

# **Objektive Zustandsbewertung von Mittelspannungsnetzen als Grundlage der Asset-Optimierung**

Von der Fakultät für

Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik

der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

**(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

**Dominik Beerboom, M. Sc.**

aus Thuine

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Balzer

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2016

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20170111-094406-3

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20170111-094406-3>]

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal entstanden.

An dieser Stelle gilt ein besonderer Dank meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, Leiter des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgungstechnik, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Motivation zu dieser Arbeit, der mit seiner stetigen Unterstützung und durch zahlreiche wertvolle Hinweise und Anregungen entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Balzer, Forschungsgruppe Elektrische Energieversorgung der Technischen Universität Darmstadt, danke ich sehr für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferats.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Kollegen am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik für die stets gute Zusammenarbeit und viele anregende Diskussionen, die für ein sehr angenehmes, kollegiales Arbeitsklima gesorgt haben. Insbesondere möchte ich hier Herrn Christopher Johae danken, der mit mir gemeinsam viele Forschungsprojekte bearbeitet hat.

Einen großen Beitrag zu dieser Arbeit leisteten auch die Fachleute aus der betrieblichen Praxis. Hier möchte ich mich bei allen beteiligten Mitarbeitern der SAG GmbH (hier im Speziellen Herrn Nico Schultze) sowie den Mitarbeitern der Stadtwerke Iserlohn, Netrion GmbH und Rheinische NETZGesellschaft mbH bedanken, ohne die die gemeinsamen Forschungsprojekte in diesem Umfang nicht möglich gewesen wären und die unverzichtbare Hinweise während der Felduntersuchungen geleistet haben.

Meiner Familie, im Speziellen meinen Eltern, möchte ich für die tolle, persönliche Unterstützung in jeglicher Hinsicht während meiner gesamten Ausbildungszeit danken, wodurch sie einen erheblichen Beitrag zur Erstellung dieser Arbeit geleistet haben.

Abschließend geht mein aller größter Dank von Herzen an meine Frau Tanja für ihre uneingeschränkte Unterstützung und ihren großartigen Rückhalt, ihr liebevolles Verständnis und insbesondere ihre unendliche Geduld, die sie während der Zeit in Wuppertal aufgebracht hat.

Wuppertal, im November 2016

Dominik Beerboom



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Rahmenbedingungen und Problemstellung.....	1
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik .....	2
1.3 Ziel und Einordnung der Arbeit .....	6
<b>2 Zustandsbewertung als zentraler Baustein des Asset Managements.....</b>	<b>9</b>
2.1 Asset Management .....	9
2.2 Instandhaltungsstrategien elektrischer Betriebsmittel.....	12
2.2.1 Definitionen Instandhaltung .....	12
2.2.2 Ereignisorientierte Instandhaltung.....	15
2.2.3 Zeitorientierte Instandhaltung .....	15
2.2.4 Zustandsorientierte Instandhaltung .....	16
2.2.5 Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung.....	16
2.2.6 Risikoorientierte Instandhaltung .....	17
2.2.7 Instandhaltungsstrategien in Mittelspannungsnetzen .....	17
2.3 Gerechtfertigter Aufwand für die Zustandsbewertung.....	19
<b>3 Verfahren zur Zustandsbewertung im Verteilungsnetz .....</b>	<b>21</b>
3.1 Inspektionen zur Zustandsdatenerfassung.....	21
3.2 Bewertungsmodell .....	24
3.2.1 Aggregationssystematik .....	24
3.2.2 Klassifizierungsschema .....	28
3.2.3 Gewichtungsfaktoren.....	32
3.3 Ergebnisdarstellung.....	37
<b>4 Subjektivität der Zustandsbewertung .....</b>	<b>43</b>
4.1 Ursachen der subjektiven Bewertung.....	43
4.2 Wirksame Maßnahmen zur Reduktion der Subjektivität .....	50
4.2.1 Organisatorische Maßnahmen .....	50
4.2.2 Bewertungsleitfaden.....	52
4.2.3 Einsatz einfacher Messtechnik .....	55
4.3 Systemimmanente Subjektivität und Unsicherheit .....	60

<b>5</b>	<b>Evidenz-Theorie zur Modellierung von Unsicherheit .....</b>	<b>65</b>
5.1	Theoretische Grundlage der Evidenz-Theorie.....	65
5.2	Kombination von unterschiedlichen Hinweisen.....	69
5.2.1	Dempster`sche Regel .....	69
5.2.2	Yager`sche Regel .....	71
5.2.3	Dubois & Prade`sche Regel .....	71
5.2.4	Proportional Conflict Redistribution rule (PCR5) .....	72
5.2.5	„Worst/Best-Case“-Regel .....	73
5.2.6	Diskussion der Kombinationsregeln für die Zustandsbewertung.....	74
5.3	Modellbildung für die Zustandsbewertung .....	78
5.3.1	Bildung von Massezahlen für die Informationsquellen .....	81
5.3.2	Behandlung fehlender Eingangsgrößen .....	90
5.3.3	Berücksichtigung des Informationsalters .....	91
5.3.4	Bestimmung einer Zustandskennziffer .....	93
5.4	Ergebnisdarstellung .....	95
5.5	Grenzen des Modells .....	99
<b>6</b>	<b>Praktische Anwendung des Zustandsbewertungsmodells.....</b>	<b>101</b>
6.1	Felduntersuchung von Netzstationen .....	101
6.2	Ergebnisse der praktischen Anwendung .....	102
6.2.1	Bewertung der einzelnen Inspektionpunkte.....	102
6.2.2	Darstellung der evidenzbasierten Ergebnisse.....	106
6.2.3	Mehrwert des evidenzbasierten Bewertungsmodells .....	118
6.3	Unsicherheit als zusätzliches Steuerungsinstrument .....	120
6.4	Zustandskennziffer für Erneuerungsentscheidungen.....	122
6.5	Ableitung eines Instandhaltungs- und Erneuerungsaufwands.....	125
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>
<b>8</b>	<b>Summary .....</b>	<b>137</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>141</b>
<b>10</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>151</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>155</b>
11.1	Inspektions-Checkliste für eine Netzstation (Beispiel) .....	155
11.2	Abschlussdokumentation Zustandsbewertung von Netzstationen .....	159

# 1 Einleitung

## 1.1 Rahmenbedingungen und Problemstellung

Durch die Liberalisierung des Energiemarktes, dem damit einhergehenden „Unbundling“ sowie der Einführung der Anreizregulierung haben sich die Rahmenbedingungen für die Energieversorgungsunternehmen in Deutschland grundlegend geändert. Hierbei unterliegen insbesondere die Verteilnetzbetreiber einem stetig steigenden Kostendruck. Nach § 11 EnWG ist jeder Netzbetreiber dazu verpflichtet, ein sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz zu betreiben sowie nach § 49 EnWG die technische Sicherheit der Energieanlagen zu gewährleisten. Diesen Pflichten muss der Netzbetreiber im Spannungsfeld zwischen gesetzlichen Vorgaben, Kostenoptimierung und Versorgungszuverlässigkeit nachkommen. Er ist somit bestrebt, eine stetige Effizienzsteigerung bei Bewirtschaftung und Betrieb der elektrischen Netze zu erreichen, ohne dabei die Qualität der Versorgungszuverlässigkeit zu verringern. Daher suchen die Netzbetreiber permanent nach Einsparungs- und Optimierungsmöglichkeiten [1, 2].

Im Bereich der Instandhaltung und Erneuerung sind wesentliche Kosteneinsparpotenziale zu finden. Im Gegensatz zu Investitionen wirken die Kosten für Instandhaltung direkt in vollem Umfang kostenreduzierend auf die Erlössituation. So können bspw. die Aufwendungen für Instandhaltungsmaßnahmen kurzfristig eingespart werden, langfristig kann dieses jedoch zu einer Verschlechterung der Versorgungszuverlässigkeit führen. Um eine gleichbleibend hohe Versorgungszuverlässigkeit zu gewährleisten, ist in der Anreizregulierung deshalb zusätzlich eine Qualitätsregulierung in Form eines Malus-(Bonus)-Systems berücksichtigt. Um hier ein mögliches Optimum zu erzielen, kommen optimierte Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien zur Anwendung [3, 4, 5].

Das Mittelspannungsnetz bietet hier ein erhebliches Potenzial, da einerseits die Nichtverfügbarkeit der angeschlossenen Netzendkunden zum Hauptteil (etwa 84 % [6]) durch das Störungsgeschehen im Mittelspannungsnetz beeinflusst wird und andererseits das Verteilungsnetz aufgrund der großen Stückzahl an Einzelkomponenten (z. B. 550.000 Netzstationen [7]) und aufgrund der Stromkreislänge einen beachtlichen Anteil am Wiederbeschaffungswert des gesamten Netzes darstellt [4, 8].

Neben den veränderten Rahmenbedingungen stellt die vorhandene Altersstruktur der Betriebsmittel im Mittelspannungsnetz (MS-Schaltanlagen, Freileitungen, Kabel und Netzstationen) eine weitere Herausforderung dar. Eine Vielzahl der installierten Betriebsmittel weist bereits ein erhöhtes Alter auf und nähert sich dem Ende ihrer kalkulatorischen Lebensdauer, weshalb eine effiziente und gezielte Instandhaltung verstärkt an Bedeutung gewinnt. Zusätzlich rückt folglich auch die gezielte Erneuerungsplanung in den Fokus [2, 9].

Um bei diesen Herausforderungen optimale Entscheidungen im Asset Management und Asset Service treffen zu können, bedarf es einer umfassenden geeigneten Informationsgrundlage. Dem aktuellen, technischen Zustand der Betriebsmittel kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Denn die Zustandsbewertung stellt die Basis aller Optimierungsbestrebungen dar, da die Ergebnisse der Zustandsbewertung die Eingangsdaten für alle optimierten Instandhaltungsstrategien sowie von Asset-Simulationen darstellen. Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen werden erst dann durchgeführt, wenn der technische Zustand es erfordert. So kann der Nutzen der Betriebsmittel über deren Lebensdauer maximiert und ausgereizt werden. Die Bestimmung des aktuellen, technischen Zustands muss auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationsquellen erfolgen. Speziell im Mittelspannungsnetz müssen - bei den enormen Betriebsmittelstückzahlen - wirtschaftliche Faktoren bei der Erhebung relevanter Informationen beachtet werden.

Erst durch eine objektive und realitätsgerechte Zustandsbewertung wird eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien im Rahmen des Asset Managements geschaffen, um die begrenzten Ressourcen optimal verteilen zu können.

## **1.2 Stand der Wissenschaft und Technik**

Die objektive und realitätsgerechte Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln ist ein zentraler Baustein des Asset Managements und unterstützt wesentlich die Asset-Entscheidungen. Die Bewertung des Zustands der Betriebsmittel kann dabei mit verschiedenen Ansätzen erfolgen, welche Gegenstand aktueller Untersuchungen sind. Die verschiedenen, wissenschaftlichen Ansätze unterscheiden sich grundsätzlich vor allem in puncto Genauigkeit, finanziellem sowie personellem Aufwand für die Zustandsdatenerfassung. Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, welche aktuellen Entwicklungen zur Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln existieren, die sich bezüglich der verwendeten Eingangsgrößen sowie der Bewertungsmodelle unterscheiden.

Generell stehen verschiedene Eingangsgrößen zur Zustandsbewertung zur Verfügung. Eingangsgrößen stellen zustandsbeschreibende Kriterien basierend auf vorhandenen Stammdaten (Alter, Typ, Einbauort etc.) und Betriebsdaten (Schaltspiele, Betriebserfahrungen, Ersatzteilversorgung, Know-how des Service Personals etc.) eines Betriebsmittels dar [1, 10, 11, 12]. Dieser Ansatz stellt eine einfache Möglichkeit dar, ein Betriebsmittelkollektiv zu segmentieren und strategische Entscheidungen abzuleiten. Hierbei wird eine Korrelation zwischen den einzelnen Eingangsgrößen und dem Zustand unterstellt. Allerdings verwendet dieser Ansatz nur statische Daten, die keine exakte Aussage über den aktuellen (technischen) Zustand treffen können, da spezifische Faktoren wie z. B. Umwelteinflüsse nicht berücksichtigt werden. Der tatsächliche, reale Zustand des betrachteten Betriebsmittels kann deutlich davon abweichen. Durch Hinzuziehen von visuellen Inspektions- und Messergebnissen wird die Zustandsbewertung wesentlich realitätsgerechter.



