

**Automatisiertes Verfahren zur  
systematischen Zustandsbewertung von  
Hochspannungsbetriebsmitteln**

der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

der

**Technischen Universität Dortmund**

vorgelegte

**DISSERTATION**

zur Erlangung des wissenschaftlichen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

**Dipl.-Ing. Jens Weller**

Dortmund, Mai 2009

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Gerd Balzer

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 2009

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner beruflichen Tätigkeit als Diplomingenieur bei der RWE Rhein-Ruhr Netzservice GmbH im Rahmen eines gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft der Technischen Universität Dortmund durchgeführten Entwicklungsprojekts zur systematischen Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln.

Für die Übernahme des Hauptreferats gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Christian Rehtanz, dem Inhaber des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft. Die konstruktive wissenschaftliche Unterstützung und die jederzeit sowohl hilfreiche als auch angenehme Betreuung trug entscheidend zum Gelingen der Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr. Gerd Balzer, einem ausgewiesenen Fachmann für die in der Arbeit behandelte Thematik, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ich danke auch Herrn Prof. em. Dr. Edmund Handschin und Herrn Dr. Ingo Jürgens, die das gemeinsam durchgeführte Entwicklungsprojekt von Seiten der TU Dortmund über weite Strecken betreuten und durch kooperative Zusammenarbeit wesentliche Anregungen und fachliche Detailinformationen zur vorliegenden Arbeit beisteuerten.

Nicht zuletzt danke ich den Herren Dipl.-Ing. Thomas Graf, Dipl.-Ing. Jens Füser und Dipl.-Ing. Jürgen Beuting, die in der gemeinsamen RWE-Projektgruppe maßgebliche Beiträge zur Entwicklung der in der Arbeit behandelten Thematik leisteten.

Nicht unerwähnt bleiben sollten auch meine Vorgesetzten und Kollegen bei RWE, bei denen ich jederzeit fachliche und organisatorische Unterstützung für die Realisierung der vorliegenden Arbeit erhielt. Stellvertretend für diese Personengruppe danke ich Herrn Dipl.-Ing. Eckhard Hermans, der mein Vorhaben zur Erstellung einer Dissertation während einer beruflichen Tätigkeit aktiv förderte und organisatorisch wesentlich unterstützte.

Dortmund, im März 2009

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation und Ausgangslage .....	1
1.2	Hauptmerkmale des entwickelten Bewertungsverfahrens.....	2
1.3	Ziel und Struktur der Arbeit .....	5
<b>2</b>	<b>Problemanalyse und Lösungsansatz</b> .....	<b>7</b>
2.1	Konzepte zur Instandhaltung elektrischer Betriebsmittel.....	8
2.2	Überblick über bisherige Entwicklungen zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel .....	9
2.3	Problemstellung und grundsätzliche Verfahrensweise zum Aufbau einer auf alle Hochspannungsbetriebsmittel anwendbaren Bewertungssystematik.....	18
2.3.1	Erfassung und Berücksichtigung von Stamm- und Historiendaten.....	19
2.3.2	Ermittlung der zustandsbeschreibenden, technischen Bewertungsparameter.....	20
2.3.3	Zusätzliche Bewertungskriterien und ihre Berücksichtigung in der Gesamtbeurteilung.....	25
2.3.4	Vorgaben zur Standardisierung von Parametern und Bewertungslistenbestandteilen .....	27
2.3.5	Automatisierte Generierung von Bewertungslisten und Auswertungssystematik .....	28
<b>3</b>	<b>Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln</b> .....	<b>30</b>
3.1	Schematischer Aufbau einer standardisierten Bewertungsliste.....	30
3.1.1	Stammdaten und Ergebniszusammenfassung .....	35
3.1.2	Technische Betriebsmittelprüfung.....	37
3.1.3	Gefährdungspotentialanalyse und Bewertung der Einhaltung von Richtlinien und gesetzlichen Vorgaben .....	41
3.1.4	Bewertung der Wichtigkeit des untersuchten Betriebsmittels im betrachteten Hochspannungsnetz .....	43

3.2	Beschreibung der Parameter-, Bewertungs- und Funktionsfelder .....	44
3.2.1	Normierung, Grenzwerte und Bewertungsbeschränkungen .....	44
3.2.2	Parametergewichtung .....	48
3.2.3	Einzelauswertung und nicht ermittelbare Bewertungsparameter .....	54
3.3	Bewertungslisten von Hochspannungsbetriebsmitteln .....	55
3.3.1	Primärtechnik .....	56
3.3.1.1	Bewertungsliste Transformator .....	57
3.3.2	Sekundärtechnik .....	72
3.3.2.1	Bewertungsliste Schutzeinrichtung .....	72
3.3.3	Überblick über alle vorliegenden Bewertungslisten .....	81
<b>4</b>	<b>Analyse- und Auswertungsverfahren.....</b>	<b>83</b>
4.1	Auswertung der Prüfparameter und Bildung von Zustandskennziffern mit Hilfe des heuristisch / deterministischen Bewertungsverfahrens .....	83
4.1.1	Bewertungsmodell .....	84
4.1.2	Technischer Gesamtzustand .....	86
4.1.3	Gefährdungspotential und Einhaltung von Richtlinien und gesetzlichen Vorgaben .....	87
4.1.4	Wichtigkeit des Betriebsmittels im Netz .....	89
4.1.5	Technischer Handlungsbedarf .....	90
4.1.6	Dringlichkeit einer Maßnahme .....	91
4.1.7	Gesamtzustandskennziffer .....	91
4.2	Auswertung der Prüfparameter und Bildung von Zustandskennziffern mit Hilfe des Evidenztheorieverfahrens .....	92
4.3	Kombination von Evidenztheorie- und heuristisch / deterministischem Verfahren .....	93
4.4	Zusammenfassung von Einzelbewertungen zu Betriebsmittelgruppen- und Systembewertungen .....	94
4.4.1	Zusammenfassungskriterien .....	95
4.4.2	Funktionsumfang und -beschreibung .....	96
4.5	Zusätzliche Auswertungsverfahren und Berichtswesen .....	100

<b>5</b>	<b>Anwendungen und Ergebnisse .....</b>	<b>101</b>
5.1	Theoretische Ergebnisanalyse .....	101
5.1.1	Analyse der Zustandskennzifferbildung und Gewichtung unter Berücksichtigung alternativer Berechnungsmethoden .....	102
5.1.2	Analyse der zusammenfassenden und zusätzlichen Auswertungsroutinen .....	111
5.2	Ergebnisse aus Testbewertungen in einem realen Energieversorgungsnetz mit dem heuristisch / deterministischen und dem Evidenztheorieverfahren .....	112
5.2.1	Testbewertungsziele, -umfang und -ablauf .....	113
5.2.2	Analyse betriebsmittelspezifischer Untersuchungsergebnisse ..	115
5.2.3	Bewertungsergebnisse von gleichartigen Betriebsmitteln bei unterschiedlichem Eingangsdatenumfang .....	131
5.2.4	Eindeutigkeit von Parameterbeurteilungskriterien.....	134
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang A</b>	Bewertungslisten der Hochspannungsbetriebsmittel mit Detailbeschreibungen der zustandsrelevanten Parameter .....	143
<b>Anhang B</b>	Auswahl von weiteren Bewertungslisten der Hochspannungsbetriebsmittel.....	171
<b>Anhang C</b>	Ergebnisse aus der Vergleichsbewertung heuristisch / deterministisches und Evidenztheorieverfahren .....	179
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	183
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	.....	186
<b>Tabellenverzeichnis</b>	.....	189
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	.....	191

## 1 Einleitung

Die wesentliche Aufgabe für Betreiber von elektrischen Netzen besteht darin, jederzeit eine zuverlässige und wirtschaftliche Energieversorgung zu gewährleisten. Von entscheidender Bedeutung sind dabei Maßnahmen zur Instandhaltung und Erneuerung der eingesetzten elektrischen Betriebsmittel. Die grundsätzlichen Ziele von Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien sind zum einen die optimale Ausnutzung des individuellen Lebenszyklusses eines Betriebsmittels, zum anderen der möglichst effiziente Einsatz personeller und finanzieller Ressourcen. In elektrischen Energieversorgungsnetzen wurde in der Vergangenheit zumeist das Konzept der zeitabhängigen Instandhaltung verfolgt. Ein festgelegter Zyklus gab den Zeitpunkt einer Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahme unabhängig von betrieblichen oder netzspezifischen Einflüssen vor. Der Vorteil einer solchen Vorgehensweise ist die gute Planbarkeit von Wartungs- und Erhaltungsmaßnahmen. Ein Nachteil besteht in der Ungewissheit hinsichtlich des optimalen Einsatzes eines Instandhaltungsbudgets. Macht ein guter technischer Betriebsmittelzustand zum festgelegten Zeitpunkt eine Wartung überflüssig, ist ein Instandhaltungsbudget ebenso wenig optimal eingesetzt wie im gegenteiligen Fall, wenn nämlich eine Instandsetzung aufgrund eines schlechten Betriebsmittelzustands längst hätte erfolgen müssen.

### 1.1 Motivation und Ausgangslage

Zur Lösung des Problems des optimalen Einsatzes eines Instandhaltungs- oder Erneuerungsbudgets gewinnt die zustandsabhängige Instandhaltung zunehmend an Bedeutung. Hierbei werden Wartungs- und Erneuerungsmaßnahmen nicht mehr nach vorgegebenen Zeitintervallen, sondern abhängig vom individuellen Zustand eines Betriebsmittels durchgeführt. Vor allem im Bereich der Hochspannungstechnik ist eine Kostenreduzierung durch eine optimierte Instandhaltungsstrategie erstrebenswert, da hier die Betriebsmittel sehr teuer sind und auch Wartungsarbeiten in der Regel hohen finanziellen Aufwand erfordern. Grundlage und Voraussetzung einer solchen Strategie ist die Kenntnis des aktuellen Betriebsmittelzustands.

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Ermittlung eines Betriebsmittelzustands lässt sich durch folgende Prozessschritte beschreiben: Zunächst müssen Betriebsmittelparameter identifiziert werden, die je nach Beurteilung ihrer individuellen Qualität den Gesamtzustand eines Geräts verändern. Diese essentiellen Bewertungsgrößen werden dann entsprechend ihrer Relevanz und ihres Einflusses auf die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels gewichtet. Eine qualitative Beurteilung dieser Parameter liefert somit einen Beitrag zur Gesamtzustandsbewertung des untersuchten Geräts. Durch Zusammenfassung der Einzelparameterbewertungen kann dann ein Gesamturteil ausgewiesen werden.

## **1.2 Hauptmerkmale des entwickelten Bewertungsverfahrens**

Dem in Kapitel 1.1 skizzierten Prinzip folgend sind standardisierte und in weiten Teilen normierte Betriebsmittelbewertungslisten mit identischem Aufbau für alle Arten von Hochspannungsbetriebsmitteln entwickelt worden. Sie dienen als Grundlage und Datenbasis einer ebenfalls neu entwickelten übergeordneten, universellen Auswertungssystematik, mit deren Hilfe Einzelbewertungen von Komponenten aller Hochspannungsbetriebsmittelgruppen nach dem gleichen Schema analysiert, vergleichbar gemacht und zu Systembeurteilungen zusammengefasst werden können. Während bisher vorliegende Bewertungsverfahren sich vor allem auf einzelne, zumeist primärtechnische Betriebsmittel wie z. B. Transformatoren konzentrierten und außerdem nicht in eine übergeordnete Bewertungssystematik eingebunden waren, liegt hier ein vollständiger Katalog standardisierter Bewertungslisten für alle Hochspannungsgeräte vor. Er ermöglicht die Bewertung sowohl von primärtechnischen Geräten (Transformatoren, Leistungsschalter, Wandler, Trenner) als auch von sekundär- und nachrichtentechnischen Komponenten (Schutzgeräte, Stationsleittechnik, Übertragungstechnik, TK-Systemen), Leitungen (Freileitungen, Hochspannungs- und Fernmeldekabel), Stromversorgungssystemen (Batterien, Gleichrichter, Wechselrichter) und technischen Gebäuden.

Jede Betriebsmittelbewertungsliste enthält drei Gruppen von Bewertungen, deren Ergebnisse einen Einfluss auf die Gesamtzustandsbeurteilung des untersuchten Geräts haben. Neben dem rein technischen Zustand wird geprüft, ob aufgrund eines

Gerät mangels oder eines Verstoßes gegen Gesetze und Richtlinien vom Betriebsmittel eine Personen- oder Umweltgefährdung ausgeht. Weiterhin wird eine Beurteilung der Wichtigkeit des untersuchten Betriebsmittels im betrachteten Energieversorgungsnetz vorgenommen.

Bei der technischen Bewertung finden als Eingangsparameter gerätespezifische Prüfdaten, Messergebnisse aus Online- oder Offline-Monitoring-Systemen, typbedingte Erfahrungswerte und Historiendaten Verwendung. Die qualitative Beurteilung erfolgt durch die Angabe von kontinuierlichen Messwerten, diskreten Messwertebereichen oder mittels Zustandsaussagen durch diskrete Abstufungen (z. B. Ölbehälter „dicht“ oder „nicht dicht“). Dabei begründet ein als „schlecht“ oder „ungenügend“ klassifizierter Bewertungsparameter einen technischen Handlungsbedarf. Die einzelnen Parameterbewertungen werden anschließend mit Hilfe zweier Auswertungssystematiken zusammengefasst und definieren so einen technischen Gesamtzustand eines Betriebsmittels.

Im Hinblick auf die Instandhaltungsstrategie ist es außerdem notwendig, bei einem vorhandenen technischen Handlungsbedarf auch die Dringlichkeit einer Maßnahme auszuweisen. Daher sind auch Einflussgrößen wie ein eventuell vom Betriebsmittel ausgehendes Gefährdungspotential und die Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz von Bedeutung. Die Vorgehensweise zur Beurteilung dieser Einflussgrößen ist analog zur rein technischen Bewertung. Auch hier werden Bewertungsparameter definiert, gewichtet und qualitativ beurteilt. Das Ergebnis dieser nicht technischen Gerätebewertung liefert zum einen durch die automatische Verknüpfung mit einem eventuellen technischen Handlungsbedarf ein Maß für die Dringlichkeit einer Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahme und findet zum anderen im Gesamturteil des Betriebsmittels Berücksichtigung.

Der rein technische Gesamtzustand eines Betriebsmittels wird in diesem Verfahren auf zwei Arten ermittelt, welche auf der Grundlage der gleichen Eingangsdatenlage auf unterschiedlichem Wege zu einer technischen Gesamtzustandsaussage kommen. Zweck dieser Vorgehensweise ist es, mittels Vergleich und Validierung der Ergebnisse eine Zustandsbeurteilung als Resultat der einen Methodik durch eine alternative Systematik zu bestätigen und somit die Unsicherheit bezüglich der Richtigkeit einer Zustandsaussage zu reduzieren. Während die erste, im Folgenden als heuristisch / deterministische Zustandsbewertung (abgekürzt: HD-Verfahren)



bezeichnete Methode alle ermittelbaren Parameterbeurteilungen auswertet, verfolgt die alternative Systematik einen anderen Ansatz. Dabei wird der Betriebsmittelzustand in Abhängigkeit ausgewählter Diagnosewerte mit Hilfe der Evidenztheorie modelliert. Zudem liefert diese Methode eine Abschätzung, ob die Anzahl der vorgenommenen Einzelparameterbewertungen für die Angabe einer belastbaren Zustandaussage ausreicht oder ob die Ermittlung weiterer Bewertungsdaten notwendig und sinnvoll ist.

Zur Analyse und Auswertung einzelner Betriebsmittelbewertungen wurde eine Berechnungssystematik entwickelt, deren Hauptmerkmal die universelle Anwendbarkeit auf alle Bereiche der Hochspannungstechnik ist. Das bedeutet, dass beispielsweise die Zustandsparameter eines Leistungsschalters mit der gleichen Analysesystematik wie die eines Schutzgeräts oder eines Hochspannungskabels ausgewertet werden. Alle aus den Parameterlisten ermittelten Bewertungsinformationen (Parameterbeurteilungen, technischer Gesamtzustand, Dringlichkeit etc.) werden durch einheitlich berechnete, normierte Kennziffern dargestellt und erlauben somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch unterschiedlicher Bereiche der Hochspannungstechnik. Als Konsequenz lassen sich nach entsprechenden Zusammenfassungen Zustandsdarstellungen von Betriebsmittelgruppen, elektrischen Anlagen oder Systemen nach frei definierbaren Kriterien erzielen und stellen somit Entscheidungshilfen zur optimalen Verteilung eines Instandhaltungs- oder Erneuerungsbudgets dar.

Das entwickelte Bewertungsverfahren wurde durch einen umfangreichen Feldversuch in einem realen Energieversorgungsnetz erprobt und hinsichtlich der grundsätzlichen Eignung und Praxistauglichkeit geprüft. Innerhalb dieses Feldversuchs wurde der technische Zustand einiger ausgewählter Betriebsmittel (9 Transformatoren und 6 Leistungsschalter) sowohl mit dem heuristisch / deterministischen als auch mit dem Evidenztheorieverfahren ermittelt. Ziel dieser Untersuchungen war die Prüfung, ob beide Verfahren trotz unterschiedlicher Berechnungswege zu ähnlichen oder gleichen Ergebnissen kommen und sich somit gegenseitig bestätigen. Weiterhin wurde das Bewertungssystem nicht nur im Netz eines reinen Energieversorgers, sondern auch bei weiteren Energienetzbetreibern wie Stadtwerken und Industrieunternehmen angewendet.

### 1.3 Ziel und Struktur der Arbeit

In dieser Arbeit wird die Entwicklung und Anwendung eines Verfahrens beschrieben, welches ausgehend von der qualitativen Bewertung zustandsbeschreibender Betriebsmittelparameter zunächst ein Maß für den aktuellen Zustand eines Hochspannungsbetriebsmittels angibt. In einem zweiten Schritt wird durch die Verknüpfung von eventuell vorhandenem technischen Handlungsbedarf und der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz eine Dringlichkeit einer Instandhaltungsmaßnahme ausgewiesen. Darüber hinaus ist das Verfahren in der Lage, mittels universeller Auswertungs- und Weiterverarbeitungssystematiken durchgeführte Einzelbewertungen nach individuell definierbaren Kriterien zusammenzufassen und daraus Systembewertungen zu generieren. Zusätzlich implementierte Funktionen generieren benötigte Prüflisten für eine anstehende Zustandsbewertung, überführen Einzelbewertungen in standardisierte Prüfberichte, berechnen die voraussichtlichen Aufwendungen für Bewertungszeit, Personal und Material oder erstellen eine Liste ermittelter Betriebsmittelmängel.

Der grundsätzliche Aufbau dieser Arbeit unterteilt sich in die Abschnitte Aufgabenformulierung, Entwicklung der Zustandsbewertungslisten und Auswertungssystematiken, Verfahrensanwendungen und Ergebnisanalyse.

In der Aufgabenformulierung in Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick zu Instandhaltungsstrategien und bisherigen Verfahren zur Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln gegeben. Danach werden die prinzipiellen Anforderungen an ein umfassendes und universelles Bewertungssystem für Hochspannungsbetriebsmittel und -systeme formuliert. Eine Beschreibung der notwendigen Merkmale von Eingangs- und Bewertungsdaten beschließt diesen Abschnitt.

Das folgende Kapitel 3 hat die Entwicklung der gerätespezifischen Zustandsbewertungslisten zum Inhalt. Dazu wird zunächst der einheitliche und standardisierte Aufbau aufgezeigt, gefolgt von der Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften der Parameter-, Bewertungs- und Funktionsfelder. Anschließend werden einige der für alle Betriebsmittel der Hochspannungstechnik vorliegenden Bewertungslisten detailliert vorgestellt. Insbesondere wird analysiert, warum ein verwendeter Bewertungsparameter zur Zustandsbewertung

herangezogen wird, in welcher Bandbreite sich seine qualitative Beurteilung bewegt und in welchem Maße eine gute oder schlechte Parameterbewertung den Betriebsmittelgesamtzustand beeinflusst.

Das Kapitel 4 ist den Analyse- und Auswertungsverfahren gewidmet. Hier werden die auf alle Bewertungslisten anwendbaren Berechnungsvorschriften vorgestellt, welche aus einzelnen Parameterbeurteilungen normierte Kennziffern für den Gesamtzustand eines Betriebsmittels generieren oder erfolgte Gerätebeurteilungen zu Systembewertungen zusammenfassen. Insbesondere wird hier auf die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Ermittlung eines technischen Gerätezustands eingegangen (heuristisch / deterministisches und Evidenztheorieverfahren) und die Methodik zur Abschätzung der Glaubwürdigkeit bzw. Unsicherheit einer Zustandsaussage vorgestellt. Der letzte Teil dieses Abschnitts widmet sich der Beschreibung der zusätzlichen Auswertungsfunktionen (z. B. zur automatisierten Berichtserstellung).

Die entwickelte Bewertungssystematik wurde auf verschiedene Arten erprobt und angewendet. Die durchgeführten Test- und Anwendungsszenarien sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse werden in den Abschnitten des Kapitels 5 ausführlich behandelt. Eine Zusammenfassung der bearbeiteten Themen und ein Ausblick auf mögliche Entwicklungen auf dem Feld der systematischen Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln beschließt die Arbeit.

## 2 Problemanalyse und Lösungsansatz

Die Grundlage für eine zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie in elektrischen Versorgungsnetzen ist die Kenntnis des aktuellen technischen Zustands eines Betriebsmittels. Dabei wird die Entscheidung über eine Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahme im Gegensatz zu zeit- oder ereignisabhängigen Konzepten maßgeblich bestimmt durch die Beurteilung des momentan vorliegenden Betriebsmittelzustands.

Um eine solche Beurteilung vornehmen zu können müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Zunächst muss bekannt sein, welche Betriebsmitteldaten und -parameter überhaupt geeignet sind, den technischen Zustand eines Geräts bei einer Änderung ihrer individuellen Qualität zu beeinflussen. Weiterhin muss festgelegt werden, in welchem Maße eine gute oder schlechte Bewertung dieser Einzelparameter den Gesamtzustand verändert. Abschließend sind die ermittelten Einzelparameterbeurteilungen derart zusammenzufassen, dass ein objektives Maß für den Gesamtzustand eines Betriebsmittels ausgewiesen werden kann.

In der praktischen Umsetzung führt diese grundsätzliche Vorgehensweise zu Bewertungslisten, in denen die gewichteten, betriebsmittelspezifischen Bewertungsparameter aufgeführt sind und ihre Beurteilungen mathematisch zu einer den Zustand repräsentierenden, normierten Kenngröße zusammengefasst werden. Werden mehrere gleichartige Betriebsmittel mit dieser Methodik untersucht, kann aus den jeweils ermittelten Kennziffern eine Güterangfolge der beurteilten Geräte erstellt werden.

Neben der Zustandsbeurteilung eines einzelnen Geräts ist es in der Praxis häufig von Interesse, in welchem Zustand sich Gruppen von Betriebsmitteln befinden (z. B. der zusammengefasste Zustand aller im Versorgungsnetz eingesetzten Leistungsschalter des Typs A im Vergleich zu dem des Typs B). Als Entscheidungshilfe zur optimalen Verteilung eines Instandhaltungsbudgets ist es ebenfalls hilfreich, wenn auch die Möglichkeit zum Vergleich unterschiedlicher Bereiche der Hochspannungstechnik besteht (z. B. der Gesamtzustand der primärtechnischen Ausstattung einer Umspannanlage im Vergleich zur sekundärtechnischen).

Diese Forderungen setzen die Existenz einer übergeordneten, universellen Auswertungssystematik voraus, welche in der Lage ist, Einzelbewertungen zu Gruppenbewertungen zusammenzufassen und Zustandsdarstellungen zusammenhängender Systeme nach frei definierbaren Filterungskriterien auszuweisen.

Im Folgenden werden diese grundsätzlichen Überlegungen präzisiert. Zur besseren Abgrenzung und Einordnung der in dieser Arbeit behandelten Thematik wird dazu zunächst ein Überblick über bestehende Instandhaltungskonzepte und bisherige Verfahren zur Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln gegeben.

## **2.1 Konzepte zur Instandhaltung elektrischer Betriebsmittel**

Zentrale und grundlegende Begriffe der Instandhaltung werden in den Normen DIN 31051 [1] und DIN EN 13306 [2] definiert. Dabei versteht man unter Instandhaltung die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen während des Lebenszyklusses eines Betriebsmittels zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass die geforderte Funktion erfüllt werden kann.

Die Instandhaltungsstrategie beschreibt, welche Maßnahmen an welchem Objekt aus welchem Anlass durchgeführt werden. Im Folgenden werden die zumeist angewandten Strategien kurz definiert und erläutert. Die vier betrachteten Strategien sind

- die ereignisorientierte Strategie,
- die zeitabhängige Strategie,
- die zustandsorientierte Strategie,
- die zuverlässigkeitsorientierte Strategie.

Bei der ereignisorientierten Strategie werden Instandhaltungsmaßnahmen erst dann ergriffen, wenn ein Schaden oder Ausfall vorliegt. Es ist nicht Ziel, einen Ausfall zu vermeiden, sondern erst beim Auftreten der Störung korrigierend einzugreifen. Ebenfalls gebräuchlich sind die Begriffe ausfallorientierte Strategie oder korrigierende Instandhaltung. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „corrective maintenance“ (CM) verwendet.

Die zeitabhängige Strategie stellt das in der Vergangenheit gängigste Instandhaltungskonzept dar und sieht in regelmäßigen Zeitintervallen Inspektionen und Wartungen vor, um Instandsetzungen aufgrund von Schäden zu vermeiden. Der aktuelle Zustand des Betriebsmittels wird bei dieser Strategie nicht berücksichtigt. Die Begriffe vorbeugende oder planmäßige Instandhaltung sind für diese Strategie ebenfalls gebräuchlich. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „time based maintenance“ (TBM) verwendet.

Bei der zustandsorientierten Strategie werden Wartungen oder Instandsetzungen erst dann durchgeführt, wenn es der Zustand des Betriebsmittels erforderlich macht. Die Wartungsintervalle, die sich aus dieser Strategie ergeben, sind nicht mehr konstant. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „condition based maintenance“ (CBM) verwendet.

Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung verbindet Elemente der ereignisorientierten, zeitabhängigen und zustandsabhängigen Strategie, um die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels im erforderlichen Maß sicherzustellen. Neben dem Zustand des Betriebsmittels wird auch seine Wichtigkeit im Netz berücksichtigt. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „reliability centred maintenance“ (RCM) verwendet.

## **2.2 Überblick über bisherige Entwicklungen zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel**

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die bisherigen Entwicklungen zur Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln gegeben und einige ausgewählte Verfahren mit ihren zentralen Bestandteilen vorgestellt.

Methoden zur Erfassung und Weiterverarbeitung von Informationen über den aktuellen Zustand eines elektrischen Betriebsmittels unterscheiden sich grundsätzlich in Diagnose- und Bewertungsverfahren. Diagnoseverfahren sind spezielle, meist betriebsmittelspezifische Prüfprozeduren, aus denen Aussagen über den Zustand eines Geräts abgeleitet werden. Beispiele für Diagnoseverfahren sind Messungen der Übertragungsfunktion [3], Teilentladungsmessungen [4] oder die Relaxationsstromanalyse [5] an Transformatoren, Verlustfaktormessungen bei sehr

niedriger Frequenz an Kabeln [6] oder Thermographiemessungen [7]. Diagnoseverfahren sind in der Regel technisch und zeitlich aufwändig und kommen meist ereignisorientiert zum Einsatz, z. B. nach Störungen oder außergewöhnlichen Belastungen wie Kurzschlüssen oder Überspannungen. Der Hauptunterschied zum in dieser Arbeit behandelten Verfahren besteht darin, dass eine spezielle Diagnosemethode meist nur bei einer bestimmten Betriebsmittelart anwendbar ist und nicht in anderen Bereichen der Hochspannungstechnik eingesetzt werden kann. In der Praxis finden Diagnoseverfahren dann Verwendung, wenn aufgrund einer schlechten Betriebsmittelbewertung zur Befunderhärtung eine spezielle Diagnosemethode herangezogen werden kann.

Im Gegensatz zu den meisten Diagnoseverfahren sind Bewertungsverfahren prinzipiell betriebsmittelunspezifisch. Vielen Bewertungsverfahren gemein ist die Identifikation und Erfassung zustandsrelevanter Betriebsparameter, deren qualitative Beurteilung im Rahmen von Inspektionen oder durch Messungen, die anschließende Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse zu Kenngrößen und die Ableitung von Zustandsaussagen. Die ermittelten Zustandsaussagen dienen dann als Grundlage für technische Handlungsempfehlungen bis hin zur Ableitung von Instandhaltungs- oder Erneuerungsstrategien.

In [8] und [20] wird ein auf der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung basierendes Verfahren beschrieben, das die Möglichkeit eröffnet, einem Betriebsmittel aufgrund seines Zustands und seiner Wichtigkeit im Netz die wirtschaftlichste Instandhaltungsstrategie zuzuweisen. Darüber hinaus bietet das Tool eine Unterstützung zur Erstellung einer Prioritätenliste im Hinblick auf die Durchführung von Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen.

Die Zustandserfassung erfolgt durch die Beurteilung und Zusammenfassung gewichteter, zustandsrelevanter Betriebsmittelparameter, wie sie z. B. in [9] beschrieben und am Beispiel eines Leistungsschalters in Tabelle 2.1 auszugsweise dargestellt werden. Nach der Bewertung der einzelnen Beurteilungskriterien und ihrer Darstellung durch Zahlen ergibt sich dann der Zustand  $c$  des untersuchten Betriebsmittels aus der Summe der mit dem Faktor  $g$  gewichteten Einzelbewertungen. Der Wertebereich des Zustands  $c$  erstreckt sich hierbei auf ein Intervall zwischen 0 und 100, wobei 0 den optimalen und 100 den schlechtesten Zustand des Betriebsmittels repräsentiert.

Kriterium	Skala		Bewertung b	Gewichtung g
Alter (in Jahren)	< 20	1		5
	20 – 25	2		
	26 – 30	3		
	31 – 35	4		
	36 – 40	5		
	> 40	6		
Gesamtzahl von Schaltungen pro Jahr	normal	1		3
	...	...		
	hoch	3		
Anzahl von Kurzschlussabschaltungen	normal	1		3
	...	...		
	hoch	5		
Ergebnis aus Messungen	gut	1		10
	...	...		
	schlecht	6		
<b>Zustand c</b>				

Tab. 2.1: Auszug aus Beurteilungsbogen Leistungsschalter nach [10]

Die Wichtigkeit eines Betriebsmittels im Netz wird in analoger Weise durch die Beurteilung von Kriterien wie Nichtverfügbarkeit der Energie im Störfall, Investitionskosten, Einfluss eines Fehlers auf das Netz oder auch Imageschaden des Unternehmens bestimmt. Der Wichtigkeitsindex  $i$  erhält ebenfalls einen Wert zwischen 0 und 100, wobei die Wichtigkeit mit Zunahme des Indexes  $i$  steigt.

Zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse wird ein zweidimensionales Bewertungsdiagramm gemäß Abbildung 2.1 verwendet. Auf der Abszisse des Koordinatensystems wird für jedes Betriebsmittel der Index  $i$  der Wichtigkeit aufgetragen, auf der Ordinate der Index  $c$  des Zustands. In Abbildung 2.1 sind einige Betriebsmittel beispielhaft durch Kreuze eingetragen. Weiterhin wird die durch  $i$  und  $c$  aufgespannte Ebene in diskrete Wertebereiche unterteilt, welche die empfohlene Instandhaltungsstrategie repräsentieren. Zudem werden sowohl für den Zustand ( $c_E$  bzw.  $c_W$ ) als auch für die Wichtigkeit ( $i_C$ ) Grenzwerte definiert, die den Übergang von der einen zur anderen Instandhaltungsstrategie markieren. Demnach werden Betriebsmittel, deren Schnittpunkt aus  $i$  und  $c$  links von  $i_C$  liegt, aufgrund ihrer geringen Wichtigkeit ereignisorientiert (d. h. in der Regel störungsabhängig) instand



gehalten. Liegt der Schnittpunkt rechts von  $i_c$  hängt es vom ermittelten Zustand  $c$  ab, ob das betreffende Betriebsmittel erneuert, gewartet oder nur überwacht wird.

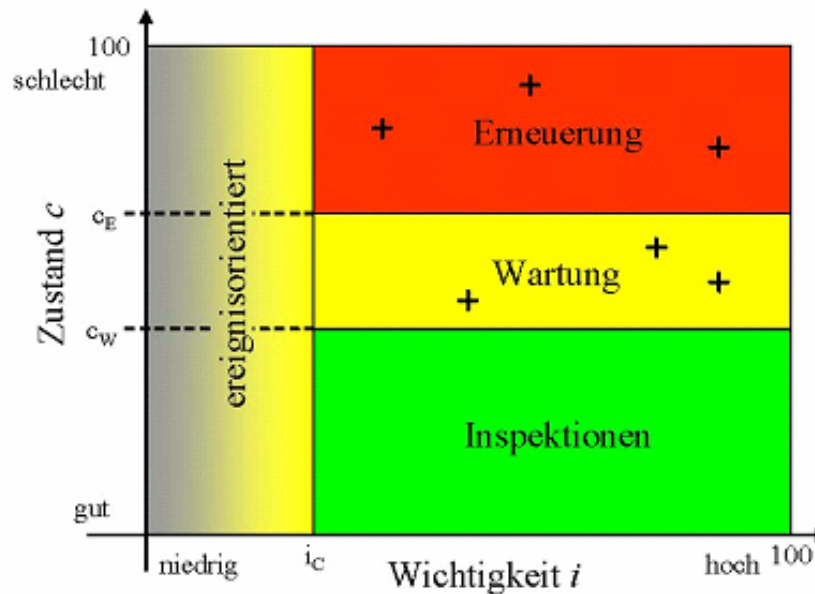


Abb. 2.1: Zweidimensionales Bewertungsdiagramm nach [9]

Die statische Festlegung der Grenzwerte ist abhängig von der unternehmensspezifischen RCM-Strategie und unterliegt damit subjektiven Einflüssen. Weiterhin besteht eine gewisse Unsicherheit des Verfahrens darin, dass unter Umständen ein Betriebsmittel gemäß der methodischen Einordnung im Bereich „Erneuerung“ aufgetragen wird, der für den schlechten Zustand ursächliche Mängel aber kostengünstig behoben werden könnte.

Eine Festlegung der Reihenfolge, nach der die untersuchten Betriebsmittel der empfohlenen Instandhaltungsart unterzogen werden, kann ebenfalls anhand des Bewertungsdiagramms erfolgen. Dazu wird durch den Ursprung des Koordinatensystems eine Hilfsgerade  $d$  mit der Geradengleichung

$$c = -i \quad (2.1)$$

eingetragen und der Abstand der Markierungspunkte im Diagramm zur Geraden  $d$  gemessen. Je größer der Abstand ist, desto dringlicher ist die empfohlene Instandhaltungsmaßnahme durchzuführen. In Abbildung 2.2 wird diese Vorgehensweise verdeutlicht.

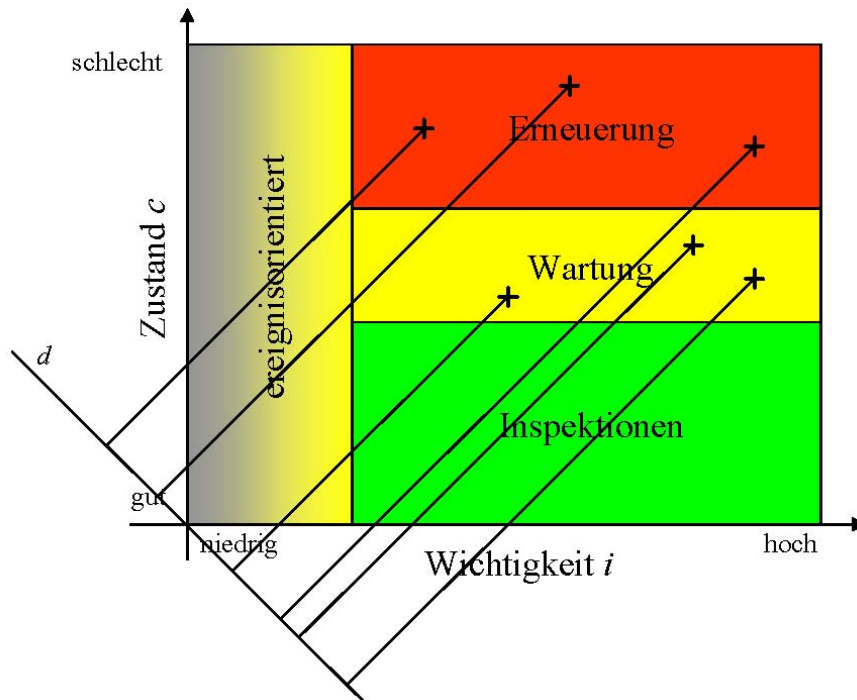


Abb. 2.2: Ermittlung der Reihenfolge von durchzuführenden Maßnahmen nach [8]

In der in Abbildung 2.2 dargestellten Form der Geraden  $d$  sind Zustand und Wichtigkeit des Betriebsmittels gleich gewichtet, ein Merkmal der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung. Durch eine Änderung der Steigung der Hilfsgeraden  $d$  lassen sich auch ereignis- oder zustandsorientierte Instandhaltungsstrategien darstellen. Ist beispielsweise die Steigung der Hilfsgeraden gleich 0, d. h. die Gerade  $d$  fällt mit der Abszisse zusammen, ist der Abstand der Markierungspunkte nur noch vom Zustand  $c$  abhängig, die Wichtigkeit  $i$  spielt dann keine Rolle mehr. Dies entspricht der Anwendung einer rein zustandsorientierten Instandhaltung. Fällt hingegen die Hilfsgerade  $d$  mit der Ordinate zusammen, wird der Einfluss des Zustands  $c$  vollständig ausgeblendet. Dies entspricht der Durchführung einer ereignisorientierten Instandhaltungsstrategie.

Weitere Verfahren zur Identifikation bzw. Unterstützung einer geeigneten Instandhaltungsstrategie auf der Grundlage einer zuvor durchgeführten Zustandsermittlung für die betreffenden elektrischen Betriebsmittel werden in [11], [12] und [13] vorgestellt. Die zustandsrelevanten Eingangsdaten werden dazu vor allem mit Hilfe von Monitoring- und Netzleitsystemen, Inspektionsprotokollen, Sachdatensystemen und Expertenwissen erfasst.

Ein alternativer Ansatz zur Zustandsbewertung eines elektrischen Betriebsmittels wird in [14] vorgestellt. Darin werden eine Zustandsaussage und ein zulässiges Instandhaltungsintervall auf Basis der Evidenztheorie [15] ermittelt. Am Beispiel einer Öl-in-Gas-Analyse bei Transformatoren wird gezeigt, wie ausgehend von dem qualitativen Zusammenhang zwischen Primärinformationen und möglichen Diagnosen der Öl-in-Gas-Analyse ein qualitativer Markovbaum als Modell entwickelt werden kann. Weiterhin wird ein quantitativer Zusammenhang hergestellt, indem die Primärinformationen auf die Maßzahlen der Evidenztheorie, die als Massezahlen bezeichnet werden, abgebildet werden. Die Bestimmung der zutreffenden Diagnose durch Propagation von Evidenz in qualitativen Markovbäumen wird anschließend dargestellt. Durch den Verlauf der Wahrscheinlichkeitsmaße der Evidenztheorie über der Zeit kann das zulässige Instandhaltungsintervall ermittelt werden.

Ein besonderes Merkmal dieses Verfahrens ist die Berücksichtigung von systematischen Unsicherheiten, welche durch das Auftreten von Mess- oder Modellungenauigkeiten entstehen. Daraus lässt sich ein Maß für die Genauigkeit der ermittelten Zustandsaussage ableiten. Eine durchgeführte Zustandsbewertung kann somit dahingehend überprüft werden, ob eine Zustandsaussage trotz fehlender oder ungenauer Eingangsinformationen weitgehend zutreffend ist, oder ob die ermittelte Zustandskennziffer eine derart große Schwankungsbreite aufweist, dass eine seriöse Bewertung nicht möglich ist. Diese Erkenntnisse werden in einem Zustandsbewertungsverfahren nach [16] und [17] genutzt. Die grundsätzliche Systematik der Zustandsbewertung mit Hilfe der Evidenztheorie nach [14] wird dabei auf vollständige Betriebsmodelle für Leistungsschalter und Transformatoren erweitert.

In der Evidenztheorie werden als zentrale Größen die Begriffe Glaube (engl. Belief, abgekürzt Bel) und Plausibilität (engl. Plausibility, abgekürzt Pl) sowie die „Massezahlen“  $m$  als Darstellung der Zustandsparameter verwendet. Dabei gibt der Glaube an, in welchem Maße eine Aussage  $A$  für wahr gehalten wird. Die Plausibilität gibt Auskunft darüber, zu welchem Grad diese Aussage überhaupt wahr sein könnte. Wird eine Aussage  $A$  als „schlechter“ und eine Aussage  $\bar{A}$  als „guter“ Betriebsmittel- oder Komponentenzustand definiert, so beschreiben die Massezahlen den Glaubensgrad dafür, dass ein Betriebsmittel oder eine seiner Komponenten den

Zustand „schlecht“ ( $A$ ), „gut“ ( $\bar{A}$ ) oder „unbekannt“ ( $\Theta$ ) hat. Die Abbildung 2.3 verdeutlicht die beschriebenen Zusammenhänge.

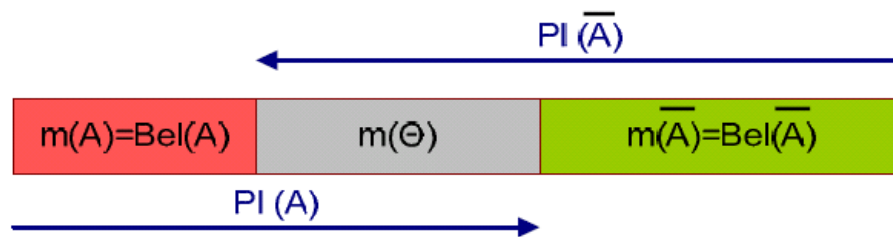


Abb. 2.3: Interpretation der Massezahlen bei den Ereignissen  $A$  und  $\bar{A}$

Zur Berechnung einer Zustandskennziffer einer Komponente oder des gesamten Betriebsmittels werden die nachfolgenden Gleichungen verwendet, die sowohl den Glaubens- als auch den Plausibilitätsgrad für die Zustandsbewertung nutzen. Die Kennziffer „Zustand schlecht“ berechnet sich nach der Gleichung

$$z(A) = b \cdot \sqrt{Pl^2(A) + (k \cdot Bel(A))^2} \quad \text{mit} \quad k \geq 1 \quad (2.2)$$

mit dem Normierungsfaktor

$$b = \frac{100}{z(A) + z(\bar{A})} \quad (2.3)$$

Das Komplement, d. h. die Kennziffer „Zustand gut“, berechnet sich nach

$$z(\bar{A}) = b \cdot \sqrt{Pl^2(\bar{A}) + (k \cdot Bel(\bar{A}))^2} \quad \text{mit} \quad k \geq 1 \quad (2.4)$$

Zur Darstellung und Verarbeitung der qualitativen Zusammenhänge zwischen den Zuständen einzelner Komponenten und dem Gesamtzustand des Betriebsmittels werden Baumstrukturen, sog. Markovbäume, verwendet (siehe Abbildung 2.4).

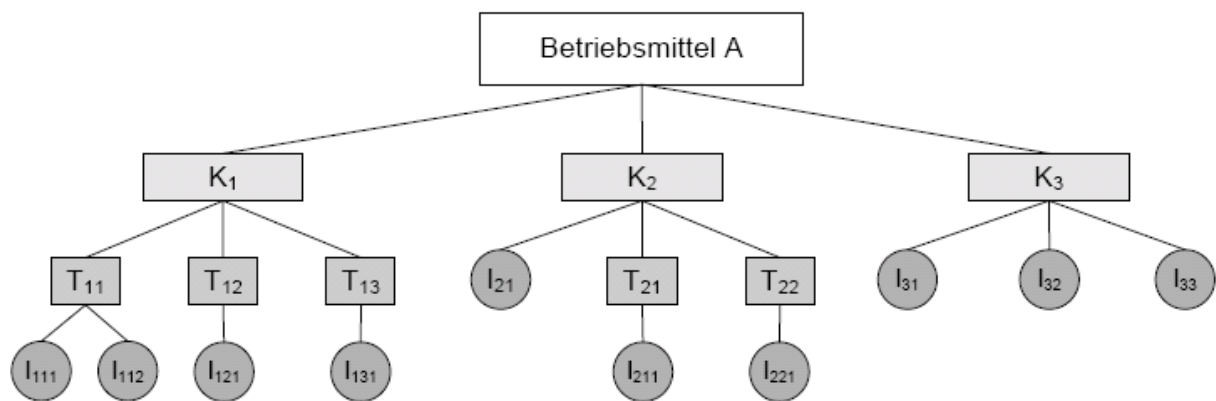


Abb. 2.4: Beispielhafte Darstellung eines Zustandsbaums

Die Wurzel des Baums stellt den Gesamtzustand eines Betriebsmittels dar. In der zweiten Ebene sind die einzelnen Komponenten  $K$  eines Betriebsmittels dargestellt, die aus weiteren Teilkomponenten  $T$  bestehen können. Die Kanten des Baums beschreiben die qualitativen Abhängigkeiten der einzelnen Betriebsmittelkomponenten. An mehreren Stellen des Baumes können nun Informationen und Hinweise  $I$  einfließen. Aus der Analyse einer Baumstruktur lassen sich dann Zustandsdarstellungen ableiten, wie sie in Abbildung 2.5. beispielhaft dargestellt sind.

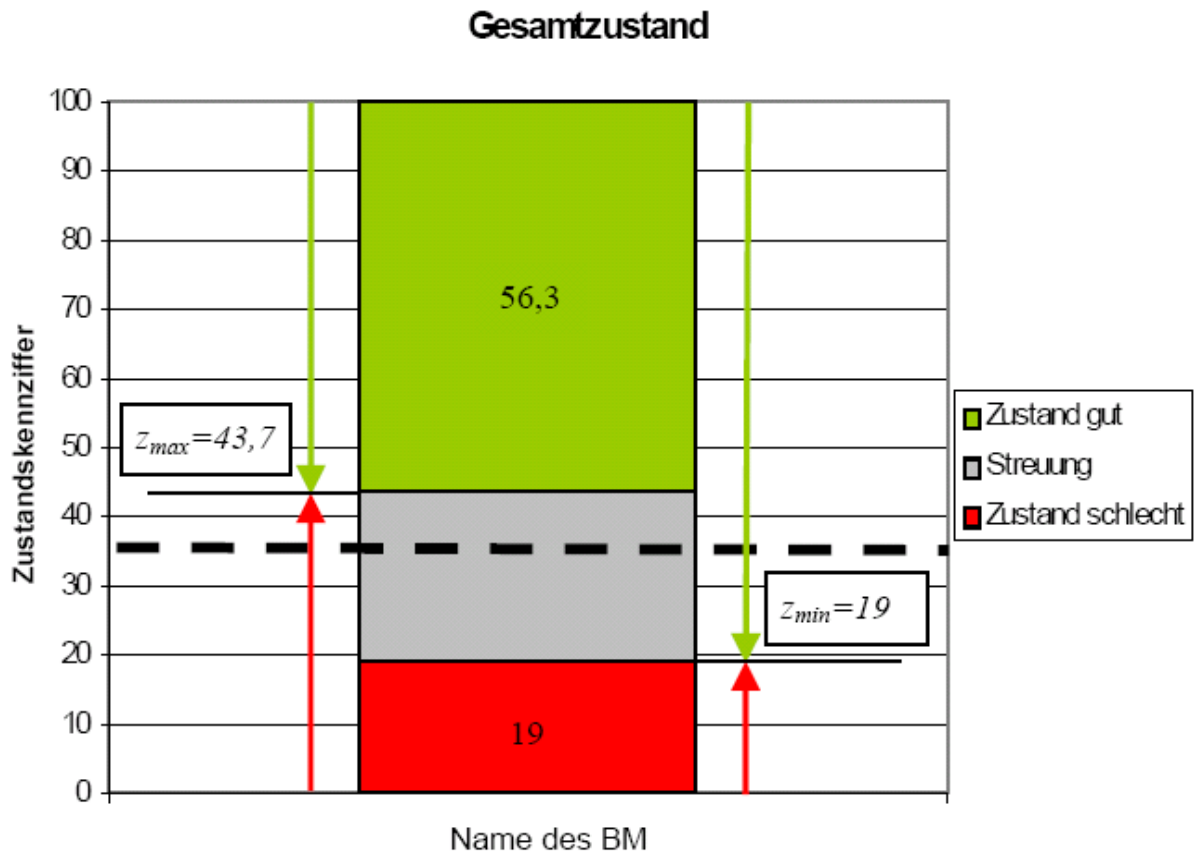


Abb. 2.5: Beispielhafte Zustandsdarstellung eines Betriebsmittels (BM) nach [17]

Dieses Beispiel lässt sich hinsichtlich der getroffenen Zustandsaussagen wie folgt interpretieren. Unter ausschließlicher Verwendung aller vorhandenen Eingangsinformationen und der Gleichung (2.2) kann eine Zustandskennziffer (hier:  $z(A) = 36$ , gestrichelte Linie) berechnet werden, die eine erste Abschätzung über die zu erwartende Zustandsbeurteilung des Betriebsmittels zulässt. Das Vorhandensein des grauen Bereichs (Unsicherheit) deutet an, dass bestimmte Eingangsdaten nicht vorliegen bzw. nicht ermittelt werden können. Für diese fehlenden Daten wird eine Extremwertabschätzung vorgenommen. Dazu wird die Zustandskennziffer  $z(A)$  einmal unter der Annahme eines optimalen Zustands und einmal für den Fall des ungenügenden Zustands des fehlenden Teilmodells berechnet. Hieraus ergeben sich die maximal bzw. minimal erreichbaren Zustandskennziffern  $z_{max}$  bzw.  $z_{min}$ , die den Bereich für das Maß der Unsicherheit der Zustandsaussage begrenzen. Der Vorteil der gewählten Darstellung liegt darin, dass über das Verhältnis der drei Bereiche zueinander sofort deutlich wird, ob der Zustand des Betriebsmittels eher gut oder eher schlecht abgeschätzt wird und in welchem Maß diese Diagnose möglichen

Schwankungen unterworfen ist. Die Kenntnis der Schwankungsbreite kann Aufschluss darüber geben, ob es empfehlenswert ist, weitere Zustandsinformationen (z. B. durch eine Freischaltung des Betriebsmittels) einzuholen oder ob die vorhandene Datenbasis ausreicht.

Ein weiterer Ansatz zur Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln basiert auf der Analyse und Weiterverarbeitung von Störungs- und Fehlerraten. So wird beispielsweise in [18] der Zustand eines Betriebsmittels durch die momentane Fehlerrate abgeschätzt und die Wichtigkeit durch die erwarteten Fehlerkosten ausgedrückt. Über die Kombination beider Parameter wird ein Risikofaktor modelliert und daraus eine Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt [19]. Der Anlagenzustand wird 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. In [20] wird ein Betriebsmittelzustand durch die Auswertung von Störungsstatistiken abgeschätzt. Am Beispiel verschiedener Freiluftleistungsschalter wird dabei nicht nur analysiert, welche Störungen in der Vergangenheit aufgetreten sind, sondern auch in welchem Zusammenhang sie mit Instandhaltungsmaßnahmen stehen. Es wird ein Verfahren vorgestellt, welches durch eine Trendanalyse eine mathematische Funktion ermittelt, die das bisherige und das zukünftige Störungsverhalten beschreibt. So kann der Zeitpunkt zur Durchführung vorbeugender Instandhaltungsmaßnahmen abgeschätzt werden.

### **2.3 Problemstellung und grundsätzliche Verfahrensweise zum Aufbau einer auf alle Hochspannungsbetriebsmittel anwendbaren Bewertungssystematik**

Die Forderung der universellen Anwendbarkeit einer Bewertungssystematik auf alle Betriebsmittel der Hochspannungstechnik setzt voraus, dass die Auswahl der in den betriebsmittelspezifischen Bewertungslisten verwendeten Eingangs- und

Beurteilungsdaten nach einheitlichen Prinzipien zu erfolgen hat und hinsichtlich ihrer Darstellung Standardisierungen vorgenommen werden. Im Folgenden wird präzisiert, welche Daten bzw. Datentypen grundsätzlich für eine Bewertung herangezogen werden, welchen Bedingungen zur Standardisierung diese Daten unterliegen und welchen Funktionsumfang eine universelle Auswertungssystematik haben muss.

### **2.3.1 Erfassung und Berücksichtigung von Stamm- und Historiendaten**

Als Stamm- und Historiendaten eines Betriebsmittels bezeichnet man zum einen identifizierende und informelle Größen wie Eigentümer, Standort, Typ, Spannungsebene oder Nennleistung, zum anderen den Lebenslauf nachzeichnende Werte wie Baujahr, Betriebsdauer, Anzahl bisheriger Störungen oder das Datum der letzten Wartung. Diese Daten werden in der Regel aus Sachdatensystemen oder Anlagendokumentationen des Betreibers ermittelt und können bereits im Vorfeld einer Vor-Ort-Bewertung erste Hinweise auf einen aktuellen Gerätzustand liefern.

Für die Entwicklung einer Bewertungsliste ist es wichtig, neben einer notwendigen Anzahl von rein informellen Kenngrößen vor allem diejenigen Stamm- und Historiendaten zu identifizieren, welche einen relevanten Beitrag zur Zustandsbeurteilung leisten können. Dabei spielen die Historiendaten eines Betriebsmittels eine wichtige Rolle. Beispielweise ist für jedes Hochspannungsgerät ein nomineller Lebenszyklus definiert. Somit sind das Alter und die Betriebsdauer immer zustandsrelevante Größen. Auch kann die Anzahl und Ausprägung von erfolgten Störungen oder Ausfällen eines Geräts Hinweise auf den aktuellen Zustand liefern. Aus der Angabe eines Datums der letzten Wartung kann gefolgert werden, dass ein empfohlener Wartungszyklus eventuell nicht eingehalten wurde und daher bestimmte Komponenten verschlissen oder übermäßig abgenutzt sind. Nicht zuletzt kann auch die Abfrage subjektiver oder objektiver (d. h. statistisch belegter) Erfahrungswerte des Betriebspersonals einen Beitrag zur Zustandseinschätzung eines Betriebsmittels leisten. Ist beispielsweise bekannt, dass Geräteeinheiten oder -komponenten eines bestimmten Herstellers, Typs oder Jahrgangs zur Störanfälligkeit neigen, so ist eine entsprechende Beurteilungsmöglichkeit in einer Bewertungsliste ein zustandsbeschreibendes Kriterium.



Neben den Historiendaten können auch bestimmte Stamm- und Grunddaten eines Betriebsmittels erste Hinweise auf den aktuellen Gerätezustand liefern. Ist beispielsweise der nominelle Ausschaltstrom eines Leistungsschalters kleiner als der Kurzschlussstrom der Umspannanlage, in der er sich befindet, so ist ein solcher Schalter falsch dimensioniert und würde bei einer auftretenden Netzstörung zumindest beschädigt. Werden bei einem Netzausbau die Einstellungen eines Schutzgeräts nicht den veränderten Bedingungen angepasst, könnte dieser Umstand ein Schutzversagen zur Folge haben – das Schutzgerät ist somit in einem schlechten Zustand. Hauptsächlich dienen Stammdaten aber der Identifikation eines Betriebsmittels und sind insbesondere bei späteren Auswertungen und Zusammenfassungen als Filterkriterium von Bedeutung.

### **2.3.2 Ermittlung der zustandsbeschreibenden, technischen Bewertungsparameter**

Die zentrale Aufgabe zur Entwicklung einer Bewertungssystematik ist die Identifikation der essentiellen, zustandsbeschreibenden Betriebsmittelparame-ter, deren individuelle Beurteilungen letztendlich zu einem technischen Gesamtzustand eines untersuchten Geräts zusammengefasst werden.

Für die Auswahl der Parameter sind einige grundsätzliche Kriterien und Prinzipien zu beachten. Das entscheidende Kriterium für die Berücksichtigung in einer Bewertungsliste ist dabei, dass eine Änderung der individuellen Qualität eines Parameters tatsächlich einen Einfluss auf den technischen Gesamtzustand eines Betriebsmittels hat. Diese Forderung schließt die Berücksichtigung z. B. von reinen Wartungsparametern im Bewertungsteil einer Betriebsmittelliste aus. Dieses Auswahlprinzip sei am Beispiel eines Ölstandsanzeigers verdeutlicht. Ist ein bestimmtes Ölniveau für ein Gerät festgelegt, hat ein zu hoher oder zu niedriger Ölstand zustandsrelevanten Charakter. Ein Parameter „Ölniveau“ mit den Beurteilungskriterien „in Ordnung“, „zu hoch“ und „zu niedrig“ muss also in einer Bewertungsliste aufgeführt werden. Kann der Ölstand aufgrund eines stark verschmutzten Schauglases nicht abgelesen werden, muss dieser Mangel zwar im Rahmen von Wartungsarbeiten beseitigt werden, hat aber keinen direkten Einfluss

auf den Betriebsmittelzustand. Ein Bewertungsparameter „Sauberkeit des Ölstandsanzeigers“ findet somit keine Berücksichtigung in einer Bewertungsliste.

Ist ein zustandsrelevanter Betriebsparameter identifiziert, muss im nächsten Schritt seine Bewertungsbandbreite von „optimal“ bis „ungenügend“ festgelegt werden. Dabei ist es individuell unterschiedlich, ob eine Parameterqualität ausreichend durch eine Ja/Nein-Aussage beschreibbar ist oder ob Abstufungen zwischen den beiden Extremwerten für eine differenziertere Zustandsaussage sinnvoll sind. Weiterhin ist zu analysieren, welchen Verlauf ein Parameter von seinem besten zu seinem schlechtesten Wert beschreibt (diskrete Stufen, linearer Verlauf, exponentieller Verlauf etc.). In einer automatisierten Bewertungssystematik lässt sich dann dieser Verlauf durch eine mathematische Funktion mit der Parameterbeurteilung als Variablen darstellen und so eine entsprechende Zustandskennziffer berechnen. Die qualitative Beurteilung selbst kann durch die Angabe von kontinuierlichen Messwerten, diskreten Messwertebereichen oder mittels Zustandsaussagen durch diskrete Abstufungen (z. B. Ölbehälter „dicht“ oder „nicht dicht“) erfolgen.