Die Zustandsbewertung auf Basis statistischer Daten aus Ausfall-/Störstatistiken stellt ebenfalls einen verbreiteten Ansatz dar, um das Lebensdauerverhalten und Störungsgeschehen der Betriebsmittel zu modellieren und daraus abzuleiten (z. B. [13, 14, 15]). Zur Beschreibung dieses Verhaltens wird dabei häufig das theoretische Modell der sog. Badewannenkurve (bzw. Abwandlungen hiervon) herangezogen, welche die Ausfallhäufigkeit in Abhängigkeit der Betriebszeit beschreibt. Dieser Ansatz basiert ebenfalls auf objektiven Daten, wenn die erforderliche Datenbasis ausreichend groß und detailliert vorhanden ist. Zudem ermöglicht dieser Ansatz auch eine Prognose der Zustandsentwicklung, welche im Rahmen von strategischen Asset-Simulationen durchgeführt wird. Jedoch kann auf Basis vergangenheitsbezogener, statistischer Daten das Ergebnis immer nur eine Abschätzung des aktuellen, realitätsgerechten Zustands ermöglichen. Außerdem erfordert dieser Ansatz geeignete Ausfall-/Störungsstatistiken, da die Datenbasis die Ergebnisse maßgeblich prägt. Öffentlich verfügbare Statistiken sind für die Auswertungen in der Regel nicht detailliert genug aufgebaut und bei internen Datenbanken fehlt es häufig an der notwendigen Grundgesamtheit für eine belastbare Entscheidungsgrundlage [14].

In einem Forschungsvorhaben der FGH [3, 16] ist unter Beteiligung mehrerer Netzbetreiber ein erster Versuch für MS-Betriebsmittel unternommen worden, eine fundierte Datenbasis über die systematische Erfassung und Auswertung von Störmeldungen und Schadensdaten zu kreieren, auf dessen Basis Prognosen über das zukünftige Schadens- und Störungsgeschehen abgeleitet werden können. Die Ergebnisse haben dabei gezeigt, dass das Alterungsverhalten der betrachteten Komponenten der MS-Ebene nicht allgemeingültig mit der Badewannenkurve beschrieben werden kann. Die erhobenen Daten dieser Vorgehensweise werden maßgeblich durch die Instandhaltungsstrategie, d. h. die je Netzbetreiber spezifischen, in der Vergangenheit durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen, beeinflusst, so dass eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich ist. Zudem ist die ermittelte Datengrundgesamtheit, gerade im Bereich hohen Betriebsmittelalters, gering, so dass hier keine fundierte, valide Datengrundlage zur Verfügung steht. Generell ist für Betriebsmittel des MS-Netzes, außer für die PE- und VPE-Kabel der ersten Generation [3, 17], deren Alterungsverhalten noch nicht eindeutig mit validen, stochastisch aussagekräftigen Daten nachgewiesen worden [3, 9, 15].

Da vorhandene, statistische Alterungsmodelle den Betriebsmittelzustand bisher nur rudimentär abbilden können, kann eine belastbare Entscheidungsgrundlage im Asset Management nur durch die Bestimmung des aktuellen, realitätsgerechten Betriebsmittelzustands mit konkreten visuellen und messtechnischen Eingangsgrößen hergestellt werden, um gezielt einen erforderlichen, operativen Instandhaltungsbedarf aufzudecken und Erneuerungsentscheidungen abzuleiten.

Eine präzise, objektive Zustandserfassung erfolgt über den Einsatz von umfangreichen Diagnoseverfahren, die im Rahmen von Online-Monitoring-Systemen oder zyklischen Messungen eingesetzt werden. Hierbei steht prinzipiell eine Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren der technischen Diagnostik zur Auswahl (Übersicht einiger Verfahren z. B. in [18, 19, 20, 21, 22]). Diese Verfahren werden betriebsmittelbezogen eingesetzt. Die Interpretation von Online-

Messwerten bietet dabei einen kontinuierlichen Überblick über den Zustand der Betriebsmittel, die zyklische Erfassung bei einer Inspektion oder Wartung (technische Diagnoseverfahren erfordern zumeist ein Freischalten des Prüfobjekts) dagegen einen diskontinuierlichen Überblick. Die Bewertung der gemessenen Diagnoseergebnisse erfolgt über absolute Grenzwerte (aus Normen, Herstellerangaben etc.) oder über relative Vergleichswerte zur Trendbeobachtung, um Rückschlüsse auf den Zustand und einen möglichen Instandhaltungsbedarf zu ziehen [20]. Ein flächendeckender Einsatz von umfangreichen Diagnoseverfahren sorgt für eine möglichst fundierte Zustandsbestimmung der elektrischen Betriebsmittel, ist jedoch auch mit einem z. T. erheblichen finanziellen und personellen Aufwand verbunden.

Die Zustandserfassung erfolgt zusätzlich häufig über visuelle Inspektionen. Das fachmännische Instandhaltungspersonal bewertet die Einzelkomponenten visuell unter Einsatz von Checklisten in regelmäßigen Zeitabständen. Dadurch fließen die Betriebserfahrungen des Instandhaltungspersonals mit in die Zustandsbewertung ein. Dieses Wissen ist aber personenabhängig und damit kann die Objektivität der Daten eingeschränkt sein [4, 9, 23].

Für die Zustandsbewertung müssen die erhobenen Eingangsgrößen aus statischen, visuellen und messtechnischen Bewertungen berücksichtigt und aus dieser Vielzahl an Informationen eine Aussage über den Gesamtzustand des Betriebsmittels abgeleitet werden. Hierzu werden verschiedene Zustandsbewertungsmodelle verwendet.

Vielfach finden im Bereich der Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel Scoring-Modelle Anwendung, die auf Bewertungen von (Unter-)Kriterien sowie anschließender Aggregation über Gewichtungsfaktoren zum Gesamtzustand des Betriebsmittels beruhen [1, 9, 10, 12, 24, 25]. Diese Aggregation kann hierbei über eine, aber auch über mehrere Hierarchieebenen an Teilkomponenten des Betriebsmittels hinweg erfolgen, wobei auf der untersten Ebene die Eingangsgrößen zur Bewertung der Kriterien einfließen. Über die Gewichtungsfaktoren wird der komplexe Zusammenhang zwischen den einzelnen Kriterien und dem Gesamtzustand abgebildet. Die Gewichtungsfaktoren repräsentieren den Einfluss eines Kriteriums auf die übergeordnete Ebene. Der Gesamtzustand ist also eine gewichtete Beurteilung der Einzelbewertungen der Teilkomponenten des Betriebsmittels. Die Eingangsgrößen der Modelle werden als sicher interpretiert.

In [1, 26, 27] wird eine auf der Fuzzy-Logik basierende Vorgehensweise vorgestellt, welche heuristische Regeln („Wenn-Dann-Beziehungen“, Konjunktionen) nutzt, um die komplexen Zusammenhänge zwischen den zustandsrelevanten Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße (Zustand) herzustellen. Dadurch soll die menschliche Entscheidungsfindung bei unscharfen Sachverhalten nachgebildet werden. Die Anzahl an Regeln kann hierbei z. T. sehr umfangreich werden, denn bspw. erfordern 4 unscharfe Werte (gut, mittel, schlecht, kritisch) einer Eingangsgröße zusammen  $4^m$ -Regeln, wenn  $m$ -Eingangsgrößen zur Zustandsbewertung herangezogen werden. Durch die Fuzzy-Logik können Ungenauigkeiten, Vagheit sowie das Fehlen von

Eingangsgrößen verarbeitet werden. Allerdings wird die resultierende Unsicherheit im Ergebnis nicht separat ausgewiesen und bleibt für den Entscheidungsträger unbekannt.

In [9, 28] werden Modelle basierend auf künstlichen neuronalen Netzen (KNN) dargestellt, um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Eingangsgrößen und dem Gesamtzustand zu bestimmen. Diese qualitativen Zusammenhänge sowie die Gewichtungsfaktoren werden bei diesem Modell in einem Trainingsprozess selbstständig erlernt und müssen nicht durch umfassendes Vorwissen festgelegt werden. Jedoch ist der Trainingsprozess sehr stark von den Trainingsdaten abhängig. Die Eingangs- und zugehörigen Ausgangsdaten müssen im Vorfeld bekannt sowie valide sein, damit der Lernprozess optimal erfolgen kann. Aufgrund der Komplexität der Betriebsmittel und der Vielzahl an potenziellen Mängeln ist dieses in der Praxis schwierig zu gewährleisten. Unsichere Daten fließen ansonsten in den Lernprozess mit ein und verfälschen das Bewertungsergebnis.

Die Evidenz-Theorie als Basis von Zustandsbewertungsmodellen elektrischer Betriebsmittel wird in [19, 29, 30, 31, 32] angewendet. Der Vorteil dieser Theorie liegt in der Tatsache begründet, dass Unsicherheiten oder Widersprüchlichkeiten der einzelnen Parameter und Eingangsgrößen einbezogen werden. Dadurch kann ein Maß für die Genauigkeit bzw. Verlässlichkeit der Zustandsbewertung abgeleitet werden, das im Ergebnis als „Unsicherheitsbereich“ mit ausgewiesen wird. Neben Ungenauigkeiten und fehlenden Eingangsgrößen können zusätzlich die Unsicherheiten der Eingangsgrößen - d. h. wie sicher bzw. aussagefähig ist die Eingangsgröße zur Bewertung eines Kriteriums - berücksichtigt werden.

Generell fokussieren sich die aktuell genutzten, innovativen Zustandsbewertungsmodelle (Fuzzy-Theorie, Neuronale Netze, Evidenz-Theorie etc.) auf die Bewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln, da dort eine Individualbetrachtung und eine Vielzahl von technischen Diagnoseverfahren eingesetzt werden.

Im Bereich der Mittelspannung basieren bisherige Ansätze vordringlich auf statischen Daten, die über Gewichtungsfaktoren aggregiert werden. Messverfahren werden dagegen bisher noch nicht flächendeckend, jedoch vereinzelt bereits [2, 33, 34, 35, 36], angewendet, wobei die Wirtschaftlichkeit der Messwerterhebung der maßgebliche Faktor ist. Die Eingangsgrößen, die in die Zustandsbewertung auf Mittelspannungsebene einfließen können, besitzen eine variierende Objektivität und Aussagefähigkeit. Sie bestimmen jedoch maßgeblich die Verlässlichkeit der Zustandsaussage. Hierbei hängt die Verlässlichkeit von der Quantität und Qualität der zugrundeliegenden Eingangsgrößen ab. Im Mittelspannungsbereich müssen Entscheidungen im Asset Management daher unter Unsicherheiten getroffen werden, da keine vollständigen und gesicherten Informationen vorliegen. Somit müssen auch hier vermehrt innovative Ansätze zur Zustandsbewertung [1, 9, 37] genutzt werden. Vor allem die Verwendung der Evidenz-Theorie ist dabei geeignet, um die Unsicherheiten beschreiben und quantifizieren zu können.

### 1.3 Ziel und Einordnung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit behandelt die technische Zustandsbewertung von Mittelspannungs(MS)-Betriebsmitteln, um Entscheidungen über die Planung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen im Asset Management optimal zu unterstützen. Im Gegensatz zu Hochspannungsbetriebsmitteln muss ein großes Kollektiv an unterschiedlichen Betriebsmitteln analysiert werden, wobei unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine möglichst objektive und realitätsgerechte Zustandsbewertung erforderlich ist. Das Ziel ist daher die Entwicklung eines geeigneten, einheitlichen Zustandsbewertungsmodells unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen. Dieses Modell soll für alle Betriebsmittel grundsätzlich gleich aufgebaut und unabhängig von individuellen Hersteller- und Betriebsmitteltypen sein. Dem Asset Management wird dadurch im Ergebnis nicht nur eine Zustandskennziffer für das MS-Betriebsmittel ausgewiesen, sondern zusätzlich auch der zugehörige Unsicherheitsbereich dieser Bewertung modelliert. Die Größe des resultierenden Unsicherheitsbereichs drückt dabei die Verlässlichkeit der Zustandskennziffer und damit die Qualität der Zustandsbewertung aus. Bei einer sehr unsicheren Zustandsbewertung ergibt sich die zusätzliche Option, in Abhängigkeit der Risikobereitschaft, die Unsicherheit entweder zu tolerieren und eine Entscheidung zu treffen oder aber erst die Erhebung weiterer Informationen zu veranlassen.