Weiterhin muss festgelegt werden, in welchem Maße die Bewertung eines Einzelparameters den Gesamtzustand verändert. Dieser Forderung liegt die Überlegung zugrunde, dass jedes Gerät bezüglich seiner Funktionsfähigkeit oder Betriebssicherheit über Zustandsparameter von unterschiedlicher Wichtigkeit verfügt. Beispielsweise ist eine defekte Gummidichtung am Ortssteuerkasten eines Leistungsschalters mit der Gefahr des Wassereintritts zwar ein zustandsrelevanter Mangel, doch ist im Vergleich dazu eine nicht ausreichende Mindestbetätigungsspannung mit der Gefahr des Schaltersversagens deutlich höher zu bewerten. Jedem Parameter ist daher entsprechend seines Einflusses auf den Gesamtzustand ein Gewichtungsfaktor zuzuordnen und dieser mit der errechneten Zustandskennziffer zu verknüpfen. Es stellt dabei eine besondere Herausforderung dar, die Gewichtungsfaktoren derart zu wählen und aufeinander abzustimmen, dass der Wichtigkeit eines Parameters auch bei der Zusammenfassung zu einer Gesamtzustandskennziffer Rechnung getragen wird.

Gewichtungsfaktoren sind in der Regel konstant, d. h. der Einfluss einer einzelnen Parameterbewertung auf den Gesamtzustand wird einmal festgelegt und bleibt immer gleich. In Einzelfällen können allerdings veränderliche Randbedingungen dazu führen, dass die Auswirkungen eines festgestellten Mangels in Bezug auf den

Gesamtzustand differenzierter zu betrachten sind. Das hat zur Konsequenz, dass Gewichtungsfaktoren unter Umständen variabel sein müssen. Dies sei an folgendem Beispiel verdeutlicht. Bei modernen Stationsleittechniksystemen werden die Betriebszustände und Funktionen der Schutzgeräte durch Fernüberwachungs- und Notmeldesysteme kontinuierlich überprüft. Die Funktionsfähigkeit der am Schutzgerät selbst befindlichen Meldeeinrichtungen wie LEDs, Störungfallklappen oder Leuchtanzeigen ist daher zwar eine gerätezustandsrelevante Größe, aber nicht besonders wichtig. Existiert ein derartiges Fernüberwachungs- und Notmeldesystem allerdings nicht, so sind die Meldeeinrichtungen am Schutzgerät die einzigen Möglichkeiten zur Betriebszustandskontrolle und deren Funktionsfähigkeit somit von hoher Wichtigkeit. Im Falle des Ausfalls der Vor-Ort-Meldeeinrichtungen ist daher ein fernüberwachtes Schutzgerät in objektiv besserem Gesamtzustand als ein nicht fernüberwachtes, da der aktuelle Gerätestatus nach wie vor überprüft werden kann. Der dem Zustandsparameter „Funktionsfähigkeit der Vor-Ort-Meldeeinrichtungen“ zugeordnete Gewichtungsfaktor darf demnach nicht konstant sein, sondern muss unterschiedliche Werte annehmen je nachdem ob ein Fernüberwachungssystem vorhanden ist oder nicht.

Wie dieses Beispiel zeigt sollte grundsätzlich jeder Zustandsparameter dahingehend überprüft werden, ob sein Einfluss auf den Gesamtzustand immer konstant ist oder ob ein Mangel in Abhängigkeit bestimmter Bedingungen unterschiedliche Auswirkungen hat. Dabei können nicht nur externe Voraussetzungen (wie z. B. ein Fernüberwachungssystem) sondern auch Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Zustandsparametern eine Rolle spielen. Auch dazu sei ein Beispiel aufgezeigt. Die nominelle Betriebsdauer eines 110-kV-Netztransformators wird mit ca. 45 Jahren angesetzt. Diese Annahme gilt allerdings nur, wenn die Wicklungsisolation keiner dauerhaft hohen thermischen Belastung ausgesetzt ist. Der Grad der thermischen Belastung wird durch die Isolieröltemperatur repräsentiert. Übersteigt die Isolieröltemperatur an der Wicklungsisolation einen Wert von 98° C (sog. Heißpunkttemperatur), verkürzt sich die nominelle Betriebsdauer des Transformators nach der Faustformel „Jeweils 6 K über Heißpunkttemperatur halbiert die Lebensdauer“ [23]. In einer Bewertungsliste werden die Zustandsparameter „Betriebsdauer“ und „durchschnittliche Öltemperatur“ getrennt aufgeführt und ihre Zustandskennziffern zunächst auch entsprechend ihres nominellen Verlaufs berechnet. In der Berechnungsvorschrift für die Betriebsdauerkennziffer ist allerdings

zu berücksichtigen, dass vom nominellen Verlauf abgewichen wird, wenn der Transformator dauerhaft jenseits der Heißpunkttemperatur betrieben wird. Das bedeutet, dass die Beurteilung des Zustandsparameters „Betriebsdauer“ eines beispielsweise 20 Jahre alten, unterhalb der Heißpunkttemperatur betriebenen Netztransformators mit „ausreichend“ angegeben wird, die eines gleich alten, aber hoch temperierten Transformators bereits mit „ungenügend“.

Da der technische Gesamtzustand eines Betriebsmittels in der Regel von einer großen Anzahl von Betriebsparametern beeinflusst wird, ist eine Unterteilung einer Bewertungsliste in Parametergruppen nicht nur aus Gründen der Übersichtlichkeit sinnvoll. Die Kriterien, nach denen eine Parametergruppe zusammengestellt wird, sind dabei unterschiedlich. So können Eingangsdaten einer definierten Prozedur eine Gruppe bilden. Ein Beispiel dafür ist die Ölalterungsanalyse eines Transformators, bei der die zugehörigen Zustandsgrößen wie Durchschlagsspannung, Wassergehalt, Neutralisationszahl, Verlustfaktor etc. in einer Parametergruppe mit der Überschrift „Ölalterung“ zusammengefasst werden. Auch können Kennwerte von charakteristischen Gerätebestandteilen eine Parametergruppe definieren. So werden alle gasspezifischen Zustandsparameter eines SF<sub>6</sub>-Schaltfeldes (SF<sub>6</sub>-Qualität, Leckrate, Druckentlastungsvorrichtungen etc.) in einer Gruppe „Gasräume“ zusammengefasst. Die grundsätzlichen Bewertungsvoraussetzungen sind ebenfalls zur Bildung von Parametergruppen geeignet. Beispielsweise können Zustandsparameter dahingehend eingeordnet werden, ob ihre Bewertung nur bei einer Freischaltung eines Betriebsmittels möglich ist, oder ob eine Sichtkontrolle im laufenden Betrieb für eine umfassende Beurteilung ausreicht.

Neben der verbesserten Übersichtlichkeit bietet die Unterteilung einer Bewertungsliste in Parametergruppen einen weiteren Vorteil. Wie die Einzelparameter können auch die Parametergruppen bezüglich ihres Einflusses auf den Gesamtzustand gewichtet werden. Man erhält somit eine zusätzliche Stellgröße zur Präzisierung der Gesamtzustandsangabe.

Der Prozess zur Identifikation und Einordnung der zustandsbeschreibenden, technischen Bewertungsparameter ist in der folgenden Abbildung 2.6 noch einmal in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt.

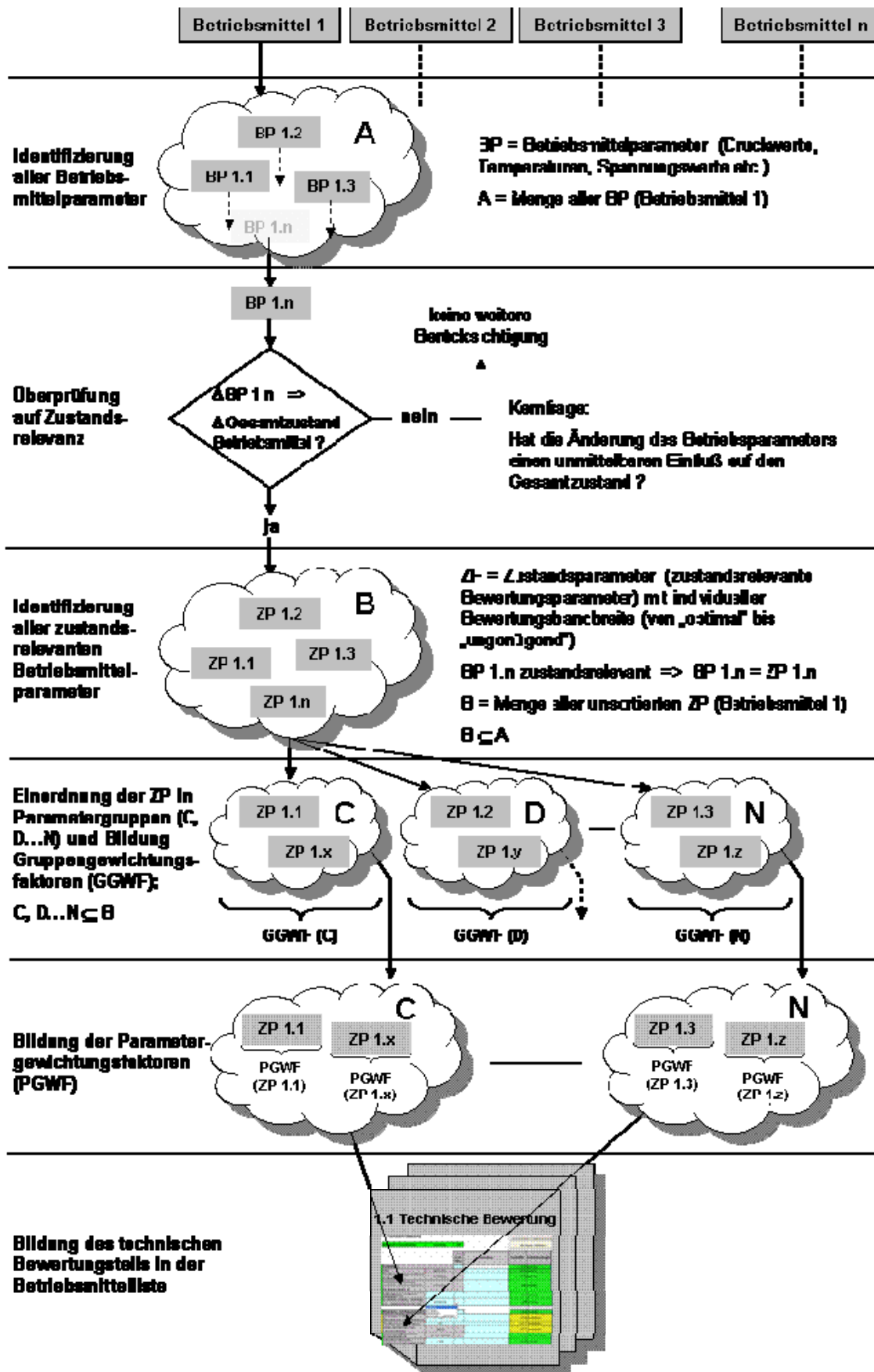


Abb. 2.6: Ablaufschema zur Ermittlung der zustandsbeschreibenden Parameter

### 2.3.3 Zusätzliche Bewertungskriterien und ihre Berücksichtigung in der Gesamtbeurteilung

Verfolgt ein Energienetzbetreiber die Strategie der zustandsabhängigen Instandhaltung seiner elektrischen Betriebsmittel, so ist dazu die Kenntnis der aktuellen technischen Gerätezustände die Grundvoraussetzung. Besteht aufgrund eines festgestellten Mangels an einem Betriebsmittel technischer Handlungsbedarf, sind Maßnahmen zur Instandsetzung einzuleiten. Wie dringlich derartige Maßnahmen durchgeführt werden müssen, hängt aber nicht ausschließlich vom technischen Zustand des Geräts ab. Dies sei an den folgenden Beispielen verdeutlicht. Zwei Transformatoren in unterschiedlichen Umspannanlagen A und B weisen den gleichen Fehler auf, welcher kurzfristig zu einer Störung führen kann. Bei einem Ausfall des Transformators in Umspannanlage A kann ein ebenfalls in A befindlicher Transformator umgehend die komplette Last übernehmen. In Umspannanlage B befindet sich nur der eine fehlerhafte Transformator, ein Ausfall hätte eine längere Versorgungsunterbrechung des angeschlossenen Verteilnetzes zur Folge. Der Transformator in Umspannanlage B ist somit objektiv wichtiger als der in Umspannanlage A, konsequenterweise sind Instandsetzungsmaßnahmen in Anlage B dringlicher als in Anlage A. In Umspannanlage A befindet sich außerdem ein Wandler, der den gleichen Mangel wie ein Wandler in Umspannanlage B aufweist. Dieser Mangel kann mittelfristig zur Explosion der Wandler führen. Umspannanlage A ist in ländlicher Umgebung gelegen, außerdem würden die Auswirkungen einer Explosion auf das Gelände der Anlage beschränkt bleiben. Umspannanlage B hingegen befindet sich innerhalb eines Wohngebiets, der fehlerhafte Wandler ist zudem nur wenige Meter entfernt von einer Straße aufgestellt. Objektiv geht also vom Wandler in Umspannanlage B eine höhere Gefährdung für die Umgebung aus als vom Wandler in Anlage A, auch hier sind Instandsetzungsmaßnahmen in Anlage B dringlicher als in Anlage A.

Diese Beispiele zeigen, dass zur umfassenden Gesamtbeurteilung und im Hinblick auf die Instandhaltungsstrategie nicht nur ein technischer Gesamtzustand, sondern auch ein Maß für das Gefährdungspotential und die Wichtigkeit eines Betriebsmittels im betrachteten Versorgungsnetz ausgewiesen werden muss. Die Vorgehensweise zur Beurteilung dieser Einflussgrößen ist analog zur rein technischen Bewertung. Auch hier werden betriebsmittelspezifische Bewertungsparameter definiert, gewichtet

und qualitativ beurteilt. Das Ergebnis dieser nicht technischen Gerätebewertung liefert ein Maß für die Dringlichkeit einer Maßnahme und muss bei der Gesamtkennzifferberechnung des Betriebsmittels Berücksichtigung finden. Gefährdungspotential und Wichtigkeit sind dabei eigenständige Parametergruppen, wobei das Gefährdungspotential eines Betriebsmittels noch in die Bereiche Personengefährdung, Umweltgefährdung und Verstoß gegen gesetzliche Vorschriften unterteilt werden kann.

Zwar ist in der Hochspannungstechnik aufgrund der Existenz hoher Spannungen und Ströme eine Gefahrenbetrachtung grundsätzlich angebracht, doch ergeben sich bei der Vielzahl von Betriebsmitteln natürlich starke Unterschiede hinsichtlich einer potentiellen Gefährdung. Der Betrieb eines Schutzgeräts kann kaum personengefährdend sein, ein Datenmodem der Nachrichtentechnik stellt keine Umweltgefährdung dar. In einer universellen, auf alle Hochspannungsbetriebsmittel anwendbaren Bewertungssystematik ist allerdings in jeder Bewertungsliste eine Gefährdungspotential- und Wichtigkeitsuntersuchung vorzusehen, da anderenfalls eine Gesamtzustandsbeurteilung auf unterschiedlicher Basis erfolgen würde und eine Vergleichbarkeit der Gesamtergebnisse nicht mehr gegeben wäre.

Die geschilderten Zusammenhänge werden in der folgenden Abbildung 2.7 in Form eines prinzipiellen Ablaufdiagramms verdeutlicht.

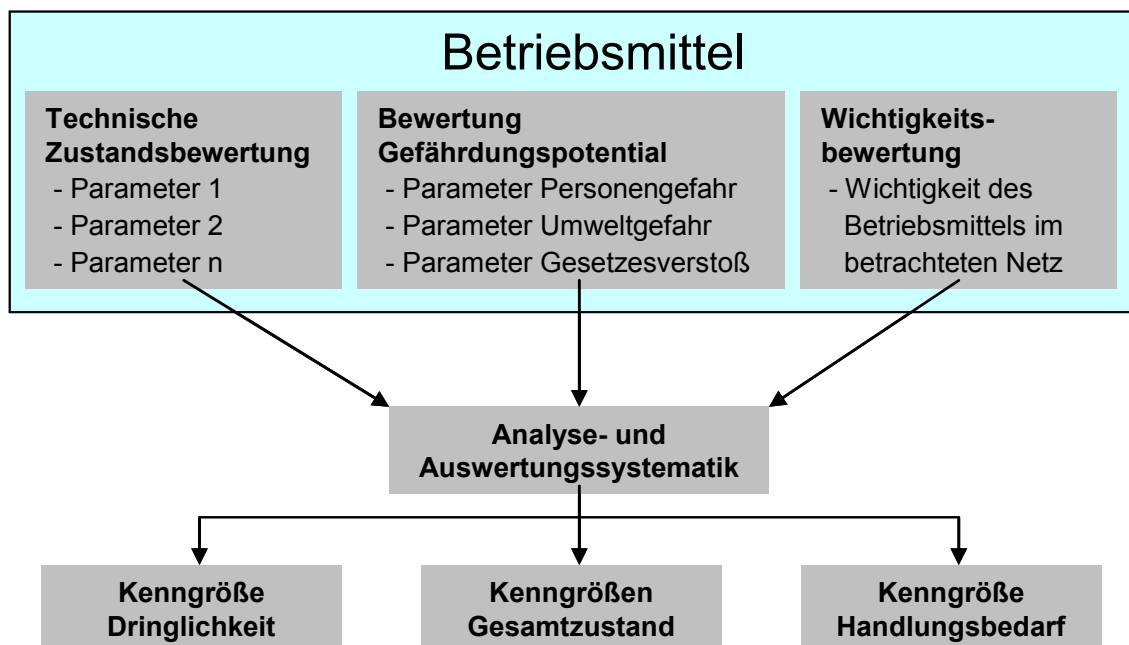


Abb. 2.7: Zusammenhänge Bewertungsergebnisse und abgeleitete Kenngrößen

### 2.3.4 Vorgaben zur Standardisierung von Parametern und Bewertungslistenbestandteilen

Die wesentliche Aufgabe bei der Bewertung eines Betriebsmittels besteht darin, die betriebsmittelspezifischen Zustandsparameter auszuwerten und zu einer Gesamtbeurteilung des untersuchten Geräts zusammenzufassen. In einer automatisierten und rechnergestützten Bewertungssystematik wird dies durch festgelegte Berechnungsroutinen realisiert, welche mit Hilfe definierter mathematischer Operationen die zustandsrepräsentierenden Gesamtergebnisse ermitteln. Wenn eine solche Systematik auf alle Betriebsmittel der Hochspannungstechnik anwendbar sein und betriebsmittelunabhängig die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten soll, setzt dies ein hohes Maß der Standardisierung von Bewertungslisten und ihrer Bestandteile voraus.

Ein erster Schritt zur Standardisierung ist ein einheitlicher Bewertungslistenaufbau unabhängig von der Art des Betriebsmittels. Dies lässt sich dadurch realisieren, dass die Listenbestandteile Stammdaten, Gesamtergebnisdaten, technische Bewertungsparameter, Gefährdungspotentialbeurteilungen und Wichtigkeits-einschätzungen in jeder Bewertungsliste vorhanden und auch immer in der gleichen Reihenfolge aufgeführt sind.

Ein weiterer Schritt ist die gleichlautende Schreibweise und einheitliche Verwendung von Schlüsselwörtern, listenspezifischen Begriffen, Überschriften und Beurteilungsbezeichnungen. Im Hinblick auf die Entwicklung von Such-, Auswertungs- und Weiterverarbeitungsroutinen (z. B. die automatisierte Erstellung einer Mängelliste) ist es wichtig, dass beispielsweise zur textlichen Übersetzung einer Kennzifferberechnung betriebsmittelunabhängig immer die gleichen Bezeichnungen benutzt werden (z. B. „neuwertig“, „ausreichend“, „reparaturbedürftig“ und „ungenügend“) oder der Bewertungsteil zur Gefährdungsuntersuchung immer mit der Überschrift „Gefährdungspotential“ beginnt.

In einer tabellen- bzw. objektorientierten Analysesystematik ist es außerdem hilfreich, wenn auszuwertende Größen in jeder Bewertungsliste an gleicher Position zu finden sind. Wenn aufgrund der betriebsmittelspezifischen Unterschiede ein derartiger absoluter Zell- bzw. Feldbezug nicht realisierbar ist, müssen bei der Erstellung einer



Bewertungsliste zumindest relative Zellbezüge berücksichtigt werden (z. B. durch definierte Abstände von Auswertegröße zu Schlüsselwörtern).

Weiterhin sollten in einer rechnergestützten Bewertungssystematik Konventionen zur Dateinamenvergabe und Positionierung innerhalb einer Ordnerstruktur festgelegt werden. Besteht eine Datei für eine Zustandsbewertung aus mehreren Teilen (z. B. mehrere Blätter in einem Tabellenkalkulationsprogramm), ist zudem wichtig, dass Dateibestandteile wie die Bewertungsliste selbst, eine Mängelliste oder das Tabellenblatt zur Evidenzuntersuchung immer an gleicher Stelle innerhalb der Gesamtdatei angeordnet werden.

### **2.3.5 Automatisierte Generierung von Bewertungslisten und Auswertungssystematik**

Ein automatisiertes Verfahren, das Zustandsbewertungen einzelner Geräte, von Betriebsmittelgruppen oder Systemen ermöglichen und darüber hinaus eine betriebsmittelunabhängige Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten soll, benötigt eine Vielzahl von standardisierten Berechnungsroutinen zur Auswertung der ermittelten Eingangs- und Beurteilungsdaten. Dabei sind die Auswertungsmethoden grundsätzlich in drei Gruppen einzuteilen.

Die erste Gruppe umfasst diejenigen Berechnungsroutinen, die zur Zustandsermittlung eines einzelnen Betriebsmittels benötigt werden. Damit sind standardisierte Berechnungsvorschriften gemeint, die in jeder betriebsmittel-spezifischen Bewertungsliste impliziert sind und mittels mathematischer Operationen aus einzelnen Parameterbewertungen z. B. ein Maß für den technischen Gesamtzustand oder das Gefährdungspotential berechnen. Auch Systematiken zur Ermittlung der Unsicherheit einer Zustandsaussage oder zur Auflistung der gravierendsten Mängel gehören in diese Gruppe.

Die zweite Gruppe beinhaltet die ebenfalls standardisierten Methoden zur automatisierten Generierung von benötigten Bewertungslisten sowie zur Zusammenfassung von Einzelergebnissen. Es sind dies die übergeordneten Funktionen, die einzelne Betriebsmittelbeurteilungen zu Systembewertungen zusammenfassen und so tabellarische und graphische Zustandsdarstellungen von

Betriebsmittelgruppen oder Systemen ermöglichen. In einem rechnergestützten Verfahren gehören in diese Gruppe auch die Funktionen zur automatisierten Dateinamengenerierung sowie zur Erstellung einer standardisierten Ordnerstruktur, in welche die für die aktuelle Betriebsmittelbewertung benötigten Bewertungslisten automatisch eingeordnet werden.

In der dritten Gruppe befinden sich die Routinen zur Weiterverarbeitung von ermittelten Einzelergebnissen oder Systemzusammenfassungen. Dazu gehören z. B. die Funktion zur Erstellung einer aus den technischen Handlungsempfehlungen resultierenden Arbeitsliste für das Betriebspersonal oder ein Algorithmus, welcher aus den Angaben einer Bewertungsliste einen standardisierten Bewertungsbericht generiert.

Eine Übersicht der verschiedenen Generierungs- und Auswertungsroutinen zeigt Abbildung 2.8.

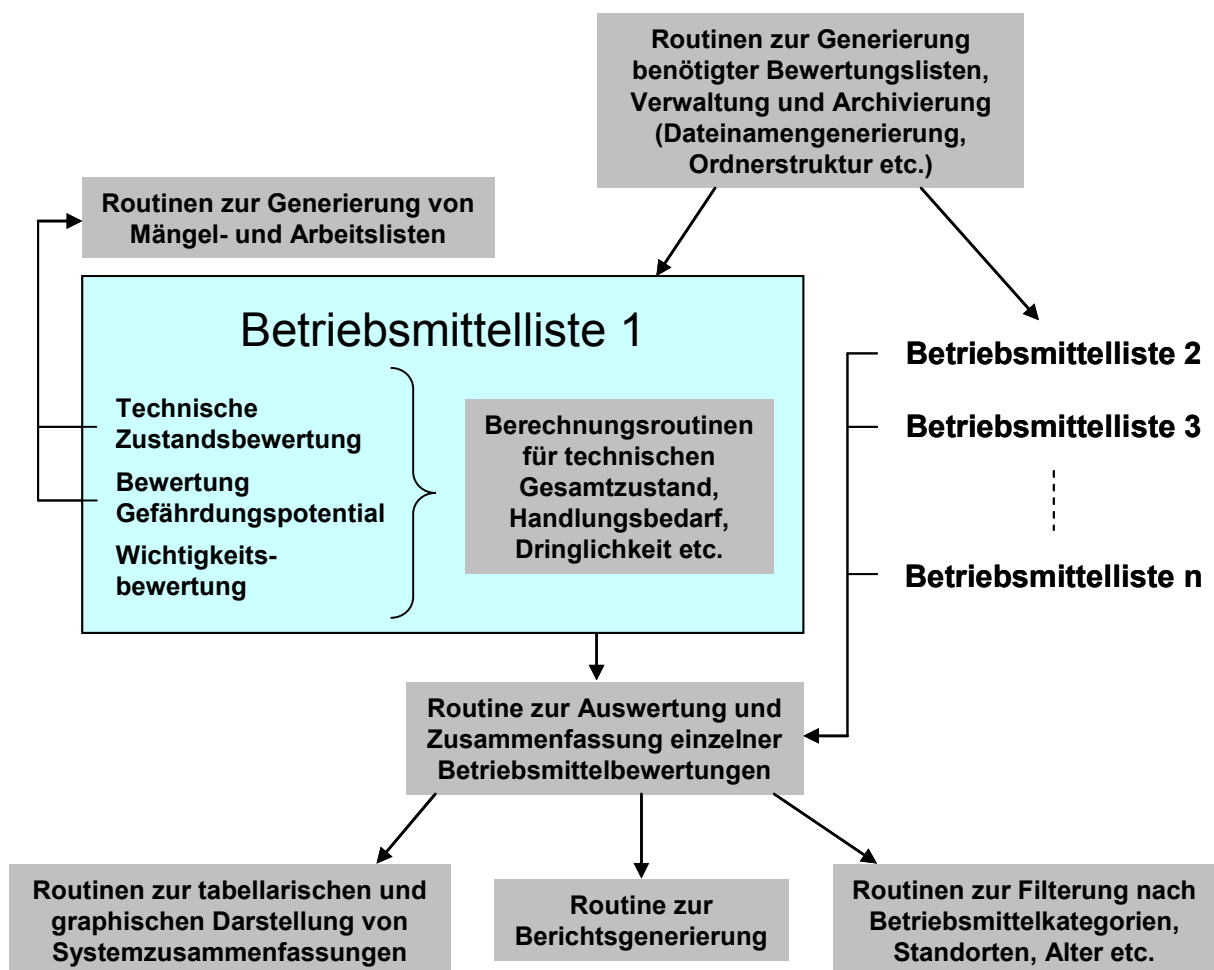


Abb. 2.8: Übersicht der Berechnungsroutinen einer universellen Bewertungssystematik

### **3 Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln**

Die Ermittlung des aktuellen Zustands eines Hochspannungsbetriebsmittels erfolgt durch die systematische Bewertung und Zusammenfassung zustandsrelevanter Geräteparameter. Zu diesem Zwecke wurden betriebsmittelspezifische Bewertungslisten entwickelt, in denen die jeweils essentiellen Bewertungsparameter aufgeführt sind und ihre qualitativen Beurteilungen mittels einer hinterlegten Auswertungsmethodik zu einem den Gesamtzustand repräsentierenden Wert zusammengefasst werden. Dabei begründet die Forderung nach universeller Anwendbarkeit auf alle Betriebsmittel der Hochspannungstechnik eine weitgehende Standardisierung der Bewertungslisten.

Das folgende Kapitel widmet sich daher der detaillierten Beschreibung der entwickelten Bewertungslisten. Dazu wird zunächst der einheitliche und standardisierte Aufbau aufgezeigt, gefolgt von der Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften der Parameter-, Bewertungs- und Funktionsfelder. Anschließend werden exemplarisch einige der für alle Betriebsmittel der Hochspannungstechnik vorliegenden Bewertungslisten detailliert vorgestellt. Insbesondere wird analysiert, warum ein verwendeter Bewertungsparameter zur Zustandsbewertung herangezogen wird, in welcher Bandbreite sich seine qualitative Beurteilung bewegt und in welchem Maße eine gute oder schlechte Parameterbewertung den Betriebsmittelgesamtzustand beeinflusst.

#### **3.1 Schematischer Aufbau einer standardisierten Bewertungsliste**

Der grundsätzliche Aufbau einer vereinheitlichten Bewertungsliste wird in Abbildung 3.1 dargestellt.

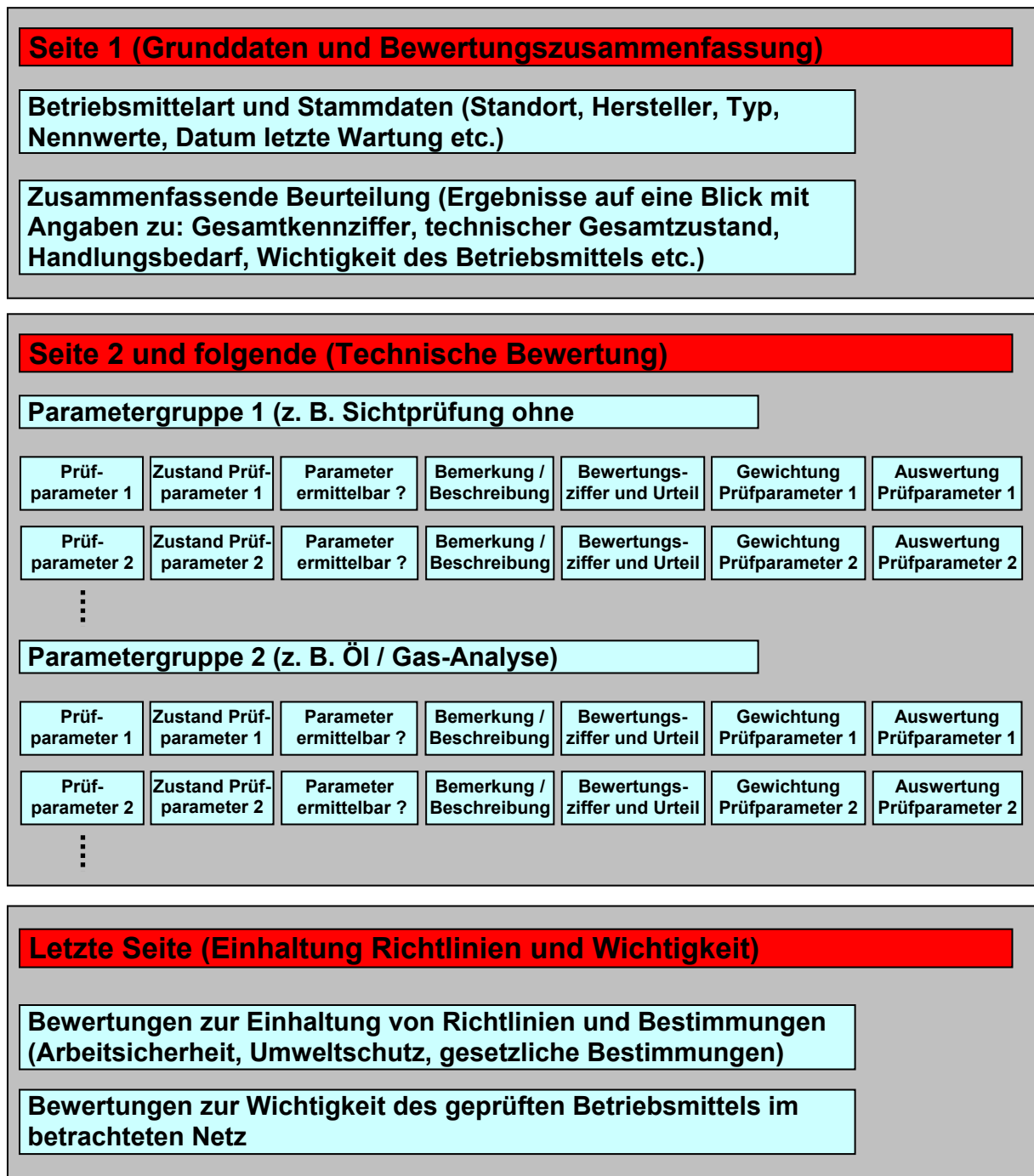


Abb. 3.1: Aufbauschema einer Betriebsmittelbewertungsliste

Abbildung 3.1 zeigt, dass jede Betriebsmittelliste grundsätzlich in drei Bereiche aufgeteilt ist. Der erste Bereich enthält zum einen identifizierende Gerätedaten wie Betriebsmittelart oder Standort, zum anderen werden die zusammengefassten Bewertungsergebnisse aufgeführt. In der vorliegenden Bewertungssystematik ist dieser Bereich so formatiert, dass sowohl die Grunddaten als auch die ermittelten Gesamtbewertungsergebnisse auf der ersten Seite eines Ausdrucks aufgeführt sind.

Der zweite Bereich enthält die Auflistung der technischen Zustandsparameter, ihre zugehörigen Bewertungs- und Bemerkungsfelder sowie die Funktionsfelder zur Kennzifferberechnung. In diesem Abschnitt wird somit die technische Betriebsmittelbewertung vorgenommen. Mit gleichem Aufbauprinzip und in analoger Vorgehensweise werden im dritten Listenbereich die Beurteilungen zur Einhaltung von Richtlinien und Vorschriften sowie die Angaben zur Wichtigkeit des untersuchten Betriebsmittels im betrachteten Netz durchgeführt. Zur Veranschaulichung sind in den Abbildungen 3.2, 3.3 und 3.4 Ansichten einer realen Betriebsmitteliste dargestellt. Die einzelnen Bestandteile einer standardisierten Bewertungsliste werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

## Bewertung Betriebsmittel

### Primärtechnik

#### Leistungsschalter

Eigentümer	Energieversorger XY
Standort / Anlage 1	UA Musteranlage
Name / Bezeichnung	Feld 102, Freileitung Nord
Hersteller	ABB
Typ	ELF 102-6012
Baujahr	1999
Betriebsspannung	110 kV
Kurzschlussstrom der Anlage	23,0 kA
Schutzfunktion mit KU ?	ja, dreipolig
Fabriknummer	89/331043402
Nennspannung	123 kV
Nennstrom	1250 A
Ausschaltleistung	6,71 GVA
Ausschaltstrom	31,5 kA
Schaltaufgabe	Freileitung
Kurzschlußausschaltungen	0
Kurzschlußeinschaltungen	0
Kurtrennung	1
Berstschutz	ja
letzte Wartung / Inbetriebnahme:	19.08.2003
Störungen/Instandsetzungen	0
Schalterpaß vorhanden	ja
Aufstellungsart	Stiel

### Zusammenfassende Beurteilung

<b>Gesamtkennziffer (Ranking)</b>	<b>11,86</b>	
<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>neuwertig</b>	<b>4,82</b>
<b>technischer Gesamtzustand (Evidenzmodell)</b>	<b>glaubwürdig</b>	<b>4,05</b>
<b>technischer Handlungsbedarf hinsichtlich einzelner Parameter</b>	<b>gering</b>	<b>36,32</b>
<b>Dringlichkeit</b>	<b>gering</b>	<b>36,32</b>
<b>Gesamtgefährdungspotential</b>	<b>gering</b>	<b>33,00</b>
<b>Wichtigkeit</b>	<b>hoch</b>	<b>100,00</b>

#### Bemerkung

Prüfdatum: 12.06.2007

Prüfung durch: Weller

(Unterschrift)

Abb. 3.2: Bewertungsliste Seite 1, Grunddaten und Bewertungszusammenfassung

1.1 Technische Bewertung

technischer Gesamtzustand		neuwertig	4,82	nicht ermittelbare Gruppen ausblenden							
				alle Gruppen einblenden							
	nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand	Bewertungsfaktor Lebensdauer	Bewertungsfaktor * Istzustand	Bewertungsfaktor * Lebensdauer	gewichteter Wert Istzustand	gewichteter Wert Lebensdauer	
<b>Grunddaten</b>											
Alter		ca. 8 Jahre	0,79	neuwertig	1,0		1,0	0,0	15,0	0,0	
Einhaltung typbedingter, empfohlener Wartungszyklus		in Ordnung	15,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	15,0	0,0	
Schaltdimensionierung (nur ermittelbar, wenn Kurzschlussstrom der Anlage bekannt ist)		in Ordnung	0,00	neuwertig	5,0		5,0	0,0	0,0	0,0	
Erfahrungswerte / Tendenz für verwendeten Typ		problemlos	0,00	neuwertig	10,0		10,0	0,0	0,0	0,0	
Ersatzteilbeschaffung wertwichtiger bzw. betriebsmitteltypischer Teile		problemlos	0,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
		problemlos	0,00	neuwertig	2,0		2,0	0,0	0,0	0,0	
<b>Begehung / Sichtkontrolle ohne Freischaltung</b>		aufwändig, problematisch, nicht möglich / unwirtschaftlich	9,30	neuwertig	1,0		1,0	0,0	492,8	0,0	
Zählerstand Schaltspiele (Gesamtanzahl seit Inbetriebnahme)			34,44	ausreichend	2,0		2,0	0,0	34,4	0,0	
Schaltspiele seit letzter Wartung			32,75	ausreichend	9,0		9,0	0,0	65,5	0,0	
elektrische Beanspruchung Unterbrechereinheit		gering	36,32	ausreichend	6,0		6,0	0,0	326,8	0,0	
mechanische Beanspruchung Unterbrechereinheit		nicht ermittelbar	0,00	keine Bewertung	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
Zählerstand Motoranläufe (Gesamtanzahl seit Inbetriebnahme)			3.452	neuwertig	2,0		2,0	0,0	0,0	0,0	
Motoranläufe seit letzter Wartung			2.555	neuwertig	6,0		6,0	0,0	0,0	0,0	
Porzellanschäden Stützisolator		unkritische Beschädigung	33,00	ausreichend	1,0		1,0	0,0	33,0	0,0	
Porzellanschäden Schaltkammerisolator		unkritische Beschädigung	33,00	ausreichend	1,0		1,0	0,0	33,0	0,0	
Porzellankittfugen Stützisolator oben		schadensfrei	0,00	neuwertig	6,0		6,0	0,0	0,0	0,0	
Porzellankittfugen Stützisolator unten		schadensfrei	0,00	neuwertig	6,0		6,0	0,0	0,0	0,0	
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator oben		schadensfrei	0,00	neuwertig	6,0		6,0	0,0	0,0	0,0	
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator unten		schadensfrei	0,00	neuwertig	6,0		6,0	0,0	0,0	0,0	
Dichtigkeit Steuerkondensatoren		dicht	0,00	neuwertig	8,0		8,0	0,0	0,0	0,0	
Schutzanstrich		in Ordnung	0,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
Polsäulenflansch-Entwässerungsbohrung Polsäule oben		frei	0,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
Polsäulenflansch-Entwässerungsbohrung Polsäule unten		frei	0,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
Hydraulikölstand LS EIN, Hydraulik auf Betriebsdruck, unteres Schauglas ölgefüllt		in Ordnung	0,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
<b>Sichtkontrolle ohne Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>			0,00	neuwertig	1,0		1,0	0,0	0,0	0,0	
Kontrolle auf Wassereintritt		kein Wassereintritt	0,00	neuwertig	6,0		6,0	0,0	0,0	0,0	

Abb. 3.3: Bewertungsliste Seite 2 und folgende, Auszug aus technischer Bewertung

1.2 Gefährdungspotential

Gesamtgefährdungspotential	gering	33,00
----------------------------	--------	-------

		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Kennziffer'
<b>Personengefahr</b>				0,00	kein	
Gefahr durch fehlenden Berstschutz (Ausschaltvermögen LS)	Berstschutz vorhanden	x		0,00	keine Bewertung	0
Gefahr durch fehlenden Berstschutz (Höherbelastung KU)	Berstschutz vorhanden	x		0,00	keine Bewertung	0
Berührungsschutz Bedienelemente	vorhanden			0,00	kein	0

		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Kennziffer'
<b>Umweltgefahr</b>				0,00	kein	
Bauart- / Typbedingte Gefährdung	keine Gefährdung			0,00	kein	0
Grundwassergefährdung	keine Gefährdung			0,00	kein	0

		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Kennziffer'
<b>Gesetzesverstoß</b>				33,00	gering	
Einhaltung Aufbaunormen	kein Verstoß			0,00	kein	0
Prüfung nach Druckbehälterverordnung	nicht geprüft		Prüfung seit 6 Monaten überfällig	33,00	gering	33
TUV-Untersuchung	in Ordnung			0,00	kein	0
Gültigkeit Betriebsgenehmigung	kein Verstoß			0,00	kein	0

1.3 Wichtigkeit

Wichtigkeit	hoch	100,00
-------------	------	--------

		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungs-faktor	Bewertungs-faktor'	gewichteter Wert
<b>Wichtigkeit</b>				100,00	hoch			
Wichtigkeit des geschalteten Betriebsmittels im Netz	hohe Wichtigkeit			100,00	hoch	1	1	100

Abb. 3.4: Bewertungsliste letzte Seite, Einhaltung Richtlinien und Wichtigkeit

3.1.1 Stammdaten und Ergebniszusammenfassung

Der erste Teil einer jeden Bewertungsliste beinhaltet zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt werden die Stamm- und Grunddaten eines untersuchten Betriebsmittels aufgeführt, der zweite Abschnitt enthält die Ergebniszusammenfassung. Dabei werden die in Kapitel 2.3.4 prinzipiell beschriebenen Vorgaben zur Standardisierung dahingehend angewendet, dass identifizierende Kenndaten immer an der gleichen Stelle der Bewertungsliste zu finden sind. Außerdem ist die Schreibweise bestimmter Schlüsselwörter und Feldüberschriften in allen Bewertungslisten identisch. Diese Vorgehensweise ist die Voraussetzung dafür, dass programmierte Suchfunktionen einer universellen Auswertungssystematik erfolgte Betriebsmittelbewertungen eindeutig identifizieren und katalogisieren können.

Jede Betriebsmittelliste enthält in der obersten Zeile die Überschrift „Bewertung Betriebsmittel“, gefolgt von der Betriebsmittelkategorie (z. B. das Schlüsselwort



„Primärtechnik“) in der dritten Zeile und der Betriebsmittelart (z. B. „Transformator“) in der fünften Zeile. Danach folgen an festgelegter Position Felder für weitere identifizierende Eintragungen wie Geräteeigentümer, Standort, Bezeichnung, Hersteller, Typ oder Baujahr. Während die bisher genannten Stammdaten in jeder Bewertungsliste zu finden sind, werden im weiteren Verlauf des ersten Abschnitts zusätzliche, dann aber betriebsmittelspezifische Grunddaten aufgeführt (z. B. Nennleistung, Anzahl der Kurzschlussein- und -ausschaltungen, Wartungsdaten, Aufstellungsart etc.). Diese können weiterhin rein informellen Charakter haben, unter Umständen aber auch durch die Bezugnahme auf einen technischen Bewertungsparameter einen Beitrag zur Gesamtzustandsbeurteilung leisten. Ein einfaches Beispiel dafür ist die Datumsangabe zur letzten Wartung und die Anzahl der seitdem getätigten Kurzschlussausschaltungen eines Leistungsschalters. Ist aus diesen Angaben abzuleiten, dass der empfohlene Wartungszyklus des Schalters nicht eingehalten wurde und außerdem Kurzschlussausschaltungen stattgefunden haben, so kann auch ohne die Freischaltung und Öffnung des Schalters gefolgert werden, dass bestimmte Komponenten verschlissen oder nur noch eingeschränkt funktionsfähig sind.

Im zweiten Abschnitt des ersten Bewertungslistenteils werden die Gesamtergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zum technischen Zustand, zum Gefährdungspotential und zur Wichtigkeit des Betriebsmittels aufgeführt. Ebenso finden sich hier die aus den Bewertungsergebnissen abgeleiteten Angaben zum technischen Handlungsbedarf und der Dringlichkeit einer eventuell einzuleitenden Instandsetzungsmaßnahme. Wie bei den Stammdaten werden auch in diesem Listenabschnitt Standardisierungsvorgaben durch die Verwendung gleichlautender Formulierungen und identischer Feldpositionen eingehalten. In der vorliegenden Bewertungssystematik sind diese Felder außerdem bedingt formatiert, so dass die Ergebnisangaben je nach Bewertungsergebnis farblich unterschiedlich angezeigt werden (von grün = „neuwertig“ bis rot = „ungenügend“). Ein Bemerkungsfeld, ein Feld zur Eingabe des Datums der Untersuchung sowie ein Feld für den Namen des Prüfers beschließen diesen Abschnitt.

In der vorliegenden Bewertungssystematik wird so auf der ersten Seite einer jeden Bewertungsliste ein umfassender Überblick über das untersuchte Betriebsmittel und den ermittelten Zustand dargestellt.

### 3.1.2 Technische Betriebsmittelprüfung

Im zweiten Teil einer jeden Bewertungsliste wird die technische Zustandsermittlung vorgenommen. In tabellarischer Form sind hier alle zustandsrelevanten Betriebsmittelparameter sowie ihre zugehörigen Felder zur Beurteilung, Gewichtung und Einzelauswertung aufgelistet. Die Anordnung der Parameter-, Funktions- und Auswertungsfelder ist in allen Bewertungslisten identisch. Die grundlegenden Standardisierungsvorgaben gemäß Kapitel 2.3.4 werden eingehalten.

Der technische Bewertungsbereich beginnt in allen Betriebsmittellisten mit der Überschrift „1.1 Technische Bewertung“, gefolgt von drei bedingt formatierten Feldern, in denen der ermittelte technische Gesamtzustand mit einem textlich ausgedrückten Urteil und in Form einer errechneten Kennziffer angezeigt wird. Anschließend erfolgt die Auflistung der technischen Zustandsparameter, wobei diese nicht nur aus Gründen der Übersichtlichkeit zumeist noch in Parametergruppen aufgeteilt sind. Die Gründe zur Bildung von Parametergruppen können technischer oder prozessorientierter Natur sein. Beispielsweise werden die Gasgehaltswerte im Isolieröl eines Transformators und die daraus ableitbaren Zustandsdiagnosen wie „Teilentladung“ oder „Überhitzung“ in einer Parametergruppe „Öl-Gas-Analyse“ zusammengefasst, eine andere Parametergruppe fasst alle zustandsrelevanten Parameter des Stufenschalters zusammen. Eine prozessorientierte Gruppenbildung ist z. B. die Aufteilung der Zustandsparameter in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen. In der ersten Gruppe befinden sich dann die Parameter, die auch ohne eine Freischaltung des Geräts ermittelt werden können, gefolgt von einer Gruppe von Parametern, die nur bei einem freigeschalteten Betriebsmittel bewertbar sind. Die Gesamtkennziffer für den technischen Betriebsmittelzustand ( $TGK$ ) wird in allen Bewertungslisten nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$TGK = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot GK_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad \text{mit}$$

$n$  = Anzahl der Parametergruppen (3.1)

$a_i$  = Gewichtungsfaktor der Parametergruppe  $i$

$GK_i$  = Zustandskennziffer (Gruppenkennziffer) der Parametergruppe  $i$

Die Zustandskennziffer einer Parametergruppe ( $GK$ ) wird in allen Betriebsmittellisten an definierter Stelle aufgeführt und ist die normierte Summe aller gewichteten Einzelkennziffern, die aus den Beurteilungen der innerhalb der Gruppe aufgeführten Bewertungsparameter errechnet werden.

$$GK = \frac{\sum_{j=1}^m b_j \cdot EK_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \quad \text{mit}$$

$m$  = Anzahl der Einzelparameter innerhalb der Parametergruppe (3.2)

$b_j$  = Gewichtungsfaktoren der Einzelparameter

$EK_j$  = Zustandskennziffern der Einzelparameter

Die betriebsmittelspezifischen, zustandsrelevanten Geräteparameter werden in Bewertungsfeldern qualitativ oder quantitativ beurteilt. In der Regel sind diese Bewertungsfelder als Listenfelder ausgeführt, d. h. eine Bewertung wird aus einer Aufstellung vorgegebener Urteilsformulierungen ausgewählt und automatisch eingetragen. Dieses Prinzip schließt zum einen das Risiko von Auswertungsfehlern durch Fehleintragungen (z. B. Schreibfehler) aus, zum anderen wird dadurch der grundsätzlich vorhandene Interpretationsspielraum bei der Bewertung eines Parameters eingeschränkt. Der Zustand  $Z$  eines Parameters ergibt sich also als Element einer definierten, parameterspezifischen Menge von Bewertungsurteilen, was durch die folgenden Beispiele verdeutlicht wird:

$Z(a) \in N_1$  mit  $N_1 = \{\text{vorhanden, teilweise vorhanden, nicht vorhanden}\}$

$Z(b) \in N_2$  mit  $N_2 = \{\text{gut, mittel, schlecht}\}$

$Z(c) \in N_3$  mit  $N_3 = \{\text{in Ordnung, nicht in Ordnung}\}$

$a, b, c$  = Betriebsmittelparameter (3.3)

Bei einigen Parametern wird eine Beurteilung durch die manuelle Eingabe von Werten vorgenommen (z. B. Strom-, Spannungs-, Temperatur- oder Prozentwerte) oder bereits systemseitig generiert. Letzteres geschieht immer dann, wenn eine Bewertung in Abhängigkeit von anderen Parameterzuständen oder sonstigen Randbedingungen errechnet werden kann. Beispielsweise liefert bei einem

Leistungsschalter das Verhältnis von tatsächlicher zu maximal zulässiger Schaltspielzahl ein Maß für die mechanische Beanspruchung der Unterbrechereinheit. Sind beide Schaltspielzahlen bereits als Eintragungen an anderer Stelle der Bewertungsliste vorhanden, kann der Parameter durch eine entsprechende Berechnungsformel im Bewertungsfeld automatisiert beurteilt werden.

In allen Betriebsmittellisten ist an definierter Stelle eine Möglichkeit vorgesehen, durch das Setzen oder Weglassen einer Markierung zu entscheiden, ob der Zustand des zugehörigen Parameters ermittelbar ist oder nicht. In der Praxis besteht nicht immer die Möglichkeit, alle Parameter einer Bewertungsliste beurteilen zu können. Dies ist z. B. der Fall, wenn keine Freischaltung des Betriebsmittels vorliegt oder bestimmte Untersuchungen nur auf einem Prüfstand möglich sind. Wenn keine Zustandsaussage über einen Parameter möglich ist, kann dieser folglich auch keinen Beitrag zur Gesamtbewertung eines Betriebsmittels leisten. Die hinterlegte Auswertungssystematik erkennt an den Eintragungen in diesen Feldern, ob eine Parameterbeurteilung bei der Berechnung des Gesamtzustands berücksichtigt werden soll oder auszuschließen ist.

Aus der qualitativ oder quantitativ vorgenommenen Zustandsaussage wird die Bewertungskennziffer eines untersuchten Parameters berechnet. Die entsprechenden Felder der Bewertungsliste enthalten mathematische Funktionen und Berechnungsvorschriften, die den Verlauf eines Parameters von seinem besten zu seinem schlechtesten Zustand beschreiben und diesem abhängig vom gefällten Urteil einen numerischen Wert zwischen 0 (= optimal / neuwertig) und maximal 100 (= ungenügend) zuordnen. Außerdem wird die errechnete Kennziffer durch ein textliches Urteil ausgedrückt. Dazu wurde der gesamte Wertebereich von 0 bis 100 in vier äquidistante Abschnitte aufgeteilt. Die errechnete Kennziffer wird dann durch die Formulierungen „neuwertig“ (0-25), „ausreichend“ (25-50), „reparaturbedürftig“ (50-75) und „ungenügend“ (75-100) textlich dargestellt. Zudem wird durch eine standardisierte Formatierung in allen Bewertungslisten gewährleistet, dass die Einordnung der ermittelten Werte bzw. Urteile auch durch entsprechende farbliche Unterlegungen verdeutlicht wird (grün für „neuwertig“, gelb für „ausreichend“, orange für „reparaturbedürftig“, rot für „ungenügend“). Im Falle eines nicht bewertbaren oder nicht vorliegenden Parameters werden der Wert 0 und die Formulierung „keine Bewertung“ ausgegeben. Allgemein lässt sich der Zusammenhang zwischen

Kennzifferbildung und Bewertungsurteil eines Parameters wie folgt beschreiben: Es sei  $a$  ein Betriebsmittelparameter und  $Z(a)$  der Parameterzustand gemäß Gleichung (3.3),  $g(a)$  eine allgemein den Parameterverlauf beschreibende Funktion (konstant, linear, exponentiell etc.) und  $f$  die resultierende Funktion aus der mathematischen Verknüpfung von  $g(a)$  und  $Z(a)$ , dann gilt für die Kennziffer  $EK$  des Parameters  $a$ :

$$EK(a) = f(Z(a) \otimes g(a)) \quad \text{mit} \quad f(Z(a) \otimes g(a)) \in [0, 100] \quad (3.4)$$

Die textliche Übersetzung eines errechneten Kennzifferwerts nach Gleichung (3.4) lässt sich allgemeingültig wie folgt darstellen: Ist  $U$  die Menge aller textlichen Urteile mit  $U = \{\text{neuwertig, ausreichend, reparaturbedürftig, ungenügend}\}$ , so gelten die Zuordnungen

$$\begin{aligned} EK(a) \in [0, 25[ & \Rightarrow EK(a)_{\text{textlich}} = \text{„neuwertig“} \\ EK(a) \in [25, 50[ & \Rightarrow EK(a)_{\text{textlich}} = \text{„ausreichend“} \\ EK(a) \in [50, 75[ & \Rightarrow EK(a)_{\text{textlich}} = \text{„reparaturbedürftig“} \\ EK(a) \in [75, 100] & \Rightarrow EK(a)_{\text{textlich}} = \text{„ungenügend“} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Wie bereits in den Gleichungen (3.1) und (3.2) beschrieben sind jedem zustandsrelevanten Betriebsmittelparameter und jeder Parametergruppe Gewichtungsfaktoren zugeordnet. Diese werden entsprechend der Relevanz des untersuchten Parameters bzw. der Parametergruppe auf den Gesamtzustand des Geräts gebildet und mit der aus der Zustandsbeurteilung ermittelten Parameter- bzw. Parametergruppenkennziffer multipliziert. Dabei werden verschiedene Arten von Gewichtungsfaktoren unterschieden. Jede Parametergruppe erhält einen eigenen Gewichtungsfaktor, der den Einfluss der Gruppe auf den Gesamtzustand des Geräts repräsentiert. Jedem Einzelparameter ist ebenfalls ein Gewichtungsfaktor zugeordnet, der in Relation zu den anderen Gruppenparametern gebildet wird, d. h. die Relevanz des Parameters innerhalb der Gruppe repräsentiert. Darüber hinaus werden in einigen Bewertungslisten Gewichtungsfaktoren noch dahingehend unterschieden, ob ein Parameter nur den rein technischen Zustand des untersuchten Betriebsmittels beeinflusst oder u. U. auch einen lebensdauerbeschränkenden Effekt hat (z. B. die Umgebungstemperatur bei Batterien). Diese ggf. aufgeführten Werte

sind allerdings nur informativ und werden nicht gesondert ausgewertet (z. B. für die Berechnung einer zu erwartenden Lebensdauer). Die Gewichtungsfaktoren sind in der Regel konstant, d. h. der Einfluss einer einzelnen Parameterbewertung auf den Gesamtzustand wird einmal festgelegt und bleibt immer gleich. In Einzelfällen können allerdings veränderliche Randbedingungen dazu führen, dass die Auswirkungen eines festgestellten Mangels in Bezug auf den Gesamtzustand differenzierter zu betrachten sind. Das hat zur Konsequenz, dass Gewichtungsfaktoren u. U. variabel sein müssen. In derartigen Fällen sind in den entsprechenden Feldern keine festen Werte, sondern Berechnungsformeln aufgeführt. Diese variieren einen Gewichtungsfaktor in Abhängigkeit von an anderer Stelle der Bewertungsliste vorgenommenen Eintragungen.

Zusätzlich zu den genannten Bestandteilen enthält jede Bewertungsliste noch Prüf- und Berechnungsvorschriften, die die Ergebnisse aus den Einzel- bzw. Gruppenparameterbeurteilungen so aufbereiten, dass sie von der übergeordneten Bewertungssystematik verarbeitet und zur Gesamtzustandsbewertung herangezogen werden können. Diese Berechnungsvorschriften sind in allen Bewertungslisten identisch und bilden den Abschluss der technischen Betriebsmittelbeurteilung.

### **3.1.3 Gefährdungspotentialanalyse und Bewertung der Einhaltung von Richtlinien und gesetzlichen Vorgaben**

Neben der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz wird im letzten Teil einer jeden Bewertungsliste untersucht, inwieweit und in welchem Maße eine Gefährdung für Personen und Umwelt vom Betriebsmittel ausgeht und ob Richtlinien und gesetzliche Vorgaben für den Betrieb des Geräts eingehalten wurden. Dabei ist es zunächst irrelevant, ob eine Gefährdung von vornherein bestand (z. B. durch fehlerhaften Aufbau) oder erst durch einen technischen Mangel im laufenden Betrieb hervorgerufen wurde. Die Untersuchungsmethode ist analog der zur Ermittlung des technischen Zustands verfolgten Vorgehensweise.