Die zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen der Zustandsbewertung werden durch die wirtschaftlichen Restriktionen an die Datenerfassung im Mittelspannungsnetz sehr stark eingegrenzt, was immer zu Entscheidungen unter Unsicherheit führt. Weiterhin basiert das entwickelte Bewertungsmodell auf den Inspektionsergebnissen des Asset Service. Dadurch fließt die Expertise des Instandhaltungspersonals vor Ort in die Zustandsbewertung ein, allerdings ist, wie auch in [9] angemerkt wird, die visuelle Inspektion von heuristischer Natur und unterliegt daher einem subjektiven Charakter. Zusätzliche Diagnoseverfahren werden empfohlen.

Hier setzt nun diese Arbeit an. In Abgrenzung zu vorhandenen Ansätzen im Mittelspannungsbereich liegt der Fokus auf einer objektiven, realitätsgerechten Bewertung der Einzelkomponenten vor Ort, die anschließend zu einer aussagekräftigen Gesamtaussage aggregiert werden. Die Aussagefähigkeit und Unsicherheit der Eingangsgrößen zur Bewertung werden analysiert und quantifiziert. Es wird untersucht, welchen Einfluss subjektive Expertenurteile auf die Zustandsbewertung ausüben und daraus folgend entsprechende, konkrete Gegenmaßnahmen abgeleitet, um objektivierte Expertenurteile zu erzielen. Allerdings ist die Aussagefähigkeit der rein visuellen Inspektion bei elektrischen Betriebsmitteln eingeschränkt.

Aus diesem Grund werden geeignete, einfache Messverfahren zur Zustandsbewertung der elektrischen Betriebsmittel ergänzt. Prinzipiell steht eine Vielzahl an möglichen Messverfahren der technischen Diagnostik zur Verfügung. Jedoch müssen die Messverfahren im Mittelspannungsbereich aussagekräftige Ergebnisse ohne vorheriges Freischalten der Betriebsmittel und damit praktisch ohne großen Zusatzaufwand liefern. Dieses beschränkt natürlich auch die Aussage-

fähigkeit bzw. Zuverlässigkeit der Messverfahren. Diesen Anforderungen entsprechend werden geeignete Messverfahren betriebsmittelspezifisch vorgestellt.

Die Evidenz-Theorie wird anschließend zur Kombination im Zustandsbewertungsmodell angewendet, um die Unsicherheit bzw. Aussagefähigkeit der Eingangsgrößen zu berücksichtigen und die unterschiedlichen Informationsquellen aus visuellen und messtechnischen Ergebnissen zu einer aussagekräftigen und realitätsgerechten Zustandskennziffer zu kombinieren. Der subjektive Einfluss bei visuellen Expertenurteilen, die Aussagefähigkeit der visuellen Inspektion sowie die Unsicherheit der einfachen Messverfahren werden ermittelt und eine Quantifizierung in Massezahlen vorgenommen. Die zugrundeliegenden Eingangsgrößen beeinflussen somit nicht nur die Zustandskennziffer der Einzelkomponente, sondern zusätzlich auch die Verlässlichkeit bzw. Unsicherheit der Bewertung selbst.

Das evidenzbasierte Zustandsbewertungsmodell wird speziell an die Anforderungen der Mittelspannungsebene angepasst. Prinzipiell ist das entwickelte Modell für alle MS-Betriebsmittel anwendbar, bei denen die Zustandsdatenerfassung über visuelle Inspektionsergebnisse des Instandhaltungspersonals („Soft-Facts“) sowie über geeignete, einfache Messverfahren („Hard-Facts“) erfolgt. An oberirdischen Anlagen ist diese Art der Zustandsdatenerfassung realisierbar, sodass in dieser Arbeit die Entwicklung des Modells am Beispiel der oberirdischen Anlage der Netzstation ausführlich demonstriert wird. Eine Netzstation (Ortsnetzstation und Kundenstation), häufig auch Trafostation genannt, ist dabei überwiegend in einer offen betriebenen Ringstruktur in das MS-Netz eingebunden. Da die visuelle Inspektion an MS-Kabeln aufgrund der unterirdischen Verlegung nahezu ausgeschlossen ist und nur durch moderne Diagnoseverfahren eine realitätsgerechte Zustandsbewertung (falls wirtschaftlich gerechtfertigt) möglich ist, sind MS-Kabel nicht Gegenstand des Zustandsbewertungsmodells dieser Arbeit.

In der vorliegenden Arbeit werden zuerst einige wichtige Begrifflichkeiten und die Bedeutung der Zustandsbewertung als eine zentrale Entscheidungsgröße im Asset Management dargestellt. Anschließend wird in Kapitel 3 das Grundgerüst des Bewertungsmodells präsentiert, das auf Basis von Gewichtungsfaktoren eine transparente, nachvollziehbare Aggregation zum Betriebsmittelzustand erlaubt. In Kapitel 4 wird die Subjektivität von Expertenurteilen und deren Einfluss auf die Zustandsbewertung behandelt, da das Wissen über die Qualität der zugrundeliegenden Daten eine wichtige Zusatzinformation für das Asset Management ist. Zudem werden geeignete Gegenmaßnahmen zur Objektivierung der Bewertung aufgezeigt. Kapitel 5 widmet sich dann ausführlich der Evidenz-Theorie zur Modellierung der Unsicherheit und zur Kombination von visuellen und messtechnischen Bewertungsergebnissen. Hier werden verschiedene mathematische Kombinationsregeln vorgestellt und diskutiert. Die theoretischen Grundzüge werden dann im Zustandsbewertungsmodell adaptiert. In Kapitel 6 wird das Modell und deren Wirkungsweise ausführlich in einer umfangreichen Felduntersuchung an einem großen Betriebsmittelkollektiv getestet und validiert. Die Bewertungsergebnisse des evidenzbasierten Modells werden ver-

deutlich sowie der Mehrwert als spezielle Eingangsgröße für vorhandene Asset-Simulationen und zur Asset-Optimierung demonstriert. Die Zusammenfassung und der Ausblick schließen in Kapitel 7 diese Arbeit ab.

## 2 Zustandsbewertung als zentraler Baustein des Asset Managements

### 2.1 Asset Management

Das Asset Management in Energieversorgungsnetzen befasst sich grundsätzlich mit der Bewirtschaftung und Optimierung der technischen Assets, um eine wirtschaftliche und langfristig zuverlässige Netzinfrastruktur zu gewährleisten. Durch das "Managen" der Assets soll ein Optimum erreicht werden, bei dem die Effektivität und der Nutzen aus den Assets maximiert und gleichzeitig die eingesetzten operativen Aufwendungen möglichst minimal und effizient verwendet werden. Zu den technischen Assets zählen die Betriebsmittel des elektrischen Netzes wie beispielsweise Transformatoren, Schaltanlagen, Freileitungen und Kabel. Asset Management ist als ein ganzheitliches Management-System zu verstehen, um unter der Berücksichtigung der verschiedenen technischen, finanziellen, organisatorischen und gesetzlichen Anforderungen die Unternehmensziele optimal zu erreichen [1, 5].

So umfasst das Asset Management nach [38], die als Standard für das Asset Management gilt, „*coordinated activity of an organization to realize value from assets*“. Durch die Einführung eines Asset Management-Systems soll eine Organisation befähigt werden, ihre Geschäftsziele durch optimales Management ihrer Assets nachhaltig zu erreichen. Speziell die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, der Chancen sowie der Risiken auch über unterschiedliche Zeithorizonte (vor allem langfristig) kommt hier eine wichtige Bedeutung zu.

Im Asset Management werden also vor allem die grundsätzlichen und strategisch langfristigen Entscheidungen bzgl. der Assets getroffen. Diese Entscheidungen beziehen sich z. B. auf die Festlegung von Investitionsstrategien, die Netzentwicklung, die Organisation- und Budgetplanung, die Bestimmung von Planungs- und Betriebsgrundsätzen, die Projektplanung sowie das Instandhaltungsmanagement [1, 39].

Die Entscheidungen verfolgen dabei das grundsätzliche Ziel, eine langfristige, wirtschaftliche Erfolgsoptimierung bei gleichzeitig hoher Versorgungszuverlässigkeit und akzeptablen Risiken anzustreben. Jedoch sind diese Zielsetzungen diametral, denn eine wirtschaftliche Erfolgsoptimierung z. B. durch Minimierung der Kapital- und Betriebskosten darf nicht zu Lasten einer zu stark sinkenden Versorgungszuverlässigkeit gehen [1].

Bei der Zielerreichung und der Entscheidungsfindung müssen unterschiedliche Interessen und Anforderungen berücksichtigt werden, die im Sinn eines dreigeteilten Rollenmodells durch die Asset Owner (Netzbesitzer), die Asset Manager (Netzmanager) und den Asset Service (Netzservice, Service Provider) in den Entscheidungsprozess einfließen. Die Rollen haben dabei folgende grundsätzliche Funktionen [1, 40]:

- Der Asset Owner ist der wirtschaftliche Asset-Eigentümer und legt die Basisstrategien durch die Geschäftspolitik für den Asset Manager fest.
- Der Asset Manager dient als Asset-Verwalter und definiert auf der Basis der Vorgaben des Asset Owners die grundsätzlichen und strategischen Aufgabenbereiche. Zu diesen Aufgaben gehören z. B. die Festlegung der Netzstrategien (z. B. Investitions- und Instandhaltungsstrategien, Risikostrategien), die Grundsatzplanung sowie das Instandhaltungsmanagement. Hierzu werden Informationen über die Assets benötigt. Für die operative Umsetzung setzt er als Auftraggeber dann den Asset Service ein.
- Der Asset Service kümmert sich um die konkrete Maßnahmenumsetzung und führt die Arbeiten an den Betriebsmitteln im Netz aus. Der Asset Service verantwortet die operativen, technischen und betrieblichen Abläufe im Netzbetrieb.

Die drei Rollen und deren grundsätzlichen Aufgaben (nach [41]) im Asset Management-Prozess sind in Abbildung 1 übersichtlich dargestellt. Einige Aufgaben lassen sich hierbei eindeutig einer der drei Rollen zuordnen, andere Aufgaben hingegen werden als überlappend angesehen. Als Beispiel sei hier die allgemein gefasste Aufgabe der Netzplanung genannt, die je nach Phase dem Asset Owner (strategische Planung/Investition), dem Asset Manager (Grundsatz- und Projektplanung) oder dem Asset Service (Ausführungsplanung) zugeordnet werden kann. Zudem sind die Wirkrichtungen des Entscheidungsprozess (Top-down) sowie der dafür notwendige Informationsfluss (Bottom-up) im Prozess abgebildet.