Der Bewertungsbereich beginnt in allen Betriebsmittellisten mit der Überschrift „1.2 Gefährdungspotential“, gefolgt von drei bedingt formatierten Feldern, in denen das aus den Einzelparameterbewertungen ermittelte Gesamtgefährdungspotential mit

einem textlich ausgedrückten Urteil und in Form einer errechneten Kennziffer angezeigt wird. Es folgen drei Parametergruppen mit den Überschriften „Personengefahr“, „Umweltgefahr“ und „Gesetzesverstoß“, in denen bewertbare Kriterien zu möglichen Personen- und Umweltgefährdungen sowie zur Überprüfung von Richtlinienereinhaltungen aufgelistet sind. Während die Parametergruppen in allen Bewertungslisten aufgeführt sind, sind die jeweiligen Gefährdungskriterien betriebsmittelspezifisch und werden in der Regel durch vorgegebene Urteilsformulierungen aus Listenfeldern bewertet. Der Zustand  $Z$  eines Gefährdungsparameters ergibt sich also wie bei der technischen Betriebsmittelprüfung als Element einer definierten, parameterspezifischen Menge von Bewertungsurteilen, was durch die folgenden Beispiele verdeutlicht wird:

$$\begin{aligned} Z(a) &\in M_1 \quad \text{mit} \quad M_1 = \{\text{keine Gefährdung, mittlere Gefährdung, hohe Gefährdung}\} \\ Z(b) &\in M_2 \quad \text{mit} \quad M_2 = \{\text{kein Richtlinienverstoß, eklatanter Richtlinienverstoß}\} \\ a, b &= \text{Gefährdungsparameter} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Auch bei der Gefährdungspotentialanalyse werden die errechneten Einzel- bzw. Gruppenkennziffern durch einen numerischen Wert zwischen 0 (= keine Gefährdung bzw. kein Richtlinienverstoß) und maximal 100 (hohe Gefährdung bzw. eklatanter Richtlinienverstoß) dargestellt. Da in der Regel die Gefährdungsparameter mit Hilfe vorgegebener Urteilsformulierungen bewertet werden, können die Kennziffern zumeist direkt aus dem Bewertungsurteil abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} EK(a) = 0 &\quad \text{mit} \quad Z(a) = \text{keine Gefährdung bzw. kein Richtlinienverstoß} \\ EK(a) = 33 &\quad \text{mit} \quad Z(a) = \text{geringe Gefährdung bzw. geringer Richtlinienverstoß} \\ EK(a) = 67 &\quad \text{mit} \quad Z(a) = \text{mittlere Gefährdung bzw. mittlerer Richtlinienverstoß} \\ EK(a) = 100 &\quad \text{mit} \quad Z(a) = \text{hohe Gefährdung bzw. eklatanter Richtlinienverstoß} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Die Auswahllisten zur Beurteilung der Gefährdungskriterien enthalten maximal vier Auswahlmöglichkeiten (meist „keine“, „geringe“, „mittlere“ und „hohe Gefährdung“), in Einzelfällen auch Ja/Nein-Aussagen. In einigen Betriebsmittellisten wird die Beurteilung bestimmter Gefährdungsparameter automatisiert aus der Bewertung

technischer Kriterien abgeleitet. Das Gesamtgefährdungspotential wird mit einer eigenen Berechnungsvorschrift ermittelt und findet in der Gesamtkennziffer und u. U. im Maß der Dringlichkeit einer Instandsetzungsmaßnahme für das untersuchte Betriebsmittels Berücksichtigung. Auf diese Umstände wird bei der Beschreibung der Analyse- und Auswertungsverfahren in Kapitel 4 näher eingegangen.

#### **3.1.4 Bewertung der Wichtigkeit des untersuchten Betriebsmittels im betrachteten Hochspannungsnetz**

Den Abschluss einer jeden Bewertungsliste bildet die Untersuchung der Wichtigkeit des untersuchten Betriebsmittels im betrachteten Hochspannungsnetz. Dieser Bewertungsbereich wird mit der Überschrift „1.3 Wichtigkeit“ eingeleitet. Auch hier folgen drei bedingt formatierte Felder, in denen die ermittelte Wichtigkeit mit einem textlich ausgedrückten Urteil und in Form einer errechneten Kennziffer angezeigt wird. Häufig besteht der Kriterienbereich nur aus einem einzigen Parameter „Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz“, der mit Hilfe eines Listenfelds und den Auswahlmöglichkeiten „keine besondere“, „geringe“, „mittlere“ und „hohe Wichtigkeit“ beurteilt werden kann. In einigen Bewertungslisten kann die Wichtigkeit eines Betriebsmittels aber differenzierter bewertet werden, z. B. durch Bezugnahme auf die Konsequenzen einer Störung oder durch Beurteilung je nach vorhandener bzw. nicht vorhandener Redundanz. Ein Unterschied zu den Bewertungsmethoden zum technischen Zustand und zum Gefährdungspotential besteht darin, dass hier der Wertebereich der ermittelten Kennziffer leicht modifiziert wurde. Ausgehend von der Überlegung, dass es kein völlig unwichtiges Betriebsmittel in einem Hochspannungsnetz gibt, wird der Minimalbewertung „keine besondere Wichtigkeit“ nicht der Wert 0, sondern der Wert 10 zugeordnet. Das Maximalurteil „hohe Wichtigkeit“ wird analog zur bisherigen Bewertungsmethodik durch den Wert 100 ausgedrückt. Das Ergebnis der Wichtigkeitsuntersuchung findet in der Gesamtkennzifferbildung für das untersuchte Betriebsmittel ebenso Berücksichtigung wie bei der Ermittlung der Dringlichkeit einer Instandsetzungsmaßnahme beim Vorliegen eines technischen Handlungsbedarfs. Auf diesen Umstand wird bei der Beschreibung der Analyse- und Auswertungsverfahren in Kapitel 4 näher eingegangen.



## 3.2 Beschreibung der Parameter-, Bewertungs- und Funktionsfelder

Im vorangegangenen Kapitel 3.1 wurden das Schema und der grundsätzliche Aufbau der standardisierten Bewertungslisten beschrieben. Die dort bereits erwähnten Parameter-, Bewertungs- und Funktionsfelder bestimmen maßgeblich die Funktion des Bewertungsverfahrens und werden daher im folgenden bezüglich ihrer charakteristische Eigenschaften und spezifische Merkmale detailliert beschrieben.

### 3.2.1 Normierung, Grenzwerte und Bewertungsbeschränkungen

Prinzipiell setzt die Forderung nach einer Vergleichbarkeit von Ergebnissen die Normierung von Berechnungswerten voraus. In der vorliegenden Bewertungssystematik sind daher diesbezügliche Festlegungen getroffen worden, welche in allen Bewertungslisten und den übergeordneten Auswertungsroutinen gleichlautend sind und somit die Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen gewährleisten.

Wie bereits in Gleichung (3.4) allgemeingültig ausgedrückt, nehmen alle berechneten Kennziffern Werte zwischen 0 und 100 an. Dies gilt sowohl für Einzelparameterauswertungen als auch für zusammengefasste Größen zur Darstellung beispielsweise des Gesamtzustands, des Gesamtgefährdungspotentials oder der Dringlichkeit einer Instandsetzungsmaßnahme. Einzige Ausnahme ist der Wertebereich zur Beurteilung der Wichtigkeit eines Betriebsmittels, der seine Grenzen bei 10 und 100 hat. Diese Intervalle werden auch bei der Zusammenfassung von Einzelbewertungen zu Zustandsdarstellungen von Betriebsmittelgruppen oder Systemen verwendet. Dabei repräsentiert 0 den optimalen Gütewert (bei Urteilen wie „neuwertig“, „in Ordnung“, „keine Gefährdung“ etc.), während 100 den schlechtesten Wert einer Beurteilung darstellt (bei Bewertungen wie „ungenügend“, „nicht in Ordnung“, „hohe Gefährdung“ etc.). Bei der Wichtigkeitsuntersuchung werden dem Urteil „keine besondere Wichtigkeit“ der Wert 10 und einem hochwichtigen Betriebsmittel der Wert 100 zugeordnet. Durch den Ausschluss des Werts 0 ist der Überlegung Rechnung getragen worden, dass es in einem Hochspannungsnetz kein völlig unwichtiges Betriebsmittel gibt und die Wichtigkeit somit immer eine Einflussgröße darstellt.

Die errechneten Kennziffern werden textlich entsprechend Gleichung (3.5) dargestellt. Eine Ausnahme von dieser Festlegung stellt die textliche Übersetzung des technischen Gesamtzustands eines bewerteten Betriebsmittels dar. Ausgehend von der Überlegung, dass ein Gerät grundsätzlich nur dann als „neuwertig“ bezeichnet werden kann, wenn die errechnete Kennziffer dem Optimalwert sehr nahe kommt, wurden die Kennzifferbereiche entsprechend der Abbildung 3.5 moduliert.

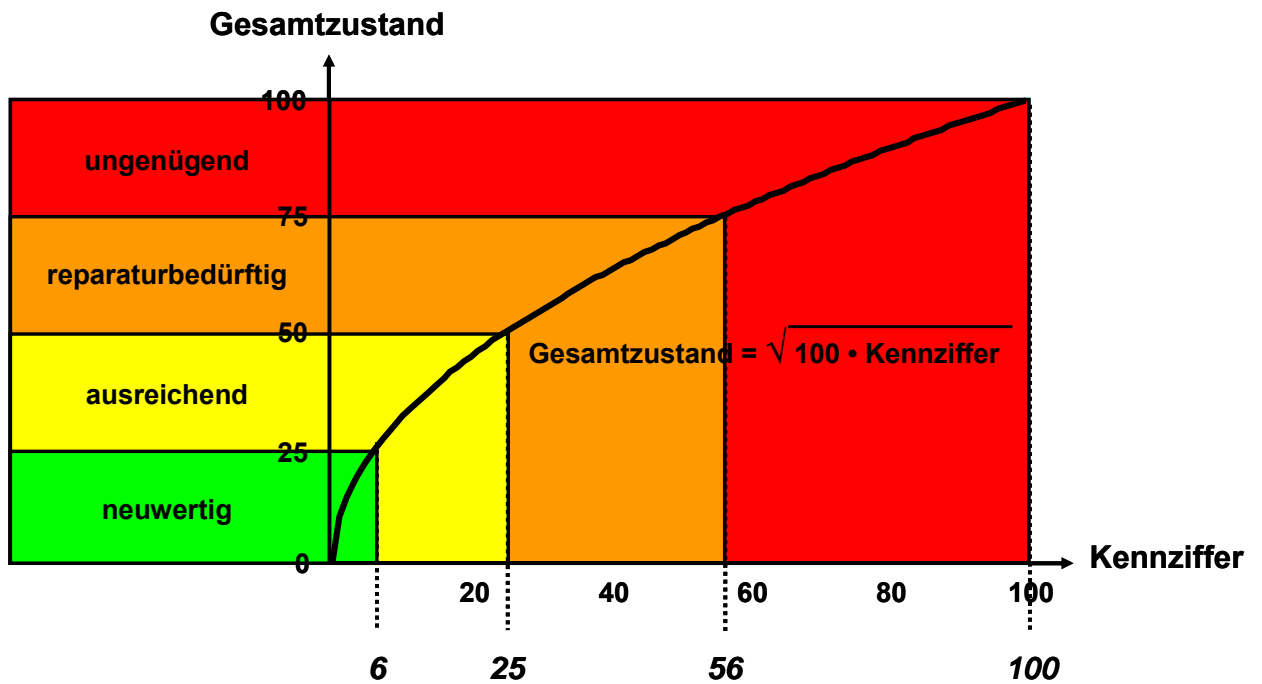


Abb. 3.5: Kennzifferbereiche für den technischen Gesamtzustand eines Betriebsmittels

Die textlichen Formulierungen der technischen Gesamtzustandskennziffer ( $TGK$ ) bleiben gleich, die Kennzifferabschnitte sind allerdings nicht mehr äquidistant. Es gelten demnach folgende Zuordnungen

$$\begin{aligned}
 TGK \in [0, 6[ & \Rightarrow TGK_{\text{textlich}} = \text{„neuwertig“} \\
 TGK \in [6, 25[ & \Rightarrow TGK_{\text{textlich}} = \text{„ausreichend“} \\
 TGK \in [25, 56[ & \Rightarrow TGK_{\text{textlich}} = \text{„reparaturbedürftig“} \\
 TGK \in [56, 100] & \Rightarrow TGK_{\text{textlich}} = \text{„ungenügend“}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 beschrieben werden Bewertungskennziffern durch mathematische Berechnungsformeln mit der Parameterbeurteilung als Variable ermittelt. Die qualitative Beurteilung erfolgt durch die Angabe von kontinuierlichen

Werten, diskreten Wertebereichen oder mittels Zustandsaussagen durch diskrete Abstufungen.

Ist die Eingabe eines kontinuierlichen Werts gefordert und der Verlauf des Parameters von seinem besten zu seinem schlechtesten Wert durch eine kontinuierliche Funktion (linear, exponentiell, quadratisch etc.) beschreibbar, können grundsätzlich alle Werte im Kennzifferintervall angenommen werden ist. Dabei gewährleisten in die Bewertungslisten implementierte Limitierungsfunktionen, dass die Grenzwerte des Kennzifferintervalls weder unter- noch überschritten werden. Zudem wird durch definierte Gültigkeits- und Einschränkungskriterien sichergestellt, dass im Eingabefeld nur plausible, realistische und verwertbare Daten eingetragen werden können. Dies sei an folgendem Beispiel verdeutlicht.

Bei der Ölalterungsuntersuchung eines 110-kV-Transformators stellt die Durchschlagsspannung des Isolieröls ein wichtiges Zustandskriterium dar. In DIN EN 60422 [21] ist als Minimalanforderung formuliert, dass die Durchschlagsspannung mindestens 40 kV betragen muss. Betriebliche Erfahrungswerte und Messungen sowie Angaben von Transformatorenherstellern weisen eine Durchschlagsspannung von 75 bis 80 kV als optimal aus, wobei ein linearer Verlauf des Parameters von seinem schlechtesten zu seinem besten Wert angenommen werden kann. Das Eingabefeld für den Spannungswert ist so formatiert, dass es zum einen nur Zahlen im realistischen Bereich zwischen 10 und 120 zulässt, zum anderen dem Eintrag die Einheit „kV“ zusetzt. Eine Abweichung von dieser Formatierung (z. B. die Angabe einer negativen Zahl) führt zu einer Fehlermeldung. Somit ist gewährleistet, dass der Berechnungsformel für die Kennzifferermittlung ein plausibler, verwertbarer Spannungswert zugeführt wird. Die Bewertungssystematik muss für eine bei einer Betriebsmitteluntersuchung ermittelte Durchschlagsspannung von etwa 80 kV (genauer Wert hier: 78 kV) die Bewertungskennziffer 0 (= neuwertig / optimal) generieren. Ab einer Durchschlagsspannung von 40 kV und weniger ist der Parameter als „ungenügend“ zu bewerten und erhält somit eine Kennziffer zwischen 75 und 100, wobei der maximale Kennzifferwert bei einer Durchschlagsspannung von nur noch 27 kV erreicht wird. Enthielte eine Parameterbewertungsformel keine Limitierungsfunktionen, würden Spannungswerte von mehr als 80 kV (im realen Betrieb durchaus erreichbar) bzw. von weniger als 27 kV eine Verletzung der Normierungskonvention zur Folge haben, da sich rechnerisch negative Kennziffern

bzw. Werte größer 100 ergeben würden. Zur Bewertung des Parameters muss daher folgende Kennzifferberechnungsvorschrift formuliert werden:

$$\begin{aligned} \text{Kennziffer} &= - (75/38) \cdot \text{Durchschlagsspannung} + 153,9475 && \text{mit} \\ \text{Kennziffer} &= 0 && \text{für } \text{Durchschlagsspannung} \geq 78 \text{ kV} && \text{und} && (3.9) \\ \text{Kennziffer} &= 100 && \text{für } \text{Durchschlagsspannung} \leq 27 \text{ kV} \end{aligned}$$

Die Bewertungssystematik verwendet Microsoft Excel als Software-Anwendung. Durch folgenden Zelleintrag wird die unter Gleichung (3.9) formulierte Berechnungsvorschrift realisiert:

$$=\text{MAX}(0;\text{MIN}(100;-75/38*[\text{Zellwert „Durchschlagsspannung“}]+153,9475)) \quad (3.10)$$

Egal welcher gültige Zellwert für die Durchschlagsspannung eingetragen wird, die Kennziffer nimmt Werte zwischen 0 und 100 an und erfüllt somit die Normierungskonvention.

Neben der manuellen Eingabe eines Werts und der Kennzifferberechnung durch eine kontinuierliche Funktion wird die qualitative Bewertung eines Parameters auch durch die Vorgabe diskreter Wertebereiche, Abstufungen oder Ja/Nein-Aussagen vorgenommen. In diesen Fällen sind die Bewertungsfelder als Listenfelder ausgeführt, d. h. eine Bewertung wird aus einer Aufstellung vorgegebener Urteilsformulierungen ausgewählt und automatisch eingetragen. Durch die Vorgabe von Auswahlmöglichkeiten entfällt die Notwendigkeit, die Eingabefelder durch gesonderte Maßnahmen gegen Fehleintragungen oder Überschreiten des normierten Kennziffernbereichs zu schützen. Jeder Auswahlmöglichkeit ist dabei eine feste Bewertungskennziffer zugeordnet, die über eine Verweisfunktionalität automatisch in das entsprechende Kennziffernfeld der Bewertungsliste eingetragen wird.

Grundsätzlich sind alle Tabellenfelder einer Bewertungsliste derart geschützt, dass der Anwender nur dort Eintragungen vornehmen kann, wo diese gefordert bzw. erwünscht sind. Neben dem Bereich zur Stamm- und Grunddatenerfassung für ein Betriebsmittel können nur die Bewertungsfelder, die Felder zum Ausschluss einer Parameterbeurteilung und die Bemerkungsfelder mit Eintragungen versehen werden. In den Fällen, in denen eine Parameterbewertung automatisch durch eine Berechnung generiert wird, sind ebenfalls keine manuellen Eingaben möglich.

### 3.2.2 Parametergewichtung

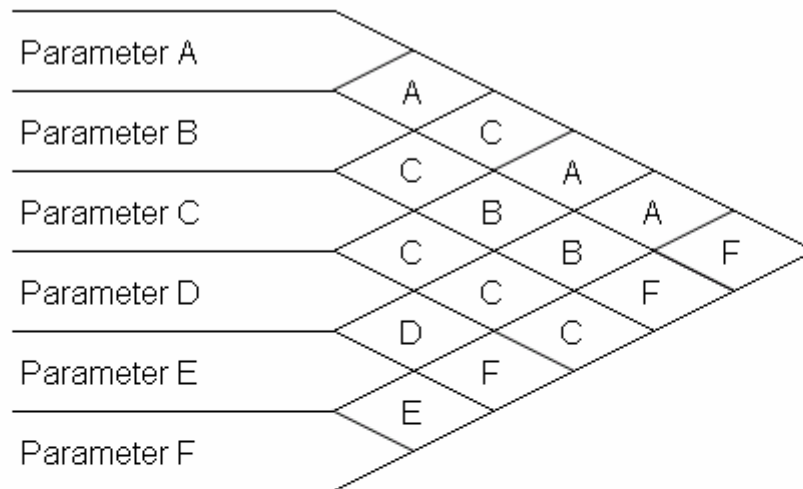
Wie bereits in Kapitel 3.1.2 beschrieben enthalten alle Bewertungslisten an definierter Stelle feste oder variable Gewichtungsfaktoren, die den Einfluss eines Parameters bzw. einer Parametergruppe auf den Gesamtzustand eines untersuchten Betriebsmittels repräsentieren. Insbesondere in Bewertungslisten mit vielen zustandsrelevanten Parametern bzw. Parametergruppen stellt die Bildung von Gewichtungsfaktoren bezüglich ihrer absoluten Werte und ihres Verhältnisses zueinander eine besondere Herausforderung dar.

In der vorliegenden Bewertungssystematik wird dieses Problem mit einem vierphasigen Verfahren gelöst. Die einzelnen Schritte sind

- die Ermittlung einer Wichtigkeitsrangfolge der Parameter bzw. Parametergruppen durch die Methode des paarweisen Vergleichs,
- die Ableitung von vorläufigen Gewichtungsfaktoren aus der Prioritätsrangfolge und die Anpassung der Gewichtungsfaktoren nach technischen Gesichtspunkten,
- die Prüfung, ob die ermittelten Gewichtungsfaktoren konstant oder in Abhängigkeit von anderen Listenparametern variabel auszulegen sind,
- die Simulation von realistischen und mit Extremwerten versehenen Bewertungsszenarien und die Prüfung, ob die simulierten Szenarien zu realistischen Gesamtzustandsaussagen führen.

Im ersten Schritt wird mit Hilfe der Methode des paarweisen Vergleichs eine Prioritätsrangfolge der Parametergruppen erstellt. Ausgehend von der Frage „Welche Parametergruppe ist wichtiger?“ wird dazu eine Gruppe mit jeweils einer anderen hinsichtlich ihrer größeren oder geringeren Bedeutung für den Gesamtzustand verglichen und die jeweils wichtigere Gruppe in eine Matrix eingetragen. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis alle Gruppen einem direkten Vergleich miteinander unterzogen sind. Danach wird für jede Gruppe die Anzahl der Nennungen ermittelt, die Parametergruppe mit den meisten Nennungen ist dann die wichtigste. Dieses Verfahren, in Abbildung 3.6 mit einem allgemeinen Beispiel graphisch verdeutlicht, wird in analoger Weise zur Ermittlung der Prioritätsrangfolge für die Parameter innerhalb einer Gruppe angewendet.

Ausgangsfrage: Welcher Parameter ist wichtiger ?



	Anzahl Nennungen	Rang (Priorität)
Parameter A:	3	2
Parameter B:	2	4
Parameter C:	5	1
Parameter D:	1	5
Parameter E:	1	5
Parameter F:	3	2

Abb. 3.6: Prinzipielles Verfahren zur Ermittlung einer Prioritätsrangfolge

Die Methode des paarweisen Vergleichs liefert zunächst nur eine objektive Rangfolge zur Wichtigkeit der Parametergruppen bzw. der Parameter und noch keine absoluten Werte für die Gewichtungsfaktoren. Allerdings lässt sich aus der Anzahl der Nennungen für einen Parameter in Relation zu der eines anderen Parameters bereits ein erster Trend für das Verhältnis der Gewichtungsfaktoren zueinander ableiten. Wenn, wie im Beispiel aus Abbildung 3.6, der Parameter C in allen fünf direkten Vergleichen als der wichtigere betrachtet und fünf Mal häufiger als der unwichtigste Parameter D genannt wird, kann in erster Näherung ein Verhältnis der Gewichtungsfaktoren von 5:1 für diese beiden Parameter angenommen werden. Konsequenterweise wird dann dem Parameter C zunächst der Gewichtungsfaktor 5 und dem Parameter D der Minimalfaktor 1 zugeordnet. Ob diese Zuordnung der Gewichtungsfaktoren allerdings die tatsächlichen Einflüsse der Parameter auf den Gesamtzustand eines realen Betriebsmittels korrekt widerspiegelt, muss durch eine

Überprüfung nach technischen Aspekten bestätigt werden. Führt beispielsweise ein erheblicher Mangel des Parameters C im realen Betrieb zum Ausfall des Geräts, während ein schlechter Zustand des Parameters D einen Betrieb kaum einschränkt, kann sich das Wichtigkeitsverhältnis von 5:1 als zu gering gewählt erweisen.

In der vorliegenden Bewertungssystematik werden daher die Zustandsparameter in allen Bewertungslisten einem erneuten paarweisen Vergleich unterzogen. In dieser zweiten Phase zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wird dann nach technischen Gesichtspunkten geprüft, ob die methodisch ermittelten Verhältnisse der jeweiligen Gewichtungsfaktoren zueinander die realen Gegebenheiten ausreichend repräsentieren. Dem unwichtigsten Parameter wird grundsätzlich der Gewichtungsfaktor 1 zugeordnet, die Faktoren der höherwertigen Parameter werden ausgehend von der Frage „Um wieviel wichtiger ist der Parameter im Vergleich zum unwichtigsten Parameter?“ entsprechend angepasst. Diese Anpassung setzt ein hohes Maß an fachlichem Know-how voraus, da hierzu umfassende Kenntnisse zu Parameterverhalten, Ausfallwahrscheinlichkeit im Falle der Beteiligung des zu gewichtenden Parameters (z. B. durch die Analyse von Störungsstatistiken) und auch Instandsetzungskosten im Fehlerfall bei der Gewichtung einfließen müssen.

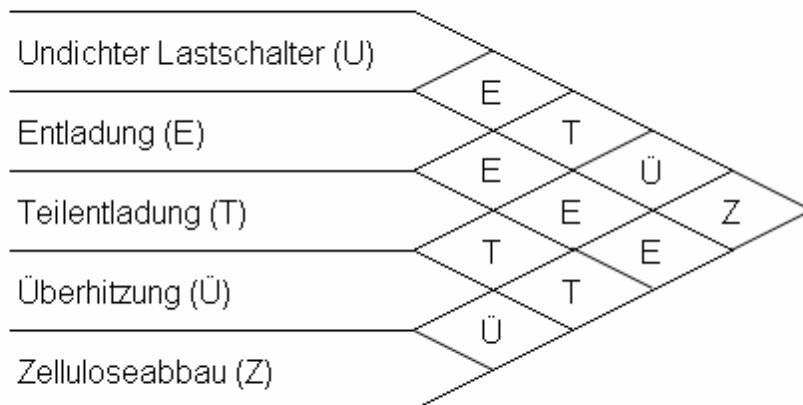
In der dritten Phase wird geprüft, ob der Einfluss eines zu gewichtenden Parameters auf den Gesamtzustand immer konstant oder in Abhängigkeit von Gerätegrunddaten, den Bewertungsurteilen anderer Listenparametern oder sonstigen Randbedingungen veränderlich ist. Für den Gewichtungsfaktor hat dies zur Konsequenz, dass dieser entweder einen festen Wert annimmt (d. h. den in der zweiten Phase ermittelten Wert beibehält) oder variabel auszulegen ist. Im letztgenannten Fall wird der Gewichtungsfaktor als Funktion der beeinflussenden Größen ausgeführt und kann unterschiedliche Werte annehmen.

In der abschließenden Phase wird anhand verschiedener Szenarien geprüft, ob die Gewichtungsfaktoren derart aufeinander abgestimmt sind, dass die Zusammenfassung einzelner Parameterbewertungen auch realistische Gesamtzustandsaussagen zur Folge hat. Führt beispielsweise innerhalb einer Parametergruppe ein erheblicher Mangel eines Parameters im realen Betrieb zum Ausfall des Geräts, darf bei der Bildung der Gruppenkennziffer auch bei sonst einwandfreiem Zustand der anderen Parameter nicht mehr das Gruppenurteil „neuwertig“ herauskommen. In manchen Fällen müssen deshalb

Gewichtungsfaktoren erneut angepasst werden. Als Prüfzenarien werden sowohl realistische Betriebszustände simuliert (z. B. kleinere Mängel bei ansonsten einwandfreiem Gesamtzustand) als auch Extremwertbetrachtungen herangezogen (z. B. der unwahrscheinliche Fall, dass die 10 wichtigsten Zustandsparameter alle mit „ungenügend“ bewertet wurden).

Die beschriebene Methodik zur Bestimmung von Gewichtungsfaktoren soll anhand eines Beispiels aus der Primärtechnik verdeutlicht werden. Bei Hochspannungstransformatoren ist die Gas-in-Öl-Analyse ein gängiges und wichtiges Kriterium zur Zustandsbewertung. Anhand der Konzentration und dem Verhältnis bestimmter im Isolieröl gelöster Gase lassen sich verschiedene, unterschiedlich relevante Diagnosen ableiten, welche als bewertbare Zustandsparameter in einer Transformatorbewertungsliste Verwendung finden. Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren für diese Zustandsparameter in der Parametergruppe „Gas-in-Öl-Analyse“ wird wie folgt vorgegangen. Zunächst wird eine Prioritätsrangfolge mit Hilfe der Methode des paarweisen Vergleichs erstellt.

Ausgangsfrage: Welcher Parameter ist wichtiger ?



	Anzahl Nennungen	Rang (Priorität)
Undichter Lastsschalter	0	5
Entladung	4	1
Teilentladung	3	2
Überhitzung	2	3
Zelluloseabbau	1	4

Abb. 3.7: Ermittlung der Prioritätsrangfolge in der Parametergruppe „Gas-in-Öl-Analyse“



Die Diagnose „Entladung“ ist demnach der wichtigste, das Kriterium „Undichter Lastschalter“ der unwichtigste Zustandsparameter. Weiterhin werden den Parametern in einem ersten Schritt vorläufige Gewichtungsfaktoren entsprechend der Anzahl ihrer Nennungen zugeordnet.

Zustandsparameter	Gewichtungsfaktor
Entladung	4
Teilentladung	3
Überhitzung	2
Zelluloseabbau	1
Undichter Lastschalter	1 (Minimalwert)

Tab. 3.1: Vorläufige Gewichtungsfaktoren nach Nennungen aus Prioritätsrangfolge

Nun werden die Parameter erneut paarweise verglichen und das vorläufige Verhältnis der jeweiligen Gewichtungsfaktoren nach technischen Gesichtspunkten untersucht. Als Ergebnis praktischer Erfahrungswerte lässt sich z. B. feststellen, dass das Verhältnis von „Entladung“ zu „Undichter Lastschalter“ von 4:1 als zu gering gewählt ist. Starke Entladungsvorgänge im Transformator können zu einem Ausfall des Betriebsmittels führen und stellen somit einen wesentlich gravierenderen Mangel dar als ein undichter Lastschalter, mit dem das Gerät eingeschränkt weiter betrieben werden kann. Auch die methodisch ermittelte Gleichwertigkeit von „Zelluloseabbau“ und „Undichter Lastschalter“ entspricht nicht den realen Gegebenheiten, da eine Reduzierung der Isolationsfähigkeit ebenfalls betriebsgefährdender einzustufen ist als ein undichter Lastschalter. Gleiches gilt für das Verhältnis von „Entladung“ zu „Teilentladung“, was durch ein Verhältnis von 4:3 nicht realitätsgerecht abgebildet wird. Aus diesen und weiteren technisch motivierten Betrachtungen lässt sich eine Anpassung der Gewichtungsfaktoren nach folgender Tabelle ableiten:

Zustandsparameter	Gewichtungsfaktor
Entladung	6
Teilentladung	3
Überhitzung	2
Zelluloseabbau	2
Undichter Lastschalter	1

Tab. 3.2: Gewichtungsfaktoren nach technischer Prüfung

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob die Gewichtungsfaktoren den ermittelten konstanten Wert beibehalten oder aufgrund der Abhängigkeit einzelner Zustandsparameter von bestimmten Randbedingungen variabel auszulegen sind. Im Beispiel zeigt sich, dass die Gewichtungsfaktoren für die Parameter „Teilentladung“ und „Zelluloseabbau“ unterschiedliche Werte annehmen müssen. Dies ist dadurch begründet, dass das für eine schlechte Beurteilung der Parameter maßgebliche Verhältnis zweier Schlüsselgaskonzentrationen zwei Schwellenwerte aufweist. Wird der erste Schwellenwert überschritten, werden die Parameter als schlecht, aber noch nicht besorgniserregend eingestuft. Wird allerdings der zweite Schwellenwert überschritten, steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit und damit der Einfluss der Parameter auf den Gesamtzustand massiv an. Für die Gewichtungsfaktoren bedeutet dies, dass sie je nach Verhältnis der Gaskonzentrationen unterschiedliche Werte annehmen müssen. Es ergibt sich die folgende Tabelle:

Zustandsparameter	Gewichtungsfaktor	Bemerkung
Entladung	6	
Teilentladung	3 <sup>I)</sup> oder 4,5 <sup>II)</sup>	I) Verhältnis Gaskonzentrationen >3 und <10 II) Verhältnis Gaskonzentrationen >10
Überhitzung	2	
Zelluloseabbau	2 <sup>III)</sup> oder 4 <sup>IV)</sup>	III) Verhältnis Gaskonzentrationen <3 IV) Verhältnis Gaskonzentrationen >10
Undichter Lastschalter	1	

Tab. 3.3: Gewichtungsfaktoren nach erweiterter technischer Prüfung

In einer abschließenden Simulation verschiedener Bewertungsszenarien wird nun geprüft, ob bei einer Beurteilung mit den gewichteten Parametern auch realistische Gesamturteile für die Parametergruppe „Gas-in-Öl-Analyse“ zu erzielen sind. Im konkreten Beispiel ist dies der Fall, d. h. die Gewichtungsfaktoren müssen nicht weiter angepasst werden.

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Schritte der Entwicklung und Anpassung der Gewichtungsfaktoren der Parametergruppe „Gas-in-Öl-Analyse“ noch einmal zusammengefasst.

Zustandsparameter	Gewichtungsfaktor nach Erstellung Rangliste	Gewichtungsfaktor nach technischer Ranglistenprüfung	Gewichtungsfaktor nach Prüfung auf Konstanz und Variabilität	Gewichtungsfaktor nach Simulation Bewertung
Entladung	4	6	6	6
Teilentladung	3	3	3 oder 4,5	3 oder 4,5
Überhitzung	2	2	2	2
Zelluloseabbau	1	2	2 oder 4	2 oder 4
Undichter Lastschalter	1	1	1	1

Tab. 3.4: Zusammenfassung Entwicklung und Anpassung Gewichtungsfaktoren

### 3.2.3 Einzelauswertung und nicht ermittelbare Bewertungsparameter

Die Felder zur Parametereinzelauswertung haben die Aufgabe, die aus der Parameterbeurteilung resultierenden, gewichteten Kennzifferwerte zu berechnen und diese dann zu einer Gruppenkennziffer für die jeweilige Parametergruppe zusammenzufassen. Dabei ist durch geeignete Feldfunktionen sicherzustellen, dass eine nicht ermittelbare Parameterbeurteilung keinen Beitrag zur Zustandskennziffer für die Gruppe leistet. Realisiert wird diese Forderung dadurch, dass die gesetzte bzw. weggelassene Markierung zum Ausschluss einer Parameterbewertung dahingehend interpretiert wird, dass der jeweilige Gewichtungsfaktor beibehalten oder auf 0 gesetzt wird. Weiterhin ist in den Auswertungsfunktionen der Extremfall

berücksichtigt, dass keiner der Gruppenparameter beurteilt werden kann. Durch die Normierung der Gruppenkennziffer würde sich in einem solchen Fall eine Division durch 0 ergeben, was durch entsprechende Ausschlussfunktionen verhindert wird.

### 3.3 Bewertungslisten von Hochspannungsbetriebsmitteln

In den vorangegangenen Abschnitten wurde der grundsätzliche Aufbau einer jeden Bewertungsliste mit ihren Bestandteilen und Funktionen ausführlich vorgestellt. Das folgende Kapitel widmet sich nun der detaillierten Beschreibung ausgewählter Bewertungslisten für bestimmte Bereiche der Hochspannungstechnik, anhand derer das Prinzip der Bewertung mit standardisierten Bewertungsliste verdeutlicht wird. Insbesondere wird analysiert, warum ein verwendeter Bewertungsparameter zur Zustandsbewertung herangezogen wird, in welcher Bandbreite sich seine qualitative Beurteilung bewegt und in welchem Maße eine gute oder schlechte Parameterbewertung den Betriebsmittelgesamtzustand beeinflusst. Aufgrund der Vielzahl der zustandsrelevanten Kriterien sowie aus Platz- und Übersichtlichkeitsgründen wird sich in diesem Kapitel auf die umfassende Beschreibung der essentiellen und wichtigsten Parameter von zwei Bewertungslisten aus den Bereichen Primärtechnik (Transformator) und Sekundärtechnik (Distanzschutzgerät) beschränkt. Weitere detailliert analysierte Bewertungslisten aus den Bereichen Primärtechnik (Gasisolierte Schaltanlagen), Nachrichtentechnik (Übertragungstechnik) und Hochspannungsleitungen (Abspannmast) sowie weitere Bewertungslistenbeispiele sind in den Anhängen A und B angefügt.

Generell wurde zur Erstellung einer Bewertungsliste nach folgendem Prinzip vorgegangen: Weist ein Betriebsmittel unabhängig von seinem Typ, dem Hersteller oder dem Funktionsprinzip überwiegend oder immer die gleichen zustandsrelevanten Bewertungsparameter auf, und haben diese essentiellen Parameter trotz ggf. unterschiedlicher Bauform den gleichen Einfluss auf den Gesamtzustand, wurde eine Musterbewertungsliste für die jeweilige Geräteart erstellt. Kleinere typ- oder bauformbedingte Unterschiede werden dann derart berücksichtigt, dass durch die Grunddatenerfassung und der Angabe des genauen Betriebsmitteltyps ggf. nicht vorhandene oder nicht ermittelbare Parameter automatisch von einer Beurteilung ausgeschlossen, Gewichtungsfaktoren angepasst oder auch zusätzliche Parameter

eingebildet werden. Dadurch steht dem Anwender immer eine auf den untersuchten Gerätetyp zugeschnittene Bewertungsliste zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu gibt es Geräte, die trotz gleicher Betriebsmittelart einen unterschiedlichen Katalog zustandsbeschreibender Parameter aufweisen. Weiterhin existieren gleichlautende Parameter, die bei dem einen Gerät einen gravierend unterschiedlichen Einfluss auf den Gesamtzustand oder weitere Parameter ausüben als bei einem anderen Gerät der gleichen Betriebsmittelsart. Da diese Problematik nicht immer durch die variable Auslegung von Gewichtungsfaktoren oder den automatisierten Ausschluss von Parametern gelöst werden konnte, mussten in einigen Fällen typspezifische Bewertungslisten erstellt werden. Dies betrifft insbesondere die Betriebsmittelgruppe der Leistungsschalter. Vor allem bedingt durch die verschiedenen Antriebs- und Lichtbogenlöschprinzipien mussten hier zur Abdeckung von möglichst vielen Bewertungsmöglichkeiten einige typ-, bauform- und herstellerabhängige Betriebsmittellisten erstellt werden.

Den Kriterien zur Beurteilung eines Gefährdungspotentials liegen eine Vielzahl von Normen, technischen Richtlinien und Gesetzen zugrunde, die hier ebenfalls aus Übersichtsgründen nicht explizit aufgeführt werden. Dabei werden die meisten Bewertungskriterien durch DIN EN 50110-1 [22] geregelt.

### **3.3.1 Primärtechnik**

Primärtechnische Hochspannungsbetriebsmittel sind Transformatoren, Leistungsschalter, Wandler, Trenn- und Erdungsschalter sowie als Sonderform die gasisolierte Schaltanlage, für die eine spezielle, schaltfeldbezogene Bewertungsliste vorliegt. Für diese Betriebsmittelarten existieren Musterbewertungslisten, wobei für Leistungsschalter aus den einleitend genannten Gründen zusätzlich eine Vielzahl von typspezifischen Bewertungslisten zur Verfügung steht. Eine Auswahl einiger typbezogener Bewertungslisten von Leistungsschaltern ist im Anhang angefügt. Im Folgenden wird exemplarisch die Bewertungsliste für einen Transformator vorgestellt.

### 3.3.1.1 Bewertungsliste Transformator

Der Hochspannungstransformator steht als wertwichtiges und teures Betriebsmittel im Fokus einer jeden Instandhaltungsstrategie. Dies wird u. a. dadurch belegt, dass ein Transformator in der Praxis wesentlich häufiger mit Monitoring-Systemen zur kontinuierlichen Betriebsüberwachung ausgestattet ist als andere Betriebsmittel. Die Kenntnis des Betriebsmittelzustands ist auch deshalb von Bedeutung, weil Leistungstransformatoren einen erheblichen Anteil an der Zahl der Störungen in Schaltanlagen beisteuern. Im Folgenden werden nun die essentiellen (u. U. bereits zustandsrelevanten) Grunddaten, Parametergruppen und wichtigsten Einzelparameter einer Transformatorbewertungsliste vorgestellt. In der Praxis, insbesondere im laufenden Betrieb, wird man selten alle der nachfolgend aufgeführten Parameter bewerten können, da bestimmte Prüfungen nur auf Prüfständen oder in Transformatorenwerkstätten durchgeführt werden können. Dennoch leisten alle angegebenen Kriterien einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtzustand eines Transformators.

#### a) Grunddatenerfassung

Im Grunddatenfeld der Transformatorenbewertungsliste werden neben den obligatorischen Identifikationsgrößen (Eigentümer, Standort, Bezeichnung etc.) diverse Eingangsdaten erfasst, welche bereits zustandsrelevanten Charakter haben bzw. in Formeln zur Berechnung von Einzelparameterkennziffern berücksichtigt werden. In der nachfolgenden Aufstellung wird sich auf diese Eingangsgrößen beschränkt und ihre Bedeutung kurz beschrieben.

Kriterium	Eingabe als	Bedeutung für
Baujahr	Jahreszahl	Bewertung Alter
Transformatorenart	Vorgabewert aus Auswahlliste (z. B. Drehstromtransformator, Drosselspule, Eigenbedarfstransformator etc.)	
eingesetzt als	Vorgabewert aus Auswahlliste (Netztransformator, Maschinentransformator, Industrietransformator)	Bewertung Alter, Betriebsdauer und durchschnittliche Belastung

Betriebsjahre	Zahlenwert	Bewertung Betriebsdauer
Bemessungsspannung Oberspannungsseite	Zahlenwert	Bewertung Wassergehalt, Neutralisationszahl, Durch- schlagsspannung, Verlust- faktor $\tan \delta$ und Feuchte der Feststoffisolation
Geräusche ohne / mit Lüfter	Zahlenwert	Bewertung Immissions- schutzbestimmungen

Tab. 3.5: Grunddatenerfassung Transformator, wichtigste Kriterien

Weiterhin besteht noch die Möglichkeit zur Angabe informativer Werte wie Bemessungsleistung, Übersetzung, relative Kurzschlussspannung sowie der gemessenen Leerlauf- und Kurzschlussverluste.

### **b) Technische Bewertung**

Zur technischen Zustandsbeurteilung eines Transformators werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Parametergruppen untersucht. Ihr Einfluss auf den Gesamtzustand wird durch die angegebenen Gruppengewichtungsfaktoren ausgedrückt. Zudem werden die jeweils wichtigsten Einzelparameter mit ihren individuellen Gewichtungsfaktoren innerhalb einer Gruppe aufgelistet. Es ist der am wenigsten wichtigen Parametergruppe der Gewichtungsfaktor 1 zugeordnet. Analog wird bei der Gewichtung der Einzelparameter innerhalb einer Gruppe vorgegangen.

Parametergruppe	Gewichtungen Parameter- gruppe	Wichtigste Einzelparameter	Gewichtungen Einzelparameter innerhalb der Gruppe
Alter	2	Alter	2
Betriebsjahre	3	Betriebsjahre	3
Betriebsdaten / Lebenslauf	5,5	Durchschnittliche Belastung	4
		Durchschnittliche Öltemperatur	10
Öldaten	1	Öltrocknung / -tausch erfolgt ?	3
Ölgasanalyse	9	Diagnose „Undichter Lastschalter“	1

		Diagnose „Entladung“	6
		Diagnose „Teilentladung“	variabel 3 - 4,5
		Diagnose „Überhitzung“	2
		Diagnose „Zelluloseabbau“	variabel 2 - 4
Ölalterungsanalyse	7	Neutralisationszahl	6
		Durchschlagsspannung	5
		Verlustfaktor $\tan \delta$	4
Furan-Analyse	4,5	DP-Wert der Papierisolation nach de Pablo bzw. Heisler	1
PCB-Gehalt	1	PCB-Gehalt Isolieröl	1
Stufenschalter	3,5	Erfahrungswert Stufenschalter	4
		Erfahrungswert Motorantrieb	3
		Schaltzahl seit letzter Inspektion	2
Durchführungen	1	Ergebnis Messdatenauswertung	1
Kühlanlage	1	Verhältnis installierte Kühlleistung zu Gesamtverlustleistung Trafo	1
		Erfahrungswert Kühlanlage	1
Widerstandsmessung	6,5	Kritischer / unkritischer Fehlergrad bei Widerstandserhöhung	2
Isolationsmessung	3	Messwerte aus aktuellem Isolationsmessprotokoll in Ordnung ?	1
FDS-Messung	5	Feuchte der Feststoffisolation	1
Kurzschlussimpedanzen	9	Kurzschlussimpedanzwerte bezogen auf Werks- und Vormessung	1
Mechanische Prüfung	1	Dichtigkeit Kessel / Stufenschalter	4
		Zustand Buchholzrelais und Lastumschalterschutz	4
		Zustand Luftentfeuchter	3

Tab. 3.6: Technische Bewertung Transformator, Parametergruppen und Einzelparameter

Im Folgenden werden die wichtigsten der in Tabelle 3.6 aufgeführten Bewertungsparameter näher beschrieben (Gewichtungsfaktor der Gruppe  $\geq 2$ ).



**Parametergruppe: Alter****Parameter:           Alter***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Das Alter eines Hochspannungsbetriebsmittels ist immer eine zustandsrelevante Größe. Zum einen ist mit zunehmendem Alter bei jedem technischen Gerät mit Störungen und Funktionseinschränkungen zu rechnen, zum anderen wird der Zustand bei einem Verzicht auf Innovationen und technischen Fortschritt verschlechtert. Bei der Bewertung eines Hochspannungstransformators wird zwischen Alter und Betriebsdauer differenziert. Diese Differenzierung ist notwendig, da insbesondere bei Energieversorgungsunternehmen häufig Transformatoren als Reserve vorgehalten werden und sich so eklatante Unterschiede zwischen Alter und tatsächlicher Betriebseinsatzzeit ergeben können. Zwar gibt es keine Norm, die ein maximal zulässiges Transformatoralter vorschreibt, doch haben sich aus Betriebserfahrungswerten und Herstellerangaben bestimmte Altersgrenzen als realistisch erwiesen. In der vorliegenden Bewertungssystematik wird ein Netztransformator ab einem Alter von 50 Jahren, ein Industrietransformator ab 43 Jahren und ein Maschinentransformator ab 33 Jahren als „ungenügend“ eingestuft.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Keine manuelle Eingabe notwendig (im Bewertungsfeld wird das Alter automatisch aus der Differenz aus der Prüfdatumsangabe und der Baujahrangabe in der Grunddatenerfassung berechnet)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Zur Bewertung des Transformatoralters wird ein linearer Parameterverlauf angenommen. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Kennziffer} &= (\text{Trafoalter} / 50) \cdot 75 && \text{für Netztransformatoren} \\ \text{Kennziffer} &= (\text{Trafoalter} / 43) \cdot 75 && \text{für Industrietransformatoren} \\ \text{Kennziffer} &= (\text{Trafoalter} / 33) \cdot 75 && \text{für Maschinentransformatoren} \end{aligned} \quad (3.11)$$

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, Herstellerangaben

**Parametergruppe: Betriebsjahre****Parameter: Betriebsjahre***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Wie bereits in der vorangegangenen Parameterbeschreibung erwähnt ist auch die Betriebsdauer eines Transformators immer ein zustandsrelevantes Kriterium. Zudem hängt die Beurteilung der Betriebsjahre maßgeblich von der thermischen Belastung der Wicklungsisolation ab. Eingehende Betrachtungen über die relative, thermische Alterung der Isolation wurden von *Arrhenius* angestellt. Die physikalischen Grundlagen wurden von *Montsinger* für den Temperaturbereich von 80 °C bis 140 °C bestätigt und in eine vereinfachte Formel gebracht. Diese besagt, dass sich ab der sog. Heißpunkttemperatur von 98 °C die Lebensdauer eines Transformators bei einer Erhöhung um 6 K jeweils halbiert. Eine Heißpunkttemperatur von 98 °C kann angenommen werden, wenn die Temperatur der obersten Ölschicht (im laufenden Betrieb einfach zu messen) 80 °C beträgt. In der vorliegenden Bewertungssystematik wird bei einer Öltemperatur unter 80 °C ein Netztransformator ab einer Betriebsdauer von 45 Jahren, ein Industrietransformator ab 38 Jahren und ein Maschinentransformator ab 28 Jahren als „ungenügend“ eingestuft. Für den Temperaturbereich über 80 °C werden die lebensdauerverkürzenden Effekte bei der Kennzifferberechnungsvorschrift berücksichtigt.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Keine manuelle Eingabe notwendig (im Bewertungsfeld wird die Betriebsdauer aus der entsprechenden Angabe in der Grunddatenerfassung übernommen)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Zur Bewertung der Betriebsdauer wird für den Öltemperaturbereich unter 80 °C (Angabe an anderer Stelle der Bewertungsliste) ein linearer Parameterverlauf angenommen. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Kennziffer} &= (\text{Betriebsjahre} / 45) \cdot 75 && \text{für Netztransformatoren} \\ \text{Kennziffer} &= (\text{Betriebsjahre} / 38) \cdot 75 && \text{für Industrietransformatoren} \\ \text{Kennziffer} &= (\text{Betriebsjahre} / 28) \cdot 75 && \text{für Maschinentransformatoren} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Für Öltemperaturen über 80 °C wird die Berechnungsvorschrift wie folgt erweitert:

$$\text{Kennziffer} = 2^{(\text{Öltemperatur}-80)/6} \cdot (\text{Betriebsjahre} / 45) \cdot 75$$

für Netztransformatoren

$$\text{Kennziffer} = 2^{(\text{Öltemperatur}-80)/6} \cdot (\text{Betriebsjahre} / 38) \cdot 75 \quad (3.13)$$

für Industrietransformatoren

$$\text{Kennziffer} = 2^{(\text{Öltemperatur}-80)/6} \cdot (\text{Betriebsjahre} / 28) \cdot 75$$

für Maschinentransformatoren

*Normative Grundlagen:*

DIN IEC 60076-7 [23], Erfahrungswerte, Herstellerangaben

### **Parametergruppe: Betriebsdaten / Lebenslauf**

**Parameter:** durchschnittliche Belastung (in % der Bemessungsleistung)

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Die Belastung eines Transformators, insbesondere im Überlastbetrieb, übt einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer und damit den Zustand eines Geräts aus. In der vorliegenden Bewertungssystematik wird die durchschnittliche Belastung mit der tatsächlichen Betriebseinsatzzeit verknüpft und durch den Vergleich mit realistischen Kombinationen aus Maximalbetriebszeiten und Grenzdauerbelastungen der verschiedenen Transformatorenarten bewertet. Die Parameterbeurteilung liefert somit ein weiteres Unterscheidungskriterium bei der Bewertung von mehreren Geräten. Für einen Netztransformator wird als Bezugswertekombination eine maximale Betriebsdauer von 45 Jahren bei einer maximalen Dauerbelastung von 45 % der Bemessungsleistung zu Grunde gelegt. Für einen Industrietransformator wird das Wertepaar 65 % / 38 Jahre und für einen Maschinentransformator die Kombination 90 % / 28 Jahre verwendet.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe eines Zahlenwerts zwischen 10 und 90 %

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Im realistischen Spektrum einer durchschnittlichen Belastung zwischen 10 und 90 % der Bemessungsleistung wird ein annähernd linearer Parameterverlauf angenommen. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$Kennziffer = 75 / (-0,818 \cdot Belastung \cdot 100 + 81,818) \cdot Betriebsjahre$   
für Netztransformatoren

$Kennziffer = 75 / (-1,085 \cdot Belastung \cdot 100 + 108,5) \cdot Betriebsjahre$  (3.14)  
für Industrietransformatoren

$Kennziffer = 75 / (-2,8 \cdot Belastung \cdot 100 + 280) \cdot Betriebsjahre$   
für Maschinentransformatoren

*Normative Grundlagen:*

DIN IEC 60076-7 [23], Erfahrungswerte, Herstellerangaben

### **Parametergruppe: Betriebsdaten / Lebenslauf**

**Parameter:** durchschnittliche Öltemperatur

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Eine hohe Öltemperatur, insbesondere die Heißpunkttemperatur, hat nicht nur einen unmittelbaren Einfluss auf die Lebensdauer eines Transformators, sie verschlechtert auch grundsätzlich bei dauerhaft hohen Werten den Gesamtzustand eines Betriebsmittels im Vergleich zu einem niedrig temperierten Gerät. Daher wird die durchschnittliche Öltemperatur als eigenständiger Parameter aufgeführt und bewertet.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe eines Zahlenwerts

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung für diskrete Wertebereiche:

$Kennziffer = 0$ (neuwertig)	für Öltemperatur < 70 °C	
$Kennziffer = 67$ (reparaturbedürftig)	für Öltemperatur zw. 70 und 80 °C	(3.15)
$Kennziffer = 100$ (ungenügend)	für Öltemperatur > 80 °C	

*Normative Grundlagen:*

DIN IEC 60076-7 [23], DIN IEC 60076-2 [24], Erfahrungswerte, Herstellerangaben

**Parametergruppe: Ölgasanalyse**

**Parameter:** Diagnosen „Undichter Lastschalter“, „Entladung“, „Teilentladung“, „Überhitzung“, „Zelluloseabbau“

**Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:**

Eines der meistverwendeten diagnostischen Hilfsmittel zur Erkennung und Bewertung von Fehlern ölgefüllter elektrischer Geräte ist die Gas-in-Öl-Analyse (engl.: Dissolved Gas Analysis, DGA). Dabei wird eine Probe des Transformatoröls genommen, die in der Probe gelösten Gase extrahiert und anschließend Art und Konzentration der gelösten Gase bestimmt. Schließlich versucht man die Konzentrationen der gelösten Gase mit dem Zustand des Transformators in Beziehung zu bringen, um daraus eine geeignete Fehlerprognose ableiten zu können. Dazu wurden verschiedene Interpretationsschemata entwickelt, deren gemeinsames Ziel die Bestimmung eines Fehlertyps aus den DGA-Ergebnissen ist. In der vorliegenden Bewertungssystematik ist ein gängiges Interpretationsschema implementiert, welches sich auf Schlüsselgasquotienten unter Berücksichtigung von Grenzkonzentrationen der Schlüsselgase stützt [25]. Die Zusammenhänge sind in die Tabelle 3.7 aufgeführt.

Fehlerart	Fehler wenn				
	Schlüsselgasquotient	Wert		Schlüsselgas	Grenzkonzentration
Undichter Lastschalter	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	> 1	und	$C_2H_2$	> 20 ppm
Entladung	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	> 3	und	$C_2H_2$	> 20 ppm
Teilentladung	$\frac{H_2}{CH_4}$	> 3	und	$H_2$	> 100 ppm
Überhitzung	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	> 1	und	$C_xH_x$	> 1000 ppm
Zelluloseabbau	$\frac{CO_2}{CO}$	< 3 oder > 10	und	$CO_x$	> 10000 ppm

Tab. 3.7: Interpretationsschema von DGA-Ergebnissen

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe von Zahlenwerten der Gaskonzentrationen aus aktueller oder dokumentierter Ölgasanalyse. Liegt die letzte dokumentierte Analyse länger als 2 Jahre zurück, werden die Gaswerte als veraltet betrachtet und von der Systematik nicht mehr zur Bewertung herangezogen.

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach automatischer Berechnung der Schlüsselgasquotienten unter Berücksichtigung der Grenzkonzentrationen:

$$\begin{array}{ll} \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{bei Einhaltung der Grenzwerte} \\ \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{bei Überschreitung der Grenzwerte} \end{array} \quad (3.16)$$

*Normative Grundlagen:*

[25], DIN EN 60567 [26], DIN EN 60599 [27], Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Ölalterungsanalyse****Parameter: Neutralisationszahl***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Die Neutralisationszahl (Azidität) eines Isolieröls ist ein Maß für die sauren Bestandteile oder Verunreinigungen im Öl. Säuren und andere Oxidationsprodukte können die dielektrischen Eigenschaften des Öls beeinflussen und für den Abbau von Zellulosematerial oder die Korrosion von Metallteilen verantwortlich sein. Die Höhe des Aziditätsniveaus wird als allgemeiner Anhalt verwendet, um den Zeitpunkt für einen Austausch oder die Regeneration des Öls zu bestimmen. Bei einem Transformator mit einer Nennspannung von mehr als 170 kV gilt eine Neutralisationszahl von 0,15 mgKOH/g und größer als ungenügend. Für Nennspannungen zwischen 72,5 kV und 170 kV ist der Grenzwert 0,2 mgKOH/g, für Nennspannungen kleiner 72,5 kV liegt der Grenzwert bei 0,3 mgKOH/g.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe eines Zahlenwerts

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Es wird ein quadratischer Parameterverlauf angesetzt. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\text{Kennziffer} = \text{Neutralisationszahl} \cdot (555,6 \cdot \text{Neutralisationszahl} + 83,33)$$

für Nennspannungen < 72,5 kV

$$\text{Kennziffer} = 125 \cdot \text{Neutralisationszahl} \cdot (10 \cdot \text{Neutralisationszahl} + 1) \quad (3.17)$$

für Nennspannungen zwischen 72,5 kV und 170 kV

$$\text{Kennziffer} = 250 \cdot \text{Neutralisationszahl} \cdot (20 \cdot \text{Neutralisationszahl} - 1)$$

für Nennspannungen > 170 kV

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 60422 [21], DIN EN 62021-1 (Prüfverfahren) [28]

### **Parametergruppe: Ölalterungsanalyse**

**Parameter: Durchschlagsspannung**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Die Durchschlagsspannung ist ein Kennwert für die Eignung eines Öls, elektrischer Beanspruchung zu widerstehen. Trockenes und sauberes Öl besitzt eine hohe Durchschlagsspannung, ein niedriger Wert deutet daher auf die Verunreinigung des Öls durch Wasser oder Partikel hin. Bei einem Transformator mit einer Nennspannung von mehr als 170 kV gilt eine Durchschlagsspannung von weniger als 50 kV als ungenügend. Für Nennspannungen zwischen 72,5 kV und 170 kV ist der Grenzwert 40 kV, für Nennspannungen kleiner 72,5 kV liegt der Grenzwert bei 30 kV.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe eines Zahlenwerts

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Es wird ein linearer Parameterverlauf angesetzt. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\text{Kennziffer} = -25/16 \cdot \text{Durchschlagsspannung} + 121,875$$

für Nennspannungen < 72,5 kV

$$\text{Kennziffer} = -75/38 \cdot \text{Durchschlagsspannung} + 153,9475 \quad (3.18)$$

für Nennspannungen zwischen 72,5 kV und 170 kV

$$\text{Kennziffer} = -75/28 \cdot \text{Durchschlagsspannung} + 208,929$$

für Nennspannungen > 170 kV

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 60422 [21], DIN EN 60156 (Prüfverfahren) [29]

**Parametergruppe: Ölalterungsanalyse****Parameter: Verlustfaktor  $\tan \delta$** *Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Der dielektrische Verlustfaktor  $\tan \delta$  gibt Hinweise über die Höhe der im Betrieb auftretenden dielektrischen Verluste in der Isolierflüssigkeit. Er reagiert sehr empfindlich auf Verunreinigungen, Alterungsprodukten und Kolloiden im Öl. Diese Verluste können zu einer zusätzlichen Erwärmung und damit zu einer beschleunigten thermischen Alterung der Isolierflüssigkeit beitragen. Bei einem Transformator mit einer Nennspannung von mehr als 170 kV gilt ein Verlustfaktor von 0,2 und höher als ungenügend. Für Nennspannungen kleiner 170 kV liegt der Grenzwert bei 0,5.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe eines Zahlenwerts

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Es wird ein linearer Parameterverlauf angesetzt. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Kennziffer} &= \text{Verlustfaktor}/0,5 \cdot 75 && \text{für Nennspannungen} < 170 \text{ kV} \\ \text{Kennziffer} &= \text{Verlustfaktor}/0,2 \cdot 75 && \text{für Nennspannungen} > 170 \text{ kV} \end{aligned} \quad (3.19)$$

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 60422 [21], DIN EN 60247 (Prüfverfahren) [30]

**Parametergruppe: Furan-Analyse****Parameter: DP-Wert der Papierisolation (nach *de Pablo* und *Heisler*)***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Der Abbau der Papierisolation durch fortschreitende Alterung oder thermische Überlastung führt u. a. zur Bildung von 5 Furanen, die in einer Isolierölprobe nachgewiesen werden können. Die Bestimmung des Polymerisationsgrades (DP-Wert) von Furfurol (2-FAL) nach *de Pablo* oder *Heisler* erlaubt eine gute Abschätzung des Zustands des Papiers. Neuwertiges Papier hat einen DP-Wert von etwa 800 bis 1000. In einem DP-Bereich zwischen 600 und 200 besteht ein linearer Zusammenhang zwischen DP-Wert und mechanischer Festigkeit. Ein DP-Wert unter 200 gilt als ungenügend.