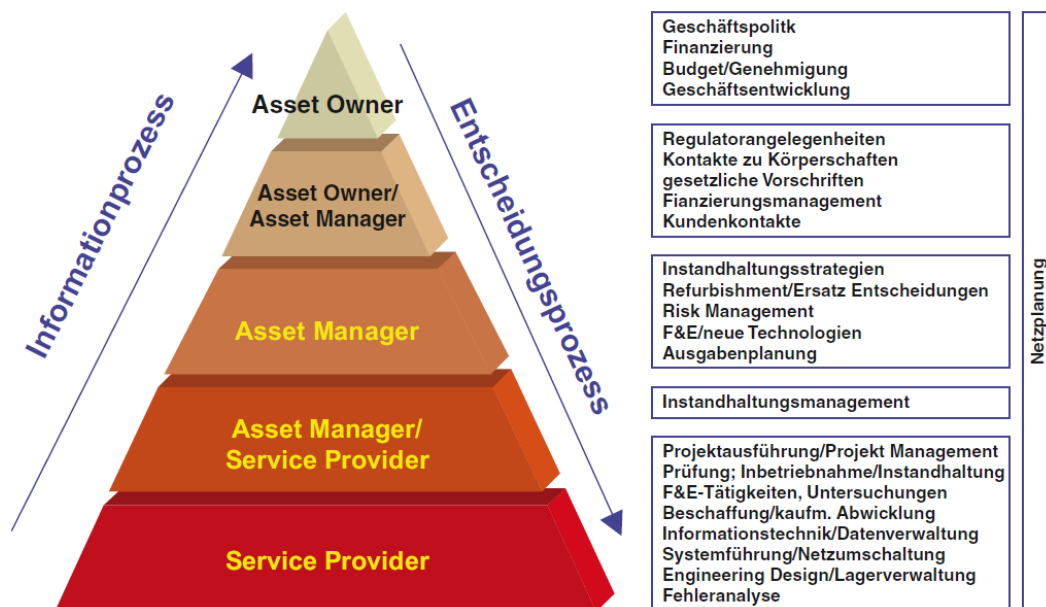


Abbildung 1 – Pyramide des Asset Management Prozesses (nach [1])

Der Asset Manager koordiniert also an den jeweiligen Schnittstellen zum Asset Owner und Asset Service die Abstimmungen und Umsetzungen und nimmt somit sowohl im Informations- als auch im Entscheidungsprozess eine zentrale Funktion ein. Dabei werden eine Vielzahl an Informationen über die Assets im Asset Service erhoben, die zur Entscheidungsunterstützung im Asset Management bzw. beim Asset Owner benötigt werden. Daher gehören zusätzlich zu den



genannten Aufgaben der Rollen (vor allem des Asset Service) auch unterstützende Tätigkeiten wie die Dokumentation und Pflege von Datenbanken sowie die Ermittlung von Zuständen, um diese den Entscheidungsträgern zur Verfügung zu stellen [1].

Die veränderte Marktsituation und der zunehmende Kostendruck durch die Liberalisierung stellt das Asset Management vor große Herausforderungen bei der Zielerreichung, da mit begrenzten Ressourcen eine langfristig gesicherte Versorgungszuverlässigkeit erzielt werden muss. Hierbei zeigt sich im Bereich der Energieversorgungsnetze, dass ein wesentlicher Anteil der Erlöse auf Basis installierter Anlagen erwirtschaftet wird, die eine lange Lebensdauer aufweisen. Somit stellen das Instandhaltungsmanagement an den installierten Anlagen und die Auswahl einer geeigneten Strategie für Instandhaltung und Erneuerung maßgebliche Einflussfaktoren für das Verhalten eines Verteilungsnetzes und damit für den unternehmerischen Erfolg dar [1, 3, 40].

Das Instandhaltungsmanagement zählt zu den Kernkompetenzen des Asset Managements und beschäftigt sich mit der Festlegung und Umsetzung der Instandhaltungsstrategie (IH-Strategie) in konkrete Maßnahmen sowie der Budgetierung dieser IH-Maßnahmen. Hierbei stellen gerade die Aufwendungen für IH-Maßnahmen der elektrischen Versorgungsnetze eine wesentliche Kostengröße dar, die im Asset Management zu beeinflussen ist [1, 42]. So wird bspw. versucht, die Betriebsmittel bis an ihre physikalischen Grenzen auszureizen, die prospektive Lebensdauer möglichst vollständig auszunutzen und die IH-Maßnahmen weitestgehend zu minimieren bzw. die Intervalle möglichst weit zu strecken. [42] Dieses führt jedoch zu einem erhöhten Risiko für die Funktionsfähigkeit der Betriebsmittel. Aufgrund von Alterung, Umwelteinflüssen und Störungsereignissen müssen die Betriebsmittel aber nach einer gewissen Zeit instandgesetzt oder erneuert werden. Der aktuelle, technische Zustand eines Betriebsmittels rückt daher zunehmend in den Fokus, auch um das erhöhte Risiko überschaubarer zu halten (Abbildung 2).

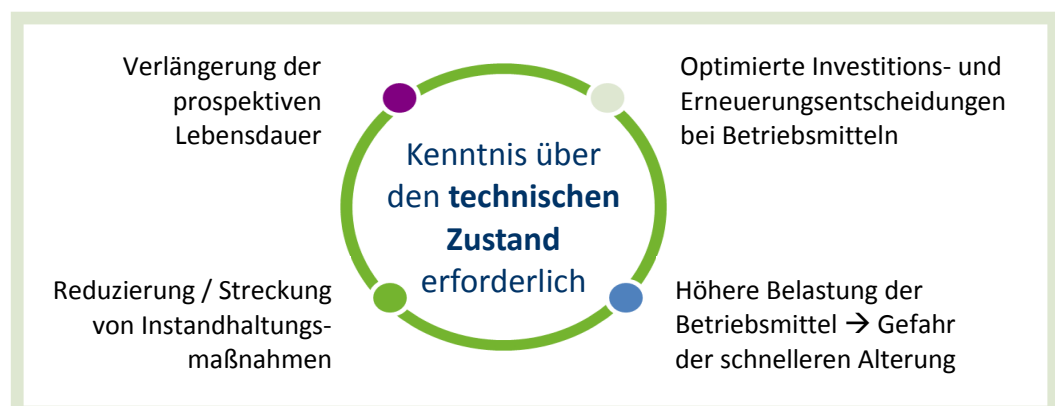


Abbildung 2 – Bedeutung des technischen Zustands für Asset-Entscheidungen

Für ein wirkungsvolles und effizientes Asset Management stellt eine objektive und realitätsgerechte Kenntnis über den technischen Zustand der Assets die Basis und einen zentralen Informationsbaustein dar, zum einen im Bereich der Erneuerungsstrategien und zum anderen auch im Bereich der optimierten und kosteneffizienten Instandhaltungsstrategien, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

## 2.2 Instandhaltungsstrategien elektrischer Betriebsmittel

Zu den Aufgaben des Asset Managements zählen insbesondere auch die Festlegung der Instandhaltungsstrategie (IH-Strategie) sowie die Budgetierung der Instandhaltungsmaßnahmen (IH-Maßnahmen). Als wichtige Informationsquelle ist die Bewertung des Zustands der Betriebsmittel, der die zustandsabhängige Instandhaltung erst ermöglicht, der zentrale Teil dieser Arbeit. Im Folgenden soll zuerst auf zentrale Begriffe und die IH-Strategien eingegangen werden, bevor der Aufwand für eine Zustandsbewertung betrachtet wird.

### 2.2.1 Definitionen Instandhaltung

Die Instandhaltung von Betriebsmitteln hat die Aufgabe, die Verfügbarkeit und die Leistungsfähigkeit über die gesamte Lebensdauer zu sichern [1]. Anlagenbedingte Störungen und Ausfälle verringern die Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit des betrachteten Betriebsmittels und beruhen auf der Grundlage, dass jede Anlage über einen spezifischen Abnutzungsvorrat verfügt. Zu Beginn besitzt jedes Betriebsmittel einen Abnutzungsvorrat von 100 %, der im Laufe der Zeit aufgebraucht wird. Die Ursache für eine stetige Abnutzung sind Verschleiß, Ermüdung, Alterung, aber auch Korrosion. Die Ursache für eine sprunghafte, starke Abnutzung stellt z. B. ein Kurzschluss dar. Dieser Abnutzungsvorrat eines Betriebsmittels kann durch Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst werden [1, 43, 44].

Die Instandhaltung nach [44] umfasst eine „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“

Grundsätzlich kann die Instandhaltung in verschiedene Teilaufgaben unterschieden werden. Die DIN 31051 untergliedert die Instandhaltung in die vier folgenden Aufgaben (vgl. Abbildung 3):



Abbildung 3 – Instandhaltungsaufgaben nach [44]

## **Inspektion**

Eine Inspektion ist eine Instandhaltungsmaßnahme, die ausschließlich zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustands eines Betriebsmittels dient. Dabei werden auch die Ursachen für die identifizierte Abnutzung ermittelt. Sie dient also primär der Informationsgewinnung. Auf Basis dieser Informationen werden anschließend die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet, um die Funktionsfähigkeit des Betriebsmittels wieder zu gewährleisten.

Die Inspektion kann wiederum durch verschiedene Aktivitäten erfolgen: [1, 45, 46]

- **Begehung**

Die Begehung stellt die einfachste Form der Inspektion dar. Sie umfasst eine grobe Inaugenscheinnahme des von außen erkennbaren Zustands während des Betriebs und wird z. B. in gleichmäßigen Intervallen durchgeführt und mittels Begehungsprotokoll dokumentiert. Sie dient vor allem der Gewährleistung der Verkehrssicherungspflicht.

- **Sichtkontrolle**

Die Aufnahme des Ist-Zustands erfolgt bei der Sichtkontrolle z. B. auf Grundlage einer Checkliste. Im Gegensatz zur Begehung wird bei der Sichtkontrolle der Zustand des Betriebsmittels mit den menschlichen Sinnesorganen bewertet und aufgedeckte Funktionsmängel und einfache Zustandsgrößen, die durch Messwertgeber angezeigt werden, werden aufgezeichnet.

- **Funktionskontrolle**

Im Rahmen der Funktionskontrolle werden die Funktionen eines Betriebsmittels (z. B. Beleuchtung, Schließung, Spannungsprüfsystem) überprüft. Die Ergebnisse werden mittels Protokoll dokumentiert. Die Funktionskontrolle ist allerdings in der Regel nicht im Betrieb der Anlage möglich (z. B. Schaltgeräte).

- **Zustandsermittlung**

Ziel dieser Maßnahme ist es, eine spezifische Beurteilung des Ist-Zustands eines Betriebsmittels zu erzielen. Dabei werden objektivierbare Kriterien zur Zustandsermittlung herangezogen, z. B. durch frühere, vergleichende Messungen (Diagnosen).

Die Aktivitäten der Inspektion (Begehung, Sichtkontrolle, Funktionskontrolle und Zustandsermittlung) werden auch unter dem Begriff Zustandserfassung zusammengefasst [1]. Die Zustandsbewertung verwertet dann die erhobenen Daten der Zustandserfassung und leitet hieraus die konkreten Instandhaltungsmaßnahmen an den betrachteten Betriebsmitteln ab.

Typische Inspektionsmaßnahmen in Mittelspanungsnetzen sind bspw.:

- Sichtkontrolle aller eingesetzten Komponenten durch das IH-Personal
- Feststellung des Anstrichzustandes sowie des Korrosionsschutzes von Komponenten
- Überprüfung des Gasfülldrucks (Ablesen des Manometers)
- Füllstandskontrolle von Massekabel-Endverschlüssen

### **Wartung**

Die Wartung ist eine Instandhaltungsmaßnahme, die ausschließlich zur Bewahrung des Soll-Zustandes eines Betriebsmittels dient, um so eine Verzögerung des Abbaus des Abnutzungsvorrates zu erreichen. Bei einer Wartung wird dabei das Betriebsmittel zumindest teilweise außer Betrieb gesetzt und/oder Verschleißteile planmäßig ausgetauscht.

Typische Wartungsmaßnahmen an Netzstationen sind bspw.:

- Reinigung von Schaltgeräten, Isolatoren etc.
- Schmierung der Antriebe von Schaltgeräten
- Nachziehen von Schraubverbindungen
- Nachfüllen von Massekabel-Endverschlüssen

### **Instandsetzung**

Im Gegensatz zur Wartung ist die Instandsetzung eine Instandhaltungsmaßnahme, die zur Wiederherstellung (Rückführung) in den Soll-Zustand eines Betriebsmittels dient. Durch eine Reparatur soll ein funktionsfähiger Zustand nach Defekt oder Ausfall wiederhergestellt werden.

Typische Instandsetzungsmaßnahmen an MS-Komponenten sind bspw.:

- Jegliche Art der Schadens- bzw. Mängelbeseitigung
- Reparatur mechanischer Beschädigungen
- Austausch von fehlerhaften Komponenten

### **Verbesserung**

Verbesserung ist eine Instandhaltungsmaßnahme, die der Steigerung der Funktionssicherheit eines Betriebsmittels dient, ohne aber die geforderte Funktion zu ändern. Sie wird durchgeführt, wenn die Betriebserfahrungen bzw. Inspektionsergebnisse systematische Probleme erkennen lassen.

Alle genannten Instandhaltungsaufgaben werden an den Komponenten im Mittelspannungsnetz angewendet. Die Auswahl und Häufigkeit der Anwendung dieser IH-Aufgaben hat zur Ausbildung verschiedener Instandhaltungsstrategien geführt, die in Abhängigkeit der Betriebsmittel und Randbedingungen eingesetzt werden. Denn eine Vielzahl an Faktoren (Gesetze und Vorschriften, Sicherheit von Personen und Umwelt, Zuverlässigkeit der Versorgung, Wirtschaftlichkeit etc.) haben einen Einfluss auf die Auswahl der geeigneten IH-Strategie. Außerdem beeinflussen auch die Kosten und der Aufwand für eine Ist-Zustandsbewertung der Betriebsmittel die Auswahl der IH-Strategie [1]. Die gebräuchlichsten IH-Strategien werden im Folgenden nun vorgestellt [1, 31, 45].

### 2.2.2 Ereignisorientierte Instandhaltung

Bei der ereignisorientierten Instandhaltung wird überwiegend auf Inspektionen und Wartungen der Betriebsmittel verzichtet. Es werden erst korrektiv Instandhaltungsmaßnahmen (Ersatz, Reparatur) ergriffen, wenn ein Schaden oder Ausfall vorliegt, der auch zu einer Störung führt. Es handelt sich also um eine reaktive Strategie. Ebenfalls gebräuchlich sind die Begriffe „ausfallorientierte Strategie“ oder „korrigierende Instandhaltung“ [31].

Diese Strategie führt im Vergleich zu den folgenden Strategien meist zu den geringsten Kosten für die Instandhaltungsmaßnahmen, da diese erst nach einem Ausfall anfallen. Jedoch sind die Folgekosten für den Ausfall und Ersatz meist schwer zu prognostizieren und können z. T. nicht unerheblich sein [45].

Der Ist-Zustand eines Betriebsmittels wird nicht systematisch erfasst. Wenn dieses wirtschaftlich nicht zielführend ist und/oder aufgrund von Unzugänglichkeit gar nicht möglich ist, dann wird diese Strategie ausgewählt [45]. In MS-Netzen kommt diese Strategie nur bei ausgewählten Betriebsmitteln zur Anwendung. Häufig wird sie aufgrund der Unzugänglichkeit und damit eingeschränkten Zustandsbewertung vor allem in MS- und NS-Kabelnetzen praktiziert [15].

### 2.2.3 Zeitorientierte Instandhaltung

Die zeitorientierte Instandhaltungsstrategie sieht in regelmäßigen, definierten Zeitintervallen Inspektionen und Wartungen vor, um Schäden und damit notwendigen Instandsetzungen vorzubeugen. Der Abbau des Abnutzungsvorrats soll dadurch hinausgezögert werden. Nach Ablauf einer erwarteten technischen Lebensdauer des Betriebsmittels erfolgt dann ein präventiver Austausch. Die Zeitintervalle und die technische Lebensdauer werden aus Empfehlungen der Hersteller oder aus Betriebserfahrungen abgeleitet. Der aktuelle Zustand des Betriebsmittels wird auch bei dieser Strategie nicht berücksichtigt. Die Begriffe „vorbeugende oder zyklische Instandhaltung“ sind für diese Strategie ebenfalls gebräuchlich [31].

Bei dieser Strategie liegt der Fokus auf der Versorgungszuverlässigkeit. Durch prophylaktische Instandhaltungsmaßnahmen sollen vorbeugend Schäden vermieden werden. Die IH-Maßnahmen sind leicht vorhersehbar und planbar. Der optimalen Bestimmung der Zeitintervalle kommt hier eine große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit zu. Zudem setzt diese Strategie eine Korrelation zwischen Alter oder Beanspruchung und der Schadenshäufigkeit voraus, um auf Basis statistischer Daten vor einer Störung eingreifen zu können [1].

Eine sehr verbreitete Anwendung findet diese Instandhaltungsstrategie bisher bei den Mittelspannungsbetriebsmitteln [15]. Um die recht hohen Instandhaltungskosten und die häufigen Wartungsmaßnahmen zu reduzieren bzw. gezielt einzusetzen, wird heutzutage von dieser Instandhaltungsstrategie jedoch immer häufiger Abstand genommen. Außerdem hat sich in der Praxis in vielen Fällen gezeigt, dass kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Nutzungsdauer (Alter) und Schadenshäufigkeit bei elektrischen Betriebsmitteln existiert [1].

### 2.2.4 Zustandsorientierte Instandhaltung

Aufgrund der Einschränkungen einer zeitorientierten Instandhaltung ist diese selten zielführend und es findet vermehrt eine zustandsorientierte Instandhaltung Anwendung. Inspektionen, Wartungen, Instandsetzungen und Verbesserungen werden erst dann durchgeführt, wenn es der technische Zustand des Betriebsmittels auch erforderlich macht. Der technische Zustand des Betriebsmittels rückt als Entscheidungsgrundlage ins Zentrum [31].

Ziel einer zustandsorientierten Instandhaltung ist es, überflüssige oder zu früh stattfindende Instandhaltungsmaßnahmen zu vermeiden und die Lebensdauer der Betriebsmittel optimal auszunutzen. Der richtige Zeitpunkt einer IH-Maßnahme macht aber zwingend geeignete Methoden zur Zustandserfassung und -bewertung erforderlich (z. B. zyklische Inspektionen, Messungen vor Ort, Monitoring-Systeme, Diagnoseverfahren). Der technische Zustand muss qualifiziert und zuverlässig bewertet werden [45].

Kosten für Wartung, Instandsetzung und Verbesserung fallen somit erst an, wenn der ermittelte Zustand eine definierte Qualität unterschreitet, was die IH-Kosten im Vergleich zur zeitorientierten Instandhaltung verringert. Allerdings stellt die exakte Zustandsbewertung eine entscheidende Herausforderung dar. Die Zustandsbewertung muss auf Basis ausreichender Informationen (z. B. aus Inspektionen, Diagnosemessungen, Monitoring-Systemen) möglich sein, was mit einem zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen für die Datenerhebung muss bestehen [1].

### 2.2.5 Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung

Die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung verknüpft den technischen Zustand noch mit der Wichtigkeit eines Betriebsmittels. Die Wichtigkeit spiegelt dabei eine Bewertung des Betriebsmittels bezogen auf die Versorgungszuverlässigkeit sowie seiner Bedeutung im elektrischen Verteilungsnetz wider. Sie kann durch Zuverlässigkeitsberechnungen oder auf Basis qualitativer Kriterien ermittelt werden. Der Begriff „prioritätenorientierte Instandhaltung“ ist für diese Strategie ebenfalls gebräuchlich. Im internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „*reliability centered maintenance*“ (RCM) verwendet [1, 31].

Durch die Verknüpfung der Informationen von Zustand und Wichtigkeit soll eine optimale Verteilung des häufig begrenzten Instandhaltungsbudgets erzielt werden. Die Instandhaltungsmaßnahmen erfolgen an den Betriebsmitteln, welche einerseits eine entsprechende Wichtigkeit für die Versorgung und andererseits auch zugleich einen kritischen Zustand erreicht haben, der eine Instandhaltungsmaßnahme erforderlich macht. Ziel der Strategie ist die Festlegung einer prioritätenorientierten Reihenfolge, an welchen Betriebsmitteln wann welche IH-Maßnahmen durchgeführt werden [1].

### 2.2.6 Risikoorientierte Instandhaltung

Die risikoorientierte Instandhaltung setzt auf der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung auf. Allerdings wird hier die Wichtigkeit des Betriebsmittels über die wirtschaftlichen Konsequenzen im Falle einer Störung dieses Betriebsmittels ermittelt. Das mögliche Risiko (= Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung  $\times$  resultierender Störungskonsequenz) wird bestimmt und monetär bewertet. Eine mögliche Zustandsverschlechterung wird also als Störungswahrscheinlichkeit und die Wichtigkeit als finanzielle Folge dieser Störung interpretiert [1, 40]. Im internationalen Sprachgebrauch wird meist der Begriff „*risk based maintenance*“ (*RBM*) verwendet.

Ziel der risikoorientierten Instandhaltung ist es, das Risiko monetär zu bewerten und als Entscheidungsgrundlage zu berücksichtigen. IH-Maßnahmen werden somit bei hohen Risiken frühzeitig und bei geringen Risiken so spät wie möglich durchgeführt. Dabei stellt die risikoorientierte Instandhaltung einen komplexen Prozess dar, da eine Vielzahl an Kriterien einbezogen und bewertet werden muss. Die Bestimmung der Risiken stellt die zentrale Herausforderung dar [40].

### 2.2.7 Instandhaltungsstrategien in Mittelspannungsnetzen

Bis vor einigen Jahren ist traditionell nahezu ausschließlich die zeitorientierte Instandhaltungsstrategie in Mittelspannungs-(MS)-Verteilungsnetzen zum Einsatz gekommen, d. h. die Betriebsmittel wurden in gleichmäßigen Zeitintervallen inspiziert, gewartet, instandgesetzt und sogar in Abhängigkeit von der Betriebsdauer erneuert (z. B. Ortsnetztransformatoren nach 40 Jahren). So betragen bspw. die üblichen Inspektionszyklen ein bis zwei, mitunter vier Jahre. In Abhängigkeit vom Zustand sind dann ggf. nur Maßnahmen aufgeschoben oder vorgezogen worden. Eine Anpassung erfolgt meistens aus langjährigen Erfahrungen mit den Betriebsmitteln im MS-Verteilungsnetz. Beim Kabelnetz dagegen ist schwerpunktmäßig die ereignisorientierte Instandhaltung angewendet worden [4, 15, 20].

Mit dem zunehmenden Kostendruck haben viele Verteilnetzbetreiber ihre Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien für die MS-Verteilungsnetze optimiert, mit dem Ziel, eine ausgewogene Balance zwischen der Häufigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen und den anfallenden Gesamtkosten zu finden. Daher finden nun auch vermehrt die weiterentwickelten IH-Strategien im MS-Verteilungsnetz Anwendung. Gemeinsam haben alle diese IH-Strategien, dass der tatsächliche, technische Betriebsmittelzustand stärker in den Fokus rückt und sich die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen an diesem Betriebsmittelzustand orientieren. So werden die Instandhaltungsintervalle je nach Betriebsmittelzustand gestreckt, gestaucht oder auch Maßnahmen für einen Zyklus ausgesetzt [47]. Zudem erfolgt verstärkt eine betriebsmittelspezifische Betrachtung. So findet bspw. bei Netzstationen die zustandsorientierte IH-Strategie immer häufiger Anwendung [48]. Beim Kabelnetz dagegen wird in der Regel weiterhin meist die ereignisorientierte Instandhaltung praktiziert, weil eine flächendeckende Zustandsbewertung aufgrund der Unzugänglichkeit der unterirdischen Leitungen kaum oder wenn nur durch aufwendige Messungen

möglich ist [4, 49]. Eine Umfrage in [16] unter Netzbetreibern zeigt, dass früher als Entscheidungskriterium über eine Instandsetzung oder Austausch gealterter MS-Anlagen hauptsächlich das Anlagenalter diente, heute aber auch andere Kriterien wie z. B. Kosten der Instandsetzung oder der Anlagenzustand mit einfließen.

Die Wahl einer Instandhaltungsstrategie hat aber nicht nur Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit, sondern auch auf die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit eines Betriebsmittels [1]. Wenn Instandhaltungsmaßnahmen (Inspektion, Wartung, Instandsetzung) entfallen oder die Intervalle vergrößert werden, reduziert sich direkt der Instandhaltungsaufwand, wobei aber die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit negativ beeinflusst werden können. Zusätzliche, gezielte Maßnahmen oder kürzere Zyklen können dagegen für die Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Betriebsmittels förderlich sein, sind aber mit einem höheren Instandhaltungsaufwand verbunden. Die gewählte Instandhaltungsstrategie und die entsprechenden Zyklen haben also einen maßgeblichen Einfluss auf den Zustand der Komponenten und somit auch auf die Versorgungszuverlässigkeit des gesamten Netzes.