*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe der Furan-Konzentrationen und automatische Berechnung des DP-Werts der Papierisolation nach *de Pablo* und *Heisler*

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Es wird ein linearer Parameterverlauf angesetzt. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\text{Kennziffer} = -0,125 \cdot (1850 / (2,3 + 2\text{-FAL-Konzentration})) + 100 \quad (\text{de Pablo})$$

$$\text{Kennziffer} = 14,353 \cdot \ln(2\text{-FAL-Konzentration} / 80,379) + 97,388 \quad (\text{Heisler}) \quad (3.20)$$

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 61198 (Prüfverfahren) [31], [32], [33]

**Parametergruppe: Stufenschalter**

**Parameter: Typbedingte Erfahrungswerte Stufenschalter und Motorantrieb, Schaltungen seit letzter Inspektion**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Zur Bewertung des Stufenschalters als wichtigste Regelungskomponente werden typbedingte Erfahrungswerte zur Zuverlässigkeit bzw. Störungsanfälligkeit herangezogen. Eine weitere Beurteilungsgröße ist die Anzahl der seit der letzten Lastumschalterwartung getätigten Schaltungen, wofür ein Grenzwert von 70.000 Schaltungen angesetzt wird.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Kriterien „problemlos“, „störanfällig“, „kritisch“ zur Bewertung der Erfahrungswerte für Stufenschalter und Motorantrieb, manuelle Eingabe eines Zahlenwerts und automatische Berechnung der Schaltzahl

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung für die Erfahrungswerte (3.21), linearer Parameterverlauf für die Schaltzahlbewertung (3.22):

$$\text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} \quad \text{für „problemlos“}$$

$$\text{Kennziffer} = 67 \text{ (reparaturbedürftig)} \quad \text{für „störanfällig“} \quad (3.21)$$

$$\text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} \quad \text{für „kritisch“}$$

$$\text{Kennziffer} = (\text{aktuelle Schaltzahl} - \text{Schaltzahl letzte Wartung}) / 70000 \cdot 75 \quad (3.22)$$

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, Herstellerangaben

**Parametergruppe: Widerstandsmessungen**

**Parameter: Widerstandserhöhung, Fehlergrad aus Messprotokoll**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Mit der Widerstandsmessung werden Kontaktprobleme innerhalb des Transformators erkannt. Vor allem bei schwach belasteten Transformatoren kann sich an den Kontakten Ölkohle bilden, was nicht immer durch eine Gas-in-Öl-Analyse nachgewiesen werden kann. Die Beurteilung erfolgt hier qualitativ. Bei einer gemessenen Widerstandserhöhung der OS-, US- bzw. Tertiärseite wird anhand des Messprotokolls beurteilt, ob der ermittelte Fehlergrad kritisch oder unkritisch ist.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld zur Bewertung einer Widerstandserhöhung mit den Kriterien „vorhanden“ und „nicht vorhanden“; im Falle einer vorhandenen Widerstandserhöhung Auswahlfeld zur Beurteilung des Fehlergrads mit den Kriterien „kritisch“ und „unkritisch“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für Widerstandserhöhung „nicht vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für Widerstandserhöhung „vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 33 (ausreichend)	für Fehlergrad „unkritisch“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für Fehlergrad „kritisch“	(3.23)

*Normative Grundlagen:*

DIN IEC 60076-1 [34], Erfahrungswerte

**Parametergruppe: FDS-Messung**

**Parameter: Feuchte der Feststoffisolation**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Die dielektrische Spektroskopie im Frequenzbereich (FDS) gibt Auskunft über die Qualität einer Isolierung. Bei der FDS-Messung handelt es sich um eine Messung des Verlustfaktors  $\tan \delta$ . Der Unterschied zu herkömmlichen  $\tan \delta$ -Messungen liegt

im Frequenzbereich. Hier wird ein Frequenzspektrum von 0,1 mHz bis 1 KHz abgedeckt. Aus den gemessenen Kurvenverläufen kann die Feuchte in der Feststoffisolation ermittelt werden. Bei Transformatoren mit einer Nennspannung von 110 kV und weniger gilt eine Feuchteanteil von 3,5 % und mehr als ungenügend. Bei Nennspannungen von 110 bis 220 kV liegt der Grenzwert bei 3 %, für größere Nennspannungen bei 2,5 %.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Manuelle Eingabe eines Prozentwerts

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Es wird ein linearer Parameterverlauf angesetzt. Die Kennziffer wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\text{Kennziffer} = 30 \cdot (\text{Prozentwert Feuchteanteil} \cdot 100 - 1)$$

für Nennspannungen  $\leq 110$  kV

$$\text{Kennziffer} = 37,5 \cdot (\text{Prozentwert Feuchteanteil} \cdot 100 - 1)$$

(3.24)

für Nennspannungen zwischen 110 kV und 220 kV

$$\text{Kennziffer} = 50 \cdot (\text{Prozentwert Feuchteanteil} \cdot 100 - 1)$$

für Nennspannungen  $> 220$  kV

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 60422 [21], [35]

**Parametergruppe: Kurzschlussimpedanzen**

**Parameter:** Impedanzmessung bezogen auf Werks- bzw. Vormessung

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Netzkurzschlüsse oder Transporte stellen für einen Transformator eine hohe mechanische Belastung dar und können z. B. zu Beschädigungen an den Wicklungen führen, die ihrerseits einen Ausfall des Geräts zur Folge haben können. Die Kurzschlussimpedanzmessung gibt Aufschluss über den mechanischen Zustand des Transformators und ist daher ein wichtiges Kriterium für die Zustandsbeurteilung. Die Bewertung der Messwerte wird durch den Vergleich mit der Werkmessung (bzw. der garantierten Herstellerwerte) und den Abgleich mit zeitnah vorangegangenen Messungen vorgenommen. Dabei gilt eine Abweichung von mehr als 2,5 % im

Vergleich zu den Werksmesswerten sowie eine Abweichung von mehr als 0,5 % zur Vormessung als ungenügend.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld zur Bewertung der Messung bezogen auf die Werksmessung mit den Kriterien „Abweichung <2,5 %“ und „Abweichung  $\geq$ 2,5 %“, sowie bezogen auf die Vormessung mit den Kriterien „Abweichung <0,5 %“ und „Abweichung  $\geq$ 0,5 %

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für Abweichung <2,5 % bzw. <0,5 %	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für Abweichung $\geq$ 2,5 % bzw. $\geq$ 0,5 %	(3.25)

*Normative Grundlagen:*

DIN IEC 60076-1 [34], Erfahrungswerte

**c) Gefährdungspotential und Wichtigkeit**

Zum Abschluss der Transformatorenbewertung erfolgt die Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz. Die Kriterien sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und werden durch die in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 beschriebene Vorgehensweise bewertet.

	Parametergruppe	Einzelparameter
Gefährdungspotential	Personen- gefährdung	Gefahr durch Berührung der Peripherieinstallation oder durch Spannungsnahe
		Gefahr durch Berührungsspannung (beschädigte / mangelhafte Anbindung an Anlagenerdungsnetz)
		Besondere Gefahr durch evtl. vorhandene Löschanlagen
		Besondere Gefahr bei Auf- oder Abstieg
	Umweltgefährdung	Umweltgefährdung durch Ölundichtigkeiten
		Besondere Gefährdung durch Betrieb innerhalb Wasserschutz-zonen
		Gefährdung durch fehlenden Kleintierschutz

	Gesetzesverstoß	Falschdimensionierung Ölauffangeinrichtungen
		Verstoß gegen Aufbaurichtlinien
		Verstoß gegen BImSchG
Wichtigkeit		Wichtigkeit des Betriebsmittels im Netz

Tab. 3.8: Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Transformator

### 3.3.2 Sekundärtechnik

In Energieversorgungsnetzen werden unter dem Begriff Sekundärtechnik die Einrichtungen zusammengefasst, die der Messung, Steuerung, Überwachung und Regelung von primärtechnischen Komponenten wie Transformatoren oder Leistungsschaltern dienen. Häufig werden auch nachrichtentechnische Systeme (Telefonanlagen, Datenübertragungssysteme etc.) diesem Bereich der Hochspannungstechnik zugeordnet. Zur Bewertung der Sekundärtechnik stehen betriebsmittelspezifische Listen für alle Schutzgerätypen (Trafo- und Leitungsdifferentialschutz, Überstromzeitschutz, Sammelschienenschutz etc.) sowie eine Bewertungsliste zur Zustandsbeurteilung von zentraler und dezentraler Netzleittechnik zur Verfügung. Für nachrichtentechnische Komponenten existieren gesonderte Bewertungslisten. Im Folgenden wird exemplarisch die Betriebsmittelliste zur Bewertung eines Distanzschutzgeräts vorgestellt.

#### 3.3.2.1 Bewertungsliste Schutzeinrichtung

Ein sehr häufig in vermaschten Hochspannungsnetzen eingesetztes Prinzip für den Schutz von Leitungen ist der Distanzschutz. Dieser ist ein impedanz- und energierichtungsabhängiger Zeitstaffelschutz, dessen Kommandozeit mit größer werdender Entfernung zwischen Relaiseinbauort und Fehlerstelle stufig ansteigt. Durch einen Impedanzvergleich mit Richtungsentscheid kann eine Fehlerstelle lokalisiert und der betreffende Leitungsabschnitt selektiv vom Netz getrennt werden.

Ein Distanzschutz berechnet aus den durch Wandler bereitgestellten Leitungsspannungen und -strömen ständig die aktuelle Leitungsimpedanz und

vergleicht sie mit eingestellten Werten des fehlerfreien Betriebs. Im Falle eines Fehlers ändert sich die Leitungsimpedanz. Der gemessenen Fehlerimpedanz ist eine Auslösezeit zur Abschaltung des fehlerbehafteten Leitungsbereichs zugeordnet. Je nach Relaisstyp sind mehrstufige Kennlinien und somit auch mehrere Stufenzeiten einstellbar. In der Regel wird durch die erste Stufe der Kennlinie ungefähr 75 % der Leitungslänge zwischen zwei Stationen abgedeckt. Die anderen Stufen der Kennlinie decken Bereiche ab, die über die nächste Station hinweggehen, können also Fehler registrieren und auswerten, die u. U. auf anderen Leitungen liegen. Für die Anlagenteile, die hinter dem Leistungsschalter der Gegenstation liegen, stellt das Distanzschutzgerät somit einen Reserveschutz dar. Darüber hinaus stellt ein modernes Distanzschutzgerät noch weitere Funktionen bereit, deren Zustände in der nachfolgend vorgestellten Bewertungsliste beurteilt werden können.

#### **a) Grunddatenerfassung**

Im Grunddatenfeld einer Distanzschutzbewertungsliste werden neben den obligatorischen Identifikationsgrößen (Eigentümer, Standort, Bezeichnung des geschützten Betriebsmittels etc.) auch Eingangsdaten erfasst, welche bereits zustandsrelevanten Charakter haben bzw. in Formeln zur Berechnung von Einzelparameterkennziffern berücksichtigt werden. In der nachfolgenden Aufstellung werden die wichtigsten Eingangsgrößen aufgeführt und ihre Bedeutung kurz beschrieben.

<b>Kriterium</b>	<b>Eingabe als</b>	<b>Bedeutung für</b>
Baujahr	Jahreszahl	Bewertung Alter
Gerätebezeichnung und Seriennummer	Text oder Zahlenwert	Bewertung betriebsmittelspezifischer Erfahrungswert
Softwarestand (bei digitalem Schutzgerät)	Versionsbezeichnung	Bewertung Geräteaktualität, evtl. Funktionsumfang und Serviceabkündigung
Gerätegeneration	Vorgabewert aus Auswahlliste (digital, analog-statisch, elektromechanisch)	Bewertung Anzeigefunktionen (LEDs, Fallklappen etc.) und Verbindung zu externen Störschreibern

Fernüberwachung vorhanden ?	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Bewertung Anzeigefunktionen (LEDs, Fallklappen etc.)
Datum letzter Batteriewechsel	Datumswert	Bewertung Batteriezustand

Tab. 3.9: Grunddatenerfassung Distanzschutzgerät, wichtigste Kriterien

Weiterhin besteht noch die Möglichkeit zur Angabe informativer Werte wie Schutzfunktion oder Versorgungsspannung.

### **b) Technische Bewertung**

Zur technischen Zustandsbeurteilung eines Distanzschutzgeräts werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Parametergruppen untersucht. Ihr Einfluss auf den Gesamtzustand wird durch die angegebenen Gruppengewichtungsfaktoren ausgedrückt. Zudem werden die jeweils wichtigsten Einzelparameter mit ihren individuellen Gewichtungsfaktoren innerhalb einer Gruppe aufgelistet. Es ist der am wenigsten wichtigen Parametergruppe der Gewichtungsfaktor 1 zugeordnet. Analog wird bei der Gewichtung der Einzelparameter innerhalb einer Gruppe vorgegangen.

Parametergruppe	Gewichtungen Parametergruppe	Wichtigste Einzelparameter	Gewichtungen Einzelparameter innerhalb der Gruppe
Betriebsjahre	1	Betriebsjahre	1
Letzter Batteriewechsel	1	Letzter Batteriewechsel	1
Vorbereitung und Sichtkontrolle	1	Vergleich Originaldatei, Relais-Einstellblatt mit Schutzeinstellungen vor Ort	10
		Typbedingter Erfahrungswert (z.B. bekannte Auswirkungen von Bauteilalterung)	5
		Kontrolle LEDs, Fallklappen und Leuchtanzeigen	variabel 1 - 5

Erste elektrische Prüfung	2	Funktion bei Anforderung (simulierter Fehler 1. Impedanzstufe)	10
Geräteprüfung	2	Überstromanregung ( $I >$ )	10
		Ansprechwerte und Auslösezeiten aller Impedanzstufen	10
		Prüfung Mitnahmefunktion	10
		Kopplung zum Sammelschienenschutz	8
		Not-UMZ-Betrieb	7
		Funktionsprüfung automatische Wiedereinschaltung	6
Peripherieprüfung	2	Auslösekreise zum Leistungsschalter	10
		Melde- und Steuerwege zu den leittechnischen Unterstationen	8

Tab. 3.10: Technische Bewertung Distanzschutzgerät, Parametergruppen und Einzelparameter

Im Folgenden werden die wichtigsten der in Tabelle 3.10 aufgeführten Bewertungsparameter näher beschrieben.

**Parametergruppe: Vorbereitung und Sichtkontrolle**

**Parameter: Vergleich Originaldatei, Relaisinstallblatt mit Schutzeinstellungen vor Ort**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Bei Änderungen der Netztopologie sind zumeist auch Anpassungen der Schutzeinrichtungen hinsichtlich ihrer Einstellwerte erforderlich. Werden diese am Schutzgerät durchgeführt, aber nicht entsprechend dokumentiert, kann es bei Schutzprüfungen zu Verfälschungen der Ergebnisse und zu Einschränkungen der Schutzfunktion kommen. Daher ist der Abgleich der dokumentierten und eingestellten Kennwerte ein zwar einfaches, aber wichtiges Bewertungskriterium.



*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“, „im Toleranzbereich“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{für „nicht in Ordnung“} \\
 \text{Kennziffer} = 67 \text{ (reparaturbedürftig)} & \text{für „im Toleranzbereich“} \\
 \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{für „in Ordnung“}
 \end{array} \quad (3.26)$$

*Normative Grundlagen:*

[36], [37]

### **Parametergruppe: Vorbereitung und Sichtkontrolle**

**Parameter:** Typbedingter Erfahrungswert

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Expertenwissen, die Auswertung von Störungsstatistiken und der Informationsaustausch mit Herstellern bilden die Grundlage zur Angabe von Erfahrungswerten zu bestimmten Schutzgerättypen. So sind bei einigen digitalen Schutzgeräten - anhand der Gerätebezeichnung und Seriennummer identifizierbar - Alterungserscheinungen bestimmter Bauteile bekannt.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „problemlos“, „störanfällig“ oder „kritisch“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{für „problemlos“} \\
 \text{Kennziffer} = 33 \text{ (ausreichend)} & \text{für „störanfällig“} \\
 \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{für „kritisch“}
 \end{array} \quad (3.27)$$

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, Herstellerangaben

**Parametergruppe: Vorbereitung und Sichtkontrolle****Parameter: Kontrolle LEDS, Fallklappen und anderer Leuchtanzeigen***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Bei modernen Stationsleittechniksystemen werden die Betriebszustände und Funktionen der Schutzgeräte durch Fernüberwachungs- und Notmeldesysteme kontinuierlich überprüft. Ist ein solches System vorhanden, ist die Funktionsfähigkeit der am Schutzgerät selbst befindlichen Meldeeinrichtungen wie LEDS, Störfallklappen oder Leuchtanzeigen zwar eine gerätezustandsrelevante Größe, aber nicht besonders wichtig. Existiert ein derartiges Fernüberwachungs- und Notmeldesystem allerdings nicht, so sind die Meldeeinrichtungen am Schutzgerät die einzigen Möglichkeiten zur Betriebszustandskontrolle und deren Funktionsfähigkeit somit von hoher Wichtigkeit.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{für „nicht in Ordnung“} \\
 \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{für „in Ordnung“}
 \end{array} \quad (3.28)$$

*Normative Grundlagen:*

[36], [37]

**Parametergruppe: Erste elektrische Prüfung****Parameter: Funktion bei Anforderung***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Ein entscheidendes Kriterium zur Bewertung eines Schutzgeräts stellt die sog. erste elektrische Prüfung dar, bei der durch die Simulation eines Fehlers (z. B. ein Kurzschluss auf einer zu schützenden Leitung) die generelle Funktionsfähigkeit des Schutzgeräts geprüft wird. Die Funktionskontrolle dieses Bewertungsparameters ist Bestandteil einer jeden Schutzprüfung und wird bei einem Distanzschutzgerät durch einen auslösewirksamen Fehler in der ersten eingestellten Impedanzstufe vorgenommen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{array}{ll} \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{für „nicht in Ordnung“} \\ \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{für „in Ordnung“} \end{array} \quad (3.29)$$

*Normative Grundlagen:*

[36], [37]

### **Parametergruppe: Geräteprüfung**

**Parameter:** Überstromanregung ( $I>$ ), Messung der Impedanzstufen, Prüfung Mitnahmefunktion

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Die Überstromanregung ist als einfachstes Kriterium zur Kurzschlusserkennung eine Anregeart, die sowohl bei elektromechanischen als auch bei analog-statischen und digitalen Schutzgeräten angewendet wird. Die Prüfung dieser Anregeart stellt daher ein allgemeingültiges Zustandskriterium für alle Schutzgerätgenerationen dar. Bei der Überstromanregung wird ein Distanzrelais ab einem bestimmten Strom aktiviert (Ansprech- oder Anregewert) und geht bei Unterschreitung eines Wertes (Rückfallwert) in den Ruhezustand. Dieser Schwellenwertentscheid wird leiterbezogen (inkl. Null-Anregung) geprüft. Ein weiteres Zustandskriterium ist die Messung aller verwendeten Impedanzstufen (inkl. Übergreifstufe) hinsichtlich der eingestellten Ansprechwerte und Auslösezeiten für ein- und mehrpolige Fehler. Existiert zwischen den einzelnen Schutzrelais eine Signalübertragung, kann zudem das sog. Mitnahmeverfahren zum Einsatz kommen. Dabei schaltet ein in Schnellzeit auslösender Leistungsschalter auch den der Gegenseite aus, so dass beide Leitungsenden in Schnellzeit abgeschaltet werden. Das Verfahren birgt die Gefahr von Fehlauflösungen bei falsch empfangenen Signalen und muss deshalb auf jeden Fall bewertet werden, wenn es verwendet wird.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“, „im Toleranzbereich“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht in Ordnung“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „im Toleranzbereich“	(3.30)
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „in Ordnung“	

*Normative Grundlagen:*

[37], [38], [39]

**Parametergruppe: Geräteprüfung****Parameter: Funktionsprüfung automatische Wiedereinschaltung (AWE)***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Etwa 90 % aller Kurzschlüsse in Freileitungsnetzen sind kurzzeitige Störlichtbogenkurzschlüsse. Daraus ergibt sich die Grundidee der automatischen Wiedereinschaltung (AWE): Nach einer Schutzauslösung in Schnellzeit wird nach Anlauf einer Pausenzeit einmal automatisch wiedereingeschaltet. Ist dann der Fehler noch vorhanden, wird endgültig ausgeschaltet, anderenfalls wird der Betrieb fortgesetzt. Die AWE-Funktion ist bei fast allen Distanzschutzgeräten implementiert, wird anhand mehrerer Szenarien (erfolgreiche und erfolglose AWE) geprüft und liefert einen Beitrag zur Zustandsbewertung.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“, „im Toleranzbereich“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht in Ordnung“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „im Toleranzbereich“	(3.31)
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „in Ordnung“	

*Normative Grundlagen:*

[37], [38], [39]

**Parametergruppe: Peripherieprüfung****Parameter: Auslösekreise zum Leistungsschalter***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Damit im Fehlerfall auch die Abschaltung des zu schützenden Betriebsmittels initiiert werden kann, kommt der einwandfreien Funktion der Auslösekreise zum Leistungsschalter eine herausragende Bedeutung zu. Diese Auslösekreise sind redundant ausgeführt und müssen sowohl separat als auch zeitgleich schaltbar sein. Zudem werden über die Auslösekreise die Fehlerabläufe protokolliert und entsprechende Meldungen abgesetzt.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{array}{ll} \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{für „nicht in Ordnung“} \\ \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{für „in Ordnung“} \end{array} \quad (3.32)$$

*Normative Grundlagen:*

[38], [39], [40]

**c) Gefährdungspotential und Wichtigkeit**

Zum Abschluss der Distanzschutzbewertung erfolgt die Beurteilung des betriebsmittelspezifischen Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz. Die Kriterien sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und werden durch die in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 beschriebene Vorgehensweise bewertet.

	Parametergruppe	Einzelparameter
Gefährdungspotential	Personen- gefährdung	Gefahr durch Berührungsspannung benachbarter Betriebsmittel
		Gefahr durch lockere Klemmen (evtl. hohe Berührungsspannungen im Stromwandlerkreis)
		Gefahr durch Kurzschlüsse an Klemmen (kann zur explosionsartigen Zerstörung des Spannungswandlers führen)
		Gefahr durch Berührungsspannung an der Schutzeinrichtung (z. B. unbedeckte Klemmleiste)
	Umweltgefährdung	keine
	Gesetzesverstoß	Einhaltung Aufbaunormen
Einhaltung Umgebungsnormen		
Wichtigkeit		Wichtigkeit des geschützten Betriebsmittels im Netz
		Wichtigkeit durch erhöhte Anforderungen an Redundanz
		Wichtigkeit durch erhöhte Anforderungen an Selektivität

Tab. 3.11: Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Distanzschutz

### 3.3.3 Überblick über alle vorliegenden Bewertungslisten

In den vorangegangenen Kapiteln wurden aus Platzgründen nur einige ausgewählte Bewertungslisten für Hochspannungsbetriebsmittel im Detail vorgestellt. Ein besonderes Merkmal der vorliegenden Bewertungssystematik ist die Existenz eines vollständigen Katalogs von standardisierten Bewertungslisten für alle Betriebsmittel der Hochspannungstechnik, welcher die Grundlage zur Zustandsbewertung von Betriebsmittelgruppen und Systemen darstellt. Eine Aufstellung aller vorhandenen Bewertungslisten zeigt die folgende Tabelle.

Bereich der Hochspannungstechnik	Vorhandene Bewertungslisten für	Bemerkungen
Primärtechnik	Transformatoren	
	Leistungsschalter	Muster- und typspezifische Listen für Druckluft-, Federspeicher- und Hydraulikleistungsschalter
	Trenner	Typspezifische Listen für Dreh-, Druckluftlast-, Einsäulen-, Erdungs- und Schwenklasttrennschalter
	Wandler	
	Gasisolierte Schaltanlagen	
Sekundärtechnik	Schutzgeräte	Typspezifische Listen für Distanz-, Sammelschienen-, Trafodifferential-, Leitungsdifferential-, Frequenz- und Überstromzeitschutzgeräte
	Stationsleittechnik	
Nachrichtentechnik	Übertragungstechnik	
	Telefontechnik	
	Fernmeldekabel	Bewertung Spezialkabel für hochbitratige Datenübertragung in Bewertungsliste „Technische Gebäude“
	Funktechnik	
Hochspannungsleitungen und -kabel	Abspannmasten	
	Tragmasten	
	Hochspannungskabel	
Stromversorgung	Gleich- und Wechselrichter	
	Batterien	
Infrastruktur	Technische Gebäude und Außenanlagen	
Betriebskonzept	Technische Betriebsführung	

Tab. 3.12: Vorhandene Bewertungslisten für Hochspannungsbetriebsmittel

## 4 Analyse- und Auswertungsverfahren

Die in Kapitel 3 ausführlich vorgestellten standardisierten Bewertungslisten mit den darin durchführbaren Beurteilungen zustandsrelevanter Geräteparameter bilden die Grundlage und Datenbasis zur Ermittlung einer Zustandsaussage für ein Hochspannungsbetriebsmittel. Im nächsten Schritt werden die durch normierte Kennziffern dargestellten Einzelparameterbewertungen mit Hilfe geeigneter Berechnungsvorschriften zusammengefasst und in eine Gesamtzustandsbeurteilung für das untersuchte Gerät überführt. Zudem werden differenzierte Aussagen zu weiteren zustandsrelevanten Aspekten wie technischer Handlungsbedarf, Dringlichkeit einer Instandhaltungsmaßnahme oder Unsicherheit des Bewertungsergebnisses generiert. Weiterhin können Gesamtzustandsbewertungen einzelner Betriebsmittel mit Hilfe einer übergeordneten Systematik weiterverarbeitet werden, so dass letztendlich Zustandsaussagen zu Betriebsmittelgruppen oder Systemen möglich sind.

Die dazu entwickelten, auf alle Bewertungslisten anwendbaren Analyse- und Auswertungsverfahren werden in diesem Kapitel beschrieben. Insbesondere wird hier auf die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Ermittlung eines technischen Gerätezustands eingegangen (heuristisch / deterministisches und Evidenztheorieverfahren) und die Methodik zur Zusammenfassung von Einzelbewertungen vorgestellt. Der letzte Teil dieses Abschnitts widmet sich der Beschreibung der zusätzlichen Auswertungsfunktionen (z. B. zur automatisierten Berichtserstellung).

### 4.1 Auswertung der Prüfparameter und Bildung von Zustandskennziffern mit Hilfe des heuristisch / deterministischen Verfahrens

In Kapitel 2.3 wurden bereits die Grundzüge des heuristisch / deterministischen Verfahrens (abgekürzt: HD-Verfahren) zur Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln skizziert. In den folgenden Abschnitten werden diese Grundzüge präzisiert und die Berechnungsmethoden für die verschiedenen Zustandsaussagen detailliert vorgestellt.



### 4.1.1 Bewertungsmodell

Die vorliegende Bewertungssystematik verwendet ein Modell, dessen Ablaufschema in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.

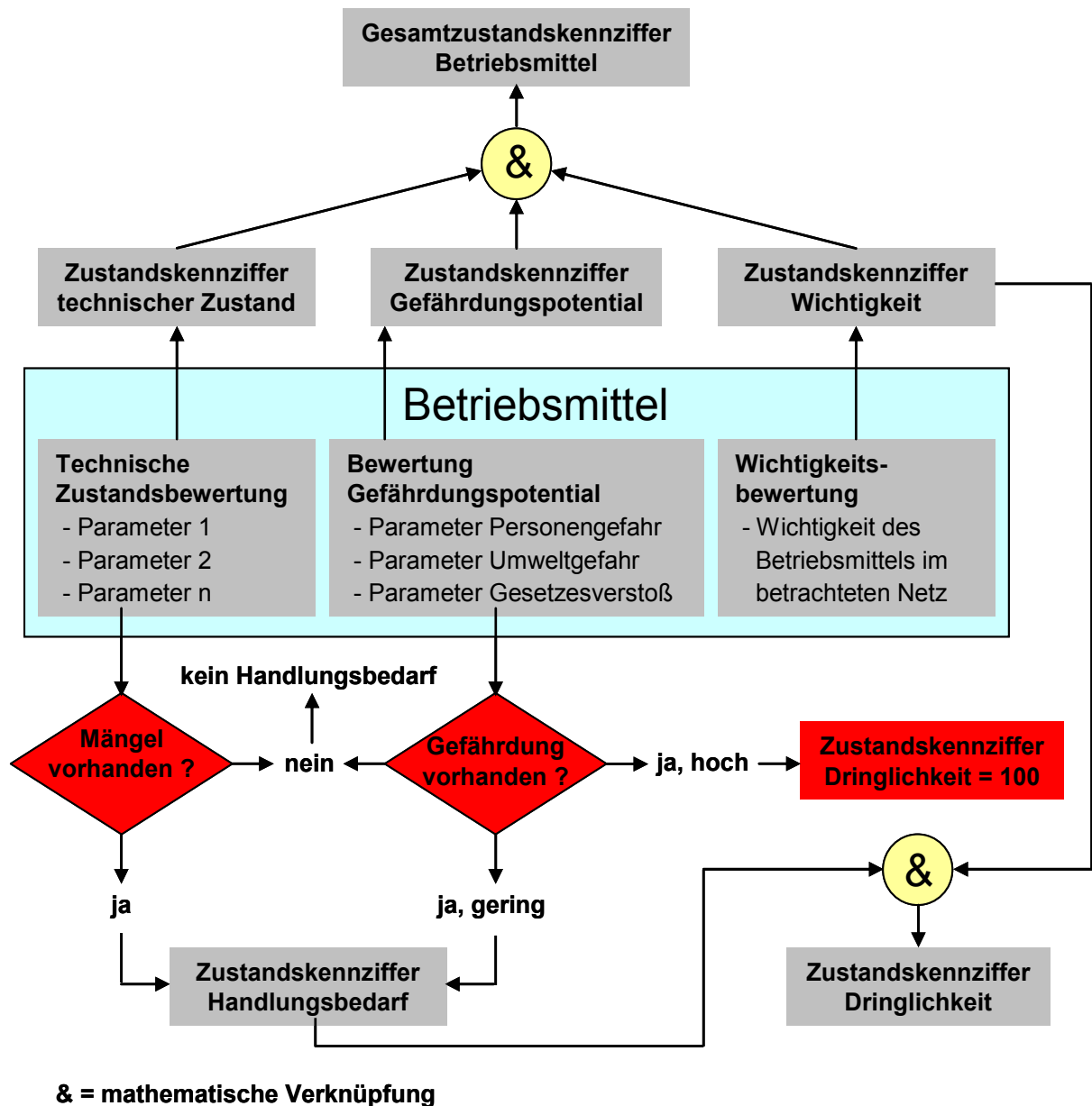


Abb. 4.1: Schematische Darstellung Bewertungsmodell

Das Modell verfolgt zwei Hauptziele, aus denen sich weitere Konsequenzen für die Instandhaltung bzw. Instandsetzung eines Betriebsmittels ableiten lassen, und zwar

- die Berechnung einer Gesamtzustandskennziffer durch die mathematische Verknüpfung der ermittelten Zustandskennziffern für den technischen Zustand, das Gefährdungspotential und die Wichtigkeit des Betriebsmittels,
- die Berechnung einer Kennziffer für die Dringlichkeit einer Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahme als mathematische Verknüpfung aus ermitteltem technischen Handlungsbedarf und Wichtigkeit des Betriebsmittels oder als Folge einer festgestellten hohen Gefährdung.

Die Gesamtzustandskennziffer liefert die umfassendste Zustandsaussage, da mit den Bewertungsergebnissen des technischen Zustands, des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit des Betriebsmittels alle drei Hauptzustandsaspekte einfließen. Sie dient vornehmlich der Ermittlung einer Qualitätsrangfolge der untersuchten Betriebsmittel und gibt durch den Kennziffernvergleich mit ebenfalls untersuchten Geräten einen ersten Hinweis darauf, bei welchen Betriebsmitteln der grundsätzliche Bedarf für Maßnahmen deutlicher oder weniger deutlich ausgeprägt ist. Anders ausgedrückt: Hat ein Gerät A eine höhere Gesamtzustandskennziffer als Gerät B, dann sind bei Gerät A eine größere Anzahl oder gravierendere Mängel festgestellt worden als bei Gerät B. Die Gesamtkennziffer liefert allerdings keine Aussage darüber, wie dringlich Maßnahmen an einzelnen Betriebsmitteln aufgrund der individuell ermittelten Mängel durchzuführen sind. Gemäß der weitreichenden Standardisierungsvorgaben (siehe Kapitel 2.3.4 und 3.2.1) wird die Gesamtzustandskennziffer in allen Bewertungslisten und Auswertungsroutinen immer gleich berechnet. Ihr Hauptnutzen besteht also darin, mehrere untersuchte Geräte (auch aus unterschiedlichen Betriebsmittelgruppen) miteinander vergleichbar zu machen und Entscheidungshilfen zur bedarfsgerechten Verteilung eines Instandhaltungsbudgets bereitzustellen. Haben z. B. primärtechnische Betriebsmittel durchweg eine höhere Gesamtzustandskennziffer als sekundärtechnische Geräte, so kann dieser Umstand für einen Asset-Verantwortlichen eine Entscheidungshilfe sein, den größeren Anteil eines zu verteilenden Betriebsbudgets der Instandhaltung der Primärtechnik zur Verfügung zu stellen.

Die Betrachtung einer Gesamtzustandskennziffer ist aber für die individuelle Beurteilung eines Betriebsmittels alleine nicht ausreichend. So ist es grundsätzlich möglich, dass eine Gesamtkennziffer ein Betriebsmittel durch die mathematische Zusammenfassung aller Prüfwerte insgesamt als gut oder noch ausreichend

beurteilt, obwohl einzelne (eventuell besonders wertwichtige) Betriebsparameter als ungenügend oder reparaturbedürftig klassifiziert wurden bzw. eine Erhöhung des Gefährdungspotentials begründen. Die Bewertung eines Geräts ausschließlich durch die Gesamtkennziffer kann daher u. U. ungenügend aussagekräftig sein. Daher werden in einem zweiten Schritt die schlecht beurteilten Parameter identifiziert und explizit ausgewiesen, um gezielt einzelne Maßnahmen anstoßen zu können. Der so ermittelte technische Handlungsbedarf wird ebenfalls in Form einer normierten Kennziffer ausgewiesen. Verknüpft mit der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz wird dann für diese Einzelmaßnahme eine Dringlichkeit definiert.

Im Bewertungsmodell nach Abbildung 4.1 ist die Dringlichkeit einer Maßnahme nicht vom Gesamtzustand, sondern von der Bedeutsamkeit konkret ermittelter Mängel abhängig. Es ist eine Maßnahme umso dringlicher, je gravierender ein festgestellter Mangel und je wichtiger das Betriebsmittel ist, die Gesamtzustandskennziffer liefert nur eine Qualitätsrangfolge der untersuchten Betriebsmittel. Eine Besonderheit stellt die differenzierte Bildung der Dringlichkeitskennziffer bei einem vorhandenen Gefährdungspotential dar. Auf diese Besonderheit wird in Kapitel 4.1.3 näher eingegangen.

Es lässt sich letztendlich so auch eine differenzierte Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsplanung realisieren. Geräte mit hohen Dringlichkeitskennziffern müssen kurzfristig instand gesetzt werden, die Qualitätsrangfolge ist eher die Grundlage einer mittel- bis langfristigen Instandhaltungsplanung.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Berechnungsvorschriften näher beschrieben, welche den in Abbildung 4.1 aufgeführten Zustandskennziffern zugrunde liegen.

#### **4.1.2 Technischer Gesamtzustand**

Wie bereits erwähnt wird der technische Gesamtzustand eines Betriebsmittels in der vorliegenden Bewertungssystematik auf zwei Arten berechnet, einmal mit dem Evidenztheoriemodell und zum anderen im Rahmen des HD-Verfahrens. Im letztgenannten Verfahren wird die Gesamtkennziffer für den technischen

Betriebsmittelzustand ( $TGK$ ) in allen Bewertungslisten durch die Gleichung (3.1) unter Zuhilfenahme der Gleichungen (3.2) bis (3.5) berechnet.

Wie alle Kennziffern ist auch die des technischen Gesamtzustands auf den Wertebereich zwischen 0 (= optimal / neuwertig) und 100 (= ungenügend) normiert. Die Standardisierungen zur tabellarischen und graphischen Darstellung des technischen Gesamtzustands (siehe auch Abb. 3.2) sowie zur textlichen Übersetzung der Kennziffer wurden bereits in Kapitel 3.1.2 behandelt.

#### **4.1.3 Gefährdungspotential und Einhaltung von Richtlinien und gesetzlichen Vorgaben**

Als Ergebnis der Bewertung gefährdungsrelevanter Kriterien wird für jedes Betriebsmittel ein Gesamtgefährdungspotential in Form einer auf den Wertebereich zwischen 0 und 100 normierten Kennziffer ausgegeben. Die Bestandteile einer solchen Untersuchung und die Vorgehensweise zur Bewertung der potentiellen Gefährdungskriterien wurden bereits in Kapitel 3.1.3 im Detail beschrieben. Der Berechnung des Gesamtgefährdungspotentials liegen folgende Festlegungen zugrunde:

- Die Gefährdungsklassen (d. h. die Parametergruppen) „Personengefahr“, „Umweltgefahr“ und „Gesetzesverstoß“ werden als gleichwertig betrachtet.
- Das höchste ermittelte Gefährdungspotential aus allen Gefährdungsklassen bestimmt maßgeblich das Gesamtgefährdungspotential.
- Alle Gefährdungsklassen finden anteilmäßig Berücksichtigung im Gesamtgefährdungspotential.

Auf der Grundlage dieser Festlegungen wird die Kennziffer des Gesamtgefährdungspotentials ( $GGK$ ) nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt. Es seien  $M_{PG}$ ,  $M_{UG}$  und  $M_{GV}$  die Mengen aller ermittelten Einzelkennziffern der Parametergruppen „Personengefahr“, „Umweltgefahr“ und „Gesetzesverstoß“, dann gilt:

$$GGK = \max \left( \begin{array}{l} GV + (100 - GV) \cdot \frac{(PG + UG)}{200}; \\ PG + (100 - PG) \cdot \frac{(GV + UG)}{200}; \\ UG + (100 - UG) \cdot \frac{(GV + PG)}{200} \end{array} \right) \quad \text{mit} \quad (4.1)$$

$$GV = \max (M_{GV})$$

$$PG = \max (M_{PG})$$

$$UG = \max (M_{UG})$$

Die Gleichung (4.1) lässt sich in Worten folgendermaßen interpretieren: Es werden drei Gleichungen gebildet, in denen jeweils eine der maximalen Einzelkennziffern aus jeder Parametergruppe den „führenden“ Summanden darstellt ( $GV$ ,  $PG$  und  $UG$  im linken Teil der großen Klammer). Die jeweils anderen Maxima aus den übrigen Parametergruppen gehen als normierter Anteil und zweiter Summand in die Gleichungen ein. Es lassen sich so drei Werte berechnen, von denen der größte Wert als Kennziffer für das Gesamtgefährdungspotential ausgewiesen wird. Diese Berechnungsvorschrift gewährleistet, dass das am schlechtesten (d. h. am gefährlichsten) bewertete Kriterium den Hauptanteil am Gesamtgefährdungspotential einnimmt, ohne das eventuell vorhandene weitere Gefährdungszustände komplett vernachlässigt werden.

Ein ermitteltes Gefährdungspotential oder eine tatsächliche Gefährdung hinsichtlich Personen- / Umweltgefährdung oder der Verletzung gesetzlicher Vorgaben wird in der vorliegenden Bewertungssystematik differenziert verarbeitet. Ausgehend von der Überlegung, dass bei Gefahr für Leib und Leben, bei hoher Umweltgefährdung oder bei eklatanten Gesetzesverstößen ein Aufschub nicht geduldet werden kann, wird automatisch die maximale Dringlichkeit (Kennziffer = 100) zur Initiierung von Instandsetzungsmaßnahmen generiert, wenn nach Gleichung (4.1) eine mittlere oder hohe Gefährdungskennziffer ausgewiesen wird. Ein als vorhanden, aber gering klassifiziertes Gefährdungspotential wird innerhalb der Zustandskennziffer für den technischen Handlungsbedarf verarbeitet. Wird kein Gefährdungspotential ermittelt, ist logischerweise auch kein diesbezüglicher Handlungsbedarf gegeben.

#### 4.1.4 Wichtigkeit des Betriebsmittels im Netz

Der Beurteilung der Wichtigkeit eines Betriebsmittels in einem Hochspannungsnetz können sowohl technische als auch wirtschaftliche oder unternehmensstrategische Kriterien zugrunde liegen. Ist beispielsweise eine technische Funktion mit Hilfe eines Zweitwegs oder eines stand-by-geschalteten Ersatzgeräts redundant gesichert, so ist ein Betriebsmittel eines solchen Redundanzsystems technisch weniger wichtig als ein entsprechendes Einzelgerät, welches die gleiche technische Funktion ausführt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Betriebsmittel, dessen Ausfall z. B. aufgrund vertraglicher Vereinbarungen finanzielle Konsequenzen (Konventionalstrafen, Ausfallentschädigungen etc.) zur Folge hätte, wichtiger als ein entsprechendes Betriebsmittel, für das keine derartigen Vertragsvereinbarungen existieren. In der vorliegenden Bewertungssystematik erfolgt die Wichtigkeitsbeurteilung analog zur Ermittlung des technischen Zustands und wurde bereits in Kapitel 3.1.4 näher beschrieben. Die Gesamtkennziffer für die Wichtigkeit eines Betriebsmittels (*WGK*) wird in allen Bewertungslisten nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$WGK = \frac{\sum_{j=1}^m b_j \cdot EK_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \quad \text{mit} \quad (4.2)$$

$m$  = Anzahl der Einzelparameter innerhalb der Kriteriengruppe „Wichtigkeit“

$b_j$  = Gewichtungsfaktoren der Einzelparameter

$EK_j$  = Zustandskennziffern der Einzelparameter

Wie in Kapitel 3.1.4 erwähnt ist die Gesamtkennziffer der Wichtigkeit auf den Wertebereich zwischen 10 (= keine besondere Wichtigkeit) und 100 (= hohe Wichtigkeit) normiert.

#### 4.1.5 Technischer Handlungsbedarf

In der vorliegenden Bewertungssystematik ist der technische Handlungsbedarf so definiert, dass eine Handlungsnotwendigkeit schon dann besteht, wenn bei der technischen Betriebsmittelprüfung bereits ein einziger der zustandsrelevanten Parameter als nicht optimal bewertet wurde. Diese strenge Auslegung gewährleistet, dass ein Mangel, sei er noch so geringwertig, unabhängig von seiner Qualität in jedem Fall identifiziert wird. Realisiert wird dieser Grundsatz dadurch, dass in der Ergebniszusammenfassung der Bewertungsliste (siehe Abb. 3.2) der Maximalwert aller Zustandskennziffern der Einzelparameter ( $EK_j$  aus Gleichung (3.2)) ausgewiesen wird. Mathematisch ausgedrückt: Ist  $M$  die Menge aller bei der technischen Betriebsmittelbewertung ermittelten Zustandskennziffern der Einzelparameter, so gilt für den technischen Handlungsbedarf ( $TH$ )

$$TH = \max(M) \quad \text{mit} \quad M = \{EK_1, EK_2, \dots, EK_j\}$$

$j = \text{Anzahl der bewerteten Einzelparameter}$  (4.3)

Durch die Normierung der Einzelparameterkennziffern ist automatisch auch die Kennziffer für den technischen Handlungsbedarf auf den Wertebereich zwischen 0 und 100 beschränkt und erfüllt so die allgemeinen Standardisierungsanforderungen. Die ermittelte Kennziffer wird auch durch ein textliches Urteil ausgedrückt. Dazu ist der gesamte Wertebereich in vier äquidistante Abschnitte aufgeteilt und der technische Handlungsbedarf durch die Formulierungen „kein“ (0-25), „gering“ (25-50), „mittel“ (50-75) und „hoch“ (75-100) verdeutlicht.

Die Angabe eines einzelnen Maximalwerts lässt allerdings nur eine unvollständige Zustandabschätzung zu - und zwar die, ob überhaupt (mindestens) ein massiver Mangel und damit hoher Handlungsbedarf vorliegt oder allenfalls geringwertige Schäden ermittelt wurden. Gleichung (4.3) liefert keine Information darüber, wie oft der Maximalwert für den technischen Handlungsbedarf im Bewertungsteil der Liste erreicht wurde. Man weiß also zunächst nicht, ob das Betriebsmittel nur einen oder mehrere Mängel der gleichen Qualität aufweist. Zur Lösung dieses Problems ist eine Zusatzfunktion in die Bewertungslisten implementiert. Diese überprüft alle errechneten Zustandskennziffern der Einzelparameter dahingehend, ob ihr Wert größer als 50 ist und somit der entsprechende Parameter als „reparaturbedürftig“

oder „ungenügend“ beurteilt wird. Das Ergebnis dieser Prüfung ist eine Mängelliste, die sowohl einen umfassenden Überblick über alle nennenswerten Schäden des Betriebsmittels liefert als auch eine Abschätzung über das gesamte Ausmaß des technischen Handlungsbedarfs ermöglicht.

#### 4.1.6 Dringlichkeit einer Maßnahme

Wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erwähnt hängt die Dringlichkeit einer Maßnahme vom technischen Handlungsbedarf und somit von der Bedeutsamkeit eines ermittelten Mangels ab. Beim in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Sonderfall einer als besonders hoch ermittelten Gefährdung wird die Dringlichkeitskennziffer automatisch auf den Maximalwert 100 gesetzt. Im Regelfall wird die Zustandskennziffer (*DGK*) durch die Verknüpfung des technischen Handlungsbedarfs (*TH* in Gleichung (4.3)) mit der Wichtigkeit des Betriebsmittels (*WGK* in Gleichung (4.2)) nach folgender einfacher Gleichung berechnet:

$$DGK = \frac{TH \cdot WGK}{100} \quad (4.4)$$

Durch den Normierungsfaktor 100 ist die Gesamtkennziffer für die Dringlichkeit auf den Wertebereich zwischen 0 und 100 beschränkt und erfüllt so die allgemeinen Standardisierungsanforderungen. Die ermittelte Kennziffer wird auch durch ein textliches Urteil ausgedrückt. Dazu ist der gesamte Wertebereich in vier äquidistante Abschnitte aufgeteilt und die Dringlichkeit durch die Formulierungen „sehr gering“ (0-25), „gering“ (25-50), „mittel“ (50-75) und „hoch“ (75-100) ausgedrückt.

#### 4.1.7 Gesamtzustandskennziffer

Die Gesamtzustandskennziffer eines Betriebsmittels ist die Verknüpfung aller Bewertungsergebnisse (technischer Zustand, Gefährdungspotential und Wichtigkeit) zu einer zentralen Kenngröße, die einerseits eine globale Zustandsabschätzung ermöglicht, vor allem aber die Vergleichbarkeit mit den Bewertungsergebnissen



anderer Betriebsmittel gewährleistet. In allen Bewertungslisten wird die Gesamtzustandskennziffer (*GZK*) nach folgender allgemeiner Vorschrift berechnet:

$$GZK = \frac{(a \cdot TGK + b \cdot GGK) \cdot WGK}{(a + b) \cdot 100} \quad \text{mit} \quad (4.5)$$

$a > 0$  (= Gewichtungsfaktor für die technische Gesamtzustandskennziffer)

$b > 0$  (= Gewichtungsfaktor für die Gesamtgefährdungspotentialkennziffer)

Die Größen *TGK*, *GGK* und *WGK* sind dabei die Gesamtkennziffern aus den Gleichungen (3.1), (4.1), und (4.2). Durch die Variation der Gewichtungsfaktoren *a* und *b*, beispielsweise aufgrund der Vorgaben einer unternehmensspezifischen Instandhaltungsstrategie, kann der Einfluss des ermittelten technischen Zustands und/oder des Gefährdungspotentials vergrößert oder vermindert werden. Die Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen unterschiedlicher Betriebsmittel bleibt natürlich nur dann gewährleistet, wenn derartige Variationen in allen Bewertungslisten gleichlautend vorgenommen werden. In der vorliegenden Bewertungssystematik sind in allen Bewertungslisten standardmäßig die Gewichtungsfaktoren  $a = 3$  und  $b = 1$  implementiert.

#### **4.2 Auswertung der Prüfparameter und Bildung von Zustandskennziffern mit Hilfe des Evidenztheorieverfahrens**

In der vorliegenden Bewertungssystematik wird der technische Gesamtzustand eines Betriebsmittels auf zwei Arten ermittelt. Neben der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Vorgehensweise (HD-Verfahren) kommt zusätzlich eine Berechnungsmethode auf Basis der Evidenztheorie zum Einsatz. Die grundsätzliche Motivation für die Anwendung eines zweiten Verfahrens besteht darin, die Bewertungsergebnisse des HD-Verfahrens durch eine alternative Methode zu überprüfen, um so eine Bestätigung für die Richtigkeit der ermittelten Zustandsaussagen zu erhalten. Darüber hinaus liefert das Evidenztheorieverfahren einen Mehrwert derart, dass nicht nur die prinzipielle Richtigkeit, sondern auch ein Maß für die Genauigkeit der Bewertungsergebnisse ausgewiesen wird.

Die Evidenztheoriemethode wird in [14], [16] und [17] detailliert beschrieben. Außerdem wurde im Rahmen dieser Arbeit bereits in Kapitel 2.2 auf die Grundzüge des Verfahrens, die Bildung von Zustandskennziffern (Gleichungen (2.2) und (2.4)) und die möglichen Zustandsdarstellungen von Betriebsmitteln (Abbildung 2.5) sowie deren Interpretation eingegangen. Es wird daher hier auf detailliertere Betrachtungen zur Entwicklung der Systematik verzichtet und auf die genannten Quellen verwiesen.

### **4.3 Kombination von Evidenztheorie- und heuristisch / deterministischem Verfahren**

In der vorliegenden Bewertungssystematik wird das Evidenztheorieverfahren ausschließlich als Alternativweg zur Ermittlung des rein technischen Betriebsmittelzustands angewendet. Alle anderen Bestandteile des Bewertungsmodells nach Abbildung 4.1 werden mit Hilfe der Berechnungsmethoden des HD-Verfahrens dargestellt. Für die Berechnung einer technischen Zustandskennziffer nutzen beide Verfahren den technischen Bewertungslistenteil und die darin ermittelten Ergebnisse der Einzelparameterbeurteilungen. Weiterhin verwendet die Evidenztheoriemethode bei der Teilmodellbildung (entspricht der Parametergruppenbewertung im HD-Verfahren) die gleichen Gewichtungsfaktoren für die Einzelparameter wie das HD-Verfahren. Somit ist gewährleistet, dass beide Verfahren von der gleichen Ausgangsdatenbasis ausgehen. Die Vergleichbarkeit der auf zwei Wegen berechneten technischen Gesamtzustandskennziffer ist durch die Normierungsvereinbarungen gemäß der Gleichungen (2.2) und (2.3) gegeben.

Das Evidenzmodell ist als eigenständiges Tool in jede standardisierte Bewertungsliste implementiert und kann automatisiert oder gesondert gestartet werden. Die vollständigen Analyseergebnisse des Tools werden in einem separaten Tabellenblatt innerhalb der Arbeitsmappe dokumentiert. Darüber hinaus werden die wichtigsten Kenndaten direkt in die Ergebniszusammenfassung jeder Bewertungsliste aufgenommen (siehe Abbildung 3.2). Sie umfassen neben der quantitativen Darstellung von Zustandskennziffer und Schwankungsbreite auch eine qualitative Beurteilung der Ergebnisgüte. Somit kann sofort entschieden werden, ob das Ergebnis der technischen Zustandsbeurteilung glaubwürdig ist oder nicht.

#### **4.4 Zusammenfassung von Einzelbewertungen zu Betriebsmittelgruppen- und Systembewertungen**

Die vorliegende Bewertungssystematik enthält automatisierte Routinen, um durchgeführte Zustandsbeurteilungen einzelner Betriebsmittel zusammenzufassen und daraus Systembewertungen zu generieren. Die zu erzielenden Zustandsdarstellungen von Umspannanlagen, Betriebsmittelgruppen oder ganzen Netzgruppen sind miteinander vergleichbar und stellen so Entscheidungshilfen zur optimalen Verteilung eines Instandhaltungs- oder Erneuerungsbudgets dar.

Der generelle Ablauf einer rechnergestützten Netz- oder Gerätegruppenbewertung im Hinblick auf eine zusammengefasste Zustandsdarstellung lässt sich wie folgt beschreiben: Die zu bewertenden Betriebsmittel werden unter Angabe von Betriebsmittelkategorie (z. B. Primärtechnik), Geräteart (z. B. Transformator) und identifizierenden Stammdaten (z. B. Eigentümer, Bezeichnung, Standort etc.) in eine Liste eingetragen. Anschließend arbeitet ein Algorithmus diese Liste derart ab, dass er für jedes angegebene Betriebsmittel die entsprechende Musterbewertungsliste lädt, diese mit den Stammdatenangaben füllt und unter einem standardisierten Dateinamen in einer automatisch generierten, bedarfsgerechten Ordnerstruktur ablegt. Mit den so vorbereiteten Betriebsmittellisten können dann die einzelnen Zustandsbewertungen am Gerät vorgenommen werden. Zur Auswertung wird ein weiterer Algorithmus verwendet, der nach Anwendervorgaben die Ordnerstruktur nach ausgefüllten Bewertungslisten einzelner Geräte durchsucht, daraus identifizierende und zustandsrelevante Kenndaten (z. B. Gesamtzustandskennziffer, technischer Gesamtzustand, Dringlichkeit etc.) extrahiert und tabellarisch erfasst. Dabei kann der Anwender entscheiden, welche Kenndaten einer Einzelbewertungsliste ausgewertet werden sollen. In der so generierten Ergebnisliste sind weitere Auswertungsfunktionen implementiert, die dem Anwender die Möglichkeit geben, Zusammenfassungen nach individuell definierbaren Kriterien vorzunehmen und so differenzierte Zustandsdarstellungen von Gerätegruppen oder Systemen ermöglichen.

In den folgenden zwei Abschnitten werden die Zusammenfassungskriterien sowie der Umfang der implementierten Auswertungsfunktionen detaillierter beschrieben.

#### 4.4.1 Zusammenfassungskriterien

Die Zusammenfassungskriterien werden im Wesentlichen bestimmt durch die Auswahl der aus den Einzelbewertungslisten extrahierten Identifikations- und Zustandskenndaten eines bewerteten Betriebsmittels. Der in Kapitel 4.4 erwähnte Algorithmus zur Erstellung einer Ergebnisliste kann nach entsprechenden Anwendervorgaben prinzipiell jedes standardisiertes Eingabefeld einer Bewertungsliste auswerten und die vorgenommenen Eintragungen in die Ergebnisliste übernehmen. Dort können dann die Datensätze beliebig sortiert und gefiltert werden (z. B. nach Betriebsmittelart, Standort oder Gerätehersteller), um so differenzierte Zustandsdarstellungen zu generieren. Die standardmäßig in eine Ergebnisliste übernommenen Identifikations- und Zustandsdaten eines untersuchten Betriebsmittels (d. h. die Kriterien, nach denen Systembewertungen vorgenommen werden können) werden in der folgenden Tabelle aufgeführt.

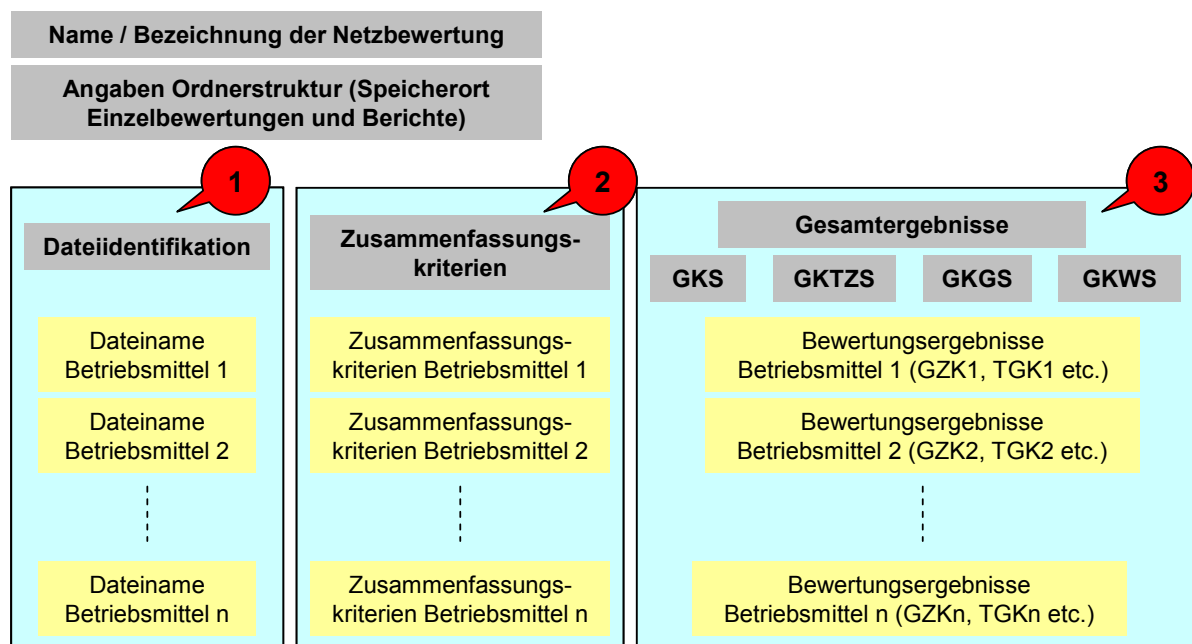
Feldart in der Bewertungsliste	Zusammenfassungskriterium	Bemerkung
Identifikationsdaten	Dateiname und -pfad	Eintrag als Hyperlink zum Speicherort
	Betriebsmittelkategorie	z. B. Primärtechnik, Freileitung etc.
	Betriebsmittelart	z. B. Leistungsschalter, Abspannmast etc.
	Eigentümer	
	Standort	bei Leitungen und Kabel: Anfangs- und Endpunkt sowie Zusatzfeld Mastnr. und Streckenlänge.
	Bezeichnung	
	Hersteller	
	Typ	
	Baujahr	
	Spannungsebene	
Alter		
Zustandskennziffern	Gesamtzustandskennziffer	
	Technischer Gesamtzustand	aus Evidenzmodell (inkl. Unsicherheit) und HD-Verfahren

	Technischer Handlungsbedarf	
	Dringlichkeit	
	Gefährdungspotential	
	Wichtigkeit	

Tab. 4.1: Standardmäßig auswählbare Zusammenfassungskriterien

### 4.4.2 Funktionsumfang und -beschreibung

Die in einer Ergebnisliste implementierten Routinen zur Auswertung und Weiterverarbeitung der kumulierten Betriebsmitteldaten aus erfolgten Einzelbewertungen sind bereits in Abbildung 2.8 schematisch aufgeführt worden. Die Ergebnisliste ist in drei Bereiche unterteilt und grundsätzlich nach folgendem Schema strukturiert.



- GKS = Gesamtkennziffer System**
- GKTZS = Gesamtkennziffer technischer Zustand System**
- GKGS = Gesamtkennziffer Gefährdungspotential System**
- GKWS = Gesamtkennziffer Wichtigkeit System**

Abb. 4.2.: Schematische Darstellung Ergebnisliste

Die aus der Ordnerstruktur extrahierten Datensätze der bewerteten Betriebsmittel werden entsprechend Abbildung 4.2 angeordnet und enthalten die in Tabelle 4.1 aufgeführten Identifikations- und Zustandsdaten. Im Ergebnisbereich der Liste (Bereich 3 in Abbildung 4.2) werden automatisch aus den Zustandskennziffern einzelner Betriebsmittel Systemkennziffern gebildet, und zwar gemäß folgender Gleichungen:

$$GKTZS = \frac{\sum_{i=1}^n TGK_i \cdot WGK_i}{\sum_{i=1}^n WGK_i} \quad (4.6)$$

$$GKGS = \frac{\sum_{i=1}^n G GK_i}{n} \quad (4.7)$$

$$GKWS = \frac{\sum_{i=1}^n WGK_i}{n} \quad (4.8)$$

$$GKS = \frac{(a \cdot GKTZS + b \cdot GKGS) \cdot GKWS}{(a + b) \cdot 100} \quad (4.9)$$

mit

$TGK_i$  = Technische Gesamtzustandskennziffer Betriebsmittel  $i$  (vgl. Gleichung 3.1)

$G GK_i$  = Gesamtkennziffer Gefährdungspotential Betriebsmittel  $i$  (vgl. Gleichung 4.1)

$WGK_i$  = Gesamtkennziffer Wichtigkeit Betriebsmittel  $i$  (vgl. Gleichung 4.2)

$a > 0$  (Standardeinstellung:  $a = 3$ )

$b > 0$  (Standardeinstellung:  $b = 1$ )

$n$  = Anzahl extrahierter bzw. individuell sortierter Datensätze

Im Bereich 3 der Ergebnisliste werden auch die betriebsmittelspezifischen Kennziffern für den jeweiligen technischen Handlungsbedarf und die Dringlichkeit einer Maßnahme aufgeführt. Die Zusammenfassung dieser Größen zu einer Systemkennziffer macht allerdings wenig Sinn, da ein u. U. dringender Handlungsbedarf aufgrund eines festgestellten Mangels hauptsächlich für das betreffende Betriebsmittel von Interesse ist.

Mit Hilfe von Filterfunktionen kann die Ergebnisliste beliebig nach den in Tabelle 4.1 aufgeführten Zusammenfassungskriterien (Bereich 2 in Abbildung 4.2) sortiert werden. Je nach gewähltem Zusammenfassungskriterium lassen sich so Teillisten generieren, die dann ausschließlich Datensätze von Geräten z. B. eines Standorts, eines Herstellers oder einer Betriebsmittelkategorie enthalten. Auch Mehrfachfilterungen (z. B. nach Betriebsmittelkategorie und Standort) sind möglich. Dabei gewährleisten Teilergebnisfunktionen, dass zur Berechnung der Systemkennziffern nach Gleichung (4.6) bis (4.9) immer nur die Datensätze der aktuell generierten Teilliste berücksichtigt werden. Es lassen sich so flexible Zustandsdarstellungen von Gerätegruppen oder Standorten realisieren oder auch Typvergleiche anstellen.

Neben der rein tabellarischen ist auch eine graphische Darstellung der Bewertungsergebnisse realisiert. Dazu wird der Ergebnisteil der aktuellen Teilliste derart weiterverarbeitet, dass die Systemkennziffern in eine Übersicht und die Zustandskennziffern der einzelnen Betriebsmittel in mehrere Diagramme übernommen werden. Einen beispielhaften Auszug einer graphischen Ergebnisdarstellung zeigt Abbildung 4.3.

## Systembewertung

### Testnetz

Standort / Anlage 1

= "UA 1"

### Zusammenfassende Beurteilung

Gesamtkennziffer (Ranking)	8,17
----------------------------	------

technischer Gesamtzustand	ausreichend	9,05
---------------------------	-------------	------

Gesamtgefährdungspotential	kein	15,87
----------------------------	------	-------

Wichtigkeit	hoch	76,00
-------------	------	-------

Durchschnittsalter Betriebsmittel	13,3 Jahre
jüngstes Betriebsmittel	8,0 Jahre
ältestes Betriebsmittel	28,0 Jahre

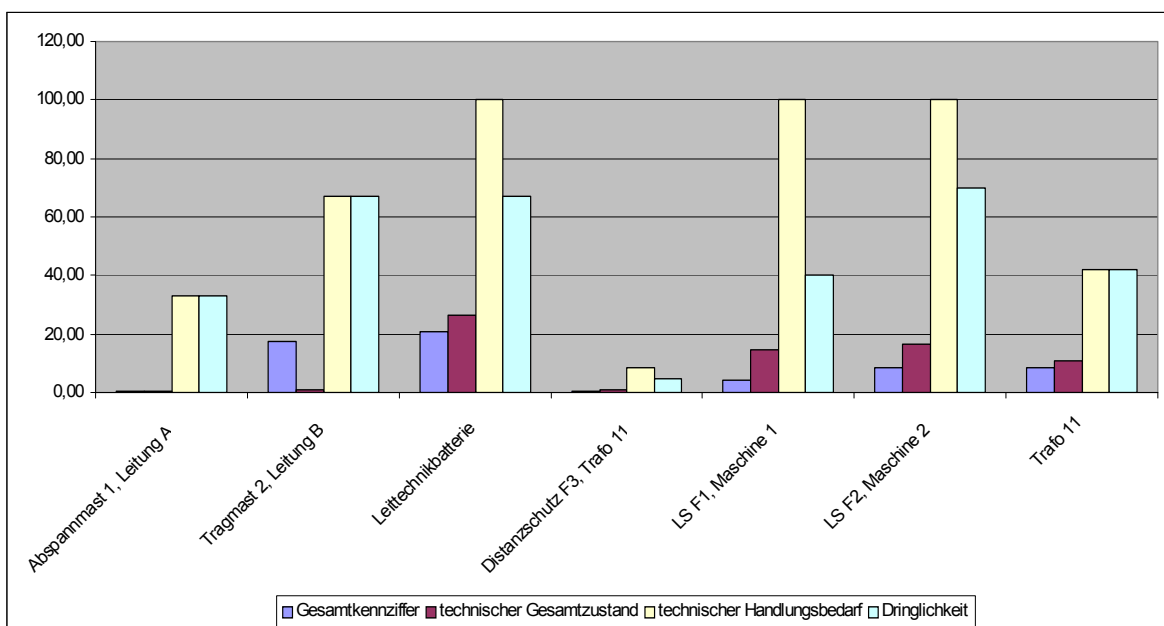


Abb. 4.3: Beispiel graphische Bewertungsergebnisdarstellung (Auszug)

In diesem Beispiel wurde eine Ergebnisliste gemäß Abbildung 4.2 nach Standort gefiltert („UA1“). Die Zustandskennziffern der bewerteten Standortgeräte (x-Achse des Diagramms) wurden als Balkendiagramm dargestellt, das Teilnetz „UA1“ weist die Gesamtkenndaten gemäß der zusammenfassenden Beurteilung im oberen Teil der Abbildung 4.3 auf.



#### 4.5 Zusätzliche Auswertungsverfahren und Berichtswesen

Neben den in Kapitel 4.4 behandelten Analyse- und Auswertungsfunktionen sind in einer Ergebnisliste nach Abbildung 4.2 noch zusätzliche Routinen zur Weiterverarbeitung von Bewertungsergebnissen implementiert.

Vor allem für das Betriebspersonal hilfreich ist z. B. die automatisierte Erstellung von Mängel- und Arbeitslisten. Ein Algorithmus durchsucht dazu die Bewertungslisten der in der Ergebnisliste aufgeführten Betriebsmittel und extrahiert alle Einzelparameter, die als „reparaturbedürftig“ oder „ungenügend“ beurteilt wurden. Diese werden anschließend unter Angabe des betreffenden Betriebsmittels und einer eventuell vorhandenen Mangelbeschreibung (kann in den Bemerkungsfeldern einer Bewertungsliste vorgenommen werden) tabellarisch dargestellt. Die so entstehende Mängelliste bietet einerseits einen Überblick über die vorhandenen Schäden im untersuchten Netz und dient zudem als globaler Arbeitsauftrag für Instandsetzungsmaßnahmen. Unter Einbeziehung der für jedes Betriebsmittel ausgewiesenen Dringlichkeit ( $DGK$  aus Gleichung (4.4)) können die aufgelisteten Mängel zusätzlich priorisiert werden.

Eine weitere nützliche Funktion ist die automatisierte Erstellung eines (vorläufigen) Bewertungsberichts. Ein Algorithmus ruft eine standardisierte Berichtsvorlage auf und füllt darin formatierte Eingabefelder automatisch mit den Identifikations- und Zustandsdaten eines Betriebsmittels aus der Ergebnisliste. Sofern Eintragungen in den Bemerkungsfeldern der Gerätebewertungslisten vorgenommen wurden, werden diese ebenfalls in die Berichtsvorlage übernommen. Zusätzlich wird eine Ordnerstruktur zur Speicherung der Berichte analog zur Ordnerstruktur für die Bewertungslisten angelegt. Die erstellten Rohberichte werden dort betriebsmittelgerecht zugeordnet und gespeichert, um dann abschließend bearbeitet und fertiggestellt zu werden.

## 5 Anwendungen und Ergebnisse

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Bewertungssystematik von Hochspannungsbetriebsmitteln ist einerseits das Resultat theoretischer Überlegungen und der Anwendung von technischem Know-how, andererseits die Umsetzung von Erkenntnissen und Rückschlüssen aus Testbewertungen und Marktanwendungen in realen Energieversorgungsnetzen. In umfangreichen Feldversuchen sind die theoretisch entwickelten Bewertungslisten sowie die hinterlegten Analyse- und Auswertungsverfahren auf ihre Praxistauglichkeit getestet worden. Dazu sind theoretische und praktische Betriebsmittelbewertungen durchgeführt, alternative Berechnungsmethoden berücksichtigt, Präzisierungen und Anpassungen vorgenommen sowie Bewertungsergebnisse auch am Erfahrungsschatz von Betriebsmittelexperten gespiegelt worden. Im Folgenden werden die verschiedenen Testszenarien und die daraus gewonnenen Erkenntnisse näher beschrieben.

### 5.1 Theoretische Ergebnisanalyse

Ein erstes Testszenario zur Analyse der entwickelten Bewertungssystematik besteht in der rein theoretischen Prüfung einer Bewertungsliste dahingehend, ob ein Betriebsmittelzustand bei gezielt vorgenommenen Beurteilungen von Zustandsparametern realistisch, plausibel und aussagekräftig dargestellt wird. Insbesondere wird untersucht, in welchem Maße die Zustandaussagen variieren, wenn die zugrunde liegenden Einzelparameter- und Gesamtzustandskennziffern sowie die Gewichtungsfaktoren mit unterschiedlichen Verfahren berechnet werden. In analoger Weise werden außerdem die weiterverarbeitenden Berechnungsroutinen zur zusammenfassenden Beurteilung und Zustandsdarstellung von Betriebsmittelgruppen und -systemen untersucht.

### 5.1.1 Analyse der Zustandskennzifferbildung und Gewichtung unter Berücksichtigungen alternativer Berechnungsmethoden

Die vorliegende Bewertungssystematik verwendet mit Ausnahme der Wichtigkeitsbeurteilung (siehe Kapitel 3.1.4) Kennziffern im Intervall zwischen 0 (= optimal) bis 100 (= ungenügend). Zwar sind auch andere Bewertungsschemata (z. B. Schulnoten) gebräuchlich, doch es lässt sich der Nachweis nicht erbringen, dass es ein „besseres“ oder „schlechteres“ Benotungssystem gibt. Entscheidend ist vielmehr, dass ein einmal gewähltes Kennzifferintervall (vor allem bei der Darstellung zusammenfassender Zustandskennziffern) durchgehend verwendet wird und somit die Vergleichbarkeit von Ergebnissen gewährleistet ist. Diese Bedingung wird in der vorliegenden Bewertungssystematik ebenso erfüllt wie die Forderung nach einer guten Differenzierbarkeit von Bewertungsergebnissen durch eine ausreichende Menge von verfügbaren Kennzifferwerten.

Die theoretische Analyse der Kennzifferbildung beschäftigt sich zudem mit der Frage, ob zur Darstellung einer Einzelparameterbewertung immer die gesamte Bandbreite des Kennzifferintervalls von 0 bis 100 genutzt werden muss. Den grundsätzlichen Benotungsregularien folgend müsste die beste Beurteilung eines Betriebsmittelparameters durch die Kennziffer 0 und die schlechteste Bewertung immer durch die Kennziffer 100 ausgedrückt werden. Es zeigt sich allerdings, dass in bestimmten Fällen - vor allem bei weniger wichtigen Zustandsparametern - eine Maximalbeurteilung durch den Wert 100 („ungenügend“) unrealistisch und dem u. U. geringen Stellenwert des Parameters nicht angemessen ist. Die Möglichkeit, die schlechteste Parameterbeurteilung auch durch einen Wert kleiner als 100 darstellen zu können, bietet zudem systemtechnische Vorteile. Zwar wird der Einfluss eines Zustandsparameters auf den Betriebsmittelgesamtzustand hauptsächlich durch die Wahl des Gewichtungsfaktors bestimmt, doch erhält man durch eine Flexibilisierung der Kennzifferbildung eine zusätzliche Stellgröße und kann die gesamte Bewertungssystematik variabler auslegen. Es können so Parameter, die in ihrer Gesamtzustandsrelevanz ähnlich geringwertig sind, differenzierter aufeinander abgestimmt werden oder ihr Einfluss zusätzlich zur Stellgröße „Gewichtungsfaktor“ begrenzt werden. Es wird in nahezu allen Bewertungslisten von der Möglichkeit der variablen Kennzifferbildung Gebrauch gemacht. Die große Mehrheit der Parameter wird aber konventionell, d. h. im Kennzifferintervall zwischen 0 und 100, bewertet.

Bei der theoretischen Ergebnisanalyse wird auch ein alternatives Verfahren zur Zusammenfassung von Einzelparameterkennziffern zu einer technischen Gesamtzustandskennziffer betrachtet. Durch die Anwendung einer Methode in Anlehnung an das sog. Quadratwurzelverfahren nach *Penrose* [41] wird untersucht, inwieweit sich eine Gesamtzustandsaussage ändert und eventuell sogar verbessert, wenn die ermittelten Einzelkennziffern nicht gemäß der Gleichungen (3.1) und (3.2) (in den folgenden Testbewertungstabellen als „Lineares Verfahren“ bezeichnet), sondern durch eine alternative Berechnungsvorschrift zusammengefasst werden. Dazu werden die ermittelten Einzelkennziffern inklusive ihrer jeweiligen Gewichtungsfaktoren zunächst quadriert, anschließend aufsummiert und aus der Summe dann die Quadratwurzel gezogen. Die Gesamtkennziffer für den technischen Betriebsmittelzustand nach dem Quadratwurzelverfahren ( $TGK_Q$ ) wird demnach nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$TGK_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i \cdot GK_{Qi})^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2}} \quad \text{mit}$$

$n$  = Anzahl der Parametergruppen (5.1)

$a_i$  = Gewichtungsfaktor der Parametergruppe  $i$

$GK_{Qi}$  = Zustandskennziffer (Gruppenkennziffer) der Parametergruppe  $i$

Die Zustandskennziffer einer Parametergruppe nach dem Quadratwurzelverfahren ( $GK_Q$ ) wird nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$GK_Q = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (b_j \cdot EK_j)^2}{\sum_{j=1}^m b_j^2}} \quad \text{mit}$$

$m$  = Anzahl der Einzelparameter innerhalb der Parametergruppe (5.2)

$b_j$  = Gewichtungsfaktoren der Einzelparameter

$EK_j$  = Zustandskennziffern der Einzelparameter

Für den Vergleich beider Verfahren wird eine verallgemeinerte Testbewertungsliste mit drei Parametergruppen erstellt. Anschließend werden durch Variation der Kenngrößen (Eingabe verschiedener Einzelparameterkennziffern und Gewichtungsfaktoren) verschiedene Gesamtzustandskennziffern berechnet und die Ergebnisse gegenüber gestellt. Abbildung 5.1 zeigt die Testbewertungsliste in ihrer Grund- bzw. Ausgangsform. Das untersuchte Betriebsmittel ist demnach in optimalem Zustand (alle Zustandskennziffern sind 0).

Gesamtkennziffer Lineares Verfahren	Gesamtkennziffer Quadratwurzel- verfahren
0	0

Gewichtung Parametergruppe 1:		3
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A1	0	10
B1	0	5
C1	0	1

Kennziffer Gruppe 1 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 1 Quadratwurzelverfahren
0	0

Gewichtung Parametergruppe 2:		2
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A2	0	10
B2	0	5
C2	0	1
D2	0	1
E2	0	1

Kennziffer Gruppe 2 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 2 Quadratwurzelverfahren
0	0

Gewichtung Parametergruppe 3:		1
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A3	0	10
B3	0	5
C3	0	1
D3	0	1
E3	0	1
F3	0	1
G3	0	1
H3	0	1

Kennziffer Gruppe 3 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 3 Quadratwurzelverfahren
0	0

Abb. 5.1: Testbewertungsliste für den Vergleich Lineares/Quadratwurzelverfahren

Im Folgenden werden einige ausgewählte Testszenarien vorgestellt und die resultierenden Ergebnisse interpretiert.

In einem ersten Testszenario wird der realistische Fall betrachtet, nach dem das untersuchte Betriebsmittel nur wenige und zudem geringwertige Mängel aufweist. Es ergibt sich die folgende Testtabelle:

Gesamtkennziffer Lineares Verfahren	Gesamtkennziffer Quadratwurzelverfahren
3,23	4,06

Gewichtung Parametergruppe 1:		3
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A1	0	10
B1	0	5
C1	33	1

Kennziffer Gruppe 1 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 1 Quadratwurzelverfahren
2,06	2,94

Gewichtung Parametergruppe 2:		2
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A2	0	10
B2	0	5
C2	0	1
D2	33	1
E2	0	1

Kennziffer Gruppe 2 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 2 Quadratwurzelverfahren
1,83	2,92

Gewichtung Parametergruppe 3:		1
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A3	0	10
B3	0	5
C3	0	1
D3	100	1
E3	0	1
F3	33	1
G3	67	1
H3	0	1

Kennziffer Gruppe 3 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 3 Quadratwurzelverfahren
9,52	10,9

Abb. 5.2: Testbewertungsliste bei wenigen geringwertigen Betriebsmittelmängeln

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse des linearen und des Quadratwurzelverfahren nicht wesentlich voneinander abweichen. Auch in der textlichen Beurteilung würde der Zustand des Betriebsmittels in beiden Fällen als „neuwertig“ bezeichnet werden.

Im zweiten Testszenario wird nun der Fall betrachtet, nach dem das Betriebsmittel Mängel der mittelschweren Kategorie aufweist, die hochwertigen Zustandsparameter aber nach wie vor schadensfrei sind. Es ergibt sich folgendes Tabellenbild:

Gesamtkennziffer Lineares Verfahren	Gesamtkennziffer Quadratwurzelverfahren
28,85	44,38

Gewichtung Parametergruppe 1:		3
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A1	0	10
B1	100	5
C1	0	1

Kennziffer Gruppe 1 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 1 Quadratwurzelverfahren
31,25	44,54

Gewichtung Parametergruppe 2:		2
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A2	0	10
B2	100	5
C2	0	1
D2	0	1
E2	0	1

Kennziffer Gruppe 2 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 2 Quadratwurzelverfahren
27,78	44,19

Gewichtung Parametergruppe 3:		1
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A3	0	10
B3	100	5
C3	0	1
D3	0	1
E3	0	1
F3	0	1
G3	0	1
H3	0	1

Kennziffer Gruppe 3 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 3 Quadratwurzelverfahren
23,81	43,69

Abb. 5.3: Testbewertungsliste bei mittelschweren Betriebsmittelmängeln

Hier zeigt sich bereits, dass die Gesamtkennziffer des linearen Verfahrens erheblich von der des Quadratwurzelverfahrens abweicht, auch wenn in beiden Fällen der Gesamtzustand des Betriebsmittels noch durch das gleiche textliche Urteil („reparaturbedürftig“) ausgedrückt würde. Es deutet sich eine Tendenz an, nach der im Quadratwurzelverfahren Mängel an wichtigen Zustandskriterien einen prägenderen und ausschlaggebenderen Effekt auf das Gesamturteil haben als beim linearen Verfahren.

Diese Vermutung wird durch ein drittes Testszenario bestätigt, in dem der durchaus realistische Fall eines Mangels ausschließlich am wertwichtigsten Zustandskriterium untersucht wird. Die Testtabelle hat demnach folgendes Aussehen.

Gesamtkennziffer Lineares Verfahren	Gesamtkennziffer Quadratwurzelverfahren
31,25	71,43

Gewichtung Parametergruppe 1:		3
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A1	100	10
B1	0	5
C1	0	1

Kennziffer Gruppe 1 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 1 Quadratwurzelverfahren
62,5	89,09

Gewichtung Parametergruppe 2:		2
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A2	0	10
B2	0	5
C2	0	1
D2	0	1
E2	0	1

Kennziffer Gruppe 2 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 2 Quadratwurzelverfahren
0	0

Gewichtung Parametergruppe 3:		1
Zustandskriterium	Zustandskennziffer	Gewichtung
A3	0	10
B3	0	5
C3	0	1
D3	0	1
E3	0	1
F3	0	1
G3	0	1
H3	0	1

Kennziffer Gruppe 3 Lineares Verfahren	Kennziffer Gruppe 3 Quadratwurzelverfahren
0	0

Abb. 5.4: Testbewertungsliste bei einem Mangel am wichtigsten Zustandskriterium

Während beim linearen Verfahren der Schaden am wichtigsten Zustandskriterium durchaus angemessen berücksichtigt und das Betriebsmittel trotz der Schadensfreiheit aller anderen Parameter folgerichtig als „reparaturbedürftig“ bezeichnet wird, erhält das Gerät beim Quadratwurzelverfahren bereits das Urteil „ungenügend“. Andere Bewertungsverfahren (vgl. Kapitel 2.2) würden u. U. bereits eine Erneuerungsempfehlung aussprechen. Weitere Testszenarien (z. B. die Variation der Gruppengewichtungsfaktoren), auf die hier aus Platzgründen nicht weiter eingegangen werden soll, bestätigen die im Vorangegangenen beschriebene Tendenz, nach der im Quadratwurzelverfahren Schäden an wichtigen Kriterien überproportionales Gewicht bei der Berechnung der Gesamtzustandskennziffer erhalten.



Für die vorliegende heuristisch / deterministische Bewertungssystematik wird als Schlussfolgerung gezogen, dass das Quadratwurzelverfahren nicht zur Anwendung kommt. Im realen Netzbetrieb ist es zumeist keine realistische Zustandsaussage, dass ein Betriebsmittel als „ungenügend“ und u. U. zu erneuern bezeichnet wird, wenn bereits ein einzelner, wenn auch wertwichtiger Zustandsparameter einen Mangel aufweist. So würden beispielsweise schlechte Werte bei der hochgewichteten Ölgasanalyse eines Transformators das Gerät unter Anwendung des Quadratwurzelverfahrens vorschnell als „ungenügend“ ausweisen, obwohl das Betriebsmittel eventuell durch verhältnismäßig einfache Maßnahmen (z. B. Ölregeneration) wieder in einen einwandfreien Zustand versetzt werden könnte.

Dennoch ist das Quadratwurzelverfahren nicht grundsätzlich ungeeignet für die Zusammenfassung von gewichteten Zustandskennziffern. Wird bei der Entwicklung einer Bewertungssystematik der Fokus darauf gelegt, dass Mängel an wichtigen Kriterien („K.O.-Kriterien“) den Ausschluss von Alternativen, wie z. B. die Weiterführung des Betriebs trotz eines erkannten Schadens, zur Folge haben sollen, dann kann auch das Quadratwurzelverfahren ein geeignetes Berechnungsmodell darstellen.

Zum Abschluss der theoretischen Analysen zur Kennzifferbildung wird außerdem eine Alternativverfahren zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren untersucht, welches letztendlich geeignet war, die in Kapitel 3.2.2 beschriebene Methodik zu unterstützen. Dazu werden Gewichtungsfaktoren mit der Methode des Analytic Hierarchy Process (AHP) [42] berechnet, einem Verfahren zur systematischen Strukturierung von Entscheidungsprozessen und der Ableitung von Gewichtungsverhältnissen der beteiligter Unterscheidungskriterien. Beim AHP entsprechen die ersten beiden Prozessschritte annähernd den ersten beiden Phasen des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Verfahrens. Durch paarweisen Vergleich wird zunächst eine Prioritätsrangfolge der zu gewichtenden Zustandsparameter erstellt. Anschließend wird durch einen erneuten paarweisen Vergleich qualitativ beurteilt, um wieviel wichtiger das eine gegenüber dem anderen Kriterium ist. Für die qualitativen Unterschiede werden Kennwerte und die entsprechenden Kehrwerte gemäß folgender Tabellen definiert:

Kriterium A ist gegenüber Kriterium B...	Zugewiesener Kennwert
gleichbedeutend	1
von etwas größerer Bedeutung	3
von wesentlich größerer Bedeutung	5
von viel größerer Bedeutung	7
von sehr viel größerer Bedeutung	9

Tab. 5.1: Qualitative Vergleichsunterschiede und Kennwerte nach [42]

Die Kehrwerttabelle hat folgendes Aussehen:

Kriterium B ist gegenüber Kriterium A...	Zugewiesener Kennwert
gleichbedeutend	1
von etwas geringerer Bedeutung	1/3
von wesentlich geringerer Bedeutung	1/5
von viel geringerer Bedeutung	1/7
von sehr viel geringerer Bedeutung	1/9

Tab. 5.2: Qualitative Vergleichsunterschiede und Kehrwerte nach [42]

Auf der Basis so definierter Wichtigkeitsunterschiede lassen sich qualitative Parametervergleiche als Matrix darstellen. Hier ein Beispiel mit vier Zustandskriterien:

Zustandsparameter	A	B	C	D
A	1	5	9	9
B	1/5	1	5	5
C	1/9	1/5	1	1
D	1/9	1/5	1	1

Tab. 5.3: Beispiel qualitativer Parametervergleiche nach [42]

Diese Matrix sagt aus, dass beispielsweise das Kriterium A wesentlich bedeutender als Kriterium B und sehr viel bedeutender als die Kriterien C und D ist. Eine weitere

Aussage ist, dass z. B. Kriterium C sehr viel geringere Bedeutung als A hat, wesentlich unwichtiger als Kriterium B und gleichbedeutend mit Kriterium D ist.

Beim AHP wird nun abgeleitet, dass die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Parameter den Verhältnissen der Eigenvektorelemente zueinander entsprechen. Der Eigenvektor berechnet sich dabei als Normalisierung der Reihensummen nach einer Quadrierung der Matrix gemäß Tabelle 5.3, d. h. der Division der einzelnen Reihensummen durch die Reihengesamtsumme. Die folgende Tabelle verdeutlicht diese Zusammenhänge (Zahlenwerte sind gerundet).

Quadrierte Matrix nach Tab. 5.3					Reihen- summen	Eigen- vektor	Gewichtungs- faktoren = Verhältnis Eigenvektor- elemente
Zustands- parameter	A	B	C	D			
A	4	13,6	52	52	121,6	$\begin{pmatrix} 0,676 \\ 0,218 \\ 0,053 \\ 0,053 \end{pmatrix}$	12,761
B	1,511	4	16,8	16,8	39,11		4,104
C	0,373	1,156	4	4	9,53		1
D	0,373	1,156	4	4	9,53		1

Tab. 5.4: Ableitung der Gewichtungsfaktoren nach [42]

Dass AHP in der vorliegenden Bewertungssystematik nicht als alleinige Methodik zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren genutzt wird, ist durch den Umstand begründet, dass Gewichtungsfaktoren aus technischen Gründen variabel sein können. Dies ist durch das starre Berechnungsmodell im AHP nur unzureichend abzubilden. Daher wird AHP in der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methodik nur zur Bestimmung einer grundsätzlichen Größenordnung angewendet, in der sich die jeweiligen Gewichtungsfaktoren ungefähr bewegen müssen. Die endgültigen Gewichtungsfaktoren werden dann auf der Grundlage technischer Aspekte festgelegt.

### 5.1.2 Analyse der zusammenfassenden und zusätzlichen Auswertungsroutinen

Die in Kapitel 4.4 ausführlich beschriebenen Analyse- und Auswertungsfunktionen (siehe Tabelle 4.1 sowie Abbildungen 4.2 und 4.3) sowie die zusätzlichen Routinen zur Weiterverarbeitung von Bewertungsergebnissen (Erstellung von Bewertungsberichten, Mängellisten etc.) werden durch automatische oder individuell zu startende Software-Programme realisiert. Die theoretische Ergebnisanalyse dieser Funktionen besteht demnach hauptsächlich aus dem Software-Test der jeweiligen Programmmodule.

Als Prüfobjekt dient eine virtuelle Umspannanlage, bestehend aus verschiedenen primär-, sekundär- und nachrichtentechnischen Komponenten. In einem ersten Schritt werden die automatische Generierung der benötigten Bewertungslisten und die Erstellung der Dateiordnerstruktur geprüft. Dabei wird insbesondere untersucht, ob aus dem Katalog aller Bewertungslisten die jeweils zutreffenden ausgewählt werden, ob diese korrekt den generierten Dateiordnern zugeordnet werden und ob alle relevanten Stamm-, Historien- und Identifikationsdaten in die Listen übernommen werden. Anschließend werden alle Testbewertungslisten ausgefüllt, d. h. die Betriebsmittel werden durch gezielt vorgenommene Parameterbeurteilungen bewertet.

Im nächsten Schritt werden die bewerteten Betriebsmittel gemäß der in den Kapiteln 4.4.1 und 4.4.2 beschriebenen Vorgehensweise zusammengefasst. Es wird dabei vor allem getestet, ob alle in der Ordnerstruktur abgelegten Bewertungslisten erfasst werden und ob alle zustandsbeschreibenden Werte korrekt in die Ergebnisliste nach Abbildung 4.2 eingetragen werden. Dabei offenbart sich ein noch nicht gelöstes Ausgrenzungsproblem. Der bestehende Algorithmus identifiziert wie gewünscht alle als Betriebsmittelbewertungslisten konzipierten Dateien (kann diese also von anderen Dateien unterscheiden) und extrahiert auch korrekt die benötigten Zustands- und Identifikationsdaten. Allerdings kann die Routine noch nicht differenzieren, ob eine Bewertungsliste bereits ausgefüllt und zur Auswertung bereit ist, oder ob es sich um eine Liste im Rohzustand handelt. Zukünftig müssen demnach die Bewertungslisten mit einem zusätzlichen Feld ausgestattet werden, welches den Bearbeitungszustand signalisiert und von der programmiertechnisch erweiterten

Analyseroutine entsprechend ausgewertet werden kann. Dann ist gewährleistet, dass nur abgeschlossene Gerätebewertungen zur zusammenfassenden Darstellung von Betriebsmittelgruppen oder -systemen herangezogen werden.

Zum Abschluss der theoretischen Ergebnisanalyse werden die Routinen zur graphischen Ergebnisdarstellung (siehe Abbildung 4.3), die individuell definierbaren Filterfunktionen sowie die Programmmodule zur automatisierten Berichts- und Mängellistenerstellung getestet. Neben der Prüfung auf vollständige Übernahme aller relevanten Zustandsdaten aus der Ergebnisliste wird dabei auch die Anwenderfreundlichkeit hinsichtlich der Übersichtlichkeit und des Layouts der Zustandsdarstellungen hinterfragt und in Teilen angepasst. So wird beispielsweise der Algorithmus zur automatisierten Berichtserstellung modifiziert. In der ursprünglichen Version der Bewertungssystematik existierte nur eine einzelne Formatvorlage für einen Bewertungsbericht. Diese enthielt editierbare Freifelder für alle in Tabelle 4.1 aufgelisteten Identifikations- und Zustandskenngößen, welche dann mit den aus der Ergebnisliste extrahieren Daten gefüllt wurden. Je nach Betriebsmittel werden aber entweder nicht alle Kenngrößen benötigt oder es sind bestimmte, nicht bei allen Geräten vorhandene Identifikationsdaten aussagekräftiger (wie z. B. eine Mastnummer, die nur bei Freileitungen eine Rolle spielt). Dies hatte einen erhöhten Nachbearbeitungsbedarf bei den Berichten zur Folge. Als Konsequenz wird ein Katalog von betriebsmittelspezifischen Berichtsvorlagen erstellt und der Generierungsalgorithmus so erweitert, dass für jedes Betriebsmittel die entsprechende Formatvorlage ausgewählt und mit den geräterelevanten Daten gefüllt wird.

## **5.2 Ergebnisse aus Testbewertungen in einem realen Energieversorgungsnetz mit dem heuristisch / deterministischen und dem Evidenztheorieverfahren**

Im Anschluss an die theoretische Ergebnisanalyse ist die entwickelte Bewertungssystematik einem umfangreichen Praxistest in einem realen Energieversorgungsnetz unterzogen worden. Die folgenden Kapitel widmen sich der Beschreibung der verschiedenen Testszenarien, der Analyse der Ergebnisse und der daraus gewonnenen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen.

### 5.2.1 Testbewertungsziele, -umfang und -ablauf

Primäres Ziel des Feldversuchs in einem realen Energieversorgungsnetz ist die Beantwortung der Frage, ob der Zustand von Betriebsmitteln, Gerätegruppen und Systemen im Bereich der Hochspannungstechnik durch die Anwendung der vorliegenden Bewertungssystematik realistisch, plausibel und mit ausreichender Präzision dargestellt werden kann. Insbesondere sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, ob die Systematik auch dann realistische und vor allem vergleichbare Ergebnisse liefert, wenn bei Betriebsmittelprüfungen unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. So kann bei der Bewertung des einen Geräts die Eingangsdatenbasis nahezu optimal sein (z. B. bei der Prüfung eines freigeschalteten Betriebsmittels), während beim nächsten Betriebsmittel der gleichen Geräteart nur wenige Zustandsparameter beurteilt werden können, da beispielsweise keine Freischaltung vorliegt und nur eine Sichtkontrolle durchgeführt werden kann. Trotzdem müssen die Bewertungsergebnisse beider Geräte vergleichbar sein. Zumindest muss (z. B. mit Hilfe des Evidenztheorieverfahrens) eine Aussage über den Genauigkeitsgrad des erzielten Prüfungsergebnisses vorliegen. Nur so kann beurteilt werden, ob die Vergleichbarkeit zweier Bewertungsergebnisse gegeben ist oder ob aufgrund des Fehlens einer ausreichenden Menge von bewertbaren Zustandsparametern keine seriöse Zustandsaussage gemacht werden kann und das Gerät von weiterführenden Auswertungen auszuschließen ist.

Ein weiteres Testbewertungsziel ist die Prüfung der Bewertungslisten dahingehend, ob zum einen alle relevanten Zustandsparameter aufgeführt und ihre Beurteilungskriterien plausibel, verständlich und nachvollziehbar sind, zum anderen ob die Listen anwenderfreundlich zu bedienen sind. Ebenso soll untersucht werden, ob der in den mathematischen Kennzifferberechnungsvorschriften verwendete Funktionsverlauf eines Parameters (linear, quadratisch, exponentiell etc.) von seinem besten zu seinem schlechtesten Wert einer realen Prüfung standhält. Weiterhin sollen zum Zwecke späterer Kostenkalkulationen die Zeiten ermittelt werden, welche ein Betriebsmittelprüfer unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen (Freischaltung vorhanden / nicht vorhanden, aktuelle Messwerte dokumentiert / nicht dokumentiert etc.) für die Bewertung eines Geräts benötigt. Es kann so für jedes Betriebsmittel die Mindest- und die Maximalbewertungsdauer abgeschätzt werden. In

diesem Prüfungsabschnitt sollen auch Festlegungen zu betriebsmittelspezifischen Voraussetzungen vorgenommen werden, welche mindestens vorliegen müssen, um ein Gerät sinnvoll und seriös bewerten zu können.

Ein Testschwerpunkt besteht in der Frage, inwieweit die Ergebnisse des heuristisch / deterministischen und des Evidenztheorieverfahrens bei der Bewertung eines Betriebsmittels korrespondieren und die Eignung der Bewertungssystematik durch die Anwendung eines Alternativverfahrens bestätigt werden kann. In einem gesonderten Prüfungsabschnitt werden dazu mehrere ausgewählte Betriebsmittel bei variierenden Randbedingungen unter Anwendung beider Verfahren bewertet und die Ergebnisse verglichen. Insbesondere soll analysiert werden, in welchem Maße die vom Evidenztheorieverfahren gelieferte Schwankungsbreite eines Bewertungsergebnisses die zu fällende Zustandsaussage beeinflusst bzw. eine solche überhaupt zulässt.

Der Feldversuch umfasst die Bewertung von ca. 250 Betriebsmitteln aus nahezu allen Bereichen der Hochspannungstechnik mit unterschiedlichen Randbedingungen (freigeschaltet / nicht freigeschaltet, städtisches / ländliches Versorgungsgebiet etc.), wobei mehrheitlich Komponenten der Primärtechnik untersucht werden. Der gesonderte Prüfungsabschnitt für den Vergleich von heuristisch / deterministischem und Evidenztheorieverfahren besteht aus der Untersuchung von 9 Transformatoren und 6 Leistungsschaltern. Um möglichst objektiv Rückschlüsse über die Qualität und Praxistauglichkeit der Bewertungssystematik ziehen zu können, werden die Testbewertungen nicht vom Entwickler des Verfahrens, sondern (nach einer kurzen Einweisung in die Handhabung der Bewertungslisten) eigenständig von Betriebsmittelfachleuten aus den Netzbetriebsabteilungen eines großen Energieversorgungsunternehmens vorgenommen. Die ausgefüllten Bewertungslisten werden danach vom Verfasser gesammelt, auf Plausibilität geprüft und zur weiteren Analyse aufbereitet. In einem anschließenden Feedback-Gespräch mit dem Betriebsmittelprüfer wird dann analysiert, inwieweit die oben beschriebenen Testbewertungsziele erreicht werden bzw. in welchem Maße Anpassungen vorgenommen werden müssen.

### 5.2.2 Analyse betriebsmittelspezifischer Untersuchungsergebnisse

Als grundsätzliches Ergebnis des Feldversuchs kann festgestellt werden, dass alle betriebsmittelspezifischen Bewertungslisten und auch die Methoden zur Zusammenfassung und Weiterverarbeitung erzielter Bewertungsergebnisse geeignet sind, realistische und nachvollziehbare Aussagen zum Zustand eines einzelnen Geräts vornehmen zu können. Zwar mussten im Nachgang der Testbewertungen nahezu alle Bewertungslisten modifiziert werden, doch bestanden diese Anpassungen in der Regel nur aus marginalen Änderungen wie z. B. der Reduzierung oder Erhöhung eines Gewichtungsfaktors oder der Präzisierung eines Beurteilungskriteriums. In Einzelfällen fehlte ein wichtiges Zustandskriterium in den Bewertungslisten, noch seltener entsprach der angenommene Funktionsverlauf eines Parameters nicht den realen Gegebenheiten. Auf die verschiedenen Modifizierungen der Bewertungslisten wird in Kapitel 5.2.4 noch näher eingegangen. Prinzipielle bzw. methodische Mängel bei der Zusammenfassung von Einzelparameterbewertungen und dem Ausweis weiterer Zustandsaussagen (technischer Handlungsbedarf, Dringlichkeit einer Maßnahme etc.) wurden nicht festgestellt. Ebenso erwiesen sich die Beurteilungsmöglichkeiten und die daraus resultierenden Darstellungen des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit eines Betriebsmittels als praktikabel und zutreffend.

Die Analyse des gesonderten Prüfungsabschnitts zum Vergleich von heuristisch / deterministischem und Evidenztheorieverfahren ergibt, dass das Evidenztheorieverfahren zur alternativen Ermittlung eines technischen Gerätezustands eine sehr gute Ergänzung zum HD-Verfahren darstellt. Zum einen kommen beide Verfahren bei Testbewertungen ausgewählter Betriebsmittel zu ähnlichen Ergebnissen (beide Methoden bestätigen sich so gegenseitig), zum anderen erweist sich die Angabe einer Schwankungsbreite von Bewertungsergebnissen als qualitativer Mehrwert.

Die These, dass die Bewertungslisten zur korrekten Zustandsdarstellung von Hochspannungsgeräten geeignet sind, wird durch zwei weitere Aspekte gestützt. Zum einen kann aufgrund der relativ hohen Anzahl der vorgenommenen Testbewertungen (ca. 250 untersuchte Betriebsmittel), deren Durchführungen in verschiedenen Bereichen der Hochspannungstechnik und des Umstands, dass kein



Bewertungsergebnis extreme Abweichungen von der grundsätzlichen Tendenz anderer Zustandsaussagen aufweist, die Tauglichkeit des Verfahrens unterstellt werden. Zum anderen ist in den Feedback-Gesprächen festgestellt worden, dass das aus Erfahrungswerten gespeiste, subjektive Urteil der Betriebsmittelprüfer über ein untersuchtes Gerät in fast allen Fällen mit den systematisch ermittelten Zustandsaussagen übereinstimmt.

Aus Platzgründen können nicht alle Testbewertungen im Detail beschrieben und analysiert werden. Außerdem werden spezielle Problematiken wie die Bewertung von gleichartigen Betriebsmitteln bei unterschiedlichem Eingangsdatenumfang oder die Interpretationsmöglichkeiten von Parameterbeurteilungskriterien in gesonderten Kapiteln behandelt (siehe Kapitel 5.2.3 und 5.2.4). Es werden daher hier nur einige ausgewählte Testbewertungsanalysen vorgestellt. Insbesondere wird dabei auf das Testszenario zum Vergleich von heuristisch / deterministischem und Evidenztheorieverfahren eingegangen. Im Folgenden wird zunächst die Testbewertung eines freigeschalteten Leistungsschalters mit dem HD-Verfahren beschrieben. Dies dient vor allem dazu, die Entwicklungsschritte einer Bewertungsliste von ihrer theoretisch konzipierten Ursprungsform zur endgültigen Version als Ergebnis von Anwendungserfahrungen zu dokumentieren und kann als beispielhaft für den Ablauf aller Testbewertungen mit dem HD-Verfahren angesehen werden. Anschließend wird das Testszenario zum Vergleich von HD- und Evidenztheorieverfahren detailliert beschrieben und analysiert.

Bei dem erwähnten Leistungsschalter handelt es sich um einen Hydraulikschalter des Herstellers ABB vom Typ ELF 102-6012. Der Schalter steht in einer Umspannanlage in ländlichem Gebiet, hat zum Zeitpunkt der Prüfung (Juni 2006) ein Alter von etwa 17 Jahren und ist freigeschaltet, so dass nahezu alle Zustandsparameter geprüft werden können. Weitere Grund- und Historiendaten können der folgenden Abbildung des Stammdatenerfassungsteils der Bewertungsliste entnommen werden.

## Bewertung Betriebsmittel

### Primärtechnik

#### Leistungsschalter

Eigentümer	
Standort / Anlage 1	
Name / Bezeichnung	
Hersteller	ABB
Typ	ELF 102-6012
Baujahr	1989
Betriebsspannung	110 kV
Kurzschlussstrom der Anlage	
Schutzfunktion mit KU ?	ja, dreipolig
Fabriknummer	
Bemessungsspannung	123 kV
Bemessungsstrom	1250 A
Ausschaltleistung	6,7 GVA
Ausschaltstrom	31,5 kA
Schaltaufgabe	Freileitung
Kurzschlußausschaltungen	0
Kurzschlußeinschaltungen	0
Kurztrennung	0
Berstschutz	ja
letzte Wartung / Inbetriebnahme:	19.08.2003
Störungen/Instandsetzungen	0
Schalterpaß vorhanden	nein
Aufstellungsart	Stiel

Abb. 5.5: Stammdatenteil Testbewertungsliste Leistungsschalter ELF 102-6012

Es lassen sich bereits aus der Stammdatendarstellung nach Abbildung 5.5 einige zustandsrelevante Aspekte abschätzen, welche im nachfolgenden Bewertungsteil noch genauer beurteilt wurden. Der Schalter ist mit einem Alter von etwa 17 Jahren zwar nicht mehr als neu zu betrachten, doch war er bisher störungsfrei und musste zudem noch keine Kurzschlusschaltungen durchführen. Außerdem ist der für diesen Schaltertyp herstellerseitig empfohlene Wartungszyklus (8 Jahre) eingehalten worden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Testbewertung mit der ursprünglichen Bewertungsliste werden in den folgenden Abbildungen gezeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Listenbestandteile ausgeblendet, welche nur der tabelleninternen Weiterverarbeitung der erfassten Daten dienen.

## 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>ausreichend</b>	<b>7,41</b>
----------------------------------	--------------------	-------------

		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Iztzustand
<b>Grunddaten</b>				15,94	neuwertig	1,0
Alter	ca. 17 Jahre			31,88	ausreichend	1,0
Schaltdimensionierung		x		0,00	keine Bewertung	10,0
Erfahrungswerte / Tendenz für verwendeten Typ	problemlos			0,00	neuwertig	1,0
<b>Begehung / Sichtkontrolle ohne Freischaltung</b>				0,75	neuwertig	1,0
Schaltspiele (Zählerstand) seit letzter Wartung	46			17,25	neuwertig	1,0
elektr. Beanspruchung Unterbrechereinheit		x	keine Angabe zu Kurzschlussstrom der Anlage	0,00	keine Bewertung	9,0
mech. Beanspruchung Unterbrechereinheit				1,73	neuwertig	6,0
Zählerstand Motoranläufe		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Porzellanschäden Stützisolator	keine			0,00	neuwertig	1,0
Porzellanschäden Schaltkammerisol.	keine			0,00	neuwertig	1,0
Porzellankittfugen Stützisolator oben	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Stützisolator unten	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator oben	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator unten	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Schutzanstrich	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Polsäulenflansch-Entwässerungsbohrung Polsäule oben	frei			0,00	neuwertig	1,0
Polsäulenflansch-Entwässerungsbohrung Polsäule unten	frei			0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikölstand LS EIN, Hydraulik auf Betriebsdruck, unteres Schauglas ölgefüllt	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
<b>Sichtkontrolle ohne Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt		x		0,00	keine Bewertung	6,0
Gummidichtungen		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Hydraulikundichtigkeit		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Ausführung Hydraulikmessleitungen		x		0,00	keine Bewertung	9,0
<b>Sichtkontrolle mit Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>				0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt	kein Wassereintritt			0,00	neuwertig	6,0
Gummidichtungen	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikundichtigkeit	dicht			0,00	neuwertig	1,0
Ausführung Hydraulikmessleitungen	Edelstahlausführung			0,00	neuwertig	9,0

Abb. 5.6: Technischer Bewertungsteil (Teil 1 alt) Leistungsschalter ELF 102-6012

Untersuchung mit Freischaltung			12,97	neuwertig	1,0
Polsäulenbefestigung	fest		0,00	neuwertig	6,0
Zug-Druckgestänge	fest u. unversehrt		0,00	neuwertig	6,0
Hydraulikölqualität	rötlich / klar		0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikölstand Ölfüllung	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikölstand LS AUS, Hydraulik druckentlastet, Ölstand im oberen Schaglas sichtb.	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Dichtigkeit Hydraulikmessanschluss	dicht		0,00	neuwertig	3,0
Auslöser Y1,Y2,Y3 (Schrauben, Anschlüsse)	in Ordnung		0,00	neuwertig	6,0
Meldeschalter	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Steckerkabel	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
N <sub>2</sub> -Vorspanndruck bei 20°	228,00 bar				
Leckrate Hydrospeicher			23,14	neuwertig	6,0
Betriebssicherheit			4,34	neuwertig	6,0
Druckdifferenz Hydraulikdruckölverbrauch LS AUS -> EIN	23,00 bar		0,00	neuwertig	6,0
Druckdifferenz Hydraulikdruckölverbrauch LS EIN -> AUS	25,00 bar		0,00	neuwertig	6,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität HF	0,00 ppmV	x	0,00	keine Bewertung	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität SO <sub>2</sub>	0,00 ppmV	x	0,00	keine Bewertung	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Wasserdampftaupunktmessung H <sub>2</sub> O-Anteil	0,10 g/m <sup>3</sup>		100,00	ungenügend	6,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Wasserdampftaupunktmessung H <sub>2</sub> O-Taupunkt	-37,5 °C		0,00	neuwertig	6,0
SF <sub>6</sub> -Volumenprozentanteil	100,0%		0,00	neuwertig	1,0
Mindestbetätigungsspannung Einschaltung	100,00 V		0,00	neuwertig	1,0
Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung I	105,00 V		1,56	neuwertig	9,0
Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung II	110,00 V		6,25	neuwertig	9,0
Auslöserwiderstand Einschaltkreis	172,00 Ω		29,76	ausreichend	1,0
Auslöserwiderstand Ausschaltkreis I	172,00 Ω		29,76	ausreichend	6,0
Auslöserwiderstand Ausschaltkreis II	172,00 Ω		29,76	ausreichend	6,0
Schaltkammerwiderstand Pol A	49 μΩ		16,88	neuwertig	1,0
Schaltkammerwiderstand Pol B	46 μΩ		11,25	neuwertig	1,0
Schaltkammerwiderstand Pol C	51 μΩ		20,63	neuwertig	1,0

Abb. 5.7: Technischer Bewertungsteil (Teil 2 alt) Leistungsschalter ELF 102-6012

Man erkennt, dass sich die Kennziffern der meisten Parameter im Intervall zwischen 0 und 25 bewegen und diese somit als „neuwertig“ beurteilt wurden. Das Alter des Schalters sowie die Messwerte der Auslöserwiderstände (optimaler Wert für diesen Schaltertyp: 168 Ω; Parameter wird „ungenügend“ bei einer Abweichung vom Optimalwert von ± 6 %) wurden als „ausreichend“ bewertet. Als einziger Mangel ist festgestellt worden, dass der Wasseranteil im Löschmedium SF<sub>6</sub> den typbedingten, maximal zulässigen Wert von 0,1 g/m<sup>3</sup> erreicht hat und der Parameter somit als „ungenügend“ beurteilt wurde. Durch die relativ hohen Gewichtungen der Parameter „SF<sub>6</sub>-Wasseranteil“ und „Auslöserwiderstand“ ergibt sich trotz der weitgehenden Schadensfreiheit der meisten anderen Parameter eine Gesamtkennziffer für den



technischen Zustand des Schalters von 7,41 und das Gesamturteil „ausreichend“. Dieses Ergebnis entspricht tendenziell auch der subjektiven Einschätzung des Betriebsmittelprüfers.

Die Bewertungen zum Gefährdungspotential und zur Wichtigkeit des Betriebsmittels liefern folgende Ergebnisse:

### 1.2 Gefährdungspotential

<b>Gesamtgefährdungspotential</b>	<b>gering</b>	<b>33,00</b>
-----------------------------------	---------------	--------------

		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen
<b>Personengefahr</b>				0,00	kein
Gefahr durch fehlenden Berstschutz (Ausschaltvermögen LS)	Berstschutz vorhanden	x		0,00	keine Bewertung
Gefahr durch fehlenden Berstschutz (Höherbelastung KU)	Berstschutz vorhanden	x		0,00	keine Bewertung
Berührungsschutz Bedienelemente	vorhanden			0,00	kein
		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen
<b>Umweltgefahr</b>				33,00	gering
Bauart- / Typbedingte Gefährdung	keine Gefährdung			0,00	kein
Grundwassergefährdung	geringe Gefährdung			33,00	gering
		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen
<b>Gesetzesverstoß</b>				0,00	kein
Einhaltung Aufbaunormen		x	kein Verstoß bekannt	0,00	keine Bewertung
Prüfung nach Druckbehälterverordnung	geprüft			0,00	kein
TÜV-Untersuchung	in Ordnung			0,00	kein
Gültigkeit Betriebsgenehmigung		x	kein Verstoß bekannt	0,00	keine Bewertung

### 1.3 Wichtigkeit

<b>Wichtigkeit</b>	<b>mittel</b>	<b>70,00</b>
--------------------	---------------	--------------

		nicht relevant	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen
<b>Wichtigkeit</b>				70,00	mittel
Wichtigkeit des geschalteten Betriebsmittels im Netz	mittlere Wichtigkeit			70,00	mittel

Abb. 5.8: Bewertung Gefährdungspotential und Wichtigkeit Leistungsschalter ELF 102-6012

Die einzelnen Bewertungsergebnisse werden dann zu den folgenden Gesamtzustandsaussagen zusammengefasst:

**Zusammenfassende Beurteilung**

<b>Gesamtkennziffer (Ranking)</b>	<b>9,67</b>	
<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>ausreichend</b>	<b>7,41</b>
<b>technischer Handlungsbedarf hinsichtlich einzelner Parameter</b>	<b>hoch</b>	<b>100,00</b>
<b>Dringlichkeit</b>	<b>mittel</b>	<b>70,00</b>
<b>Gesamtgefährdungspotential</b>	<b>gering</b>	<b>33,00</b>
<b>Wichtigkeit</b>	<b>mittel</b>	<b>70,00</b>

Abb. 5.9: Gesamtkennziffern (alt) Testbewertung Leistungsschalter ELF 102-6012

Hinsichtlich der in Kapitel 5.2.1 formulierten Testbewertungsziele führt die Analyse der Betriebsmitteluntersuchung mit der ursprünglichen Bewertungsliste zu folgenden Erkenntnissen und Anpassungen.

Der Parametergruppe „Grunddaten“ werden zwei neue Zustandskriterien hinzugefügt. Zum einen wird die im Stammdatenteil bereits vorhandene Angabe des Datums der letzten Wartung dahingehend aufgewertet, dass die Einhaltung eines typbedingten Wartungszyklusses als Zustandsparameter bewertbar ist bzw. eine Beurteilung aus der Datumsangabe automatisiert abgeleitet wird. Zudem wird der Parameter „Ersatzteilbeschaffung wertwichtiger bzw. betriebsmitteltypischer Teile“ eingeführt. Ein solches Kriterium ist grundsätzlich von Relevanz, erhält aber bei Leistungsschaltern durch die Vielzahl spezieller Typen eine noch ausgeprägtere Bedeutung. Der Parametergruppe „Begehung / Sichtkontrolle ohne Freischaltung“ werden ebenfalls neue Zustandskriterien hinzugefügt bzw. es werden bestehende Bewertungsparameter differenzierter ausgeführt. Das Kriterium „Dichtigkeit der Steuerkondensatoren“ wird neu aufgenommen. Die Parameter „Anzahl Schaltspiele“ und „Anzahl Motoranläufe“ werden differenziert nach „Anzahl Schaltspiele / Motoranläufe seit Inbetriebnahme“ und „Anzahl Schaltspiele / Motoranläufe seit letzter Wartung“, wobei die Angaben bezüglich des letzten Wartungsdatums höher als die des Inbetriebnahmetermins gewichtet werden.