Die Strategie muss also das Ziel verfolgen, dass bei einem vorgegebenen Niveau an Versorgungszuverlässigkeit und Grad der Verkehrssicherungspflicht die Kosten der Anlage über den Lebenszyklus minimiert werden. Die weiterentwickelten Strategien versuchen dieses Optimierungsproblem zu lösen, indem der Instandhaltungsaufwand an dem technischen Zustand oder auch (noch) an anderen Kriterien (Wichtigkeit) der Betriebsmittel orientiert wird, d. h. eine Instandhaltungsmaßnahme wird erst dann durchgeführt, wenn der technische Zustand des Betriebsmittels dieses auch erfordert. Dabei ist offensichtlich, dass alle zustandsbasierten Instandhaltungsstrategien bzw. die zustandsbasierte Festlegung der Zeitintervalle nur dann sinnvoll umgesetzt werden können, wenn die Forderung nach einer möglichst realitätsgerechten, aussagefähigen Zustandsbewertung erfüllt wird. Erst durch eine objektive und nachvollziehbare Zustandsbewertung wird eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien im Rahmen des Asset Managements geschaffen, um die begrenzten Ressourcen und ein immer knapper werdendes Instandhaltungsbudget optimal einsetzen zu können [2].



## 2.3 Gerechtfertigter Aufwand für die Zustandsbewertung

Eine Zustandsbewertung kann sowohl durch eine individuelle Bewertung der Betriebsmittel vor Ort (Inspektion, Messverfahren) durch den Asset Service als auch durch eine modellbasierte Einstufung des Betriebsmittels auf Basis von statischen Eingangsparametern wie dem Betriebsmittelalter, der Schalthäufigkeit pro Jahr bei Schaltgeräten oder der Störungshistorie erfolgen [50]. Generell unterscheiden sich diese Vorgehensweisen in puncto Genauigkeit sowie finanziellem und personellem Aufwand. Der modellbasierte Ansatz ist kostengünstiger und mit weniger Aufwand verbunden, weil auf vorhandene Stamm- und Betriebsdaten bei den Netzbetreibern zurückgegriffen wird. Jedoch weist dieser Ansatz den Nachteil auf, dass eine Vielzahl an Einflussfaktoren wie z. B. Umwelteinflüsse nicht berücksichtigt wird. Das kann dazu führen, dass der modellbasierte Zustand z. T. stark von dem tatsächlich vorliegenden Zustand abweicht [4]. Aufgrund von Unzugänglichkeit der Betriebsmittel (z. B. Kabel) kann dagegen auch nur der modellbasierte Zustandsansatz möglich sein, wenn auf flächendeckende Messverfahren aus wirtschaftlichen Gründen verzichtet werden muss. Prinzipiell kann aber nur über die individuelle Zustandserfassung und -bewertung der Betriebsmittel vor Ort ein realitätsgerechtes Abbild des Zustands der Betriebsmittel erzeugt werden. Für eine Instandhaltung und Zustandsbewertung eines Betriebsmittels ist immer das konkrete technische Objekt von Interesse, d. h. dessen Verhalten und nicht das Verhalten einer statistischen Grundgesamtheit [43]. Daher wird die individuelle Vor-Ort-Bewertung weiter verfolgt.

Bei der individuellen Vor-Ort-Bewertung der Betriebsmittel durch den Asset Service muss grundsätzlich auch abgewogen werden, wie aufwendig eine Zustandsbewertung von Betriebsmitteln des MS-Verteilungsnetzes sein darf und welche Anforderungen dabei zu berücksichtigen sind. Generell liefert der Einsatz von umfangreichen Online-Diagnosemessungen dem Asset Management die genauesten Eingangsgrößen, da zu jedem Zeitpunkt Messwerte erhoben und daraus Rückschlüsse auf den Zustand gezogen werden können [4]. Allerdings sind die Diagnoseverfahren i. d. R. technisch und zeitlich sehr aufwendig und erfordern z. T. ein Freischalten des Betriebsmittels. Daher werden sie, außer an sehr wichtigen Betriebsmitteln, meist aus wirtschaftlichen Gründen nicht regelmäßig angewendet, sondern im Rahmen einer Instandhaltungsmaßnahme (Wartung, Instandsetzung) eingesetzt. Dagegen stellen die Ergebnisse aus Inspektionschecklisten die einfachste Vor-Ort-Bewertung dar, um eine schnelle, qualitative Aussage über den Zustand zu erhalten. Allerdings ist die Aussage daraus mit erheblich größerer Unsicherheit als beim Einsatz von Diagnoseverfahren verbunden. Die Anforderungen an eine Zustandsbewertung und der wirtschaftlich gerechtfertigte Aufwand sind zudem stark von der Spannungsebene abhängig (Abbildung 4) [2].

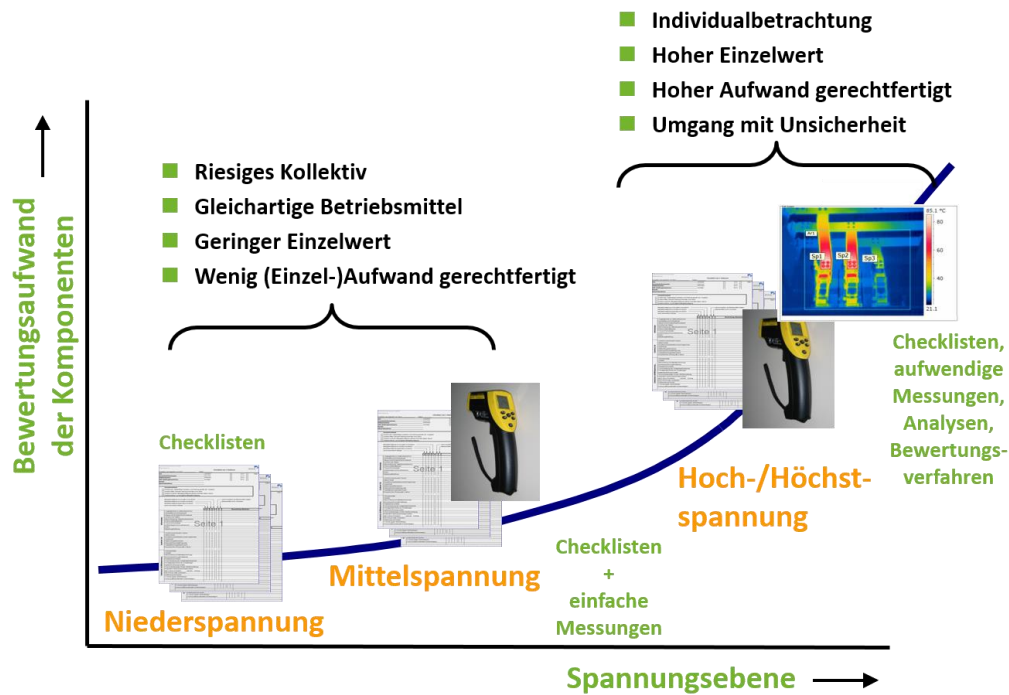


Abbildung 4 – Zustandsbewertungsaufwand in Abhängigkeit der Spannungsebene (nach [23])

Im Hoch- und Höchstspannungsnetz ist eine aufwendige Zustandsbewertung der einzelnen Betriebsmittel gerechtfertigt, da jedes einzelne Betriebsmittel hohe spezifische Anschaffungskosten besitzt. Zudem ist auch die Anzahl der Betriebsmittel verhältnismäßig gering. Die Zustandsbewertung schließt dabei auch den Einsatz umfangreicher Messtechnik und Diagnoseverfahren mit ein. So kommen z. B. häufig auch komplexe Monitoring-Systeme und Diagnoseverfahren bei der individuellen Zustandsbewertung zum Einsatz und liefern dem Asset Management umfangreiche Informationen.

Mittel- und besonders Niederspannungsnetze bestehen dagegen aus einem großem Kollektiv an nahezu gleichartigen Betriebsmitteln, die bei einer Zustandsbewertung beurteilt werden müssen. Die Betriebsmittel besitzen nur relativ geringe spezifische Anschaffungskosten und dieses rechtfertigt nur einen geringen Bewertungsaufwand. So liegen Kosten für die Online-Überwachungsgeräte z. T. in ähnlicher Größenordnung wie die des betrachteten Betriebsmittels selbst [4]. Eine individuelle Zustandsbewertung mit Hilfe umfangreicher, verschiedenartiger Diagnoseverfahren, wie sie im Hochspannungsbereich Anwendung finden, ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten deshalb nicht zielführend [3]. Die Zustandsbewertung erfolgt daher in der Regel über visuelle zyklische Inspektionen, die ggf. unter Zuhilfenahme einfacher Messverfahren gestützt werden.

Da die Zustandsbewertung der Betriebsmittel des Mittelspannungsnetzes möglichst kostengünstig und ohne großen zeitlichen Zusatzaufwand erfolgen soll, basiert das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Zustandsbewertung der MS-Betriebsmittel auf den turnusmäßig durchgeführten Inspektionen.

## **3 Verfahren zur Zustandsbewertung im Verteilungsnetz**

### **3.1 Inspektionen zur Zustandsdatenerfassung**

Um die Instandhaltungsmaßnahmen im MS-Verteilungsnetz optimal planen zu können, sind die Informationen zu erfassen, die den möglichst realitätsgerechten Zustand der Betriebsmittel beschreiben. Aufgrund der genannten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im MS-Verteilungsnetz muss die Datenerfassung dafür möglichst kostengünstig und ohne großen Aufwand erfolgen, dabei aber trotzdem einen aussagekräftigen Informationsgehalt bezüglich der Zustandsabschätzung des Betriebsmittels besitzen. Daher basieren die Zustandsbewertungsverfahren im MS-Verteilungsnetz in der Regel auf systematischen und einheitlichen Inspektionen, die zyklisch durchgeführt werden [9, 46, 51, 52, 53].

Die Inspektion stellt für eine erfolgreiche Instandhaltung im Verteilungsnetz das Fundament dar und ist eine einfache Möglichkeit, die betriebsrelevanten Informationen zu gewinnen und die bestehenden Mängel von inspizierten Betriebsmitteln bzw. deren Komponenten aufzudecken. So schreiben [54] und [55] die Durchführung regelmäßiger Wiederholungsprüfungen durch eine Elektrofachkraft vor, die der Beurteilung des ordnungsgemäßen Zustands dienen sollen. Die Inspektion als eine Möglichkeit zur Zustandsfeststellung von Betriebsmitteln in elektrischen Versorgungsnetzen ist auch in [46] aufgeführt, wobei bei den meisten aufgeführten Komponenten die Sichtkontrolle als geeignete Maßnahme genannt wird. Dadurch kann der aktuelle Ist-Zustand eines Betriebsmittels durch die Prüfer zyklisch festgestellt und gezielte Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. Instandsetzung, Wartungsarbeiten) können abgeleitet werden. Ein weiterer Vorteil der Auswertung dieser zyklischen Prüfungen ist, dass im Laufe der Zeit eine große Datenbasis erzeugt wird, die für statistische Auswertungen nach verschiedenen Stammdaten und auch zur Untersuchung des Alterungsverhaltens der Betriebsmittel genutzt werden kann [9].

Da turnusmäßige Inspektionen an elektrischen Betriebsmitteln somit, insbesondere auch aus Gründen der Verkehrssicherungspflicht, vorgeschrieben sind und von allen Verteilnetzbetreibern durchgeführt werden, stellen diese eine geeignete Datengrundlage für die Zustandsbewertung dar, die systematisch genutzt werden sollte. Inspektionsprotokolle liegen dabei in der Regel bei den Verteilnetzbetreibern vor und werden verwendet, um die Durchführung regelmäßiger Prüfungen und die dabei festgestellten Mängel zu dokumentieren und anschließend entsprechend zu beheben. Jedoch werden diese Informationen aus den Inspektionsprotokollen nur selten automatisiert ausgewertet und dementsprechend selten zur Zustandsbewertung genutzt. Es werden andere Zielstellungen mit den Protokollen (wie die Dokumentations- und Nachweispflicht) verfolgt. Das Know-how der Mitarbeiter, die sich im täglichen Arbeitsablauf mit den Betriebsmitteln beschäftigen, sollte in die Zustandsbewertung jedoch mit einfließen. Allerdings liegen diese Erfahrungen häufig nicht als apriorisches Wissen vor, sondern in impliziter Form beim Instandhaltungspersonal [43]. Mithilfe eines systematischen Zustandsbewertungsverfahrens wird

dieses Wissen akquiriert und aufbereitet und kann für Entscheidungen des Asset Managements gezielt genutzt werden.

Um das Know-how der Mitarbeiter über eine systematische Zustandsbewertung zu objektivieren und eine homogene Dokumentationssystematik zu erzielen, wird eine einheitliche Inspektions-Checkliste (in Abbildung 5 am Beispiel für MS-Netzstationen (siehe auch Anhang 11.1) dargestellt) verwendet, die universell für eine Betriebsmittelgruppe einsetzbar ist. Checklisten haben den Vorteil, dass sie relativ schnell ausgefüllt und ausgewertet werden können. Zudem verhindern sie durch die umfangliche Auflistung weitestgehend das Vergessen einzelner Inspektionspunkte bei der Begutachtung, wodurch ein umfassendes und genaues Bild von dem Gesamtbetriebsmittel erzielt wird. Der Einsatz einer mobilen Datenverarbeitungslösung und eines Workforce Management Systems unterstützt dieses und ermöglicht das elektronische Ausfüllen der Checkliste direkt vor Ort. Es kann dadurch eine betriebsmittelspezifische Checkliste zur Anwendung kommen, d. h. es werden bspw. die Inspektionspunkte einer Maststation nicht angezeigt, wenn eine Gebäudestation zu inspizieren ist.

Die Inspektions-Checklisten stellen die Basis der objektiven Zustandsdatenerfassung dar und müssen vor allem zwei wesentlichen Anforderungen genügen:

- Zum einen muss für das Asset Management ein Zustandsindex erzeugt werden, der als Basisinformation für operative und strategische Analysen und als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung steht.
- Zum anderen müssen für den Asset Service die Ableitung von konkreten Instandhaltungsmaßnahmen und eine homogene, aussagekräftige Dokumentation möglich sein.

The image shows three overlapping forms for an inspection checklist of an MS-Netzstation. Each form is titled 'ZUSTANDSBERICHT' and includes the logo of Bergische Universität Wuppertal. The forms contain the following sections:

- Kundenanschrift:** Name, Straße, PLZ Ort, Telefon / Fax.
- ZUSTANDSBERICHT:**
  - Kunde: Stationenname, Ort, Datum, Unterschrift
  - Monteur: \_\_\_\_\_
  - Gesamtzustand:  gut,  mittel,  schlecht,  sehrschlecht
  - Stationsbauform:  Kompaktstation (K),  Gebäudestation (G),  Maststation (M)
- Inspection Table:** A grid with columns for 'Bewertung' (1, 2, 3, 4, 5) and 'Bemerkungen'. Rows include:
  - Außenanlage der Station:** Zugangsfreiheit, Wege, Flächen; Anstrich, Putz, Fassade, Gelände; Fundament; Bewuchs der Station; Dach, Dachabwasserung; Lüftungsgitter, Dachentlüftung; Lichtschacht, Einbaueinrichtung; Türen, Torflügel, Revisionsöffnung; Schließeneinrichtung, Schlüsselkasten; Beschriftung und Warnschilder; Mast (Zustand, Standschemen); Aufstiegsstufe; Vogelschutzbeschriftung.
  - Innenraum der Station:** Raumklima (Temperatur, Feuchte); Be-Entlüftung, Druckentlastung; (Not-) Beleuchtung, Steckdosen; Putz, Anstrich, Wände, Decke; Fußböden (Innenraum); Flucht-/Rettungsweg (Innen, außen); Panikschloss; Kabelabdeckung/schacht; Erdungsanlage (Sichtkontrolle); Sauberkeit (Innenraum); Warn- und Hinweisschilder (Gebäude).
  - MS-Schaltanlage:** Schmelzsichernde, Isolieren, Stützen; Durchführungen; MS-Schaltgeräte; Kugeloberflächengeschalter; HSI-Sicherungen; SF<sub>6</sub>-Gasdruck (Manometer).
- Remarks Section:** 'Bemerkungen' with 'Vorschlag IK-Maßnahme' and 'Freitext'.
- Footer:** 'Seite 1 / 3', 'Seite 2 / 3', 'Seite 3 / 3' and 'Unterschrift: \_\_\_\_\_'.

Abbildung 5 – Inspektions-Checkliste einer MS-Netzstation (vgl. Anhang 11.1)

Abbildung 5 zeigt die in dieser Arbeit für MS-Netzstationen verwendete Checkliste, die eine solche beispielhafte universelle Inspektions-Checkliste darstellt [2]. Um die unterschiedlichen Anforderungen zu berücksichtigen, ist diese durch mehrere Experten (Asset Management, Asset Service) erarbeitet worden und umfasst alle relevanten Inspektionspunkte der MS-Netzstation, die vor Ort durch das Instandhaltungspersonal Schritt für Schritt bei der Inspektion abgearbeitet wird [2, 9]. Der Inspektion ist dadurch ein definierter und einheitlicher Rahmen zugrunde gelegt, der für das Instandhaltungspersonal einen systematischen Leitfaden darstellt. Die einzelnen Inspektionspunkte werden wiederum zu Hauptinspektionsteilen (HIT) zusammengefasst. Diese Zusammenfassung ermöglicht Detailanalysen für die Hauptkomponenten eines MS-Betriebsmittels. Bei MS-Netzstationen umfassen diese HIT:

- Baulicher Teil (Außenanlage, Gebäude/Gehäuse, Innenraum)
- Mittelspannungs-(MS-)Schaltanlage
- Verteiltransformator
- Niederspannungs-(NS-)Verteilung
- Zubehör

Wie umfänglich eine Checkliste allgemein ist und welche einzelnen Inspektionspunkte im Detail wie bezeichnet werden, ist dabei abhängig von den Erfahrungen und Anforderungen eines Verteilnetzbetreibers und bietet bei der Erstellung der Checkliste Freiheitsgrade. So kann eine Inspektions-Checkliste bei Verteilnetzbetreibern auch Unterschiede zu der in Abbildung 5 aufgeführten Checkliste für MS-Netzstationen z. B. in der Formulierung der Inspektionspunkte sowie im Detaillierungsgrad der zu erfassenden Punkte aufweisen. Es muss aber eine einheitliche Checkliste für eine jeweilige Betriebsmittelgruppe (z. B. MS-Netzstationen) verwendet werden, um eine homogene Vorgehensweise und Zustandsdatenbasis zu erzielen. Unterstützend bei der Erarbeitung sind zudem [46] und [56], die beispielhafte Inspektionsaktivitäten zur Ist-Zustandsfeststellung von Betriebsmitteln und Anlagen in Elektrizitätsversorgungsnetzen beschreiben. Diese sind allerdings für die konkrete Anwendung im MS-Verteilungsnetz an vielen Stellen zu präzisieren und um operative Aspekte zu erweitern. Es ist allgemein zu empfehlen, die Inspektions-Checklisten möglichst detailliert aufzubauen, um eine Bewertung differenziert nach Komponente bzw. Ursache eines Mangels abgeben zu können. So sollten sich die Hauptinspektionsteile mindestens aus den Inspektionspunkten ihrer maßgeblich zustandsrelevanten (Unter-)Komponenten zusammensetzen, an denen eine Inspektion durchgeführt wird. Bspw. sollte die MS-Schaltanlage mindestens die Inspektionspunkte wie Gehäuse/Kapselung, MS-Schaltgeräte, Kugelbolzen/Erdungsschalter, HH-Sicherungen, Sammelschiene/Isolator/Stützer, Durchführungen, MS-Kabelendverschlüsse etc. umfassen, die jeweils vor Ort zu bewerten sind. Nur so kann ein festgestellter Mangel auch verursachergerecht zugeordnet werden. Eine defekte HH-Sicherung (Austausch) kann im Modell von einem defekten MS-Schaltgerät (Auswechseln) differenziert werden. Als weiteres Beispiel sei auch der Punkt „Sauberkeit“ zu nennen. Dieser Punkt sollte ebenfalls separat als Inspektionsteil je Hauptinspektionsteil herausgezogen und

aufgenommen werden. Die Eigenschaften einer Komponente werden durch eine Verschmutzung nur zeitweise verändert und können durch eine Reinigungsmaßnahme leicht wieder zurückgesetzt werden (reversibler Vorgang). Der Aspekt „Reinigungsmaßnahme“ kann somit separat ausgewiesen und in der Aggregationssystematik berücksichtigt werden.

Alle Inspektionenpunkte werden also vor Ort durch das Instandhaltungspersonal anhand eines einheitlichen Klassifizierungsschemas (Abschnitt 3.2.2) bewertet und darauf basierend wird ein Gesamtzustandsindex für das Asset Management generiert (Abschnitt 3.2). Für den Asset Service wird neben dem Klassifizierungsschema zusätzlich ein Bemerkungsfeld bei jedem Inspektionenpunkt ergänzt, in dem eine differenziertere Beschreibung eines identifizierten Mangels erfolgt und entsprechend notwendige Instandhaltungsmaßnahmen eingetragen werden. Diese Bemerkungen werden ausgewertet und Folgemaßnahmen daraus generiert.

Zudem sind auch einige objektspezifische Daten aufgeführt. Diese stellen allgemeine Daten zu den inspizierten Betriebsmitteln dar und werden bei Auftragserzeugung der Inspektion automatisch in die Checklisten übernommen. Während der Inspektion können diese Daten überprüft oder ggfs. aktualisiert werden. Sie dienen für spätere Auswertungsmöglichkeiten oder werden in anderen Unternehmensbereichen wie der Netzplanung (z. B. Belastungswerte) benötigt.

## **3.2 Bewertungsmodell**

### **3.2.1 Aggregationssystematik**

Die Bewertung des Zustands eines elektrischen Betriebsmittels und die daraus folgende Ableitung von Entscheidungen stellen komplexe Entscheidungsprobleme dar. Hierbei können Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung wie die Nutzwertanalyse, Scoring-Modelle oder der Analytic Hierarchy Process (AHP) zur Entscheidungsvorbereitung hilfreich eingesetzt werden, die das Entscheidungsproblem in einer Kriterienhierarchie strukturieren und einen Kriterienbaum mit Ober- und Unterkategorien aufstellen. Die Anzahl der Unterkategorien und der Hierarchieebenen ist dabei von der untersuchten Problemstellung abhängig [57, 58]. Auf der untersten Ebene werden die Kriterien dann auf Basis vorliegender Informationen, welche aus unterschiedlichen Quellen - im Rahmen der Zustandsbewertung z. B. visuelle Inspektionsergebnisse, Erfahrungswerte, statistische Erhebungen oder konkrete Messergebnisse - stammen können, bewertet und anschließend über eine Aggregationssystematik mit Gewichtungsfaktoren zu einer Gesamtaussage für das Entscheidungsproblem zusammengefasst.

Diese Methoden der Entscheidungsunterstützung und somit ein darauf basierendes Bewertungsmodell können aber nicht den Zweck realisieren, ein „objektives Optimum“ zu bestimmen. Sie stellen aber hilfreiche Instrumente dar, deren Anwendung zu einer Entscheidung führen soll, die optimal oder aber doch wenigstens „gut“ ist in Bezug auf die Zielvorstellungen des Entscheiders und der zugrundeliegenden Informationsbasis in der betrachteten Problemstellung [59].

Daher finden diese Methoden, die auf Bewertungen von Kriterien und Informationen sowie anschließender Aggregationssystematik via Gewichtungsfaktoren beruhen, vielfach Anwendung im Bereich der Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel (siehe Abschnitt 1.2). Doch ebenfalls in anderen Bereichen werden ähnliche Vorgehensweisen verfolgt, so bspw. im Gesundheitsmanagement bei der Verknüpfung von Gesundheitsscores zu einem Health Index [60] oder im Kontext betrieblicher Entscheidungen [58].