Bezüglich der Formulierungen der Beurteilungskriterien, der Werte von Gewichtungsfaktoren sowie der grundsätzlichen Funktionsverläufe der Zustandsparameter müssen keine Änderungen vorgenommen werden. Einzige Ausnahme bildet dabei das „ungenügend“ bewertete Kriterium des Wasseranteils im

Löschmedium. Hier wird die ursprünglich nur sehr grob differenzierte Beurteilung (bis 0,1 g/m<sup>3</sup> Wasseranteil = „neuwertig“, ab 0,1 g/m<sup>3</sup> = „ungenügend“) durch einen die realen Gegebenheiten besser abbildenden Toleranzbereich erweitert. Danach erhält das Intervall zwischen 0,9 g/m<sup>3</sup> und 1,1 g/m<sup>3</sup> Wasseranteil die Kennziffer 67 und das Urteil „reparaturbedürftig“.

Nach erfolgter Anpassung sowie der Übertragung der Parameterbeurteilungen aus der ursprünglichen Bewertungsliste hat die neue Betriebsmittelliste folgendes Aussehen (nur technischer Bewertungsteil, alle anderen Listenbestandteile entsprechen den Abbildungen 5.5 und 5.8):

### 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>neuwertig</b>	<b>5,48</b>
----------------------------------	------------------	-------------

		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Iztzustand
<b>Grunddaten</b>				10,88	neuwertig	1,0
Alter	ca. 17 Jahre			31,88	ausreichend	1,0
Einhaltung typbedingter, empfohlener Wartungszyklus	in Ordnung			0,00	neuwertig	5,0
Schalterdimensionierung (nur ermittelbar, wenn Kurzschlußstrom der Anlage bekannt ist)	Kurzschlußstrom der Anlage nicht angegeben	x		0,00	keine Bewertung	10,0
Erfahrungswerte / Tendenz für verwendeten Typ	problemlos			0,00	neuwertig	1,0
Ersatzteilbeschaffung wertwichtiger bzw. betriebsmitteltypischer Teile	aufwändig			33,00	ausreichend	2,0
<b>Begehung / Sichtkontrolle ohne Freischtaltung</b>				0,30	neuwertig	1,0
Zählerstand Schaltspiele (Gesamtanzahl seit Inbetriebnahme)	46			0,99	neuwertig	1,0
Schaltspiele seit letzter Wartung	10			1,33	neuwertig	2,0
elektrische Beanspruchung Unterbrechereinheit	nicht ermittelbar	x		0,00	keine Bewertung	9,0
mechanische Beanspruchung Unterbrechereinheit	keine besondere			1,73	neuwertig	6,0
Zählerstand Motoranläufe (Gesamtanzahl seit Inbetriebnahme)		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Motoranläufe seit letzter Wartung		x		0,00	keine Bewertung	2,0
Porzellanschäden Stützisolator	keine			0,00	neuwertig	1,0
Porzellanschäden Schaltkammerisolator	keine			0,00	neuwertig	1,0
Porzellankittfugen Stützisolator oben	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Stützisolator unten	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator oben	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator unten	schadensfrei			0,00	neuwertig	6,0
Dichtigkeit Steuerkondensatoren	dicht			0,00	neuwertig	8,0
Schutzanstrich	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Polsäulenflansch-Entwässerungsbohrung Polsäule oben	frei			0,00	neuwertig	1,0
Polsäulenflansch-Entwässerungsbohrung Polsäule unten	frei			0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikölstand LS EIN, Hydraulik auf Betriebsdruck, unteres Schauglas ölgefüllt	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0

Abb. 5.10: Technischer Bewertungsteil (Teil 1 neu) Leistungsschalter ELF 102-6012

<b>Sichtkontrolle ohne Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>			0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt	kein Wassereintritt		0,00	neuwertig	6,0
Gummidichtungen	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikdichtigkeit	dicht		0,00	neuwertig	1,0
Ausführung Hydraulikmeßleitungen	Edelstahlausführung		0,00	neuwertig	9,0
<b>Sichtkontrolle mit Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>		x	0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt		x	0,00	keine Bewertung	6,0
Gummidichtungen		x	0,00	keine Bewertung	1,0
Hydraulikdichtigkeit		x	0,00	keine Bewertung	1,0
Ausführung Hydraulikmeßleitungen		x	0,00	keine Bewertung	9,0
<b>Untersuchung mit Freischaltung</b>			10,73	neuwertig	1,0
Polsäulenbefestigung	fest		0,00	neuwertig	6,0
Zug-/Druckgestänge	fest u. unversehrt		0,00	neuwertig	6,0
Hydraulikölqualität	rötlich / klar		0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikölstand Ölfüllung	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikölstand LS AUS, Hydraulik druckentlastet, Ölstand im oberen Schauglas sichtbar	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Dichtigkeit Hydraulikmeßanschluß	dicht		0,00	neuwertig	3,0
Auslöser Y1,Y2,Y3 (Schrauben, Anschlüsse)	in Ordnung		0,00	neuwertig	6,0
Meldeschalter	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Steckerkabel	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
N <sub>2</sub> -Vorspanndruck bei 20°	228,00 bar				
Leckrate Hydrospeicher	neuwertig		23,14	neuwertig	6,0
Betriebssicherheit	neuwertig		4,34	neuwertig	6,0
Druckdifferenz Hydraulikdruckölverbrauch LS AUS -> EIN	23,00 bar		0,00	neuwertig	6,0
Druckdifferenz Hydraulikdruckölverbrauch LS EIN -> AUS	25,00 bar		0,00	neuwertig	6,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität HF	0,00 ppmV		0,00	neuwertig	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität SO <sub>2</sub>	0,00 ppmV		0,00	neuwertig	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - H <sub>2</sub> O-Anteil	0,100 g/m <sup>3</sup>		67,00	reparaturbedürftig	6,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - H <sub>2</sub> O-Taupunkt	-37,5 °C		0,00	neuwertig	6,0
SF <sub>6</sub> -Volumenprozentanteil	100,0 %		0,00	neuwertig	1,0
Mindestbetätigungsspannung Einschaltung	100,00 V		0,00	neuwertig	1,0
Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung I	105,00 V		1,56	neuwertig	9,0
Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung II	110,00 V		6,25	neuwertig	9,0
Auslöserwiderstand Einschaltkreis	172,00 Ω		29,76	ausreichend	1,0
Auslöserwiderstand Ausschaltkreis I	172,00 Ω		29,76	ausreichend	6,0
Auslöserwiderstand Ausschaltkreis II	172,00 Ω		29,76	ausreichend	6,0
Schaltkammerwiderstand Pol A	49 µΩ		16,88	neuwertig	1,0
Schaltkammerwiderstand Pol B	46 µΩ		11,25	neuwertig	1,0
Schaltkammerwiderstand Pol C	51 µΩ		20,63	neuwertig	1,0

Abb. 5.11: Technischer Bewertungsteil (Teil 2 neu) Leistungsschalter ELF 102-6012

Es zeigt sich, dass sich die Kennziffer für den technischen Gesamtzustand des Leistungsschalters nicht wesentlich geändert hat, auch wenn die textliche Formulierung des Gesamturteils nun „neuwertig“ und nicht mehr „ausreichend“ lautet. Die leichte Verbesserung des technischen Gesamtzustands resultiert dabei im Wesentlichen aus der differenzierter ausführbaren Bewertungsmöglichkeit des Parameters „SF<sub>6</sub>-Qualität - H<sub>2</sub>O-Anteil“. Die Anpassungen haben auch



Konsequenzen für die Darstellung der zusammenfassenden Beurteilungen, welche für die durchgeführte Testbewertung nun folgendes Aussehen haben:

#### Zusammenfassende Beurteilung

<b>Gesamtkennziffer (Ranking)</b>	<b>8,65</b>	
<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>neuwertig</b>	<b>5,48</b>
<b>technischer Handlungsbedarf hinsichtlich einzelner Parameter</b>	<b>mittel</b>	<b>67,00</b>
<b>Dringlichkeit</b>	<b>gering</b>	<b>46,90</b>
<b>Gesamtgefährdungspotential</b>	<b>gering</b>	<b>33,00</b>
<b>Wichtigkeit</b>	<b>mittel</b>	<b>70,00</b>

Abb. 5.12: Gesamtkennziffern (neu) Testbewertung Leistungsschalter ELF 102-6012

Der gesonderte Prüfungsabschnitt zum Vergleich von heuristisch / deterministischem und Evidenztheorieverfahren besteht aus der Analyse von Bewertungsergebnissen von 9 Transformatoren und 6 Leistungsschalter aus insgesamt vier Umspannanlagen (1 x ländliches, 3 x städtisches Versorgungsgebiet). Dazu werden diese 15 Betriebsmittel zunächst mit dem HD-Verfahren bewertet. Um ein möglichst gutes Abbild der Gegebenheiten in einem realen Energieversorgungsnetz zu erhalten, finden diese Prüfungen unter verschiedenen Randbedingungen statt. Es werden Geräte verschiedenen Typs aus allen Hochspannungsebenen (110 kV, 220 kV und 380 kV) und bei unterschiedlichen Betriebszuständen (3 x freigeschaltet, 12 x nicht freigeschaltet) untersucht. Anschließend dienen die ausgefüllten technischen Bewertungsteile einer jeden Bewertungsliste dem Evidenztheorieverfahren als Datenbasis zur erneuten Berechnung einer Kennziffer für den technischen Gesamtzustand des Betriebsmittels.

Im HD-Verfahren werden bei der Berechnungen einer technischen Gesamtzustandskennziffer gemäß Gleichung (3.1) die Zustandskennziffern aller Parametergruppen berücksichtigt, auch wenn aufgrund bestimmter Betriebsbedingungen nicht alle Parametergruppen geprüft werden können und somit die Berechnung der entsprechenden Gruppenkennziffer nicht möglich ist. Ihr Anteil bei der Berechnung der Gesamtzustandskennziffer ist dann 0. Das Evidenztheorieverfahren berücksichtigt nur einzelne Teilmodelle (entsprechen in etwa den Parametergruppen im HD-Verfahren) zur Ermittlung der

Zustandskennziffern und der Schwankungsbreite eines Bewertungsergebnisses. Eine grundsätzliche Darstellung dieser Teilmodellbildung in Form eines sog. Markovbaums zeigt Abbildung 2.4. Im hier vorgestellten Testbewertungsabschnitt werden die Zustandsmodelle des Evidenztheorieverfahrens aus den folgenden Teilmodellen aufgebaut.

Teilmodelle für die Transformatorbewertungen:

- Allgemeinzustand (bestehend aus den Parametern Alter, Anzahl der Umsetzungen und Belastung im Verhältnis zur Bemessungsleistung)
- Zustand des Isolieröls (bestehend aus den Parametern der Ölgasanalyse)
- Wicklungszustand (bestehend aus den Parametern der Kurzschlussimpedanzmessung)

Teilmodelle für die Leistungsschalterbewertungen:

- Allgemeinzustand (bestehend aus den Parametern Alter, Anzahl der Schaltspiele und Erfahrungswert für den untersuchten Typ)
- Auslösung (bestehend aus den Parametern Auslöserwiderstand Einschaltkreis und Auslöserwiderstand Ausschaltkreise I und II)
- Betätigung (bestehend aus den Parametern Mindestbetätigungsspannung Einschaltung und Mindestbetätigungsspannung Ausschaltungen I und II)
- Kammerwiderstand (bestehend aus den Parametern Schaltkammerwiderstand Pol A, B und C)

Die in den Teilmodellen berücksichtigten Parameter sind im Evidenztheorieverfahren mit den gleichen Gewichtungsfaktoren versehen wie im HD-Verfahren. Auf der Grundlage dieser Festlegungen werden im Folgenden einige ausgewählte Bewertungsergebnisse vorgestellt und analysiert. Weitere Vergleichsbewertungen befinden sich im Anhang C.

In Abbildung 5.13 sind die Simulationsergebnisse für einen nicht freigeschalteten 110-kV-Transformator (Trafo 11) in einer Umspannanlage in ländlicher Umgebung dargestellt.

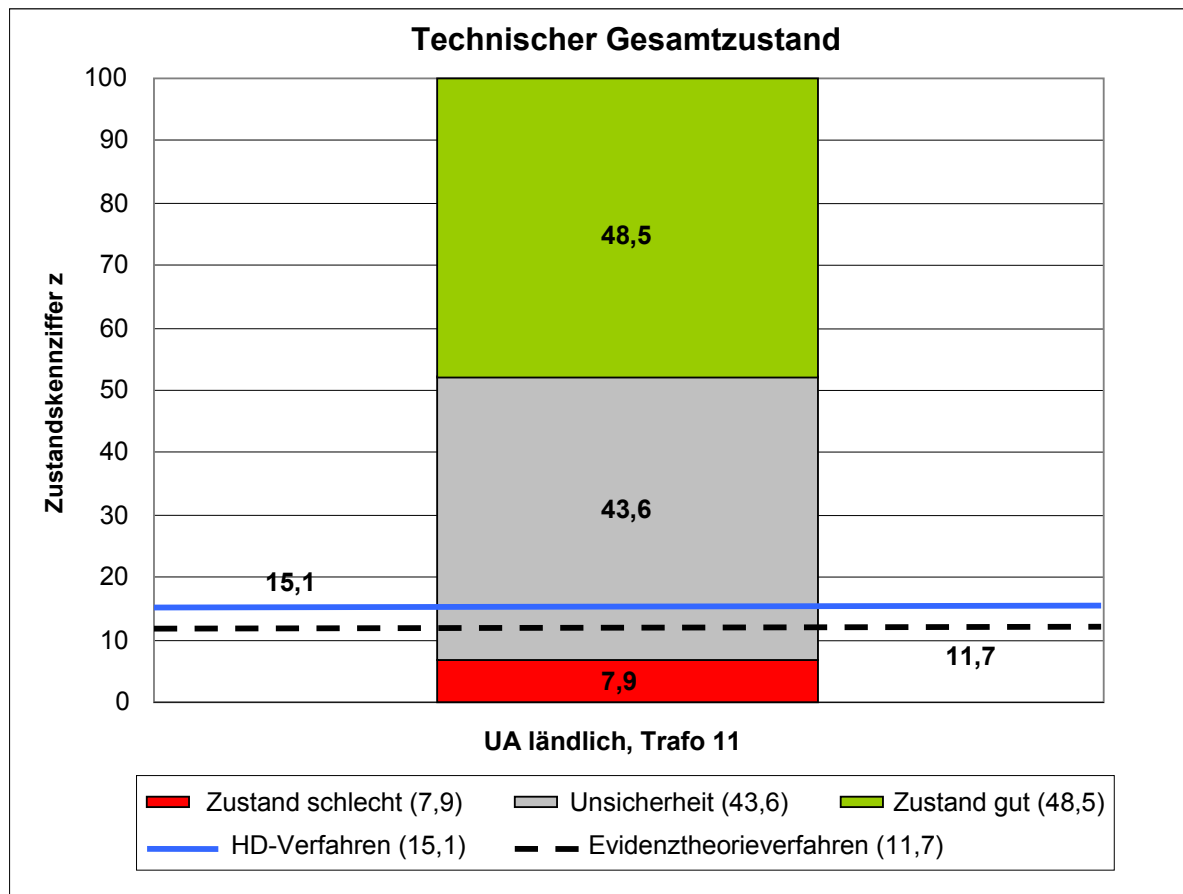


Abb. 5.13: Testbewertungsergebnisse UA ländlich, Trafo 11

Die auf Grundlage des Evidenzmodells ermittelte Zustandskennziffer (gemäß Gleichung (2.2)) beträgt 11,7 und ist in der Abbildung gestrichelt dargestellt. Es handelt sich dabei um den Wert, der ausschließlich mittels der vorliegenden Messdaten zum Allgemeinzustand und der Ölgasanalyse bestimmt wird. Aufgrund der nicht vorliegenden Freischaltung fehlen die Primärinformationen zum Teilmodell Wicklungszustand gänzlich. Außerdem ist die durchschnittliche Belastung unbekannt, so dass für die beiden Teilmodelle Allgemeinzustand und Wicklungszustand eine Extremwertabschätzung vorgenommen wird. Dies wird in der Abbildung deutlich durch den grau dargestellten Bereich der Unsicherheit. Die Schwankungsbreite der ermittelten Zustandskennziffer beträgt 43,6, wobei der bestmögliche Wert 7,9 beträgt. Im schlechtesten Fall liegt er bei 51,5. Als Referenz ist der auf Basis des HD-Verfahrens ermittelte Wert der Zustandskennziffer dargestellt (blaue Linie). Er beträgt 15,1 und liegt damit innerhalb der ermittelten Schwankungsbreite. Beide Verfahren kommen also nahezu zu dem gleichen Ergebnis. Es ist jedoch zu beachten, dass das HD-Verfahren alle in der Bewertungsliste vorgesehenen Messdaten verwendet. Nicht

ermittelbare Werte werden dabei ausgeklammert und gehen nicht in die Bewertung ein. In dem Evidenzmodell werden diese zur Abschätzung der Schwankungsbreite genutzt. Ein weiterer Unterschied zum HD-Verfahren besteht darin, dass hier nicht alle zur Verfügung stehenden Informationen genutzt werden, sondern das Modell durch drei wesentliche Teilmodelle abgebildet wird. Aus diesen Gründen ist die Vergleichbarkeit der beiden Werte zwar zunächst nur bedingt gegeben, es wird jedoch deutlich, dass die nahezu gleiche Aussage zum Betriebsmittelzustand getroffen wird. Es kann daher unterstellt werden, dass sich die Bewertungsergebnisse beider Verfahren weiter angleichen, wenn weitere Teilmodelle berücksichtigt werden. In einem realen Bewertungsfall würde die vorliegende Betriebsmittelbewertung demnach so interpretiert werden, dass aufgrund der annähernden Gleichheit der Zustandskennziffern die ermittelte Zustandsaussage („ausreichend“) zwar als tendenziell korrekt angenommen werden kann, eine präzisere Beurteilung aber aufgrund der relativ hohen Schwankungsbreite nur durch zusätzliche Maßnahmen (z. B. eine Freischaltung und anschließende Messung der Kurzschlussimpedanzen) zu erreichen ist. Es zeigt sich so auch, dass das Evidenztheorieverfahren durch den Ausweis einer Schwankungsbreite einen Mehrwert für die gesamte Bewertungssystematik darstellt.

Wie stark das Problem einer zu geringen Anzahl von Teilmodellen ein Bewertungsergebnis beeinflussen kann zeigt das folgende Untersuchungsbeispiel. Bei einem ebenfalls nicht freigeschalteten, 47 Jahre alten 110-kV-Trafo (Trafo 11) in einem städtischen Versorgungsgebiet fehlen wie im vorangegangenen Beispiel die Informationen zur durchschnittlichen Belastung und zum Wicklungszustand. In Abbildung 5.14 sind die Bewertungsergebnisse dargestellt.

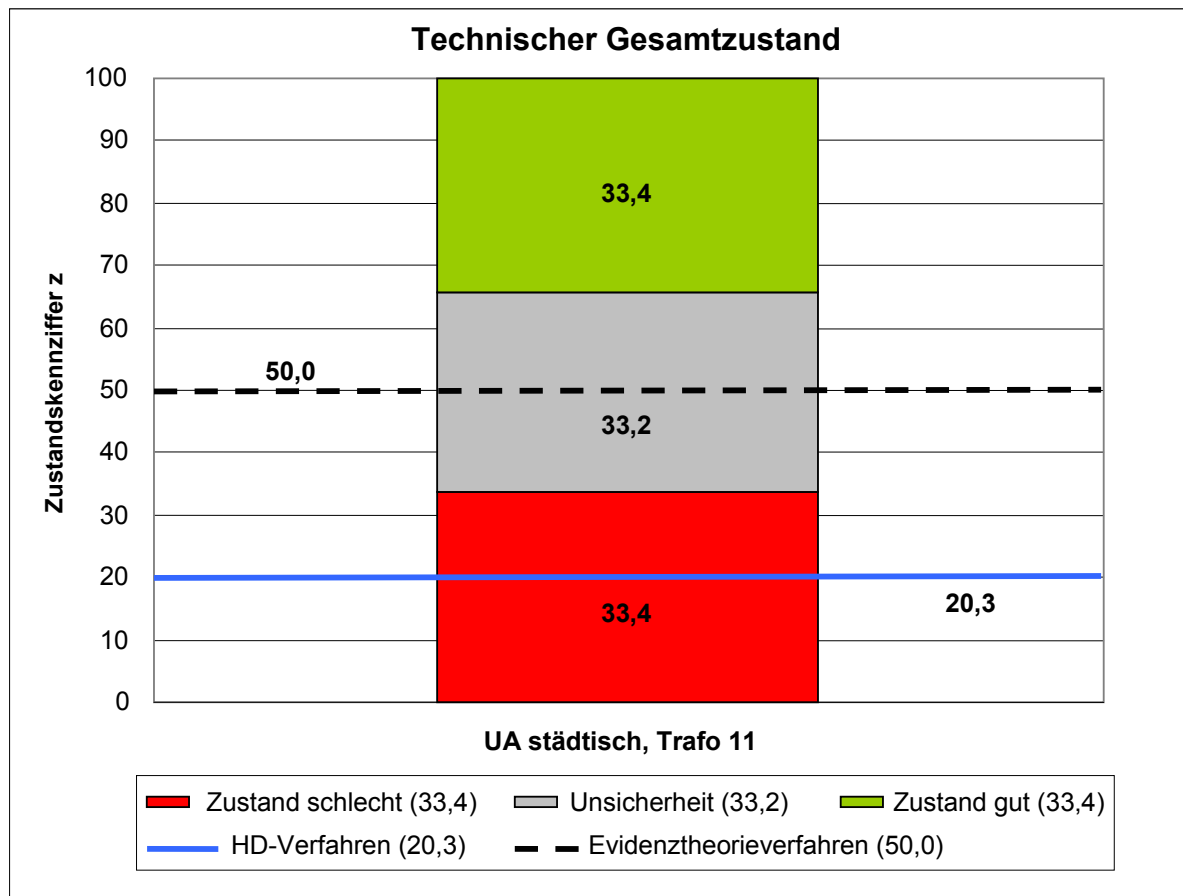


Abb. 5.14: Testbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 11

Das HD-Verfahren bewertet das Betriebsmittel mit einem Wert von 20,3 als ausreichend, laut Evidenzverfahren ist es bereits annähernd reparaturbedürftig ( $z=50$ ). Der Bereich der Schwankungsbreite schließt den Zustandswert des HD-Verfahrens nicht ein. Die Ursache der Abweichung liegt bei diesem Transformator im Wesentlichen darin begründet, dass er mit 47 Jahren ein sehr hohes Betriebsalter aufweist. Dieses führt im Teilmodell Allgemeinzustand des Evidenztheorieverfahrens zu einem hohen Punktwert und beeinflusst entsprechend stark das Gesamtergebnis, das aus der Kombination von nur drei Teilmodellen gebildet wird (von denen das Teilmodell Wicklungszustand zudem nicht bewertet werden konnte). Beim HD-Verfahren, in das in diesem Falle signifikant mehr und überwiegend gut beurteilte Messdaten eingehen, wird das Gesamtergebnis entsprechend schwächer durch das hohe Alter beeinflusst. Es wird so deutlich, dass für einen aussagekräftigen Vergleich der Zustandskennziffern dem Evidenztheorieverfahren eine ausreichende Anzahl von Teilmodellen zur Verfügung stehen muss.

Eine annähernde Gleichheit von berechneten Zustandskennziffern und die daraus resultierende gegenseitige Bestätigung beider Verfahren wird besonders dann erzielt, wenn aufgrund besonderer Betriebsbedingungen (z. B. bei einem freigeschalteten Betriebsmittel) die Möglichkeit zur Bewertung vieler Zustandsparameter besteht und beide Verfahren somit eine annähernd gleiche Datenbasis nutzen können. Dies zeigt das folgende Bewertungsbeispiel eines freigeschalteten Leistungsschalters in einem ländlichen Versorgungsgebiet.

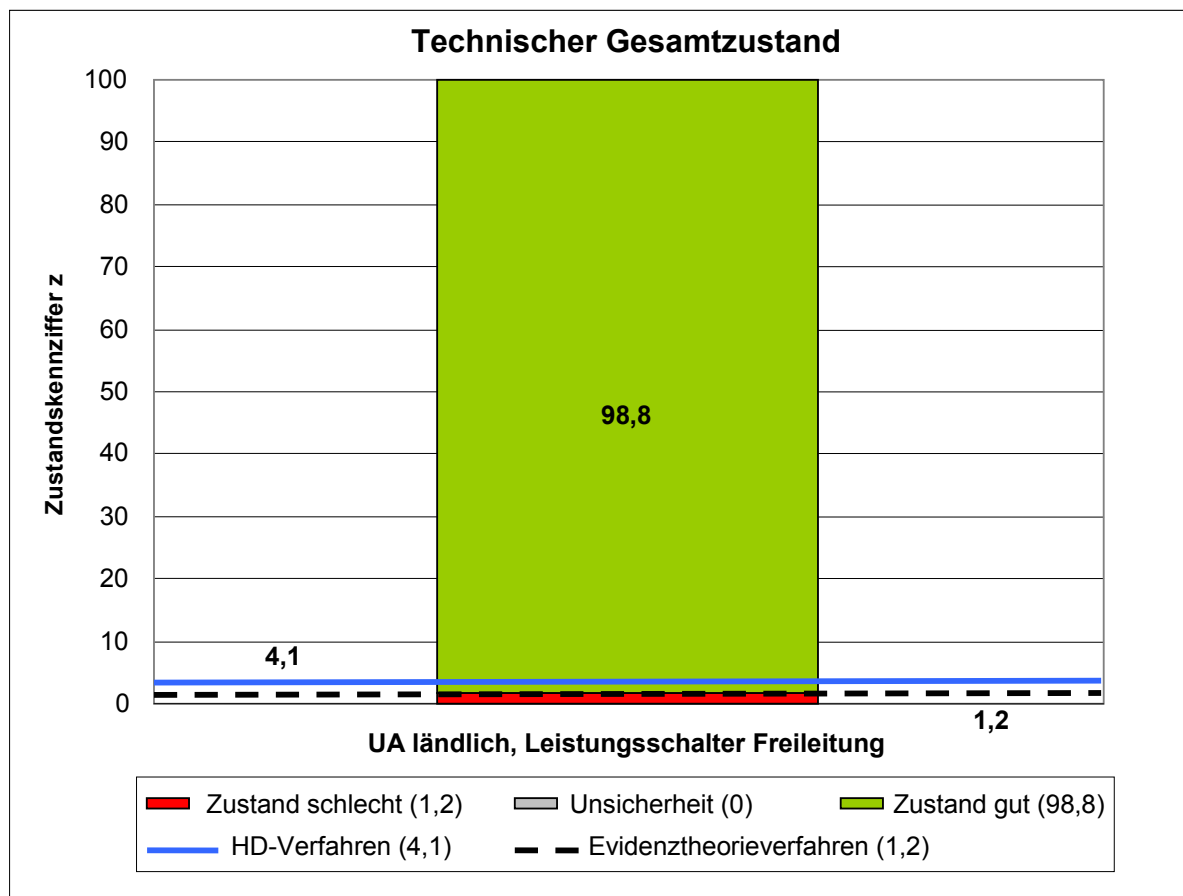


Abb. 5.15: Testbewertungsergebnisse UA ländlich, Leistungsschalter Freileitung

Im Rahmen der Freischaltung können alle Zustandsparameter bewertet werden, das Maß der Unsicherheit ist demnach 0. Die Zustandskennziffern weichen nur sehr geringfügig um knapp drei Punkte voneinander ab, was durch den Umstand begründet ist, dass der Umfang der im Evidenzmodell verwendeten Daten geringer ist. Übereinstimmend bewerten beide Verfahren den Schalter als neuwertig.

Können bei der Untersuchung eines Betriebsmittels beide Methoden in etwa auf die gleiche Eingangsdatenbasis zurückgreifen, ergibt sich bei einer Sortierung der im

Rahmen der Testbewertungen ermittelten Zustandskennziffern bei beiden Verfahren die gleiche Rangfolge der untersuchten Geräte. Dies belegen die folgenden Tabellen.

<b>Betriebsmittel</b>	<b>Zustandskennziffer HD-Verfahren</b>	<b>Zustandskennziffer Evidenzmodell</b>	<b>Priorität HD-Verfahren</b>	<b>Priorität Evidenzmodell</b>
UA ländlich, Trafo 11	20,29	49,99	1	1
UA städtisch, Trafo 11	14,56	25,04	2	2
UA städtisch, Trafo 12	14,26	22,19	3	3
UA städtisch, Trafo 211	12,10	17,19	4	4
UA städtisch, Trafo 421	10,23	16,36	5	5

Tab. 5.5: Prioritätenrangliste Transformatoren (Auswahl)

<b>Betriebsmittel</b>	<b>Zustandskennziffer HD-Verfahren</b>	<b>Zustandskennziffer Evidenzmodell</b>	<b>Priorität HD-Verfahren</b>	<b>Priorität Evidenzmodell</b>
UA städtisch, LS Trafo 13	38,98	48,61	1	1
UA städtisch, LS Freileitung	21,86	33,34	2	2
UA ländlich, LS Freileitung	4,06	1,16	3	3
UA ländlich, LS Trafo 12	1,04	0,76	4	4

Tab. 5.6: Prioritätenrangliste Leistungsschalter (Auswahl)

Es wird deutlich, dass sich trotz voneinander abweichender Zustandskennziffern bei beiden Verfahren die gleiche Prioritätenrangfolge ergibt. Dieser Umstand stützt die These, dass sowohl das heuristisch / deterministische als auch das Evidenztheorieverfahren zur Zustandsbestimmung von Betriebsmitteln geeignet sind.

### **5.2.3 Bewertungsergebnisse von gleichartigen Betriebsmitteln bei unterschiedlichem Eingangsdatenumfang**

Ein spezielles Testbewertungsziel ist die Beantwortung der Frage, ob Bewertungsergebnisse auch dann vergleichbar sind, wenn die jeweiligen Geräteeinzelbewertungen mit unterschiedlichem Eingangsdatenumfang vorgenommen werden. In der praktischen Anwendung einer Bewertungssystematik ist dies der Regelfall. Nur selten wird man ideale Bewertungsbedingungen dahingehend vorfinden, dass beispielsweise alle zu prüfenden Leistungsschalter einer Umspannanlage freigeschaltet sind, somit alle Zustandsparameter beurteilt werden können und Ergebnisse auf exakt der gleichen Datenbasis beruhen.

Die vorliegende Bewertungssystematik bietet zwei Möglichkeiten zur Abschätzung der Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen. Die erste ist die Interpretation der durch das Evidenztheorieverfahren ausgewiesenen Schwankungsbreite eines Bewertungsergebnisses und wurde bereits im vorangegangenen Kapitel 5.2.2 vorgestellt. Dabei ist eine differenzierte Betrachtung möglich. Sind die aus dem heuristisch / deterministischen und dem Evidenztheorieverfahren ermittelten Zustandskennziffern trotz einer u. U. nicht vernachlässigbaren Schwankungsbreite annähernd gleich (vgl. Beispiel gemäß Abbildung 5.13), kann der Anwender die tendenzielle Richtigkeit der ermittelten Zustandsaussage unterstellen und eventuell trotz einer signifikanten Schwankungsbreite auf zusätzliche (u. U. unverhältnismäßig kostenintensive) Maßnahmen zur Erhärtung der Zustandsaussage verzichten. Liegen die Zustandskennziffern beider Verfahren hingegen zu weit auseinander oder übersteigt die ermittelte Schwankungsbreite ein vertretbares Maß, sollten Maßnahmen zur zusätzlichen Datengewinnung ergriffen werden.

Die zweite Möglichkeit zur Vergleichbarkeitsabschätzung von Bewertungsergebnissen besteht in der Festlegungen betriebsmittelspezifischer



Voraussetzungen, welche mindestens vorliegen müssen, um ein Gerät sinnvoll und aussagekräftig bewerten zu können. Im Nachgang der Testbewertungen wurden zu diesem Zwecke einzelne Bewertungslisten mit zusätzlichen Funktionen versehen. Dabei wird durch die Beurteilung bestimmter Schlüsselkriterien automatisiert festgelegt, ob gerätespezifische Mindestvoraussetzungen erfüllt sind und ein Bewertungsergebnis aussagekräftig ist, oder ob die bis dato gesammelten Bewertungsdaten nicht für eine gesicherte Zustandsaussage ausreichen. Ein Beispiel einer derart ausgestatteten Bewertungsliste zeigt die folgende Abbildung (Ausschnitt aus dem technischen Bewertungsteil eines 110-kV-Leistungsschalters vom Typ Siemens H801).

Isolierölundichtigkeit Polsäule	dicht		0,00	neuwertig	8,0
Hydraulikölstand	nicht in Ordnung		67,00	reparaturbedürftig	6,0
Schutzanstrich	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
<b>Sichtkontrolle ohne Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>			34,62	ausreichend	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt	Wassereintritt		100,00	ungenügend	6,0
Gummidichtungen	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Hydraulikundichtigkeit	dicht		0,00	neuwertig	6,0
Dichtigkeit Hydraulikmeßanschluß	undicht		100,00	ungenügend	3,0
Auslöser, Einschaltventil	in Ordnung		0,00	neuwertig	6,0
Meldeschalter	in Ordnung		0,00	neuwertig	3,0
Steuerkabel	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
<b>Zwischenbewertung nach Prüfung ohne Freischaltung</b>			0,00		
Schaltstift ausgetauscht oder Schaltstiftausführung unkritisch?	ja		0,00		
Stößel: obere Einspritzung ausgetauscht oder Stößelaußführung unkritisch?	ja		0,00		
max. 100 Schaltungen seit letzter Kontrolle Festkontakte ?	ja		0,00		
max. 100 Schaltungen seit letzter Kontrolle Löschkammerplatten ?	ja		0,00		
Auslaßventil innerhalb der letzten 8 Jahre kontrolliert?	ja		0,00		
<b>Hinreichend genaue Bewertung aufgrund der bisherigen Ergebnisse</b>	<b>Intensivinspektion für qualitativ höherwertigere Bewertung durchführen?</b>				
	nein				
<b>Sichtkontrolle mit Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>	x		0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt	x		0,00	keine Bewertung	6,0
Gummidichtungen	x		0,00	keine Bewertung	1,0

Abb. 5.16: Beispiel Bewertungsliste Leistungsschalter Typ Siemens H801 bei vorliegenden Mindestvoraussetzungen

Man erkennt, dass nach der Beurteilung von Parametern, die ohne das Vorliegen einer Freischaltung des Schalters ermittelbar sind, eine Zwischenbewertung anhand einiger Schlüsselkriterien vorgenommen werden muss. Nur wenn diese Schlüsselkriterien positiv beurteilt werden, wird die auf der Grundlage der bis dato

gesammelten Parameterbewertungen formulierte Zustandsbestimmung als hinreichend aussagekräftig akzeptiert („Hinreichend genaue Bewertung aufgrund der bisherigen Ergebnisse“). Wird hingegen mindestens ein Schlüsselkriterium negativ oder als nicht ermittelbar beurteilt (wie in Abbildung 5.17 exemplarisch dargestellt), gilt die bisher ermittelte Zustandsaussage als nicht aussagekräftig. Dem Anwender wird signalisiert, dass nur durch weiterführende Untersuchungen die Bestimmung einer Zustandsaussage möglich ist („Intensivinspektion empfohlen“). Über ein entsprechendes Auswahlfeld kann dann der Anwender entscheiden, ob er weitere Zustandsparameter zur Bewertung freigegeben möchte oder das Gerät von weiterführenden Auswertungen auszuschließen ist.

Isolierölundichtigkeit Polsäule	dicht		0,00	neuwertig	8,0	
Hydraulikölstand	nicht in Ordnung		67,00	reparaturbedürftig	6,0	
Schutzanstrich	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0	
<b>Sichtkontrolle ohne Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>			34,62	ausreichend	1,0	
Kontrolle auf Wassereintritt	Wassereintritt		100,00	ungenügend	6,0	
Gummidichtungen	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0	
Hydraulikundichtigkeit	dicht		0,00	neuwertig	6,0	
Dichtigkeit Hydraulikmeßanschluß	undicht		100,00	ungenügend	3,0	
Auslöser, Einschaltventil	in Ordnung		0,00	neuwertig	6,0	
Meldeschalter	in Ordnung		0,00	neuwertig	3,0	
Steuerkabel	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0	
<b>Zwischenbewertung nach Prüfung ohne Freischaltung</b>			100,00			
Schaltstift ausgetauscht oder Schaltstiftausführung unkritisch?	ja		0,00			
Stößel: obere Einspritzung ausgetauscht oder Stößelaußführung unkritisch?	nein		100,00			
max. 100 Schaltungen seit letzter Kontrolle Festkontakte ?	ja		0,00			
max. 100 Schaltungen seit letzter Kontrolle Löschkammerplatten ?	ja		0,00			
Auslaßventil innerhalb der letzten 8 Jahre kontrolliert?	nicht ermittelbar		100,00			
<b>Intensivinspektion empfohlen!</b>	<b>Intensivinspektion durchführen?</b>					
	ja					
	nein					
<b>Sichtkontrolle mit Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>			x	0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt		x	0,00	keine Bewertung	6,0	
Gummidichtungen		x	0,00	keine Bewertung	1,0	

Abb. 5.17: Beispiel Bewertungsliste Leistungsschalter Typ Siemens H801 bei nicht vorliegenden Mindestvoraussetzungen

#### 5.2.4 Eindeutigkeit von Parameterbeurteilungskriterien

Ein grundsätzliches Problem bei der qualitativen Bewertung eines Kriteriums ist es, die zur Auswahl stehenden Urteile so zu formulieren, dass sie weitestgehend eindeutig, nachvollziehbar und verständlich sind. Idealerweise sollte der Zustand eines Parameters auch dann ein immer gleichlautendes Urteil aufweisen, wenn er von mehreren Betriebsmittelprüfern in unabhängig voneinander durchgeführten Untersuchungen geprüft wird. Es ist jedoch festzustellen, dass ein gewisser Interpretationsspielraum nicht vollständig eliminiert, sondern nur minimiert werden kann. Beispielsweise bewertet der eine Betriebsmittelprüfer den Korrosionsschutz eines Betriebsmittels als reparaturbedürftig, weil er kleinere Korrosionsstellen als beginnende Durchrostung interpretiert. Ein anderer Betriebsmittelprüfer beurteilt die gleichen Korrosionsstellen als nicht akut betriebsgefährdend und bewertet den Parameter als ausreichend. Beide Betriebsmittelprüfer können mit Recht die Korrektheit ihres jeweiligen Urteils reklamieren, in der Bewertungssystematik werden aber unterschiedliche Parameterkennziffern berechnet und weiterverarbeitet. Enthält eine Bewertungsliste eine größere Anzahl solcher nicht eindeutigen bzw. interpretationsfähigen Parameterbeurteilungen, kann sich dies negativ auf die Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen auswirken.

Diese grundsätzliche Problematik kann auf verschiedenen Arten minimiert werden. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit, Parameterzustände mit Beispielabbildungen (Fotos von Geräteschäden, Zeichnungen etc.) zu versehen und so eine Zuordnung von Urteilen vorzuschreiben. In den Testbewertungen zur vorliegenden Bewertungssystematik wird das Problem in mehreren Teilschritten angegangen. Ein erster Schritt besteht darin, in den Feedback-Gesprächen mit den Betriebsmittelprüfern Schwachstellen hinsichtlich der Eindeutigkeit von Parameterbeurteilungen zu identifizieren und anschließend zu eliminieren. Als Resultat dieser nachträglichen Analysen sind diverse Parameterurteile umformuliert oder die Auswahlfelder zur Parameterbeurteilung dahingehend erweitert worden, dass durch zusätzliche Formulierungen eine differenziertere und eindeutigere Bewertung ermöglicht wird. Weiterhin werden viele ursprünglich sehr allgemein ausgedrückte Urteile („gut, mittel, schlecht“) durch mehr auf den technischen Charakter des jeweiligen Parameters zugeschnittene Formulierungen ersetzt. Die folgende Tabelle zeigt einige Beispiele für die beschriebenen Entwicklungsprozesse.

Betriebsmittel / Zustandsparameter	Ursprüngliche Urteils- formulierungen	Ursprünglich zugeordnete Kennziffern	Angepasste Urteils- formulierungen	Angepasste zugeordnete Kennziffern
110-kV-Kabel: Parameter Endverschlussköpfe	in Ordnung	0	in Ordnung	0
			korrodiert	33
	nicht in Ordnung	100	mechanisch beschädigt	67
			undicht	100
Hochspannungswandler: Parameter Lunkerstellen Topfgehäuse	dicht	0	dicht	0
			leicht schwitzend	33
	undicht	100	stark schwitzend	67
			tropfend	100
Nachrichtentechnische Übertragungstechnik: Parameter Qualität Managementsystem	gut	0	steuern, überwachen, messen	0
	mittel	33	nur steuern und überwachen	33
	schlecht	67	nur überwachen	67
Batterie: Parameter klimatische Raum- bedingungen (jährliche Raumtemperatur- schwankungen)	keine/gering	0	$\Delta T < 4^\circ \text{C}$	0
			$\Delta T > 4^\circ \text{C}$	33
	erheblich	100	$\Delta T > 8^\circ \text{C}$	67
			$\Delta T > 16^\circ \text{C}$	100

Tab. 5.7: Beispiele angepasster Parameterbeurteilungsformulierungen

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung von Unsicherheiten hinsichtlich vorzunehmender Parameterbeurteilungen besteht darin, dem Betriebsmittelprüfer durch in die Bewertungslisten integrierte Kommentareinblendungen Zusatzinformationen und Beurteilungsanleitungen zur Verfügung zu stellen. Ein Beispiel zeigt der folgende Ausschnitt aus der Bewertungsliste für nachrichtentechnische Übertragungstechnikgeräte.

<b>Gerätegrunddaten</b>			37,64	ausreichend
Grad der Bestückung	keine spezielle Bestückung angegeben bzw. vorhanden	x	0,00	keine Bewertung
Softwarestand	aktuell, update-fähig		0,00	neuwertig
Hardwarestand	aktuell		0,00	neuwertig
Managementfähigkeit	ja		0,00	neuwertig
Fernüberwachung	nein		100,00	ungenügend
Übertragungsmedium	optisch und elektrisch		0,00	neuwertig
Letzter Batteriewechsel liegt zurück			0,00	neuwertig
Support-Einschränkung bei erfolgter Abkündigung durch den Hersteller?	<b>Anmerkungen:</b> - Parameter nur relevant, wenn das System tatsächlich vom Hersteller abgekündigt wurde - Eintragung "nein" vornehmen, wenn Abkündigungstermin ausreichend Zeit für Systemersatz läßt - Eintragung "teilweise" vornehmen, wenn Service <u>oder</u> Hard-/Software-Support kurzfristig eingeschränkt wird - Eintragung "ja" vornehmen, wenn Service <u>und</u> Hard-/Software-Support kurzfristig eingeschränkt wird		67,00	reparaturbedürftig
Dokumentation			0,00	neuwertig
<b>Sichtkontrolle Gerät</b>			31,32	ausreichend
Klimatische Umgebungsbedingungen			0,00	neuwertig
Eignung des Aufstellungsorts			0,00	neuwertig
Feld- und Gerätekenzeichnung	in Ordnung		0,00	neuwertig
Zustand Klemmleisten, Verdrahtung, Automaten etc.	neuwertig		0,00	neuwertig
Zustand Belüftung	nicht in Ordnung		100,00	ungenügend
mechanischer Zustand und Festigkeit Schnittstellen	ausreichend		33,00	ausreichend
Zugänglichkeit Schnittstellen	schlecht		67,00	reparaturbedürftig
Zustand Schrank-, Rahmen- und Geräteerdung	reparaturbedürftig	zwar mechanisch fest, aber zu geringer Querschnitt	67,00	reparaturbedürftig

Abb. 5.18: Beispiel für Kommentareinblendungen zur Bewertungsunterstützung

Präzisierungen und Anpassungen von Urteilsformulierungen sind auch als Folge eines nicht repräsentativen, aber dennoch aufschlussreichen Testszenarios vorgenommen worden. Dazu wurde ein einzelnes Betriebsmittel in unabhängig voneinander durchgeführten Inspektionen von vier Betriebsmittelprüfern bewertet. Ziel dieses Szenarios war die Überprüfung, ob die Bewertungsbestandteile einer Betriebsmittelliste von allen Prüfern in etwa gleichwertig interpretiert wurden und die Bewertungsergebnisse somit annähernd identisch sind, oder ob die Interpretationsbandbreite doch so groß ist, dass sich signifikante Unterschiede in der Beurteilung des Geräts ergeben. Es zeigte sich, dass zwar alle vier Bewertungsergebnisse leicht voneinander abwichen (niedrigste Zustandskennziffer 11,3, höchste Zustandskennziffer 17,4), alle Prüfer aber zu tendenziell ähnlichen Gesamturteilen kamen und Abweichungen fast ausschließlich aus der unterschiedlichen Beurteilung allgemein formulierter Beurteilungskriterien („gut, mittel, schlecht“) resultierten. Nach der Anpassung von bemängelten Beurteilungskriterien wurden zwar immer noch keine identischen Ergebnisse erzielt, das Intervall der Zustandskennziffern konnte aber von 6,1 auf 3,7 Bewertungspunkte verkleinert werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kernaufgabe für Betreiber von elektrischen Netzen ist die Gewährleistung einer jederzeit sicheren und wirtschaftlichen Versorgung mit elektrischer Energie. Dabei ist die Planung und Durchführung von Maßnahmen zur Instandhaltung und Erneuerung der eingesetzten elektrischen Betriebsmittel von entscheidender Bedeutung. Die in der Vergangenheit hauptsächlich verfolgten Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien hatten das Merkmal der Zeitabhängigkeit, festgelegte Zyklen gaben den Zeitpunkt einer Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahme vor. Zur Optimierung des Personaleinsatzes und als Ansatz zur Kostenreduzierung gewinnt in jüngerer Vergangenheit die zustandsabhängige Instandhaltung an Bedeutung. Dabei werden Wartungs- und Erneuerungsmaßnahmen nicht mehr nach vorgegebenen Zeitintervallen sondern abhängig vom individuellen Zustand eines Betriebsmittels vorgenommen. Vor allem im Bereich der Hochspannungstechnik ist eine Kostenreduzierung durch eine optimierte Instandhaltungsstrategie erstrebenswert, da hier die Betriebsmittel sehr teuer sind und auch Wartungsarbeiten in der Regel hohen finanziellen Aufwand erfordern.

Grundlage einer solchen Strategie ist die Kenntnis des aktuellen und objektiv ermittelten Zustands eines elektrischen Betriebsmittels. Zu diesem Zwecke wurde das in dieser Arbeit vorgestellte automatisierte Verfahren zur systematischen Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln entwickelt. Es ist geeignet, den aktuellen Zustand eines Einzelbetriebsmittels, einer Betriebsmittelgruppe oder eines Systems zu ermitteln, auszuwerten und zu dokumentieren. Besondere Merkmale der vorliegenden Bewertungssystematik sind dabei, dass hier zum einen ein vollständiger Katalog standardisierter Bewertungslisten für alle Arten von Hochspannungsgeräten vorliegt, zum anderen eine universell anwendbare Auswertungssystematik den Vergleich von Bewertungsergebnissen auch unterschiedlicher Bereiche der Hochspannungstechnik ermöglicht.

Ein erster Schritt zur Entwicklung der Bewertungssystematik bestand in der Identifikation von zustandsrelevanten Betriebsmittelparametern für alle Arten von Hochspannungsgeräten. Anschließend wurde für jeden Zustandsparameter festgelegt, mit welchen Beurteilungsformulierungen sein aktueller Zustand beschrieben werden kann, welchen Funktionsverlauf er auf dem Weg von seinem

optimalen bis zu seinem schlechtesten Zustand beschreibt und wie seine Zustandsbewertung im Verhältnis zu anderen Parameterbeurteilungen zu gewichten ist. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden dann standardisierte und in weiten Teilen normierte Betriebsmittelbewertungslisten für alle Arten von Hochspannungsgeräten entwickelt und die Methodik als heuristisch / deterministisches Bewertungsverfahren bezeichnet. Die Bewertungslisten dienen als Grundlage und Datenbasis einer ebenfalls neu entwickelten übergeordneten, universellen Auswertungssystematik, mit deren Hilfe Einzelbewertungen von Komponenten aller Hochspannungsbetriebsmittelgruppen nach dem gleichen Schema analysiert, vergleichbar gemacht und zu Systembeurteilungen zusammengefasst werden können.

In den nahezu identisch aufgebauten Bewertungslisten werden durch qualitative Beurteilungen von betriebsmittelspezifischen Zustandsparametern zunächst drei essentielle Zustandsaussagen automatisch generiert. Im ersten Bewertungsteil wird der rein technische Zustand eines Betriebsmittels ermittelt und, wie auch alle anderen Zustandsaussagen, durch eine normierte Zustandskennziffer sowie ein textliches Urteil ausgedrückt. In einem zweiten Bewertungsteil wird beurteilt, in welchem Maße vom Betriebsmittel ein grundsätzliches oder mangelbegründetes Gefährdungspotential hinsichtlich einer Personen- und Umweltgefährdung sowie der Einhaltung von Richtlinien und Vorschriften ausgeht. Im dritten Bewertungsteil wird die Wichtigkeit des untersuchten Betriebsmittels im betrachteten Hochspannungsnetz klassifiziert.

Der technische Gesamtzustand eines Betriebsmittels wird in der vorliegenden Bewertungssystematik auf zwei Arten ermittelt, welche auf der Grundlage der gleichen Eingangsdatenlage auf unterschiedlichem Wege zu einer technischen Gesamtzustandsaussage kommen. Zweck dieser Vorgehensweise ist es, mittels Vergleich und Validierung der Ergebnisse eine Zustandsbeurteilung als Resultat der einen Methodik durch eine alternative Systematik zu bestätigen und somit die Unsicherheit bezüglich der Richtigkeit einer Zustandsaussage zu reduzieren. Der alternativ ermittelte Betriebsmittelzustand wird dabei in Abhängigkeit ausgewählter Diagnosewerte mit Hilfe der Evidenztheorie modelliert. Dies ist ein Berechnungsmodell, das im Gegensatz zur herkömmlichen Wahrscheinlichkeitstheorie auch die Unsicherheit bzw. Unkenntnis von

Eingangsinformationen berücksichtigt. Es kann daher neben der Zustimmung und der Ablehnung einer Diagnose (hier „guter“ oder „schlechter“ Zustandswert) ein Plausibilitätsintervall angegeben werden. Dieses Intervall liefert ein Maß, welche Werte eine Zustandskennziffer höchstens bzw. mindestens annehmen kann, wenn alle zustandsbeschreibenden Parameter geprüft werden. Die Angabe einer derartigen Schwankungsbreite stellt einen Mehrwert innerhalb der Bewertungssystematik dar und eignet sich zur Abschätzung, ob die Anzahl der vorgenommenen Einzelparameterbewertungen ausreicht und die ermittelte Zustandskennziffer trotz der Unkenntnis einiger Prüfparameter hinreichend genau ist, oder ob die Ermittlung weiterer Bewertungsdaten zur Präzisierung einer Zustandsaussage notwendig und sinnvoll ist.

Aus den drei essentiellen Zustandsaussagen zum technischen Gesamtzustand, zum Gefährdungspotential und zur Wichtigkeit eines Betriebsmittels wird eine Gesamtkennziffer gebildet. Diese dient vor allem der Ermittlung einer Qualitätsrangfolge innerhalb einer untersuchten Betriebsmittelgruppe. Die Rangliste liefert somit einen ersten Hinweis darauf, mit welchem Betriebsmittel hinsichtlich der Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen begonnen werden sollte. Weiterhin werden alle schlecht beurteilten Betriebsmittelparameter identifiziert und explizit ausgewiesen. Ein so begründeter technischer Handlungsbedarf wird mathematisch mit der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz verknüpft. Als Ergebnis wird dann ein Maß für die Dringlichkeit einer Instandsetzungsmaßnahme in Form einer Kennziffer ausgewiesen. Im besonderen Fall eines als hoch ermittelten Gefährdungspotentials wird die Kennziffer für die Dringlichkeit einer Maßnahme automatisch auf den Maximalwert gesetzt (höchste Dringlichkeit).

Die Kennziffern der essentiellen und abgeleiteten Zustandsaussagen werden in der vorliegenden Bewertungssystematik auf immer gleiche Art und Weise errechnet, bewegen sich im Intervall zwischen 0 (= optimaler Zustand) bis 100 (= ungenügender Zustand) und ermöglichen so die Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen auch unterschiedlicher Gerätearten.

Die universell anwendbare Auswertungssystematik bietet die Möglichkeit, durchgeführte Geräteeinzelbewertungen nach individuell definierbaren Kriterien zusammenzufassen, um daraus Systembewertungen zu generieren und diese



tabellarisch und graphisch darzustellen. Die so zu erzielenden Zustandsdarstellungen von Betriebsmittelgruppen, Spannungsebenen oder Systemen liefern weitere Entscheidungshilfen hinsichtlich der zu wählenden Instandhaltungsstrategie. Die Systematik enthält außerdem Algorithmen zur automatisierten Generierung von benötigten Bewertungslisten im Vorfeld einer Netzbewertung, zur Erstellung einer standardisierten Ordnerstruktur für die Einordnung und Archivierung von Bewertungslisten, zur Generierung von Mängel- und Arbeitslisten für das Betriebspersonal sowie zur automatischen Berichtserstellung zum Zwecke der strukturierten Dokumentation einer durchgeführten Betriebsmittelbewertung.

Die theoretisch entwickelten Bewertungslisten sowie die hinterlegten Analyse- und Auswertungsverfahren wurden in umfangreichen Feldversuchen in einem realen Energieversorgungsnetz auf ihre Praxistauglichkeit getestet. Dazu wurden theoretische und praktische Betriebsmittelbewertungen durchgeführt, alternative Berechnungsmethoden berücksichtigt, Präzisierungen und Anpassungen vorgenommen sowie Bewertungsergebnisse auch am Erfahrungsschatz von Betriebsmittelexperten gespiegelt.

Es zeigte sich, dass alle betriebsmittelspezifischen Bewertungslisten und auch die Methoden zur Zusammenfassung und Weiterverarbeitung erzielter Bewertungsergebnisse geeignet sind, realistische und nachvollziehbare Aussagen zum Zustand eines einzelnen Geräts vornehmen zu können. Als Ergebnis eines gesonderten Prüfungsabschnitts zum Vergleich von heuristisch / deterministischem und Evidenztheorieverfahren konnte festgestellt werden, dass das Evidenztheorieverfahren zur alternativen Ermittlung eines technischen Gerätezustands eine sehr gute Ergänzung zum heuristisch / deterministischen Verfahren darstellt. Zum einen kamen beide Verfahren bei Testbewertungen ausgewählter Betriebsmittel zu ähnlichen Ergebnissen (beide Methoden bestätigten sich so gegenseitig), zum anderen erwies sich die Angabe einer Schwankungsbreite von Bewertungsergebnissen als qualitativer Mehrwert.

Zur zukünftigen Erweiterung und Optimierung der vorliegenden Bewertungssystematik sind verschiedene Entwicklungsszenarien denkbar. So könnten beispielsweise Forschungen im Hinblick auf eine Systematisierung und Darstellung von Ausfallwahrscheinlichkeiten auf der Grundlage eines ermittelten

Gerätezustands von Nutzen sein. Diesbezügliche Überlegungen lassen sich eventuell noch dahingehend optimieren, dass für ein entsprechendes Abschätzungsmodell nur einige hochgewichtete und gleichzeitig ungenügend beurteilte Betriebsmittelparameter berücksichtigt werden müssen und so die Kosten zur Ermittlung der notwendigen Daten reduziert werden können. In eine ähnliche Richtung zielen auch Überlegungen zur Erweiterung des Verfahrens um eine Risikooptimierung von Betriebsmittelkollektiven. Dazu werden der Zustand und die Wichtigkeit von Betriebsmitteln zu einzelnen Risikowerten verknüpft, die in ihrer Gesamtheit unter Verwendung von linearer Programmierung optimiert werden. Durch diese Systematik wird sichergestellt, dass die Betriebsmittel in einem optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnis instand gehalten werden. Wesentliche Randbedingungen sind dabei die Einhaltung fester Budgets sowie definierter Qualitätsstandards, so dass dieses Verfahren insbesondere vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit bei der Zuordnung finanzieller Mittel von besonderem Interesse ist.

Weiterhin ist eine Erweiterung der Bewertungssystematik im Hinblick auf eine verbesserte Mängel- und Schadensanalyse denkbar. Ein erster Schritt ist durch die Möglichkeit einer automatisierten Mängellistenerstellung zwar bereits realisiert, doch dient diese Funktionalität vor allem der Auflistung identifizierter Mängel, um daraus gezielte Instandsetzungsmaßnahmen ableiten zu können. Es ist bis dato nicht ohne besonderen Aufwand möglich, flexible und individuell definierte Analysen im Sinne einer Datenbankanwendung vorzunehmen (beispielsweise um einen immer wiederkehrender Mangel an einer Hochspannungskomponente auch statistisch auszuwerten). Bestehende Informationssysteme oder Störungsdatenbanken haben zuweilen den Nachteil, dass durch fehlende Standardisierungen (z. B. Fehler durch die uneinheitliche, manuelle Eingabe von Störungsereignissen) die Analyse von Mängeln oder Geräteschäden erschwert wird. Aufgrund der Standardisierung und weitgehenden Normierung der vorliegenden Bewertungssystematik könnte dieser Nachteil bei einem Transfer von Mängeldaten in ein Analysesystem vermieden werden.

Bei der Ergebnisanalyse von Betriebsmittelbewertungen, die sowohl mit dem heuristisch / deterministischen als auch mit dem Evidenztheorieverfahren vorgenommen wurden, wurde festgestellt, dass Bewertungsergebnisse immer dann signifikant voneinander abwichen, wenn dem Evidenzmodell eine zu geringe Anzahl

von Teilmodellen (bewertbare Parametergruppen) zur Verfügung stand. Es sollte daher für alle Hochspannungsbetriebsmittel geprüft werden, auf welche Weise eine Erweiterung der Modelle und damit die Nutzung weiterer Messdaten die Ergebnisse beeinflusst. Ausgehend von dieser Analyse sollten die Teilmodelle erweitert und entsprechende Anpassungen in allen Bewertungslisten vorgenommen werden. Weiterhin sollte untersucht werden, inwieweit die durch das Evidenzmodell errechnete Schwankungsbreite eines Bewertungsergebnisses für weiterführende Auswertungen nutzbar ist. So ist beispielsweise die Implementierung einer Funktion denkbar, die ein Bewertungsergebnis ab einer bestimmten Unsicherheit automatisch von weiteren Auswertungen ausschließt. Bei der Zustandsdarstellung von Betriebsmittelgruppen oder Systemen werden dann nur die Betriebsmittel berücksichtigt, für die zur Bewertung eine ausreichende Datenbasis vorlag.

Eine weitere Möglichkeit zur Ergänzung der vorliegenden Bewertungssystematik besteht darin, identifizierte Mängel zur Kostenabschätzung für resultierende Instandsetzungsmaßnahmen heranzuziehen. Existiert eine Datenbank mit Komponentenpreisen oder Kostenangaben zu Instandsetzungsmaßnahmen, so könnten ungenügend beurteilte Betriebsmittelparameter automatisch auf entsprechende Datensätze verwiesen und mit den zugehörigen Kostenangaben verknüpft werden. Eine anschließende Aufsummierung und Darstellung der Kostenabschätzung ist dann eine weitere sinnvolle Ergänzung eines umfassenden Verfahrens zur systematischen Bewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln.

## **Anhang A:      Bewertungslisten der Hochspannungsbetriebsmittel mit Detailbeschreibungen der zustandsrelevanten Parameter**

Im Kapitel 3.3 wurden aus Platz- und Übersichtlichkeitsgründen nur zwei Bewertungslisten aus den Bereichen Primärtechnik (Transformator) und Sekundärtechnik (Distanzschutzgerät) mit detaillierter Beschreibung der zustandsrelevanten Bewertungsparameter vorgestellt. Um zu verdeutlichen und zu belegen, dass eine wesentliche Merkmal der vorliegenden Bewertungssystematik darin besteht, dass ein vollständiger Katalog von Bewertungslisten für alle Bereiche der Hochspannungstechnik existiert, sollen hier drei weitere Betriebsmittellisten detailliert beschrieben werden. Im Folgenden werden daher die Bewertungslisten für gasisolierte Schaltanlagen, nachrichtentechnische Übertragungstechnikgeräte und Hochspannungsfreileitungen (Abspannmast) in der gleichen Art wie in Kapitel 3.3 vorgestellt.

### **A.1 Bewertungsliste Gasisolierte Schaltanlage (Primärtechnik)**

Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen werden in Deutschland seit den 1960er Jahren eingesetzt. Durch ihre raumsparende Konstruktion und die geringe Geräusch- und Feldemission (EMV) integriert sich eine zumeist mit SF<sub>6</sub> als Isolier- und Löschgas betriebene Anlage problemlos in sensible Umgebungen, Wohngebiete und Innenstadtbereiche. Bei korrekter Dimensionierung sorgen zudem relativ geringe Instandhaltungsaufwendungen, eine hohe Betriebssicherheit und eine lange Lebensdauer für ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit. Nachteile sind vergleichsweise hohe Baukosten und zumeist längere Ausfallzeiten mit hohen Instandsetzungskosten im Fehlerfall. In der Bewertungsliste sind daher die Parameter besonders hoch gewichtet, die im Falle einer Fehlkonzeption oder Falschdimensionierung einen Fehlerfall begünstigen. In der vorliegenden Bewertungssystematik erfolgt die Zustandsbeurteilung schaltfeldbezogen, d. h. die Bewertungsliste enthält die zustandsrelevanten Parameter aller durch die Metallkapselung umschlossenen Komponenten vom Abgang (Leitung, Kabel, Transformator) bis zur Sammelschiene

unter besonderer Berücksichtigung der gasspezifischen Aspekte. Im Folgenden werden nun die essentiellen (u. U. bereits zustandsrelevanten) Grunddaten, Parametergruppen und wichtigsten Einzelparametern vorgestellt.

### **a) Grunddatenerfassung**

Im Grunddatenfeld werden neben den obligatorischen Identifikationsgrößen (Eigentümer, Standort, Bezeichnung etc.) diverse Eingangsdaten erfasst, welche bereits zustandsrelevanten Charakter haben bzw. in Formeln zur Berechnung von Einzelparameterkennziffern berücksichtigt werden. In der nachfolgenden Aufstellung wird sich auf diese Eingangsgrößen beschränkt und ihre Bedeutung kurz beschrieben.

<b>Kriterium</b>	<b>Eingabe als</b>	<b>Bedeutung für</b>
Baujahr	Jahreszahl	Bewertung Alter
Kurzschlussstrom der Anlage	Zahlenwert	Bewertung Einzelkomponenten-dimensionierung und elektrische Beanspruchung Leistungsschalter
Ausschaltstrom	Zahlenwert aus Auswahlliste	Bewertung Einzelkomponenten-dimensionierung
Anzahl Kurzschluss- und -ausschaltungen, Anzahl Kurtrennungen	Zahlenwerte	Bewertung elektrische Beanspruchung Leistungsschalter
Datum letzte Wartung	Datumswert	Bewertung Einhaltung empfohlener Wartungszyklus, Schaltspiele bzw. Motoranläufe

Tab. A.1: Grunddatenerfassung Gasisolierte Schaltanlage, wichtigste Kriterien

Weiterhin besteht noch die Möglichkeit zur Angabe informativer Werte wie Feldart, Feldbemessungsstrom, Schaltaufgabe oder Anzahl der Störungen.

### **b) Technische Bewertung**

Zur technischen Zustandsbeurteilung einer gasisolierten metallgekapselten Schaltanlage werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Parametergruppen untersucht. Ihr Einfluss auf den Gesamtzustand wird durch die angegebenen Gruppengewichtungsfaktoren ausgedrückt. Während bei anderen Betriebsmitteln die Parametergruppen in der Regel unterschiedlich gewichtet sind, werden bei der gasisolierten Schaltanlage alle Parametergruppen hinsichtlich ihres Einflusses auf den Gesamtzustand als gleichwertig betrachtet. Dies ist dadurch begründet, dass eine mangelhaft beurteilte Parametergruppe durch die gemeinsame Unterbringung aller Komponenten in einem Gehäuse und das feldbezogene Bewertungsprinzip einen unmittelbaren Einfluss auf alle anderen Gruppen ausübt. Weiterhin werden die jeweils wichtigsten Einzelparameter mit ihren individuellen Gewichtungsfaktoren innerhalb einer Gruppe aufgelistet. Es ist der am wenigsten wichtigen Parametergruppe der Gewichtungsfaktor 1 zugeordnet. Analog wird bei der Gewichtung der Einzelparameter innerhalb einer Gruppe vorgegangen.

<b>Parametergruppe</b>	<b>Gewichtungen Parametergruppe</b>	<b>Wichtigste Einzelparameter</b>	<b>Gewichtungen Einzelparameter innerhalb der Gruppe</b>
Schaltfeld allgemein	1	Dimensionierung Komponenten	10
		Dimensionierung Kapselung	8
		Verriegelungskonzept	8
		Erdungszustand	10
		Ersatzteilbeschaffung	9
Gasräume	1	gerichtete Druckentlastungsvorrichtungen vorhanden ?	10
		Leckrate Gasräume	10
		Gasüberwachungseinrichtungen an allen Gasräumen vorhanden und korrekt funktionierend ?	10
		Zustand Kompensatoren	8
		SF <sub>6</sub> -Qualität (Azidität und H <sub>2</sub> O-Taupunkt)	10

Leistungsschalter	1	Schalterdimensionierung	10
		elektrische und mechanische Beanspruchung	9
		Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung I + II	10
		Auslöserwiderstand Ausschaltkreis I + II	10
Trenner	1	Trennerdimensionierung	2
		Verriegelungskonzept	2
Wandler	1	Sekundärklemmenzustand	5
		Kippschwingungsfestigkeit	5
Erdungsschalter	1	Erderdimensionierung	2
		Verriegelungskonzept	2
Sammelschiene	1	Feldweise geschottet ?	1
HS-Durchführungen	1	Bauart / Ausführung	10

Tab. A.2: Technische Bewertung Gasisolierte Schaltanlage, Parametergruppen und Einzelparameter

Im Folgenden werden die wichtigsten der in Tabelle A.2 aufgeführten Bewertungsparameter näher beschrieben. Viele der oben genannten Parameter sind bereits in den entsprechenden Bewertungslisten der Einzelkomponenten enthalten. Beispielsweise ist in einer der gängigsten 110-kV-SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen vom Typ Siemens 8DN8 der Leistungsschalter Siemens 3AP1 integriert, für den eine hier nicht detailliert vorgestellte Bewertungsliste existiert. Es wird sich daher auf die Bewertungskriterien beschränkt, welche eine besondere Bedeutung für gasisolierte Schaltanlagen haben.

**Parametergruppe: Schaltfeld allgemein**

**Parameter: Dimensionierung Einzelkomponenten und Kapselung**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Neben der Dimensionierung der Einzelkomponenten hinsichtlich des Betriebs- und Kurzschlussstroms ist die Dimensionierung der Metallkapselung von großer Bedeutung. Diese muss der thermischen Wirkung des Lichtbogens bei vollem

Nennkurzschlussstrom bis zum Ansprechen der Schutzeinrichtungen standhalten. Zur Bewertung sind dazu neben der Untersuchung auf Beschädigungen auch konzeptionelle Aspekte aus der Anlagendokumentation zu prüfen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfelder mit den Bewertungen „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“ (Einzelkomponenten) bzw. „durchbrandsicher“, „bedingt durchbrandsicher“ oder „nicht durchbrandsicher“ (Kapselung)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnungen nach folgenden Berechnungsvorschriften:

*A) Einzelkomponenten*

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht in Ordnung“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „in Ordnung“	(A.1)

*B) Kapselung*

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht durchbrandsicher“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „bedingt durchbrandsicher“	(A.2)
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „durchbrandsicher“	

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 62271-203 [43], Herstellerangaben, Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Schaltfeld allgemein**

**Parameter:** Verriegelungskonzept (feld- / netzbezogen)

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Zwar ist ein Verriegelungskonzept, d. h. der konzeptionelle, schaltfeld- oder netzbezogene Schutz vor Fehlschaltungen, immer ein wichtiger Aspekt der Netzführung, doch verdient ein derartiger Bewertungsparameter aus den eingangs genannten Gründen (lange Ausfallzeiten im Fehlerfall) bei gasisolierten Schaltanlagen besondere Beachtung. Ist beispielsweise das zu bewertende Schaltfeld außer Betrieb und die Einschaltung einer angeschlossenen Leitung von der Gegenstation aus grundsätzlich möglich, muss das SF<sub>6</sub>-Schaltfeld einen kurzschlusseinschaltfesten Erder vorweisen. Ist dies nicht der Fall kann eine Einschaltung zu Beschädigungen führen und lange Ausfallzeiten zur Folge haben.



*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „passend zur Anlagenkonfiguration“, „Fehlschaltungen in Ausnahmesituationen möglich“ oder „Fehlschaltungen nicht sicher verhindert“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „passend zu Anlagenkonfiguration“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „Fehlschaltungen in Ausnahmesituationen möglich“	(A.3)
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Fehlschaltungen nicht sicher verhindert“	

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 62271-203 [43], Netzführungskonzept des Energienetzbetreibers

**Parametergruppe: Schaltfeld allgemein****Parameter: Ersatzteilbeschaffung***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Gasisolierte Schaltanlagen gelten als relativ wartungsarm und betriebssicher. Dennoch können Störungen Instandsetzungsarbeiten notwendig machen, die in der Regel teuer und aufwändig sind. Insbesondere bei älteren Anlagen kommt dann das Problem der schwierigen oder gar unmöglichen bzw. unwirtschaftlichen Ersatzteilbeschaffung dazu. Dieser Aspekt ist daher ein wichtiges Zustandskriterium.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „problemlos“, „aufwändig“, „problematisch“ oder „nicht möglich / unwirtschaftlich“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „problemlos“	
<i>Kennziffer</i> = 33 (ausreichend)	für „aufwändig“	(A.4)
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „problematisch“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht möglich / unwirtschaftlich“	

*Normative Grundlagen:*

Herstellerangaben, Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Gasräume****Parameter: Druckentlastungsvorrichtungen***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Die Bewertungsliste enthält mehrere Beurteilungskriterien zu den Sicherheitseinrichtungen einer gasisolierten Schaltanlage. Gefordert wird, dass Auswirkungen eines inneren Lichtbogenfehlers durch Schottdurchführungen auf den betroffenen Gasraum begrenzt bleiben müssen. Weiterhin muss jeder Gasraum eine eigene Druckentlastungsvorrichtung haben, die das sofortige und gefahrlose Entweichen des Gases bei Überdruck während eines inneren Lichtbogens ermöglicht. Als Druckentlastungsvorrichtungen sind vorzugsweise Berstplatten zu verwenden. Durch Umlenkvorrichtungen ist zu gewährleisten, dass ein solcher Gasaustritt nicht in Richtung der normalen Betätigungsposition des Schaltgerätes erfolgt, so dass Personen, die sich dort aufhalten, bei diesem Vorgang nicht verletzt werden. Innere Entlastungsvorrichtungen, die in benachbarte Bausteine münden, sind unzulässig.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfelder mit den Bewertungen „an jedem Gasraum vorhanden“, „teilweise vorhanden“, „nicht vorhanden“ oder „nicht ermittelbar“ (Druckentlastungsvorrichtungen) bzw. „ja“ oder „nein“ (Druckentlastung gerichtet)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnungen nach folgenden Berechnungsvorschriften:

**A) Druckentlastungsvorrichtungen**

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „nicht ermittelbar“	(A.5)
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „teilweise vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „an jedem Gasraum vorhanden“	

**B) Druckentlastung gerichtet**

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nein“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „ja“	(A.6)

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 62271-203 [43], Herstellerangaben, Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Gasräume**

**Parameter: Gasüberwachung, Leckrate, SF<sub>6</sub>-Qualität**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Jeder Gasraum muss mit funktionierenden Gasüberwachungseinrichtungen ausgerüstet sein. Die Gasräume müssen zudem mit Filtermaterial ausgestattet sein, die Restfeuchtigkeit und eintretende Feuchtigkeit im Inneren der Hochspannungshäuser zuverlässig absorbieren. Die Filter in Gasräumen mit Schaltgeräten müssen auch gasförmige Zersetzungsprodukte absorbieren können, die durch den Schaltlichtbogen entstehen. Eine bestimmte jährliche Leckrate darf nicht überschritten werden, ein typischer Wert ist 1 % pro Jahr. Weiterhin ist die SF<sub>6</sub>-Gasqualität hinsichtlich Feuchtegehalt und Verunreinigungen zu prüfen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „an allen Gasräumen vorhanden“, „teilweise vorhanden“ oder „nicht vorhanden“ (Gasüberwachung) bzw. „< 1 % pro Jahr“ oder „≥ 1 % pro Jahr“ (Leckrate)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnungen nach folgenden Berechnungsvorschriften:

**A) Gasüberwachung**

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „teilweise vorhanden“	(A.7)
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „an jedem Gasraum vorhanden“	

**B) Leckrate**

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „≥ 1 % pro Jahr“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „< 1 % pro Jahr“	(A.8)

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 62271-203 [43], Herstellerangaben, Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Gasräume****Parameter: Zustand Kompensatoren***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Temperaturbedingte Längenänderungen der Gehäuse und Fertigungstoleranzen werden bei gasisolierten Schaltanlagen durch bewegliche Balg-Kompensatoren ausgeglichen. Diese dürfen weder gestaucht, überdehnt, mit einem übermäßigen Querversatz versehen oder sonstwie beschädigt sein, da sonst Gasverlust und der Ausfall des Schaltfelds drohen. Ist die Anlage nicht feldweise geschottet, kann eine Beschädigung der Kompensatoren sogar zum Ausfall der gesamten Schaltanlage führen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „einwandfrei“, „Querversatz, kritisch“, „Querversatz, unkritisch“, „Überdehnung“, „Stauchung“ oder „beschädigt“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „einwandfrei“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „Querversatz, unkritisch“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Querversatz, kritisch“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Überdehnung“	(A.9)
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Stauchung“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „beschädigt“	

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 62271-203 [43], Herstellerangaben, Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Trenner, Erdungsschalter****Parameter: Trenner- / Erdungsschalterausführung passend zur Schaltaufgabe ?***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Vor dem Hintergrund der Vermeidung von Fehlschaltungen und langen Ausfallzeiten spielt die Dimensionierung der Trenn- und Erdungsschalter eine wichtige Rolle. Es muss hinterfragt werden, ob unter Berücksichtigung der Anlagenkonfiguration und des Verriegelungskonzepts der eingebaute Trenner zur Schaltaufgabe passt oder

nicht (normaler Trenner ausreichend oder Lasttrennschalter notwendig). Gleiches gilt für den Erdungsschalter (normaler oder kurzschlussesichere Erder).

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

*Kennziffer* = 0 (neuwertig) für „in Ordnung“  
*Kennziffer* = 100 (ungenügend) für „nicht in Ordnung“ (A.10)

*Normative Grundlagen:*

DIN EN 62271-203 [43], Netzführungskonzept des Energienetzbetreibers

### **c) Gefährdungspotential und Wichtigkeit**

Zum Abschluss der Bewertung gasisolierter Schaltanlagen erfolgt die Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz. Die Kriterien sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und werden durch die in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 beschriebene Vorgehensweise bewertet. Eine Besonderheit weisen die Bewertungslisten durch die automatische Beurteilung der Personengefährdung bei fehlenden bzw. vorhandenen Berstschtzeinrichtungen auf.

	Parametergruppe	Einzelparameter
Gefährdungspotential	Personen- gefährdung	Gefahr durch fehlenden Berstschutz ( <i>automatische Bewertung aus Gasraumuntersuchung</i> )
		Gefahr durch nicht gerichtete Druckentlastung ( <i>automatische Bewertung aus Gasraumuntersuchung</i> )
		Berührungsschutz bewegliche Teile
		Berührungsschutz Bedienelemente
	Umweltgefährdung	bauart- / typbedingte Gefährdung
		Grundwassergefährdung
	Gesetzesverstoß	Einhaltung Aufbaunormen
		Prüfung nach Druckbehälterverordnung

		TÜV-Untersuchung
		Schaltbilder / Schnittdarstellungen
		Rauchverbotsschilder
		Typenschilder Schaltfeld
		Gültigkeit Betriebsgenehmigung
Wichtigkeit		Wichtigkeit des Betriebsmittels im Netz

Tab. A.3: Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Gasisolierte Schaltanlagen

## A.2 Bewertungsliste Übertragungstechnik (Nachrichtentechnik)

Unter dem Begriff Nachrichtentechnik fasst man die Informations- und Kommunikationstechnologien zur Aufnahme, Übertragung, Verarbeitung und Speicherung von Informationen zusammen. Nimmt man die betragsmäßigen Größen der üblicherweise verwendeten Ströme und Spannungen als Maßstab, ist die Nachrichtentechnik kein Bereich der Hochspannungstechnik. Allerdings kommt der Nachrichtentechnik sowohl durch die fortschreitende Automatisierung und Fernsteuerung energietechnischer Prozesse als auch aufgrund des wachsenden Kommunikationsbedarfs in Hochspannungsnetzen eine immer größere Bedeutung zu. Die Bereitstellung von traditionellen (z. B. Telefon) und modernen Diensten (z. B. E-Mail oder lokale Datennetzwerke) in der Büro- und Verwaltungskommunikation galt bisher als Kerngebiet der Nachrichtentechnik, ihr Anteil an Prozessen zur Steuerung, Überwachung und Regelung von Hochspannungskomponenten ist in jüngerer Vergangenheit allerdings stark angestiegen (z. B. durch Anwendung von [44]). Die Nachrichtentechnik lässt sich anhand der Dienstart (Sprach- oder Datendienst) und des verwendeten Übertragungsmediums (Kupferkabel, LWL, Luft) in Spezialgebiete unterteilen. Zur Bewertung der Nachrichtentechnik stehen Betriebsmittellisten für Telefonanlagen, Fernmeldekabel, Übertragungstechnik- und Funktechniksysteme zur Verfügung. Im Folgenden wird exemplarisch die Betriebsmittelliste zur Bewertung eines Übertragungstechniksystems vorgestellt.

Die prinzipielle Aufgabe der Übertragungstechnik ist es, das von einem Sender abgegebene Signal über ein Übertragungsmedium möglichst unverzerrt und

verlustfrei an einen Empfänger zu transportieren. Grundsätzlich wird zwischen analoger und digitaler Signalübertragung unterschieden. In heutigen Kommunikationsnetzen werden analoge Übertragungstechniken (z. B. die klassische analoge Vermittlungstechnik für Telefongespräche) zwar immer noch verwendet, allerdings werden sie immer mehr durch digitale Verfahren verdrängt. Diese nutzen zur Signal- und Nachrichtenübertragung sog. Multiplexverfahren. Darunter versteht man Methoden, bei denen mehrere Signale zusammengefasst und simultan über ein Medium übertragen werden. Zum Zwecke der Übermittlung von Prozessdaten in Hochspannungsnetzen (Schutzsignale, fernüberwachte Leistungsschalterstellungen, Messwerte etc.) kommen vor allem zwei standardisierte Techniken zum Multiplexen digitaler Datenströme zum Einsatz: Die Plesiochrone Digitale Hierarchie (PDH, Übertragungsrate bis maximal 565 Mbit/s, meist nur bis 2 Mbit/s genutzt) und die Synchrone Digitale Hierarchie (SDH, Übertragungsrate bis maximal 159 Gbit/s). Für geringwertigere Anwendung werden auch Modem- oder Direktverbindungen über Kupferkabel oder LWL genutzt. Im Folgenden werden nun die essentiellen Grunddaten, Parametergruppen und wichtigsten Einzelparameter der Bewertungsliste vorgestellt.

#### ***a) Grunddatenerfassung***

Im Grunddatenfeld der Bewertungsliste werden neben den obligatorischen Identifikationsgrößen (Eigentümer, Standort, Bezeichnung etc.) auch Eingangsdaten erfasst, welche bereits zustandsrelevanten Charakter haben bzw. in Formeln zur Berechnung von Einzelparameterkennziffern berücksichtigt werden. In der nachfolgenden Aufstellung werden die wichtigsten Eingangsgrößen aufgeführt und ihre Bedeutung kurz beschrieben.

Kriterium	Eingabe als	Bedeutung für
Baujahr Einbauwanne	Jahreszahl	Bewertung Alter
Hierarchie	Vorgabewert aus Auswahlliste (PDH, SDH, sonstige)	Auswahlliste für mögliche Baugruppenausstattung
Bestückung	Vorgabewert aus Auswahlliste abhängig von Hierarchie (PDH- und SDH-Baugruppen)	Bewertung Bestückungsgrad / maximale Anzahl der Datenports
Abkündigung	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Bewertung Support-Einschränkung bei erfolgter Abkündigung
Fernüberwachung vorhanden ?	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Bewertung Gerätequalität
Managementfähigkeit vorhanden ?	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Bewertung Gerätequalität
Redundante Standort-anbindung möglich ?	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Bewertung Betriebssicherheit / Ausfallwahrscheinlichkeit
Elektrische Einspeisung redundant ?	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Bewertung Betriebssicherheit / Ausfallwahrscheinlichkeit
Datum letzter Batteriewechsel	Datumswert	Bewertung Batteriezustand

Tab. A.4: Grunddatenerfassung Übertragungstechniksystem, wichtigste Kriterien

Weiterhin besteht noch die Möglichkeit zur Angabe informativer Werte wie verwendetes Übertragungsmedium oder Versorgungsspannung.

### **b) Technische Bewertung**

Zur technischen Zustandsbeurteilung eines Übertragungstechniksystems werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Parametergruppen untersucht. Ihr Einfluss auf den Gesamtzustand wird durch die angegebenen Gruppengewichtungsfaktoren ausgedrückt. Zudem werden die jeweils wichtigsten Einzelparameter mit ihren individuellen Gewichtungsfaktoren innerhalb einer Gruppe aufgelistet. Es ist der am wenigsten wichtigen Parametergruppe der Gewichtungsfaktor 1 zugeordnet. Analog wird bei der Gewichtung der Einzelparameter innerhalb einer Gruppe vorgegangen.



Parametergruppe	Gewichtungen Parameter- gruppe	Wichtigste Einzelparameter	Gewichtungen Einzelparameter innerhalb der Gruppe
Gerätegrunddaten	10	Fernüberwachung möglich ?	14
		Bestückungsgrad des Baugruppenträgers	12
		Support-Einschränkung bei erfolgter Herstellerabkündigung	10
		Managementfähigkeit	8
		Softwarestand	8
Sichtkontrolle Gerät	6	mechanischer Zustand und Festigkeit Schnittstellen	10
		Zustand Klemmleisten, Verdrahtung, Automaten etc.	8
Schnittstellen	6	Herstellerabhängigkeit	1
Managementfähigkeit	6	Funktion	8
		Qualität	6
Redundanzen	2	Zentralteil redundant ?	10
		Stromversorgung redundant ?	8

Tab. A.5: Technische Bewertung Übertragungstechniksystem, Parametergruppen und Einzelparameter

Im Folgenden werden die wichtigsten der in Tabelle A.5 aufgeführten Bewertungsparameter näher beschrieben.

**Parametergruppe: Gerätegrunddaten**

**Parameter: Fernüberwachung**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Jeder Energienetzbetreiber ist bestrebt, nach einer Störung seiner Hochspannungskomponenten die Ausfallzeiten so gering wie möglich zu halten. Voraussetzung dafür ist das Funktionieren der Kommunikationswege, sowohl was die Informationen über Art und Ausmaß der Störung angeht als auch hinsichtlich der

Koordination des Entstörungsprozesses. Diese Umstände begründen die generell hohen Anforderungen an nachrichtentechnische Komponenten hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und Betriebssicherheit. Die Fernüberwachung von Übertragungstechniksystemen gewährleistet eine optimale Statusbeurteilung des Kommunikationsnetzes und ist daher ein wichtiges Zustandskriterium.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Keine manuelle Eingabe notwendig (im Bewertungsfeld wird die entsprechende Angabe in der Grunddatenerfassung übernommen)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{array}{ll} \text{Kennziffer} = 100 \text{ (ungenügend)} & \text{für „nein“} \\ \text{Kennziffer} = 0 \text{ (neuwertig)} & \text{für „ja“} \end{array} \quad (\text{A.11})$$

*Normative Grundlagen:*

[45], Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Gerätegrunddaten**

**Parameter: Bestückungsgrad des Baugruppenträgers**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

PDH- und SDH-Systeme enthalten in der Regel mehrere dienstspezifische Baugruppen in Form von Steckkartenmodulen (Stromversorgungskarten, LAN-Karten, Schnittstellenkarten etc.). Diese Karten sind in sog. Einbauwannen fixiert, deren Kapazität hinsichtlich der Baugruppeneinbaumöglichkeiten begrenzt ist. Übertragungstechnisch wird ein PDH- bzw. SDH-System durch eine maximale Anzahl der verarbeitbaren Datenports (Signalkanäle) begrenzt. Eine 100-prozentige Steckplatz- und Portauslastung ist allerdings aus diversen technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht optimal. Ein gut aufgebautes System verfügt über eine gewisse Port- und Einbaureserve. Daher ist der aus den Grunddatenangaben berechenbare Bestückungsgrad ein zustandsrelevantes Kriterium.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Keine manuelle Eingabe notwendig (im Bewertungsfeld wird der Auslastungsgrad aus den Angaben zur Bestückung in der Grunddatenerfassung berechnet)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für Bestückungsgrad $\leq$ 66 %	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für Bestückungsgrad zw. 66 % und 75 %	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für Bestückungsgrad $>$ 75 %	(A.12)

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, Herstellerangaben, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

**Parametergruppe: Gerätegrunddaten****Parameter: Managementfähigkeit***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Ein managementfähiges System ist grundsätzlich qualitativ hochwertiger als ein nicht regelbares Gerät. Somit muss die prinzipielle Abfrage dieses Parameters zur Zustandsbewertung herangezogen werden.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Keine manuelle Eingabe notwendig (im Bewertungsfeld wird die entsprechende Angabe in der Grunddatenerfassung übernommen)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „nein“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „ja“	(A.13)

*Normative Grundlagen:*

[45], Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Gerätegrunddaten****Parameter: Softwarestand***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Bei einem in Betrieb befindlichen, digitalen Übertragungstechniksystem übt der Betriebssoftwarestand keinen unmittelbaren Einfluss auf den aktuellen Zustand des Geräts aus (würde die Software nicht funktionieren, wäre das System gestört).

Allerdings ist die qualitative Beurteilung dieses Parameters entscheidend für den zukünftigen Betrieb und hat u. U. gravierende Konsequenzen im Hinblick auf Instandhaltungs- oder Erneuerungsentscheidungen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „aktuell, update-fähig“, „nicht aktuell, update-fähig“, „aktuell, nicht update-fähig“ oder „nicht aktuell, nicht update-fähig“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „nicht aktuell, nicht update-fähig“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „aktuell, nicht update-fähig“	
<i>Kennziffer</i> = 33 (ausreichend)	für „nicht aktuell, update-fähig“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „aktuell, update-fähig“	(A.14)

*Normative Grundlagen:*

Herstellerangaben

**Parametergruppe: Sichtkontrolle Gerät**

**Parameter: mechanischer Zustand und Festigkeit Schnittstellen; Zustand Klemmleisten, Verdrahtung, Automaten etc.**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Unzureichende Steck- oder Lötverbindungen stellen eine häufig auftretende und oft nur schwer feststellbare Fehlerquelle dar. Daher ist die Kontrolle der Schnittstellen auf mechanische Unversehrtheit und festen Sitz ein wichtiges Beurteilungskriterium. Gleiches gilt für den Zustand der Klemmleisten, der Verdrahtung und sonstiger Infrastrukturmaterialien.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfelder mit den Bewertungen „neuwertig“, „ausreichend“, „reparaturbedürftig“ oder „ungenügend“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „ungenügend“	
<i>Kennziffer</i> = 67 (reparaturbedürftig)	für „reparaturbedürftig“	
<i>Kennziffer</i> = 33 (ausreichend)	für „ausreichend“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „neuwertig“	(A.15)

*Normative Grundlagen:*

[46], [47], [48]

### **Parametergruppe: Schnittstellen**

**Parameter:**            **Herstellerabhängigkeit**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Proprietäre, d. h. herstellerabhängige technische Lösungen haben generell Einschränkungen der Kompatibilität technischer Anschlusskomponenten und der Flexibilität bei der Materialbeschaffung zur Folge. Speziell bei Schnittstellen kann dies zu technisch vermeidbaren Qualitätseinbußen (z. B. durch die Notwendigkeit eines Adaptereinbaus) oder zu kostenmäßigen Mehraufwendungen führen. Ein System mit genormten, herstellunabhängigen Schnittstellen ist daher einer proprietären Alternative vorzuziehen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „herstellerabhängig“ oder „herstellerunabhängig“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „herstellerabhängig“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „herstellerunabhängig“	(A.16)

*Normative Grundlagen:*

[47], [48], Herstellerangaben, Erfahrungswerte

### **Parametergruppe: Managementfähigkeit**

**Parameter:**            **Funktion; Qualität**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Sofern ein Managementsystem für die installierte Übertragungstechnik vorhanden ist (Abfrage in der Grunddatenerfassung), wird die Güte eines PDH- oder SDH-Systems

maßgeblich von der Funktion und der Qualität des integrierten Management-Tools bestimmt und hat somit einen Einfluss auf den Gesamtzustand des Übertragungstechniksystems.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfelder mit den Bewertungen „einwandfrei“, „eingeschränkt“ oder „gestört“ (Funktion) bzw. „steuern, überwachen, messen“, „nur steuern und überwachen“ oder „nur überwachen“ (Qualität)

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnungen nach folgenden Berechnungsvorschriften:

*A) Funktion*

<i>Kennziffer = 100</i> (ungenügend)	für „gestört“	
<i>Kennziffer = 67</i> (reparaturbedürftig)	für „eingeschränkt“	(A.17)
<i>Kennziffer = 0</i> (neuwertig)	für „einwandfrei“	

*B) Qualität*

<i>Kennziffer = 50</i> (reparaturbedürftig)	für „nur überwachen“	
<i>Kennziffer = 33</i> (ausreichend)	für „nur steuern und überwachen“	(A.18)
<i>Kennziffer = 0</i> (neuwertig)	für „steuern, überwachen, messen“	

*Normative Grundlagen:*

Herstellerangaben, Erfahrungswerte

**Parametergruppe: Redundanzen**

**Parameter: Redundanzen Zentralteil und Stromversorgung**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Aufgrund der hohen Verfügbarkeitsanforderungen sind nachrichtentechnische Systeme häufig netzseitig über zwei Wege, d. h. redundant, angebunden. Der optimale Nutzen einer zweiseitigen Anbindung wird aber nur dann erzielt, wenn auch die wichtigsten Steuer- und Versorgungskomponenten eines PDH- oder SDH-Systems redundant ausgeführt sind. Das Vorhandensein einer gedoppelten zentralen Steuerung (Zentralteil) und einer redundanten Stromversorgung sind daher wichtige Zustandskriterien.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfelder mit den Bewertungen „ja“ oder „nein“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung durch folgende Berechnungsvorschrift:

$$\begin{aligned} \text{Kennziffer} &= 100 \text{ (ungenügend)} && \text{für „nein“} \\ \text{Kennziffer} &= 0 \text{ (neuwertig)} && \text{für „ja“} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

*Normative Grundlagen:*

[45], Erfahrungswerte

### **c) Gefährdungspotential und Wichtigkeit**

Zum Abschluss der Bewertung eines Übertragungstechniksystems erfolgt die Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz. Die Kriterien sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und werden durch die in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 beschriebene Vorgehensweise bewertet.

	Parametergruppe	Einzelparameter
Gefährdungspotential	Personen- gefährdung	Gefahr durch Laserlicht
		Gefahr durch Berührungsspannung
	Umweltgefährdung	<i>(nicht vorhanden)</i>
	Gesetzesverstoß	Warnhinweise / Kennzeichnung Laserklassen ?
		Einhaltung von Zugangsrichtlinien (Gewährleistung Fernmeldegeheimnis)
	Einhaltung von Aufbaurichtlinien	
Wichtigkeit		Wichtigkeit des Netzknotens im Netz

Tab. A.6: Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Übertragungstechnik

### **A.3 Bewertungsliste Abspannmast (Hochspannungsfreileitungen)**

In Energieversorgungsnetzen dienen Freileitungen der Übertragung elektrischer Energie über lange Strecken und werden im Hoch-, Mittel- und Niederspannungsbereich eingesetzt. Die stromführenden Leiterseile sind nicht isoliert, werden an Freileitungsmasten an Isolatoren aus Porzellan oder Kunststoff aufgehängt und bestehen zumeist aus Stahl oder Aluminium, selten aus Kupfer oder Aldrey (einer Legierung aus Aluminium, Magnesium und Silizium). Im Mittel- und Niederspannungsbereich kommen Holz-, Beton-, Stahlrohr- und Stahlfachwerkmaste zum Einsatz, im Hochspannungsbereich werden zumeist Stahlfachwerkmaste (selten Stahlrohr- oder Betonmaste) verwendet. Freileitungen mit Betriebsspannungen über 50 kV werden in der Regel mit einem an der Mastspitze befestigten Erdseil ausgerüstet, das die Leitung vor Blitzeinschlägen schützen soll. Oft ist in ein Erdseil noch ein Lichtwellenleiter für die Übertragung nachrichtentechnischer Dienste eingebettet. Übernimmt der Freileitungsmast eine reine Tragfunktion, spricht man von einem Tragmast. Ein Mast, der auch die Zugkräfte der Leiterseile aufnehmen muss, wird als Abspannmast bezeichnet. Die Zustandsbewertung von Freileitungen kann einerseits durch das Besteigen der Masten (Intensivinspektion), andererseits durch das Abfliegen der Leitung per Hubschrauber erfolgen. Im Folgenden wird exemplarisch die Bewertungsliste für einen Abspannmast vorgestellt.

Abspannmasten in Hochspannungsnetzen werden zumeist dann eingesetzt, wenn die Leitungstrasse eine Richtungsänderung vollzieht, die Leitung in eine Schaltanlage oder ein Erdkabel überführt wird oder eine weitere Leitung abgezweigt wird. Im Folgenden wird die Bewertungsliste eines Abspannmastes mit den essentiellen Grunddaten, Parametergruppen und wichtigsten Einzelparametern vorgestellt.

#### **a) Grunddatenerfassung**

Im Grunddatenfeld einer Abspannmastbewertungsliste werden neben den obligatorischen Identifikationsgrößen (Eigentümer, Standort, Bezeichnung etc.) diverse Eingangsdaten erfasst, welche zum Teil zustandsrelevanten Charakter haben bzw. in Formeln zur Berechnung von Einzelparameterkennziffern berücksichtigt werden. In der nachfolgenden Aufstellung sind die wichtigsten



Eingangsgrößen aufgeführt und werden hinsichtlich ihrer Bedeutung kurz beschrieben.

Kriterium	Eingabe als	Bedeutung für
Baujahr	Jahreszahl	Bewertung Alter und Maststahlversprödung
Mastnummer	Zahlenwert	Bewertung Signaturen und Beschilderung
Mastart	Vorgabewert aus Auswahlliste (Gittermast, Betonmast, Stahlrohrmast)	Ausschluss bestimmter Bewertungsparameter
Mitgeführtes Luftkabel, Erdseil mit LWL ?	Vorgabewert aus Auswahlliste (ja, nein)	Ausschluss bestimmter Bewertungsparameter
Mitgeführter Stromkreis, Farbkennzeichnung	Text	Bewertung Signaturen und Beschilderung

Tab. A.7: Grunddatenerfassung Abspannmast, wichtigste Kriterien

Weiterhin besteht noch die Möglichkeit zur Angabe informativer Werte wie Spannfeldlänge, Erdseiltyp oder Fundamentart.

### ***b) Technische Bewertung***

Zur technischen Zustandsbeurteilung eines Abspannmastes werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Parametergruppen untersucht. Ihr Einfluss auf den Gesamtzustand wird durch die angegebenen Gruppengewichtungsfaktoren ausgedrückt. Zudem werden die jeweils wichtigsten Einzelparameter mit ihren individuellen Gewichtungsfaktoren innerhalb einer Gruppe aufgelistet. Es ist der am wenigsten wichtigen Parametergruppe der Gewichtungsfaktor 1 zugeordnet. Analog wird bei der Gewichtung der Einzelparameter innerhalb einer Gruppe vorgegangen.

Parametergruppe	Gewichtungen Parameter- gruppe	Wichtigste Einzelparameter	Gewichtungen Einzelparameter innerhalb der Gruppe
Alter	1	Alter	1
Mastzuwegung	1	Zuwegung / Erreichbarkeit	1
Mastgeviert	1	Zustand Mastgeviert	1
Fundament	3	Fundament ausreichend für Topologie ?	3
		Betonschäden	3
		Erdabsenkungen / Ausschwemmungen	3
Mastzustand	4	Beschädigungen Aufhängungen	8
		Beschädigungen Nieten / Schrauben	5
		Beschädigungen Mastschaft	3
Mastzusatz- komponenten	3	Fremdkörper (z. B. Nester)	10
		Beschädigungen LWL / Luftkabel (sofern vorhanden)	6
		Mastakustik vorhanden ?	6
		Zustand Steigsystem	3
		Signaturen und Beschilderung	3
Erdseiltraverse	5	Fremdkörper (z. B. Nester)	10
		Zustand Erdseilaufhängung	2
Traverse 1 - n	6	Fremdkörper (z. B. Nester)	10
		Zustand Aufhängearmaturen	6
		Isolatorschäden	6
Stromschlaufen Traverse 1 - n	6	Beschädigung Schlaufenseil	8
Spannfeld in Leitungs- richtung Traverse 1 - n	6	Beschädigungen Leiterseil	8
		Beschädigungen Phasenabschalter	8

Schutzstreifenbetrachtung in Leitungsrichtung	6	Leitungsgefährdender Bewuchs vorhanden ?	4
		Trassenbreite ausreichend ?	3

Tab. A.8: Technische Bewertung Abspannmast, Parametergruppen und Einzelparameter

Im Folgenden werden einige der wichtigsten in Tabelle A.8 aufgeführten Bewertungsparameter näher beschrieben.

**Parametergruppe: Fundament**

**Parameter: Betonschäden, topologiegerechte Dimensionierung, Erdabsenkungen / Ausschwemmungen**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Fundamente von Freileitungsmasten können als Block- oder Schwellenfundamente sowie als Einzelfundamente für jeden Eckstiel ausgeführt sein. Anhand verschiedener Kriterien (z. B. Untersuchung auf Betonschäden oder Absenkungen) kann die Stabilität und Tragfähigkeit beurteilt werden.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfelder, z. B. mit den Bewertungen „nicht vorhanden“, „vorhanden, unerheblich“ oder „vorhanden, erheblich“ für die Untersuchung auf Betonschäden

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „vorhanden, erheblich“	
<i>Kennziffer</i> = 33 (ausreichend)	für „vorhanden, unerheblich“	(A.20)
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „nicht vorhanden“	

*Normative Grundlagen:*

[49] und darin angegebene Verweise

**Parametergruppe: Mastzustand****Parameter: Beschädigungen Mastschaft, Aufhängungen, Schrauben***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Beschädigungen am Mastschaft (z. B. verbogene Diagonalträger), lockere oder fehlende Schraub- und Nietverbindungen sowie schadhafte Aufhängungen beeinträchtigen die statische Stabilität des Mastes und bestimmen maßgeblich den aktuellen Betriebsmittelzustand.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „nicht vorhanden“	(A.21)

*Normative Grundlagen:*

[49] und darin angegebene Verweise

**Parametergruppe: Mastzusatzkomponenten****Parameter: Mastakustik***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Das Auftreten bestimmter außergewöhnlicher Geräusche liefert einem erfahrenen Betriebsmittelprüfer Hinweise auf beginnende oder bereits aufgetretene Mängel hinsichtlich der Maststatik.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „nicht vorhanden“	(A.22)

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, [49] und darin angegebene Verweise

**Parametergruppe: Traverse 1 - n****Parameter: Isolatorschäden***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Schäden an Isolatoren (Porzellanrisse und -brüche, beschädigte Sicherungssplinte etc.) und den Ableitvorrichtungen (Schutzringe und -hörner) können zu Überschlägen und u. U. zum Ausfall des Betriebsmittels führen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „vorhanden“	
<i>Kennziffer</i> = 0 (neuwertig)	für „nicht vorhanden“	(A.23)

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, [49] und darin angegebene Verweise

**Parametergruppe: Spannfeld in Leitungsrichtung Traverse 1 - n****Parameter: Beschädigungen Leiterseil***Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Beschädigungen an Leiterseilen (Aderabbrallungen, Schwingungsbrüche etc.) beeinträchtigen die mechanische Stabilität der stromführenden Phase und können aufgrund der hohen Zugkräfte zum Abriss führen.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „nicht vorhanden“ sowie der möglichen Beschädigungsarten

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Aderabbrallung“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Aderbrüche“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Besen“	
<i>Kennziffer</i> = 100 (ungenügend)	für „Schmorstellen“	(A.24)

*Kennziffer* = 100 (ungenügend) für „Schwingungsbrüche“  
*Kennziffer* = 0 (neuwertig) für „nicht vorhanden“

*Normative Grundlagen:*

Erfahrungswerte, [49] und darin angegebene Verweise

### **Parametergruppe: Schutzstreifenbetrachtung in Leitungsrichtung**

**Parameter: Leitungsgefährdender Bewuchs**

*Beschreibung und Motivation zur Berücksichtigung in der Bewertungsliste:*

Jede Freileitung muss gegen eine Berührung durch Bewuchs geschützt werden. Unter der Leitung befindlicher Bewuchs muss daher regelmäßig kontrolliert und ggf. zurückgeschnitten oder beseitigt werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass beim Besteigen von unter der Leitung befindlichem Bewuchs (z. B. Obstbäume) keine Personengefährdung durch das Unterschreiten des Mindestabstands zur Leitung entsteht. Bei einer Leitungsführung durch bewachsene Flächen (z. B. Wälder) muss außerdem die Trassenbreite so bemessen sein, dass umfallende Bäume nicht in die Leitung stürzen können (Fallkurvenbetrachtung). Die Prüfung auf leitungsgefährdenden Bewuchs ist daher ein wichtiges Zustandskriterium.

*Eingabe und Bewertungsbandbreite:*

Auswahlfeld mit den Bewertungen „nicht vorhanden“, „vorhanden, noch unkritisch“ oder „vorhanden, kritisch“

*Kennzifferberechnung und Parameterverlauf:*

Feste Kennzifferzuordnung nach folgender Berechnungsvorschrift:

*Kennziffer* = 100 (ungenügend) für „vorhanden, kritisch“  
*Kennziffer* = 67 (reparaturbedürftig) für „vorhanden, noch unkritisch“ (A.25)  
*Kennziffer* = 0 (neuwertig) für „nicht vorhanden“

*Normative Grundlagen:*

[49] und darin angegebene Verweise

### **c) Gefährdungspotential und Wichtigkeit**

Zum Abschluss der Abspannmastbewertung erfolgt die Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit des Betriebsmittels im betrachteten Netz.

Die Kriterien sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und werden durch die in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 beschriebene Vorgehensweise bewertet.

	<b>Parametergruppe</b>	<b>Einzelparameter</b>
Gefährdungspotential	Personen- gefährdung	Gefahr durch herabstürzende Mastbauteile
		Gefahr durch Berührungsspannung (z. B. durch schlechte Erdseilverbindung)
		Gefahr durch mangelhafte oder fehlende Mastsignaturen
		Besondere Gefahr bei Auf- oder Abstieg (z. B. durch fehlendes oder schadhafes Steigsystem)
	Umweltgefährdung	Grundwassergefährdung durch abblätternde Altbeschichtungen
	Gesetzesverstoß	Einhaltung Vorschriften für gesicherten Verkehrsweg
		Einhaltung Umgebungsnormen (Schutzstreifen etc.)
Wichtigkeit		Wichtigkeit der Freileitung im Netz

Tab. A.9: Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Abspannmast

## **Anhang B:       Auswahl von weiteren Bewertungslisten der Hochspannungsbetriebsmittel**

Wie bereits in der Einleitung zu Anhang A formuliert können aufgrund der Vielzahl der vorliegenden Bewertungslisten für Hochspannungsbetriebsmittel nur einige ausgewählte Gerätelisten im Detail vorgestellt werden. Außerdem ist eine rein graphische Darstellung existierender Bewertungslisten nur von beschränktem Erkenntniswert, da die implementierten Automatisierungsfunktionen und Berechnungsvorschriften als Software-Programmierungen realisiert sind und in einer Abbildung naturgemäß nicht identifizierbar sind. Um dennoch zumindest eine Vorstellung über den Umfang des vorliegenden Katalogs von Bewertungslisten zu erhalten, werden im Folgenden weitere Listen aus verschiedenen Hochspannungsbereichen abgebildet. Dabei wird sich auf die Darstellung des technischen Bewertungsteils beschränkt, da in den Listen der Stammdatenteil sowie die Möglichkeiten zur Bewertung des Gefährdungspotentials und der Wichtigkeit nicht nur einen identischen Aufbau aufweisen, sondern häufig auch inhaltlich nicht wesentlich voneinander abweichen. Die Abbildungen zeigen Beispielbewertungen, aus denen zumindest entnehmbar ist, welche Zustandsparameter zur Bewertung herangezogen werden, wie eine beispielhafte Parameterbeurteilung aussehen kann und wie diese gewichtet wird.



## B.1 Bewertungsliste 110-kV-Kabel (Leitungen)

### 1.1 Technische Bewertung

technischer Gesamtzustand		ausreichend		8,99		nicht ermittelbare Gruppen ausblenden		alle Gruppen einblenden	
		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand			
<b>Alter des Kabels</b>		ca. 28 Jahre		15,78	neuwertig	1,5			
<b>Kabelanlage allgemein</b>				0,94	neuwertig	3,0			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Endverschluß 1	-1,44 V			0,00	neuwertig	1,0			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Endverschluß 2	-1,24 V			0,00	neuwertig	1,0			
Letzte Streckenbegehung mit Korrosionsschutzprüfung liegt zurück	ca. 3,2 Jahre			33,00	ausreichend	0,5			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Streckenmeßstelle 1	-1,53 V			0,00	neuwertig	1,0			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Streckenmeßstelle 2	-1,51 V			0,00	neuwertig	1,0			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Streckenmeßstelle 3	-1,41 V			0,00	neuwertig	1,0			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Streckenmeßstelle 4		x		0,00	keine Bewertung	1,0			
Spannungswert kathodischer Korrosionsschutz Streckenmeßstelle 5		x		0,00	keine Bewertung	1,0			
Ummantelungsdicke Außenrohr	> 1,5 mm			0,00	neuwertig	1,0			
Betriebs- oder Instandhaltungsbeeinträchtigung durch Bebauung oder Bautätigkeiten auf der Kabelstrecke	keine			0,00	neuwertig	1,0			
Stickstoffdichtigkeit	kein Stickstoffverlust			0,00	neuwertig	10,0			
<b>Letzte Wartung / Sanierung Endverschluß 1 liegt zurück</b>		ca. 8,1 Jahre		0,00	neuwertig	1,0			
<b>Endverschlußanlage 1</b>				28,40	ausreichend	3,0			
Endverschlußgrundplatten	in Ordnung			0,00	neuwertig	10,0			
Befestigung Porzellan-Grundplatte (Kittung, Schrauben)		x	nicht ermittelbar ohne Freischaltung, Typ bisher unauffällig	0,00	keine Bewertung	10,0			
Porzellanisolatoren	undicht			100,00	ungenügend	10,0			
Endverschlußköpfe	in Ordnung			0,00	neuwertig	10,0			
Kleinrohrleitung	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Aufteilungskopf	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Isolierstützer	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0			
Ausdehnungsgefäße	mechanisch beschädigt			67,00	reparaturbedürftig	5,0			
Öldruckmanometer	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Stickstoffmanometer	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Massebedarf pro Jahr (ca.) (+ = aufgedrückt, - = abgelassen)	0,00 l			0,00	neuwertig	3,0			
Schaum oder Blasenbildung im Schauglas oder beim Ablassen von Masse ersichtlich		x		0,00	keine Bewertung	10,0			
Gasblasenmessung		x		0,00	keine Bewertung	10,0			
<b>Letzte Wartung / Sanierung Endverschluß 2 liegt zurück</b>		ca. 8,1 Jahre		0,00	neuwertig	1,0			
<b>Endverschlußanlage 2</b>				0,23	neuwertig	3,0			
Endverschlußgrundplatten	in Ordnung			0,00	neuwertig	10,0			
Befestigung Porzellan-Grundplatte (Kittung, Schrauben)		x	nicht ermittelbar ohne Freischaltung, Typ bisher unauffällig	0,00	keine Bewertung	10,0			
Porzellanisolatoren	in Ordnung			0,00	neuwertig	10,0			
Endverschlußköpfe	in Ordnung			0,00	neuwertig	10,0			
Kleinrohrleitung	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Aufteilungskopf	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Isolierstützer	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0			
Ausdehnungsgefäße	in Ordnung			0,00	neuwertig	5,0			
Öldruckmanometer	in Ordnung		Schaugläser aller Phasen komplett gefüllt; Empfehlung: Zur besseren Ausdehnbarkeit etwas Glycerin ablassen	0,00	neuwertig	2,0			
Stickstoffmanometer	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0			
Massebedarf pro Jahr (ca.) (+ = aufgedrückt, - = abgelassen)	0,12 l			3,60	neuwertig	3,0			
Schaum oder Blasenbildung im Schauglas oder beim Ablassen von Masse ersichtlich		x		0,00	keine Bewertung	10,0			
Gasblasenmessung		x		0,00	keine Bewertung	10,0			

Abb. B.1: Bewertungsliste 110-kV-Kabel (technischer Bewertungsteil)

## B.2 Bewertungsliste Drehtrennschalter (Primärtechnik)

### 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>		<b>ausreichend</b>	<b>9,16</b>	nicht ermittelbare Gruppen ausblenden		
		alle Gruppen einblenden				
		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand
<b>Grunddaten</b>						
Alter	ca. 5 Jahre			0,97	neuwertig	3,0
Ersatzteilbeschaffung wertwichtiger bzw. betriebsmitteltypischer Teile	problemlos			10,71	neuwertig	1,0
Schalterdimensionierung (Nennstrom / Betriebsstrom, Nenn-Kurzzeitstrom)	ausreichend			0,00	neuwertig	2,0
Erfahrungswert / Tendenz für verwendeten Typ	problemlos			0,00	neuwertig	5,0
<b>Begehung / Sichtkontrolle ohne Freischaltung</b>						
Porzellanschäden	keine			15,18	neuwertig	2,0
Verschmutzung der Isolatoren	stark / kritisch			0,00	neuwertig	2,0
Korrosion	mittel			67,00	reparaturbedürftig	2,0
Sichtkontrolle Erdung	in Ordnung			33,00	ausreichend	1,0
Fettung der Kontakte	in Ordnung			0,00	neuwertig	5,0
<b>Zustand Hauptkontakte (Freischaltung erforderlich)</b>						
Zustand der Kontakte	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Kontaktwiderstand				13,50	neuwertig	5,0
Pol A	90 µΩ			25,00	ausreichend	1,0
Pol B	88 µΩ			20,00	neuwertig	1,0
Pol C	89 µΩ			22,50	neuwertig	1,0
Bewegungsablauf	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
<b>Kontrolle Motorantrieb (Freischaltung erforderlich)</b>						
Antriebsheizung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle der Handkurbelverriegelung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Türdichtung / Scharniere	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0
Gehäusebe- und -entlüftungen	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0

Abb. B.2: Bewertungsliste Drehtrennschalter (technischer Bewertungsteil)

## B.3 Bewertungsliste Batterie (Stromversorgung)

### 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>		<b>ausreichend</b>	<b>22,05</b>	nicht ermittelbare Gruppen ausblenden			
		alle Gruppen einblenden					
		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand	Bewertungsfaktor Lebensdauer
<b>Batteriealter</b>							
Batteriealter	ca. 2 Jahre			14,29	neuwertig	3,0	
Letzte Kontrolle liegt zurück	ca. 1,1 Jahre			27,04	ausreichend	1,0	
<b>Temperaturmessungen</b>							
Temperaturmessungen				35,00	ausreichend	1,0	5,0
klimatische Raumbedingung	Delta T > 8°C			67,00	reparaturbedürftig	3,0	3,0
Ø Zelltemperatur	20,0 °C			0,00	neuwertig	1,0	1,0
Δ Zelltemperatur	0,3 °C			4,50	neuwertig	2,0	2,0
<b>Batteriemessungen</b>							
Batteriemessungen				27,84	ausreichend	3,0	2,0
Wechselstromanteil I <sub>EW</sub>	0,6 A			10,50	neuwertig		2,0
Ø Säuredichte	1,241 kg/l			7,50	neuwertig	2,0	
Δ Säuredichte	0,009 kg/l			27,00	ausreichend	3,0	1,0
Ø Zellenspannung	2,000 V						
Max. Zellenspannung	2,050 V			18,75	neuwertig	3,0	
Min. Zellenspannung	1,990 V			7,50	neuwertig	3,0	
Symmetrie i.O.	ja			0,00	neuwertig	3,0	
<b>Sichtkontrolle</b>							
Sichtkontrolle				10,00	neuwertig	1,0	1,0
Sauberkeit	in Ordnung			0,00	neuwertig		1,0
Abblätterung Polbrücken	kein			0,00	neuwertig	2,0	2,0
Bodensatz	kein			0,00	neuwertig	2,0	2,0
Verbinder / Anschlüsse	nicht in Ordnung			100,00	ungenügend	1,0	
Verschleiß	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0	
sonst. Schäden	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0	

Abb. B.3: Bewertungsliste Batterie (technischer Bewertungsteil)



## B.4 Bewertungsliste Leistungsschalter (Federspeicher) Typ AEG S1 123 (Primärtechnik)

### 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>neuwertig</b>	<b>4,15</b>
----------------------------------	------------------	-------------

nicht ermittelbare Gruppen ausblenden
alle Gruppen einblenden

	nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand
<b>Grunddaten</b>			4,36	neuwertig	1,0
Alter	ca. 9 Jahre		16,88	neuwertig	1,0
Einhaltung typbedingter, empfohlener Wartungszyklus	in Ordnung		0,00	neuwertig	5,0
Schalterdimensionierung (nur ermittelbar, wenn Kurzschlußstrom der Anlage bekannt ist)	in Ordnung		0,00	neuwertig	10,0
Erfahrungswerte / Tendenz für verwendeten Typ	problemlos		0,00	neuwertig	1,0
Ersatzteilbeschaffung wertwichtiger bzw.	aufwändig		33,00	ausreichend	2,0
<b>Begehung / Sichtkontrolle ohne Freischaltung</b>			10,60	neuwertig	1,0
Zählerstand Schaltspiele (Gesamtanzahl seit Inbetriebnahme)	623		24,39	neuwertig	1,0
Schaltspiele seit letzter Wartung	142		15,24	neuwertig	2,0
elektrische Beanspruchung Unterbrechereinheit	gering		33,33	ausreichend	9,0
mechanische Beanspruchung Unterbrechereinheit	keine besondere		23,36	neuwertig	6,0
Porzellanschäden Stützisolator	keine		0,00	neuwertig	1,0
Porzellanschäden Schaltkammerisolator	keine		0,00	neuwertig	1,0
Porzellankittfugen Stützisolator oben	schadensfrei		0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Stützisolator unten	schadensfrei		0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator oben	schadensfrei		0,00	neuwertig	6,0
Porzellankittfugen Schaltkammerisolator unten	schadensfrei		0,00	neuwertig	6,0
Dichtigkeit Steuerkondensatoren	dicht		0,00	neuwertig	8,0
Schutzanstrich	nicht in Ordnung		67,00	reparaturbedürftig	1,0
<b>Sichtkontrolle ohne Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>			0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt	kein Wassereintritt		0,00	neuwertig	6,0
Kontrolle des Antriebsgestänges	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle der Steuer- bzw. Steckerkabel	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Meldeschalter	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Gummidichtungen	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle des Dämpfers	dicht		0,00	neuwertig	9,0

Abb. B.4.1: Bewertungsliste Leistungsschalter Typ AEG S1 123 (technischer Bewertungsteil, ohne Freischaltung ermittelbare Parameter)

<b>Sichtkontrolle mit Freischaltung abhängig von der Aufstellungsart</b>		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle auf Wassereintritt		x		0,00	keine Bewertung	6,0
Kontrolle des Antriebsgestänges		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle der Steuer- bzw. Steckerkabel		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Meldeschalter		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Gummidichtungen		x		0,00	keine Bewertung	1,0
Kontrolle des Dämpfers		x		0,00	keine Bewertung	9,0
<b>Untersuchung mit Freischaltung</b>				1,63	neuwertig	1,0
Kontrolle der Polantriebsschwingen	in Ordnung			0,00	neuwertig	5,0
Auslöser Y1,Y2,Y3 (Schrauben, Anschlüsse)	in Ordnung			0,00	neuwertig	6,0
Steckerkabel	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität HF	0,70 ppmV			0,00	neuwertig	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität SO <sub>2</sub>	0,90 ppmV			33,00	ausreichend	1,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Wasserdampftaupunktmessung H <sub>2</sub> O-Anteil	0,060 g/m <sup>3</sup>			0,00	neuwertig	6,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Wasserdampftaupunktmessung H <sub>2</sub> O-Taupunkt	-38,0 °C			0,00	neuwertig	6,0
SF <sub>6</sub> -Volumenprozentanteil	99,0 %			15,00	neuwertig	1,0
Mindestbetätigungsspannung Einschaltung	134,00 V			0,00	neuwertig	1,0
Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung I	142,00 V			0,00	neuwertig	9,0
Mindestbetätigungsspannung Ausschaltung II	141,00 V			0,00	neuwertig	9,0
Schaltkammerwiderstand Pol A	47 µΩ			13,13	neuwertig	1,0
Schaltkammerwiderstand Pol B	44 µΩ			7,50	neuwertig	1,0
Schaltkammerwiderstand Pol C	46 µΩ			11,25	neuwertig	1,0

Abb. B.4.2: Bewertungsliste Leistungsschalter Typ AEG S1 123 (technischer Bewertungsteil, nur mit Freischaltung ermittelbare Parameter)

## B.5 Bewertungsliste Hochspannungswandler (Primärtechnik)

### 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>ausreichend</b>	<b>12,32</b>
----------------------------------	--------------------	--------------

nicht ermittelbare Gruppen ausblenden

alle Gruppen einblenden

		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktorzustand
<b>Alter</b>	ca. 2 Jahre			5,00	neuwertig	1,0
<b>Letzte Wartung liegt zurück</b>	unbekannt, bezogen auf Baujahr noch nicht			0,00	neuwertig	1,0
<b>Begehung / Sichtkontrolle (ohne Freischaltung möglich)</b>				26,09	ausreichend	3,0
Isolatorschäden	keine			0,00	neuwertig	2,0
Kittung / Klebung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Verschmutzung	unkritisch			0,00	neuwertig	1,0
Schutzanstrich	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Erdungszustand	nicht in Ordnung		Erdungsbänder stark korrodiert	100,00	ungenügend	3,0
Zustand der Sekundärkabel	in Ordnung			0,00	neuwertig	3,0
<b>Öl-isolierte Wandler (ohne Freischaltung möglich)</b>				x		
				0,00	keine Bewertung	4,0
Öldichtigkeit Flanschverbindungen			Wandler ist gas- und nicht ölsoliert	0,00	neuwertig	2,0
Öldichtigkeit Primärdurchführungen				0,00	neuwertig	2,0
Öldichtigkeit Ölblässe				0,00	neuwertig	2,0
Lunkerstellen Kopfgehäuse				0,00	neuwertig	2,0
Lunkerstellen Topfgehäuse				0,00	neuwertig	2,0
Lunkerstellen Schweißnähte				0,00	neuwertig	2,0
Isolierölstand				0,00	neuwertig	1,0
<b>SF<sub>6</sub>-isolierte Wandler (Freischaltung erforderlich)</b>						
				16,49	neuwertig	5,0
SF <sub>6</sub> -Füllung (bezogen auf 20°C)	im Normbereich, Korrektur empfohlen			33,00	ausreichend	10,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität HF	0,08 ppmv			6,00	neuwertig	3,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - Acidität SO <sub>2</sub>	0,11 ppmv			8,25	neuwertig	3,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - H <sub>2</sub> O-Anteil	0,01 mg/l			7,50	neuwertig	4,0
SF <sub>6</sub> -Qualität - H <sub>2</sub> O-Taupunkt	-38,0 °C			15,00	neuwertig	8,0
Betriebsüberdruck						
SF <sub>6</sub> -Volumenprozentanteil	99,30%			23,33	neuwertig	3,0
Dichtwächterbefüllung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Dichtwächterfunktion	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0
Dichtigkeit SF <sub>6</sub> -Füllanschluß, Meßanschluß und Dichtwächteranschluß	undicht		Blasenbildung SF <sub>6</sub> -Füllanschluß	67,00	reparaturbedürftig	1,0
<b>Überprüfung der Berstscheibe inkl. Abdeckung</b>						
Wasserdichtigkeit Schutzhaube	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Versehrtheit Abdeckung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
optischer Zustand Berstscheibe	in Ordnung			0,00	neuwertig	3,0
<b>Primäranschluß (Freischaltung erforderlich)</b>						
				0,00	neuwertig	5,0
Befund Primäranschlüsse	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Kontaktscheiben ausgebaut	ja			0,00	neuwertig	1,0
Primärumschaltung: Fester Sitz der Anschlüsse	in Ordnung			0,00	neuwertig	3,0
Primärumschaltung: Umschaltkontakte gefettet	ja			0,00	neuwertig	1,0
<b>Luftabschluß Metall (Freischaltung erforderlich)</b>				x		
				0,00	keine Bewertung	4,0
Faltenbalg / Dehnzelle						
Führung und Befestigung				0,00	neuwertig	2,0
Korrosion				0,00	neuwertig	1,0
Verschmutzung				0,00	neuwertig	1,0
Funktion Ölstandsanzeige				0,00	neuwertig	4,0
Öldichtigkeit						
Löt- und Schweißnähte				0,00	neuwertig	2,0
Rohrverbindungen				0,00	neuwertig	2,0
<b>Luftabschluß mit N<sub>2</sub> (Freischaltung erforderlich)</b>						
				16,38	neuwertig	5,0
Ötemperatur des Wandlers	22,0 °C					
Ablesbarkeit der Manometerskala	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Dichtigkeit Manometeranschluß	dicht			0,00	neuwertig	1,0
Art der N <sub>2</sub> -Druckbestimmung	Manometeranzeige und Messung					
N <sub>2</sub> -Druckbestimmung nur durch Manometeranzeige						
N <sub>2</sub> -Druck (Manometeranzeige)		x		0,00	keine Bewertung	6,0
N <sub>2</sub> -Druckbestimmung durch Messung und Manometeranzeige						
N <sub>2</sub> -Druck (gemessener Wert)	0,33 bar			18,55	neuwertig	6,0
N <sub>2</sub> -Druck (Manometeranzeige)	0,34 bar			26,25	ausreichend	2,0
<b>Kontrolle der Anschlußkästen (Freischaltung erforderlich)</b>						
				11,00	neuwertig	1,0
Wassereintritt	nein			0,00	neuwertig	1,0
Deckeldichtung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Korrosion	mittel			33,00	ausreichend	3,0
Belüftung	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Öldichtigkeit (Sekundärdurchführung)	dicht			0,00	neuwertig	3,0

Abb. B.5: Bewertungsliste Hochspannungswandler (technischer Bewertungsteil)



## B.6 Bewertungsliste TK-Systeme (Nachrichtentechnik)

### 1.1 Technische Bewertung

<b>technischer Gesamtzustand</b>	<b>ausreichend</b>	<b>11,45</b>
----------------------------------	--------------------	--------------

nicht ermittelbare Gruppen ausblenden

alle Gruppen einblenden

		nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand
<b>Alter</b>	ca. 3 Jahre			22,50	neuwertig	3,0
<b>Gerätegrunddaten</b>				20,01	neuwertig	6,0
Portauslastung	82,03 %			70,03	reparaturbedürftig	6,0
Erweiterbarkeit	ja			0,00	neuwertig	5,0
Softwarestand	aktuell, update-fähig			0,00	neuwertig	4,0
Hardwarestand	aktuell			0,00	neuwertig	2,0
Managementfähigkeit	ja			0,00	neuwertig	2,0
Fernüberwachung	ja			0,00	neuwertig	1,0
Support-Einschränkung bei erfolgter Abkündigung durch den Hersteller?		x		0,00	keine Bewertung	7,0
Dokumentation	vollständig, aktuell			0,00	neuwertig	1,0
<b>Ausstattung</b>				7,33	neuwertig	5,0
Endgerätequalität	teilweise hochwertig			22,00	neuwertig	1,0
Systemqualität	hochwertig			0,00	neuwertig	2,0
<b>Sichtkontrolle Gerät</b>				9,14	neuwertig	1,0
Klimatische	einwandfrei			0,00	neuwertig	4,0
Eignung des Aufstellungsorts	einwandfrei			0,00	neuwertig	1,0
Kontrolle Leuchtanzeigen und Alarmmeldungen	in Ordnung			0,00	neuwertig	1,0
Zustand Belüftung	in Ordnung			0,00	neuwertig	2,0
mechanischer Zustand und Festigkeit Schnittstellen	neuwertig			0,00	neuwertig	5,0
Zugänglichkeit Schnittstellen	schlecht			67,00	reparaturbedürftig	3,0
Zustand Schrank-, Rahmen- und Geräteerdung	einwandfrei			0,00	neuwertig	6,0
<b>Verdrahtung, Verteiler, Klemmleisten</b>				0,00	neuwertig	1,0
Eignung und Zugänglichkeit des Verteilerstandorts	einwandfrei			0,00	neuwertig	1,0
Verdrahtungsprinzip	Patchfeld			0,00	neuwertig	4,0
Beschaltungs- und Rangierzustand	einwandfrei			0,00	neuwertig	1,0
Dokumentation der Beschaltung	vollständig			0,00	neuwertig	3,0
Erweiterungsmöglichkeit	ja			0,00	neuwertig	2,0
Zustand Erdung	einwandfrei			0,00	neuwertig	5,0
<b>Managementfähigkeit</b>				9,31	neuwertig	2,0
Prinzip	Fern- und Nahsteuerung			0,00	neuwertig	4,0
Admin-Software vorhanden ?	ja			0,00	neuwertig	1,0
Herstellerabhängigkeit	herstellerabhängig			50,00	reparaturbedürftig	1,0
Funktion	einwandfrei			0,00	neuwertig	5,0
Qualität	nur steuern und überwachen		keine Verkehrsmessung möglich	33,00	ausreichend	3,0
Benutzerfreundlichkeit	gut			0,00	neuwertig	2,0
<b>Redundanzen</b>				0,00	neuwertig	4,0
Redundanz Systemanbindung	ja			0,00	neuwertig	8,0
Stromversorgung redundant ?	ja			0,00	neuwertig	8,0
Datensicherung redundant ?	ja			0,00	neuwertig	1,0
Zentralrechner redundant ?	ja			0,00	neuwertig	8,0

Abb. B.6: Bewertungsliste TK-Systeme (technischer Bewertungsteil)

## B.7 Bewertungsliste Überstromzeitschutz (Sekundärtechnik)

### 1.1 Technische Bewertung

**technischer Gesamtzustand**    **neuwertig**    **5,44**

nicht ermittelbare Gruppen ausblenden

alle Gruppen einblenden

	nicht ermittelbar	Bemerkung	Kennziffer	Einzelbewertungen	Bewertungsfaktor Istzustand	Bewertungsfaktor Lebensdauer
<b>Letzte Prüfung liegt zurück</b>	ca. 0,8 Jahre					
<b>Betriebsjahre</b>	ca. 5,0 Jahre		10,71	neuwertig	1,0	
<b>Letzter Batteriewechsel vor</b>	ca. 1,8 Jahren		0,00	neuwertig	0,5	
<b>Vorbereitung und Sichtkontrolle</b>			10,17	neuwertig	1,0	0,2
Vergleich Originaldatei, Relais-Einstellblatt mit Schutzeinstellungen vor Ort	in Ordnung		0,00	neuwertig	10,0	
Überprüfung der allg. Relaisdaten und Vergleich mit Betriebsmittelinformationssystem	nicht in Ordnung	im Betriebsmittelinformationssystem teilweise nicht gepflegt	100,00	ungenügend	1,0	
Kontrolle LEDs, Falklappenanzeigen bzw. anderer Leuchtanzeigen	in Ordnung		0,00	neuwertig	5,0	
Korrosion, Kontaktabbrand (soweit prüfbar), Verschmutzungen etc. an Schutzgerät und Hilfsrelais	im Toleranzbereich	Korrosion vorhanden, aber nicht betriebsgefährdend, innerhalb des nächsten Halbjahrs beseitigen	67,00	reparaturbedürftig	2,0	
Klemmleisten, Verdrahtung, WS- und GS-Automaten	in Ordnung		0,00	neuwertig	3,0	
Klimatische Umgebungsbedingungen (z.B. Temperaturschwankungen)	in Ordnung		0,00	neuwertig		1,0
Messung der anliegenden Hilfsspannung	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0	
<b>Erste elektrische Prüfung</b>			0,00	neuwertig	2,0	
Erste elektrische Prüfung mit einem auslösewirksamen Fehler zur Überprüfung "Funktion bei Anforderung"	in Ordnung		0,00	neuwertig	10,0	
Kontrolle der Datums- und Zeitführung (verbunden mit zyklischem Batteriewechsel)	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0	
<b>Geräteprüfung</b>			12,18	neuwertig	2,0	
Messung der Anrege- und Abfallwerte aller Stufen für ein- und mehrpolige Fehler	in Ordnung		0,00	neuwertig	10,0	
Messung der Auslösezeiten	in Ordnung		0,00	neuwertig	10,0	
Erdschlußwischer- bzw. Erdschlußrichtungsfunktionen für SS-seitige und leitungsseitige Erdschlüsse mit repräsentativen Erdschlußsequenzen prüfen	in Ordnung		0,00	neuwertig	5,0	
AWE EIN/AUS bzgl. Steuerrichtung und Rückmeldung	in Ordnung		0,00	neuwertig	2,0	
Funktionsprüfung bei erfolgreicher bzw. erfolgloser AWE	im Toleranzbereich		67,00	reparaturbedürftig	6,0	
- Logische Funktion der AWE-Sperre vom Leistungsschalter	in Ordnung					
- Prüfung der Wirkzeit	im Toleranzbereich					
- Prüfung der Pausenzeit	im Toleranzbereich					
- Prüfung der Sperrzeit	nicht in Ordnung					
- Prüfung der Zuschaltung auf einen Kurzschluß	in Ordnung					
- Erfolgreiche AWE mit LS	in Ordnung					
- Erfolgreiche AWE mit LS	in Ordnung					
- Prüfung der AWE-Parallelsperre bei Zweitschutz	in Ordnung					
<b>Peripherieprüfung und Abschluß</b>			0,00	neuwertig	2,0	
Prüfung Melde- und Steuerwege zu den leittechnischen Unterstationen	in Ordnung		0,00	neuwertig	8,0	
Prüfung Auslösekreise zum LS	in Ordnung		0,00	neuwertig	10,0	
Überprüfung der Verbindungen zu externen Störschreibern (falls verwendet)	in Ordnung		0,00	neuwertig	3,0	
Vergleich der Meßgrößen am Schutz mit den Betriebsmeßwerten vor Ort	in Ordnung		0,00	neuwertig	4,0	
Exemplarische Kontrolle der Dokumentaton auf Mängel	in Ordnung		0,00	neuwertig	1,0	

Abb. B.7: Bewertungsliste Überstromzeitschutz (technischer Bewertungsteil)

## Anhang C: Ergebnisse aus der Vergleichsbewertung heuristisch / deterministisches und Evidenztheorieverfahren

Die im Rahmen des Feldversuchs zur Tauglichkeitsprüfung der vorliegenden Bewertungssystematik durchgeführte Vergleichsbewertung zwischen dem Evidenztheorie- und dem heuristisch / deterministischen Verfahren wurde anhand ausgewählter Bewertungsergebnisse im Kapitel 5.2.2 detailliert beschrieben. Im Folgenden werden weitere Bewertungsergebnisse aus diesem gesonderten Prüfungsabschnitt vorgestellt.

### C.1 Bewertungsergebnisse für Transformatoren

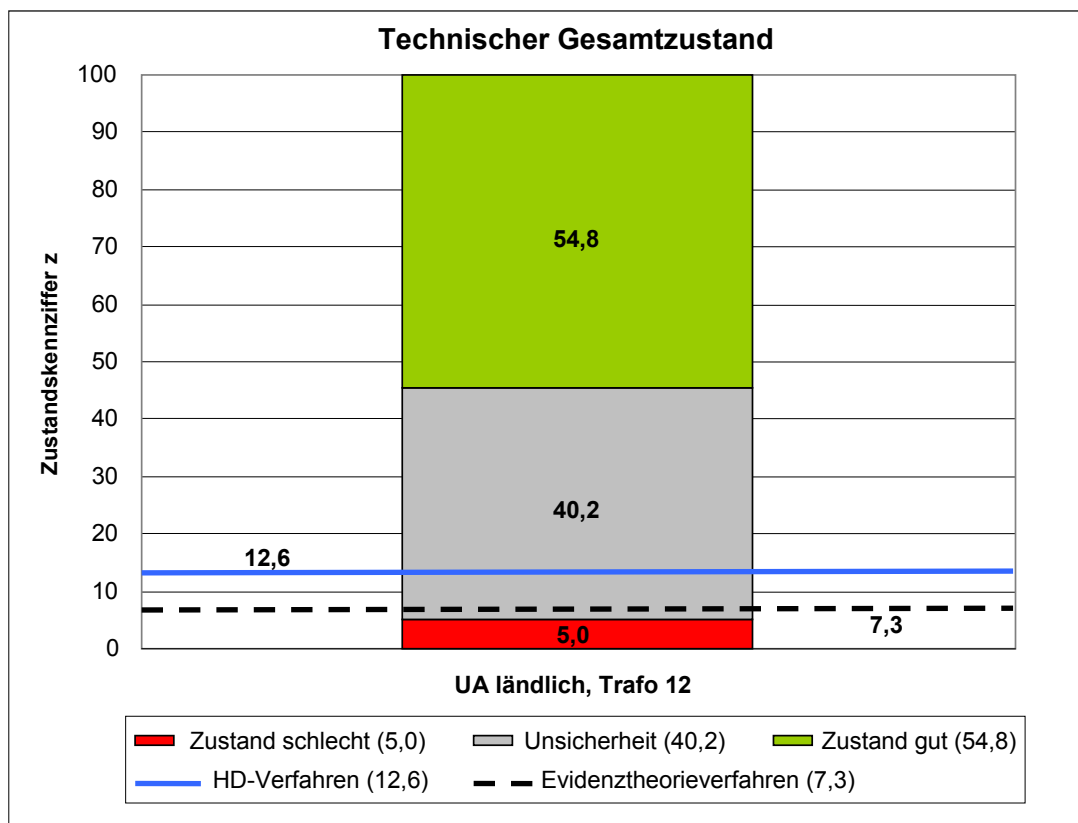


Abb. C.1: Vergleichsbewertungsergebnisse UA ländlich, Trafo 12 (110-kV-Trafo)



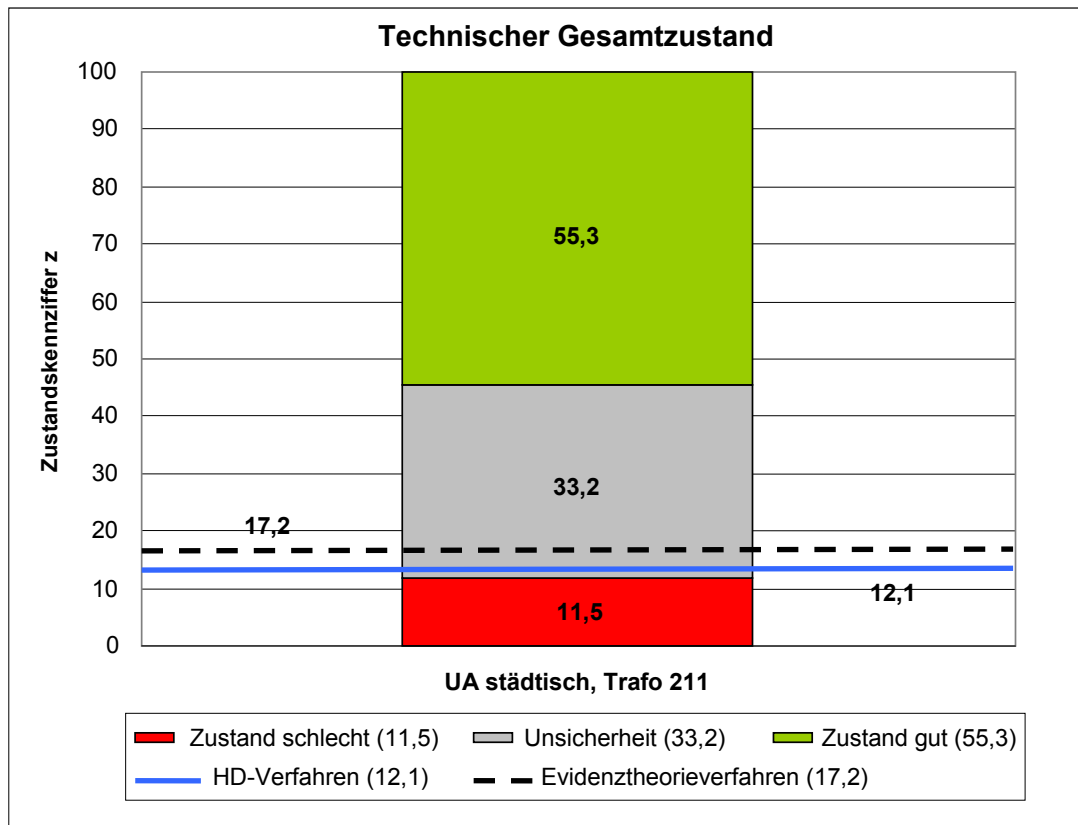


Abb. C.2: Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 211 (220-kV-Trafo)

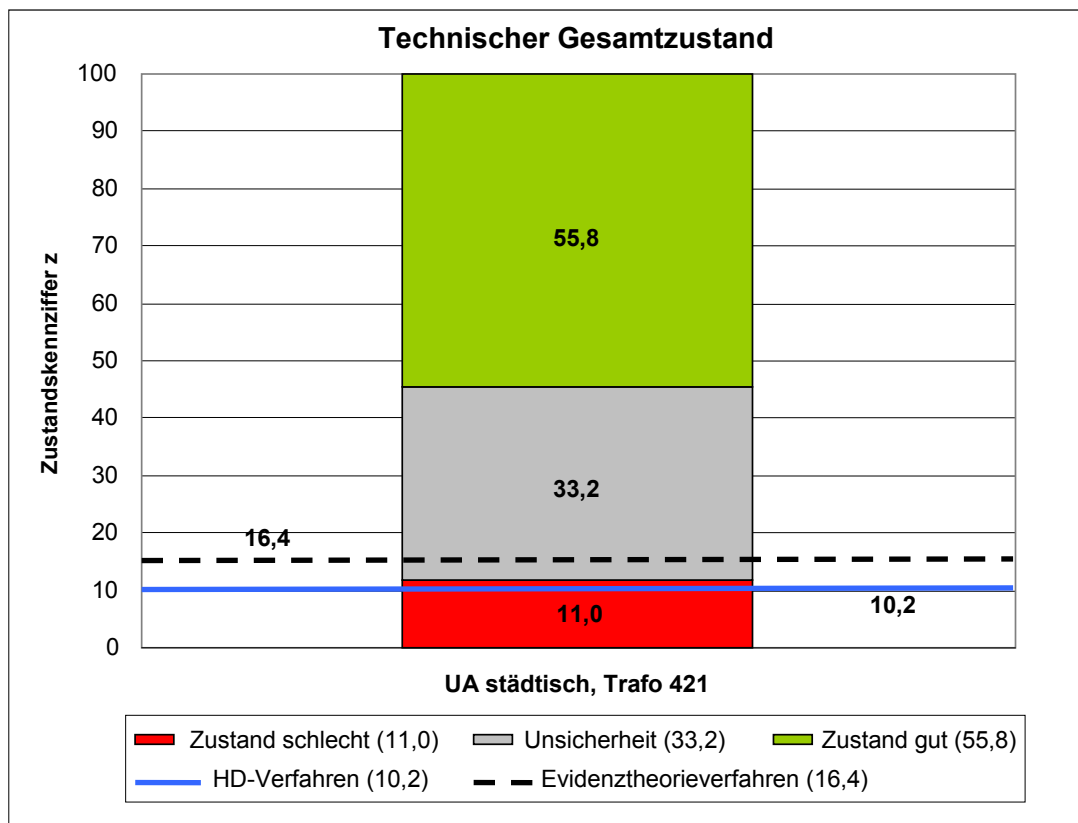


Abb. C.3: Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 421 (380-kV-Trafo)

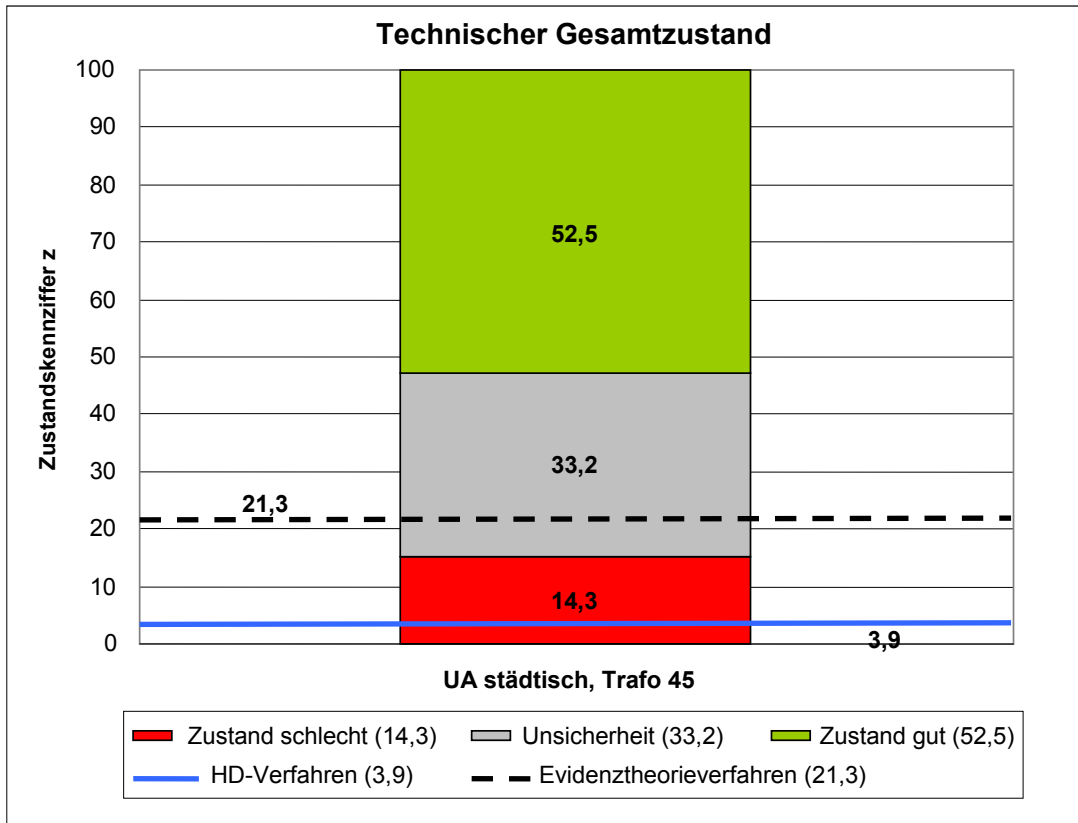


Abb. C.4: Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 45 (380-kV-Trafo)

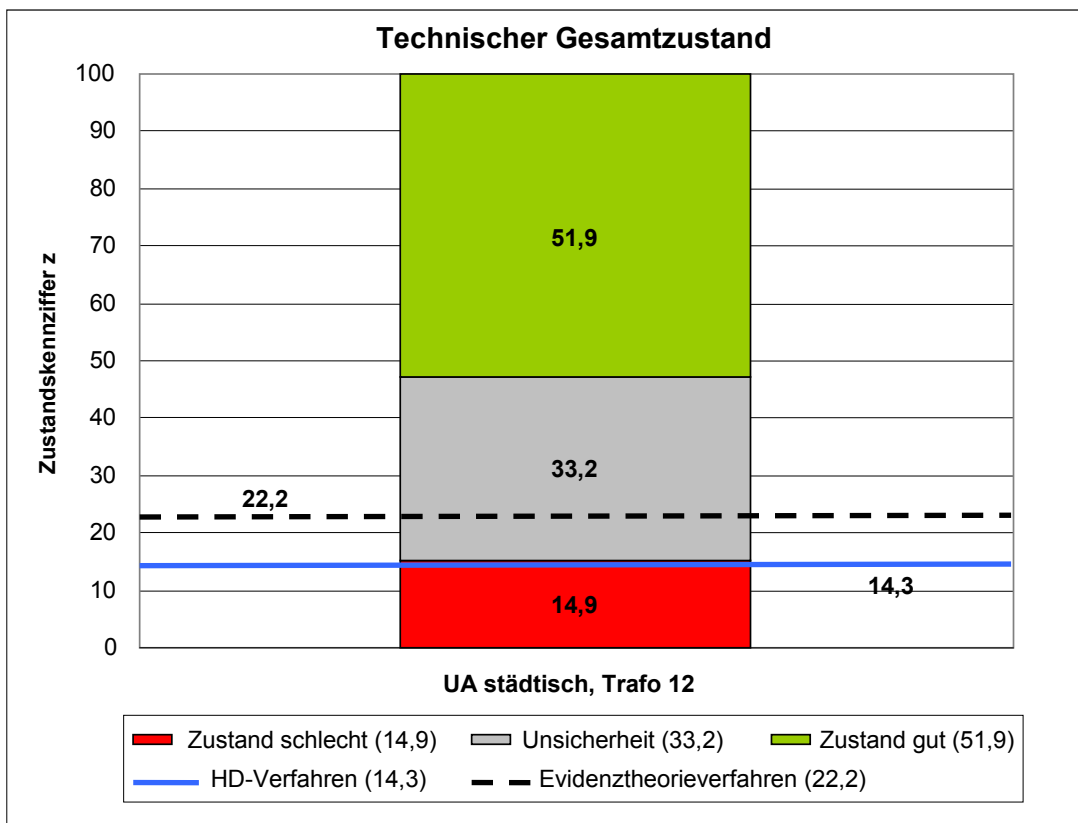


Abb. C.5: Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 12 (110-kV-Trafo)

## C.2 Bewertungsergebnisse für Leistungsschalter

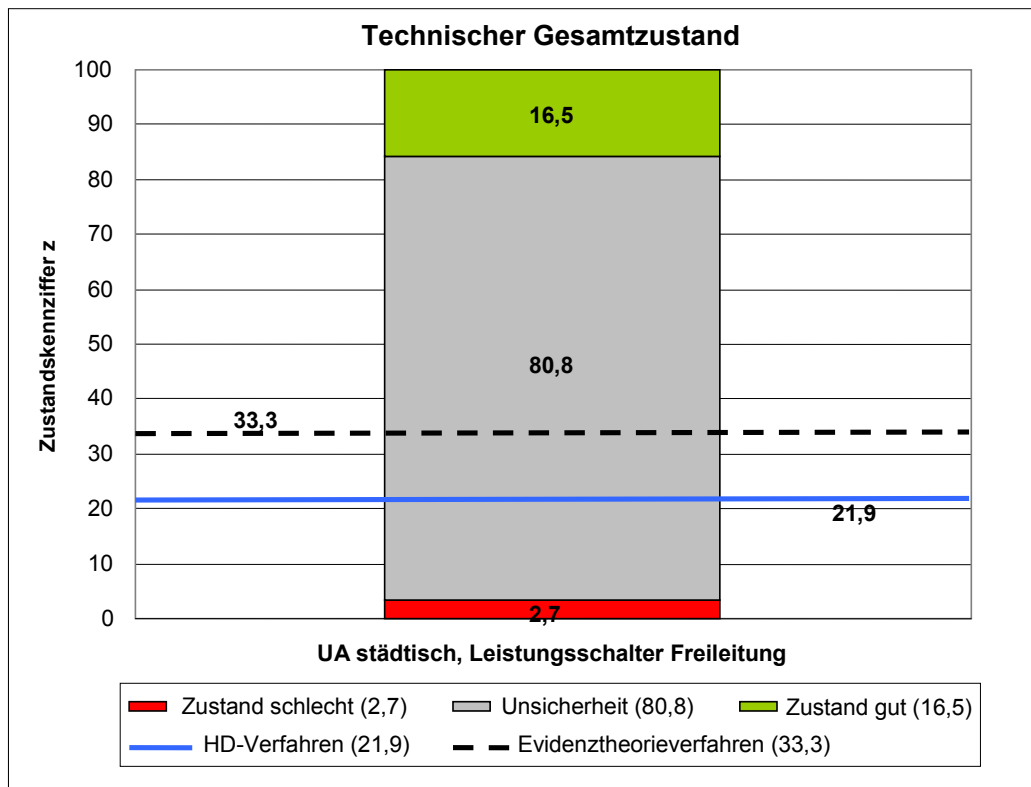


Abb. C.6: Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Leistungsschalter Freileitung

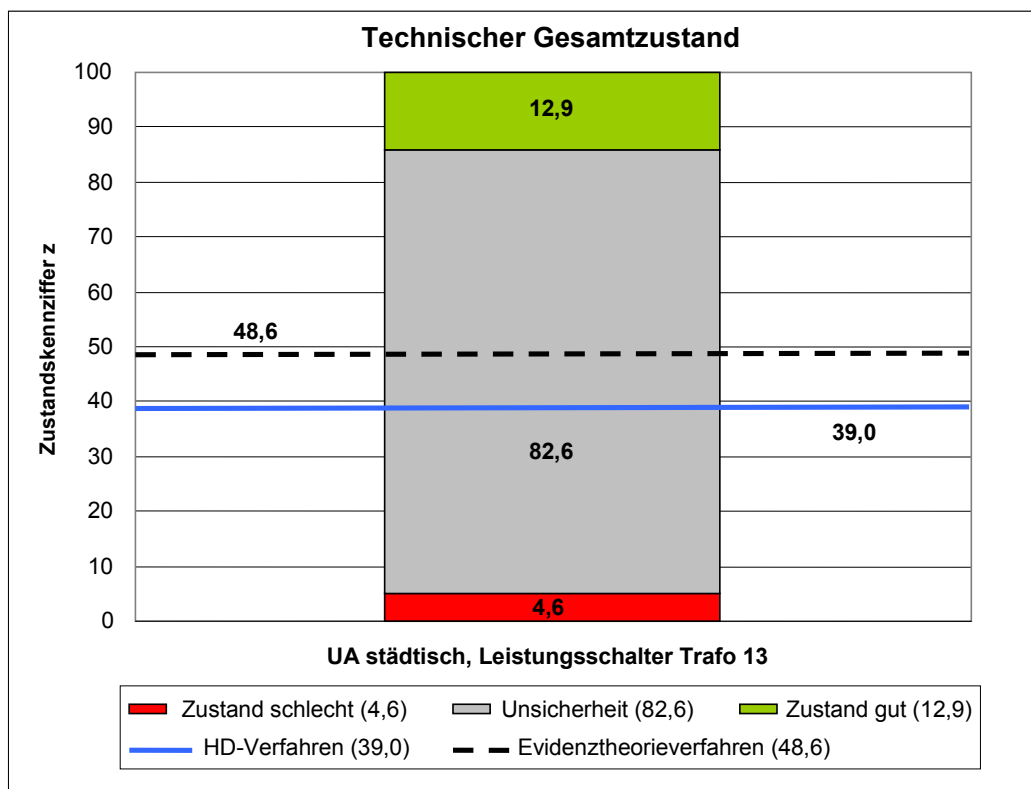


Abb. C.7: Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Leistungsschalter Trafo 13

## Literaturverzeichnis

- [1] **Norm DIN 31051 2003-6:** *Grundlagen der Instandhaltung.*
- [2] **Norm DIN EN 13306 2001-9:** *Begriffe der Instandhaltung: Dreisprachige Fassung EN 13306:2001.*
- [3] **Christian, J. ; Feser, K. ; Sundermann, U. :** *Zustandsdiagnose bei mechanischen Wicklungsschäden mit der Übertragungsfunktion. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): ETG-Fachberichte Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 229-232.*
- [4] **Plath, K.-D. ; Plath, R. ; Emanuel, H. ; Kalkner, W. :** *Synchrone dreiphasige Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren vor Ort und im Labor. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): ETG-Fachberichte Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 69-72.*
- [5] **Leibfried, T.:** *Zustandsdiagnose des Öl-Papier-Isolationssystems von Leistungstransformatoren mit Hilfe der Relaxationsstromanalyse. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): ETG-Fachberichte Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 73-76.*
- [6] **Baur, M. ; Mohaupt, P. ; Schlick, T. :** *Aktuelle Ergebnisse der VLF Diagnose an Mittelspannungskabeln. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): ETG-Fachberichte Nr. 87. Berlin : VDE-Verlag, 2002. - ISBN 3-8007-2671-8, S. 245-249.*
- [7] **Smorszek, P.; Liebelt, L. :** *Festlegung und Anwendung von Dringlichkeitskriterien für Instandhaltungsinspektionen“, Zeitschrift ew, Jahrgang 106 (2007), Heft 6.*
- [8] **Balzer, G. ; Brandl, M. ; Schmitt, O. ; Strnad, A.:** *Rechnergestützte Instandhaltungsplanung von Betriebsmitteln in der Elektrischen Energieversorgung. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): ETG-Fachberichte Nr. 79. Berlin : VDE-Verlag, 1999. - ISBN 3-8007-2502-9, S. 411-420.*
- [9] **Schmitt, O. ; Schneider, A.:** *Servicekonzepte aus Sicht des Betriebs. In: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): ETG-Fachberichte Nr. 83. Berlin : VDE-Verlag, 2001. - ISBN 3-8007-2605-X, S. 49-59.*
- [10] **Drescher, D.:** *Rechnergestützte Bewertung von Betriebsmitteln für Instandhaltungsstrategien, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2007.*
- [11] **Haase, M.; Hogräfer, J.:** *Software bewertet Anlagenteile und stellt Expertenwissen bereit. In: MM Maschinenmarkt Jg. 107 (2001), Heft 30/31, S. 22-25.*
- [12] **Hogräfer, J.:** *Software analysiert und bewertet Anlagenteile und gibt Empfehlungen für Instandhaltungsmaßnahmen. In: EVU-Betriebspraxis Bd. 39 (2000), Nr. 12, S. 24-28.*
- [13] **Neumann, U.:** *Integrierte Instandhaltungsplanung. Nr. 249. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1998 (Fortschrittberichte VDI Reihe 21: Elektrotechnik).-ISBN 3-18324921-9.*
- [14] **Feilhauer, W.:** *Ein Verfahren zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel, Dissertation, Universität Dortmund, 2005.*

- [15] **Shafer, G.:** *A mathematical theory of evidence.* Princeton University Press. London : Princeton, 1976.
- [16] **Handschin, E.; Jürgens, I.; Weller, J.; Zdrallek, M.:** *Novel Methods for the Condition Based Maintenance of Distribution Networks, Proceedings of the IEEE Power Tech 2007, Lausanne, Switzerland, July 1-5, 2007.*
- [17] **Jürgens, I.; Rehtanz, C.:** *Praktische Umsetzung einer Systematik zur Bestimmung des Zustands von elektrischen Betriebsmitteln im Hochspannungsnetz. Projektbericht, Technische Universität Dortmund, 2007.*
- [18] **Neumann, C.:** *Monitoring und Diagnose als Werkzeug des Assetmanagement, ETG Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 2006.*
- [19] **Oszttermayer, J.:** *Zustandsabhängiges, risikobasiertes Asset-Management in der Energieversorgung, Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.*
- [20] **Balzer, G.; Strnad, A.; Schnettler, A.:** *Rechnergestützte Instandhaltungsplanung für elektrische Netze. ABB Technik 1997, H.4*
- [21] **Norm DIN EN 60422:** *Richtlinien zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln (IEC 60422:2005).*
- [22] **Norm DIN EN 50110-1:** *Betrieb von elektrischen Anlagen.*
- [23] **Norm DIN IEC 60076-7:** *Leistungstransformatoren - Teil 7: Leitfadens für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren (IEC 60076-7:2005).*
- [24] **Norm DIN IEC 60076-2:** *Leistungstransformatoren - Teil 2: Übertemperaturen (IEC 60076-2:1993, modifiziert).*
- [25] **Möllmann, A.; Pahlavanpour, B. (TF 15.01.01):** *New guideline for interpretation of dissolved gas analysis in oil filled transformers. In: Electra. No. 186, Oct. 1999, pp. 31-51.*
- [26] **Norm DIN EN 60567:** *Ölgefüllte elektrische Betriebsmittel - Probeentnahmen von Gasen und von Öl für die Analyse freier und gelöster Gase - Anleitung (IEC 60567:2005).*
- [27] **Norm DIN EN 60599:** *In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte - Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase (IEC 60599:1999+A1:2007).*
- [28] **Norm DIN EN 62021-1:** *Isolierflüssigkeiten - Bestimmung des Säuregehalts - Teil1: Automatische potentiometrische Titration (IEC 62021-1:2003).*
- [29] **Norm DIN EN 60156:** *Isolierflüssigkeiten - Bestimmung der Durchschlagspannung bei Netzfrequenz - Prüfverfahren (IEC 156:1995).*
- [30] **Norm DIN EN 60247:** *Isolierflüssigkeiten - Messung der Permittivitätszahl, des dielektrischen Verlustfaktors ( $\tan \delta$ ) und des spezifischen Gleichstrom-Widerstandes (IEC 60247:2004).*
- [31] **Norm DIN EN 61198:** *Isolieröle auf Mineralölbasis - Prüfverfahren zur Bestimmung von Furfurol und verwandten Verbindungen (IEC 1198:1993).*
- [32] **De Pablo, A.:** *CIGRE-Konferenzbericht 15/21/33-19, Session 1996.*

- [33] **Anonym:** *Alterung von fester Isolation in Leistungstransformatoren - Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Furfurol-Bestimmung.* In: *Elektrizitätswirtschaft* 102 (2003), Heft 16, pp.44-45.
- [34] **Norm DIN IEC 60076-1:** *Leistungstransformatoren - Teil 1: Allgemeines (IEC 60076-1:1993, modifiziert+A1:1999).*
- [35] **P. Werelius:** *Development and application of high voltage dielectric spectroscopy for diagnosis of medium voltage XLPE cables, Ph D Thesis, Department of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, 2001, ISSN 1650-674x*
- [36] **Autorenkollektiv:** *VDN-Richtlinie für digitale Schutzsysteme, Verband der Netzbetreiber - VDN - e.V. beim VDEW, Ausgabe 2003.*
- [37] **Autorenkollektiv:** *Richtlinien für Schutzsysteme, VDEW-Ringbuch Allgemeiner Teil, Ausgabe 2002.*
- [38] **Autorenkollektiv:** *Leitfaden für Schutzsysteme, VEÖ / FNN, 2008.*
- [39] **Herold, G.:** *Elektrische Energieversorgung IV, J. Schlembach Fachverlag, 2003. - ISBN 3-935340-32-X, Kapitel 15.*
- [40] **Norm DIN EN 60255-6:** *Elektrische Relais - Teil 6: Meßrelais und Schutzeinrichtungen (IEC 255-6:1988, modifiziert).*
- [41] **Penrose, L.:** *The elementary statistics of majority voting.* Journal of the Royal Statistical Society 109 (1946), S. 53–57.
- [42] **Saaty, T.L.:** *Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. 2. Auflage. RWS Publishing, Pittsburgh 1990, ISBN 0-9620317-2-0.*
- [43] **Norm DIN EN 62271-203:** *Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 203: Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen von 52 kV und darüber (IEC 62271-203:2003).*
- [44] **Norm DIN EN 61850:** *Kommunikationsnetze und -systeme in Stationen - Teile 1-10, 2002-2005.*
- [45] **Frohberg, W.; Kolloschie, H.; Löffler, H.:** *Taschenbuch der Nachrichtentechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2008, ISBN 978-3-446-41602-4.*
- [46] **Norm DIN VDE 0800-1:** *Fernmeldetechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe, Anforderungen und Prüfungen für die Sicherheit der Anlagen und Geräte, 1989.*
- [47] **Norm DIN EN 50288-1:** *Mehradrige metallische Daten- und Kontrollkabel für analoge und digitale Übertragung - Teil 1: Fachgrundspezifikation (Deutsche Fassung EN 50288-1:2003).*
- [48] **Norm DIN EN 50288-4-2:** *Mehradrige metallische Daten- und Kontrollkabel für analoge und digitale Übertragung - Teil 4-2: Rahmenspezifikation für geschirmte Kabel bis 600 MHz - Geräteanschlusskabel und Schaltkabel; (Deutsche Fassung EN 50288-4-2:2003).*
- [49] **Norm DIN EN 50341-1:** *Freileitungen über AC 45 kV - Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Gemeinsame Festlegungen; (Deutsche Fassung EN 50341-1:2001).*

## Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen:

2-FAL	Furfurol
AHP	Analytic Hierarchy Process
AWE	Automatische Wiedereinschaltung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BP	Betriebsmittelparameter
CH <sub>4</sub>	Methan
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Ethin
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethan
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propen
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CBM	condition based maintenance
CM	corrective maintenance
DGA	dissolved gas analysis (Gas-in-Öl-Analyse)
DGK	Dringlichkeitsgesamtkennziffer (Einzelbetriebsmittel)
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DP-Wert	Durchschnittspolimerisationsgrad
EK	Einzelparameterkennziffer
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
etc.	et cetera
FDS	frequency domain spectroscopy
GGK	Gesamtgefährdungspotentialkennziffer (Einzelbetriebsmittel)
GK	Gruppenkennziffer
GKGS	Gesamtkennziffer Gefährdungspotential System
GKS	Gesamtkennziffer System
GKTZS	Gesamtkennziffer technischer Zustand System
GKWS	Gesamtkennziffer Wichtigkeit System
GV	Gesetzesverstoßkennziffer

GZK	Gesamtzustandskennziffer (Einzelbetriebsmittel)
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HD-Verfahren	heuristisch / deterministisches Verfahren
Hz	Hertz
I>	Überstromanregung
LAN	local area network
LED	light emitting diode
LS	Leistungsschalter
LWL	Lichtwellenleiter
N <sub>2</sub>	Stickstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
OS-Seite	Oberspannungsseite
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PG	Personengefährdungskennziffer
PDH	Plesiochrone Digitale Hierarchie
ppm	parts per million
RCM	reliability centred maintenance
SDH	Synchrone Digitale Hierarchie
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexaflorid
TBM	time based maintenance
TGK	technische Gesamtzustandskennziffer (Einzelbetriebsmittel)
TH	technischer Handlungsbedarf
u. U.	unter Umständen
UA	Umspannanlage
UG	Umweltgefährdungskennziffer
UMZ	Unabhängiger Maximalstromzeitschutz
US-Seite	Unterspannungsseite
vgl.	vergleiche
WGK	Wichtigkeitsgesamt-kennziffer (Einzelbetriebsmittel)
z. B.	zum Beispiel
Z <sub>max</sub>	maximale Zustandskennziffer
Z <sub>min</sub>	minimale Zustandskennziffer
ZP	Zustandsparameter



**Formelzeichen:**

$\sqrt{\dots}$	Quadratwurzel
$\Rightarrow$	daraus folgt
$\Sigma$	Summenoperator
$\subseteq$	ist Teilmenge von
$\in$	ist Element von
$\{\dots\}$	Mengenklammern
$f(x)$	Funktion von x
$[\dots]$	geschlossenes Intervall
$]\dots[$	offenes Intervall
$]\dots]$	teilgeschlossenes Intervall
$\otimes$	allgemeiner mathematischer Verknüpfungsoperator
MIN	Minimumoperator
MAX	Maximumoperator
$\tan \delta$	Tangens Delta (Verlustfaktor Isolieröl)
K	Kelvin
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
ln	Logarithmus naturalis
$\Omega$	Ohm
$\Delta$	Delta (Abweichungs- / Änderungsoperator)
$<$	kleiner
$\leq$	kleiner / gleich
$>$	größer
$\geq$	größer / gleich

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auszug aus Beurteilungsbogen nach [44].....	11
Tabelle 3.1:	Vorläufige Gewichtungsfaktoren nach Nennungen aus Prioritätsrangfolge.....	52
Tabelle 3.2:	Gewichtungsfaktoren nach technischer Prüfung.....	53
Tabelle 3.3:	Gewichtungsfaktoren nach erweiterter technischer Prüfung.....	53
Tabelle 3.4:	Zusammenfassung Entwicklung und Anpassung Gewichtungsfaktoren .....	54
Tabelle 3.5:	Grunddatenerfassung Transformator, wichtigste Kriterien.....	57
Tabelle 3.6:	Technische Bewertung Transformator, Parametergruppen und Einzelparameter.....	58
Tabelle 3.7:	Interpretationsschema von DGA-Ergebnissen.....	64
Tabelle 3.8:	Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Transformator .....	71
Tabelle 3.9:	Grunddatenerfassung Distanzschutzgerät, wichtigste Kriterien .....	73
Tabelle 3.10:	Technische Bewertung Distanzschutzgerät, Parametergruppen und Einzelparameter .....	74
Tabelle 3.11:	Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Distanzschutzgerät .....	81
Tabelle 3.12:	Vorhandene Bewertungslisten für Hochspannungs- betriebsmittel .....	82
Tabelle 4.1:	Standardmäßig auswählbare Zusammenfassungskriterien .....	95
Tabelle 5.1:	Qualitative Vergleichsunterschiede und Kennwerte nach [42] .....	109
Tabelle 5.2:	Qualitative Vergleichsunterschiede und Kehrwerte nach [42] .....	109
Tabelle 5.3:	Beispiel qualitativer Parametervergleiche nach [42] .....	109
Tabelle 5.4:	Ableitung der Gewichtungsfaktoren nach [42] .....	110
Tabelle 5.5:	Prioritätenrangliste Transformatoren (Auswahl).....	130
Tabelle 5.6:	Prioritätenrangliste Leistungsschalter (Auswahl) .....	130
Tabelle 5.7:	Beispiele angepasster Parameterbeurteilungsformulierungen...	135

Tabelle A.1:	Grunddatenerfassung Gasisolierte Schaltanlage, wichtigste Kriterien.....	144
Tabelle A.2:	Technische Bewertung Gasisolierte Schaltanlage, Parametergruppen und Einzelparameter .....	145
Tabelle A.3:	Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Gasisolierte Schaltanlage .....	153
Tabelle A.4:	Grunddatenerfassung Übertragungstechniksystem, wichtigste Kriterien.....	155
Tabelle A.5:	Technische Bewertung Übertragungstechniksystem, Parametergruppen und Einzelparameter .....	156
Tabelle A.6:	Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Übertragungstechniksystem .....	162
Tabelle A.7:	Grunddatenerfassung Abspannmast, wichtigste Kriterien .....	164
Tabelle A.8:	Technische Bewertung Abspannmast, Parametergruppen und Einzelparameter.....	165
Tabelle A.9:	Bewertungskriterien Gefährdungspotential und Wichtigkeit Abspannmast.....	170

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Zweidimensionales Bewertungsdiagramm nach [9].....	12
Abbildung 2.2:	Ermittlung der Reihenfolge von durchzuführenden Maßnahmen nach [8].....	13
Abbildung 2.3:	Interpretation der Massezahlen bei den Ereignissen A und $\bar{A}$ .....	15
Abbildung 2.4:	Beispielhafte Darstellung eines Zustandsbaums .....	16
Abbildung 2.5:	Beispielhafte Zustandsdarstellung eines Betriebsmittels (BM) nach [17] .....	17
Abbildung 2.6:	Ablaufschema zur Ermittlung der zustandsbeschreibenden Parameter .....	24
Abbildung 2.7:	Zusammenhänge Bewertungsergebnisse und abgeleitete Kenngrößen .....	26
Abbildung 2.8:	Übersicht der Berechnungsroutinen einer universellen Bewertungssystematik .....	29
Abbildung 3.1:	Aufbauschema einer Betriebsmittelbewertungsliste .....	31
Abbildung 3.2:	Bewertungsliste Seite 1, Grunddaten und Bewertungs- zusammenfassung.....	33
Abbildung 3.3:	Bewertungsliste Seite 2 und folgende, Auszug aus technischer Bewertung .....	34
Abbildung 3.4:	Bewertungsliste letzte Seite, Einhaltung Richtlinien und Wichtigkeit .....	35
Abbildung 3.5:	Kennzifferbereiche für den technischen Gesamtzustand eines Betriebsmittels.....	45
Abbildung 3.6:	Prinzipielles Verfahren zur Ermittlung einer Prioritätsrangfolge.....	49
Abbildung 3.7:	Ermittlung der Prioritätsrangfolge in der Parametergruppe „Gas-in-Öl-Analyse“ .....	51
Abbildung 4.1:	Schematische Darstellung Bewertungsmodell.....	84
Abbildung 4.2:	Schematische Darstellung Ergebnisliste.....	96
Abbildung 4.3:	Beispiel graphische Bewertungsergebnisdarstellung (Auszug) ...	99
Abbildung 5.1:	Testbewertungsliste für den Vergleich Lineares / Quadratwurzelverfahren .....	104

Abbildung 5.2:	Testbewertungsliste bei wenigen geringwertigen Betriebsmittelmängeln .....	105
Abbildung 5.3:	Testbewertungsliste bei mittelschweren Betriebsmittelmängeln .....	106
Abbildung 5.4:	Testbewertungsliste bei einem Mangel am wichtigsten Zustandskriterium .....	107
Abbildung 5.5:	Stammdatenteil Testbewertungsliste Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	117
Abbildung 5.6:	Technischer Bewertungsteil (Teil 1 alt) Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	118
Abbildung 5.7:	Technischer Bewertungsteil (Teil 2 alt) Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	119
Abbildung 5.8:	Bewertung Gefährdungspotential und Wichtigkeit Leistungsschalter ELF 102-6012.....	120
Abbildung 5.9:	Gesamtkennziffer (alt) Testbewertung Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	121
Abbildung 5.10:	Technischer Bewertungsteil (Teil 1 neu) Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	122
Abbildung 5.11:	Technischer Bewertungsteil (Teil 2 neu) Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	123
Abbildung 5.12:	Gesamtkennziffer (neu) Testbewertung Leistungsschalter ELF 102-6012 .....	124
Abbildung 5.13:	Testbewertungsergebnisse UA ländlich, Trafo 11 .....	126
Abbildung 5.14:	Testbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 11 .....	128
Abbildung 5.15:	Testbewertungsergebnisse UA ländlich, Leistungsschalter Freileitung .....	129
Abbildung 5.16:	Beispiel Bewertungsliste Leistungsschalter Typ Siemens H801 bei vorliegenden Mindestvoraussetzungen.....	132
Abbildung 5.17:	Beispiel Bewertungsliste Leistungsschalter Typ Siemens H801 bei nicht vorliegenden Mindestvoraussetzungen .....	133
Abbildung 5.18:	Beispiel für Kommentareinblendungen zur Bewertungsunterstützung .....	136
Abbildung B.1:	Bewertungsliste 110-kV-Kabel (technischer Bewertungsteil).....	172

Abbildung B.2:	Bewertungsliste Drehtrennschalter (technischer Bewertungsteil) .....	173
Abbildung B.3:	Bewertungsliste Batterie (technischer Bewertungsteil) .....	173
Abbildung B.4.1:	Bewertungsliste Leistungsschalter Typ AEG S1 123 (technischer Bewertungsteil, ohne Freischaltung ermittelbare Parameter) .....	174
Abbildung B.4.2:	Bewertungsliste Leistungsschalter Typ AEG S1 123 (technischer Bewertungsteil, nur mit Freischaltung ermittelbare Parameter) .....	175
Abbildung B.5:	Bewertungsliste Hochspannungswandler (technischer Bewertungsteil) .....	176
Abbildung B.6:	Bewertungsliste TK-Systeme (technischer Bewertungsteil) .....	177
Abbildung B.7:	Bewertungsliste Überstromzeitschutz (technischer Bewertungsteil) .....	178
Abbildung C.1:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA ländlich, Trafo 12 (110-kV-Trafo) .....	179
Abbildung C.2:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 211 (220-kV-Trafo) .....	180
Abbildung C.3:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 421 (380-kV-Trafo) .....	180
Abbildung C.4:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 45 (380-kV-Trafo) .....	181
Abbildung C.5:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Trafo 12 (110-kV-Trafo) .....	181
Abbildung C.6:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Leistungsschalter Freileitung .....	182
Abbildung C.7:	Vergleichsbewertungsergebnisse UA städtisch, Leistungsschalter Trafo 13 .....	182