Die Zustandsbewertung der Mittelspannungsbetriebsmittel auf Basis einer Inspektions-Checkliste erfolgt durch Aggregation der einzelnen, bewerteten Inspektionen zu einem Gesamtzustandsindex. Zuerst werden durch eine geeignete Verknüpfung die Inspektionen, die vor Ort gemäß ihres Zustands bewertet werden, zu Zwischenergebnissen für relevante Hauptinspektionsteile zusammengefasst, um auch Detailanalysen realisieren zu können. Die Verknüpfung dieser Zwischenergebnisse zum Gesamtzustandsindex erfolgt dann wiederum durch die Bildung einer relativen gewichteten Summe. Die zugrundeliegende, prinzipielle Systematik [2, 51] basiert also auf Bewertungs- und Gewichtungsfaktoren und zeigt Abbildung 6.

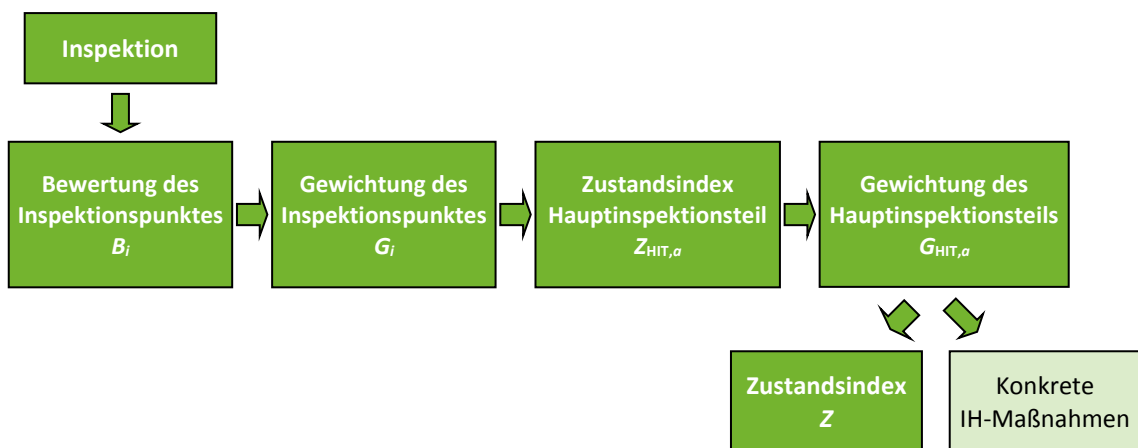


Abbildung 6 – Grundlegendes Schema zur Bestimmung des Gesamtzustandsindex

Um den Zustandsindex  $Z$  des MS-Betriebsmittels zu ermitteln, muss zunächst im ersten Schritt vom sachkundigen Instandhaltungspersonal eine Bewertung jedes Einzelinspektionpunktes vor Ort während der Inspektion durchgeführt werden. Dieses geschieht, wie in Kapitel 3.2.2 näher beschrieben, anhand eines einheitlichen Klassifizierungsschemas, welches sich z. B. an der Fristigkeit der Mängelbeseitigung orientiert. Hiernach bewertet das Instandhaltungspersonal dann, welche Folgen ein auftretender Mangel hat und bis wann der Mangel behoben werden muss, um einen ordnungsgemäßen Betrieb weiterhin zu gewährleisten und nicht zu gefährden. Diese Einschätzung unterliegt aber den subjektiven Erfahrungen des Instandhaltungspersonals, die in jedem Fall einzuschätzen haben, wie lange ein Betriebsmittel seine Funktion im geforderten Zustand erfüllen wird und welche sofortige, kurz- oder langfristige Gegenmaßnahme erforderlich wird. Dieses sei insbesondere in dem Zusammenhang der Vergleichbarkeit erwähnt, da diese nur eingeschränkt möglich ist, wenn generell unterschiedliche Herangehensweisen und Bewertungsgrundlagen beim Instandhaltungspersonal vorliegen.

Jeder Inspektionspunkt  $i$  wird entsprechend mit einem zugehörigen Bewertungspunkt  $B_i$  und ferner dann mit einer Gewichtung  $G_i$  (näheres zu Gewichtungsfaktoren in Kapitel 3.2.3) belegt. Basierend auf den Bewertungspunkten sowie der festgelegten Gewichtung für die Inspektionsteile bzw. Hauptinspektionsteile erfolgt eine Bewertung des Zustandes, indem mittels einer Bewertungs- und Gewichtungssystematik alle Parameter miteinander verknüpft werden. Als Ergebnis ergibt sich dann der Zustandsindex  $Z$ .

Im ersten Schritt wird für jeden Einzelinspektionsteil eine gewichtete Bewertung ermittelt:

$$GB_i = B_i \cdot G_i \quad (3.1)$$

wobei:

- $GB_i$  – gewichtete Bewertung des  $i$ -ten Inspektionsteiles
- $B_i$  – Bewertung des  $i$ -ten Inspektionsteiles
- $G_i$  – Gewichtung des  $i$ -ten Inspektionsteiles

Anschließend wird für jeden einzelnen Hauptinspektionsteil die Summe der gewichteten Bewertungen  $GB_i$  erstellt und durch die maximal mögliche, gewichtete Bewertung jedes bewerteten Einzelinspektionsteiles dividiert. Wird ein Einzelinspektionsteil nicht bewertet, d. h. der Inspektionsteil auf der Checkliste wurde nicht ausgefüllt (Betriebsmittel nicht vorhanden) oder die Durchführung der Inspektion war nicht möglich, so geht diese maximal gewichtete Bewertung nicht in die Division ein. Würde nämlich die maximale Bewertung hier mit einfließen, würde das Ergebnis je Hauptinspektionsteil reduziert werden und nicht mehr den Zustand der bewerteten Inspektionsteile wiedergeben (Gleichung (3.2)).

Es ergibt sich der Zustandsindex eines Hauptinspektionsteils  $Z_{\text{HIT}}$  wie folgt:

$$Z_{\text{HIT},a} = \frac{\sum_{i=1 \forall B_i \neq \emptyset}^{n_a} (GB_i)}{B_{\text{max}} \cdot \sum_{i=1 \forall B_i \neq \emptyset}^{n_a} G_i} \quad (3.2)$$

wobei:

- $Z_{\text{HIT},a}$  – Zustandsindex des Hauptinspektionsteils  $a$
- $n_a$  – Anzahl der bewerteten Inspektionsteile im Hauptinspektionsteil  $a$
- $B_{\text{max}}$  – maximal mögliche Bewertung des  $i$ -ten Inspektionsteiles

Im nächsten Schritt werden die Zustandsindizes der Hauptinspektionsteile  $Z_{\text{HIT},a}$  unter Berücksichtigung der jeweiligen Gewichtung  $G_{\text{HIT},a}$  aufsummiert und durch die jeweiligen Gewichtungen der Hauptinspektionsteile, die einen Zustandsindex  $Z_{\text{HIT},a}$  ungleich Null aufweisen, dividiert. Denn falls ein Hauptinspektionsteil durchgängig nicht bewertet wird, so kann der Zustandsindex maximal die Summe der Gewichtungen  $G_{\text{HIT}}$  der übrigen bewerteten Hauptinspektionsteile erhalten. Es kann somit kein Vergleich mit anderen Stationen, bei denen eine ganzheitliche Bewertung erfolgt, angestellt werden. Diese Problematik wird durch eine Division durch die Gewichtungen der HIT, die einen Zustandsindex ungleich Null aufweisen, behoben (Gleichung (3.3)).



Es lässt sich der gesamte Zustandsindex für das komplette MS-Betriebsmittel gemäß folgender Gleichung bestimmen:

$$Z = \frac{\sum_{a=1 \vee Z_{\text{HIT},a} \notin \emptyset}^h (Z_{\text{HIT},a} \cdot G_{\text{HIT},a})}{\sum_{a=1 \vee Z_{\text{HIT},a} \notin \{\emptyset, 0\}}^h G_{\text{HIT},a}} \quad (3.3)$$

wobei:

- $Z$  – Zustandsindex des Betriebsmittels
- $G_{\text{HIT},a}$  – Gewichtung des  $a$ -ten Hauptinspektionsteiles
- $h$  – Anzahl Hauptinspektionsteile

Abschließend erfolgt noch eine Normierung des Zustandsindex, um einen Zustandsindex  $Z$  zwischen 0 und 100 % zu erreichen. Da der mängelfreie Zustand der Inspektionpunkte mit dem Bewertungspunkt  $B_i = 1$  bewertet wird und die maximal mögliche Bewertung  $B_{\text{max}}$  der Inspektionpunkte abhängig vom gewählten Klassifizierungsschema (siehe Abschnitt 3.2.2, in dieser Arbeit  $B_{\text{max}} = 4$ ) ist, ist die Normierung erforderlich. Wenn alle Inspektionpunkte als mängelfrei eingestuft werden, ergibt sich für den Zustandsindex  $Z$  durch diese Rahmenbedingungen ein von Null verschiedener Grundwert. Die Normierung erfolgt durch lineare Transformation nach Gleichung (3.4) und die Herleitung dieser Gleichung ist in [9] näher erläutert.

$$Z_{\text{norm}} = \frac{Z - 1}{B_{\text{max}} - 1} \cdot 100 \quad (3.4)$$

wobei:

- $Z$  – Zustandsindex des Betriebsmittels
- $B_{\text{max}}$  – maximal mögliche Bewertung der Inspektionpunkte
- $Z_{\text{norm}}$  – normierter Zustandsindex des Betriebsmittels

Für den so ermittelten Index  $Z_{\text{norm}}$  für den Zustand gilt, dass er umso größer ist, je schlechter der Zustand des betrachteten Betriebsmittels ist. Ein Zustandsindex von  $Z_{\text{norm}} = 0$  % bedeutet, dass das MS-Betriebsmittel mängelfrei ist und demzufolge keine Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Ein Zustandsindex von  $Z_{\text{norm}} = 100$  % impliziert, dass das inspizierte MS-Betriebsmittel als mangelhaft bewertet wird und ein enormer, sofortiger Instandhaltungsbedarf besteht.

Die Normierung wird ebenfalls bei den Hauptinspektionsteilen durchgeführt, um erstens einen aussagefähigen Zustandsindex  $Z_{\text{HIT},a,\text{norm}}$  zu erreichen und um zweitens einen Detailvergleich zwischen den Hauptinspektionsteilen zu ermöglichen. Die normierten Zustandsindizes  $Z_{\text{HIT},a,\text{norm}}$  werden nach Gleichung (3.5) bestimmt.

$$Z_{\text{HIT},a,\text{norm}} = \frac{Z_{\text{HIT},a} - 1}{B_{\text{max}} - 1} \cdot 100 \quad (3.5)$$

wobei:

- $Z_{\text{HIT},a}$  – Zustandsindex des Hauptinspektionsteil  $a$
- $B_{\text{max}}$  – maximal mögliche Bewertung der Inspektionpunkte
- $Z_{\text{HIT},a,\text{norm}}$  – normierter Zustandsindex des Hauptinspektionsteils  $a$

Die Zustandsindizes  $Z_{\text{HIT},a,\text{norm}}$  berücksichtigen nicht die Gewichtung des jeweiligen Hauptinspektionsteils  $a$  und damit den Einfluss auf den Gesamtzustand. Somit werden sie nicht durch die Gewichtungen verzerrt und ein direkter Vergleich untereinander bei der Auswertung ist möglich. Über die Ermittlung der normierten Zustandsindizes der Hauptinspektionsteile  $Z_{\text{HIT},a,\text{norm}}$  kann direkt erkannt werden, welcher HIT einen großen oder geringen Treiber für den Gesamtzustandsindex  $Z_{\text{norm}}$  darstellt und in welchem Zustand sich dieser befindet.

In Abbildung 7 wird der Zusammenhang zwischen Bewertungspunkten  $B_i$ , Gewichtungsfaktoren  $G_i$  und  $G_{\text{HIT},a}$  sowie die Aggregation dieser Größen zum Gesamtzustandsindex  $Z_{\text{norm}}$  nochmal zusammenfassend veranschaulicht.

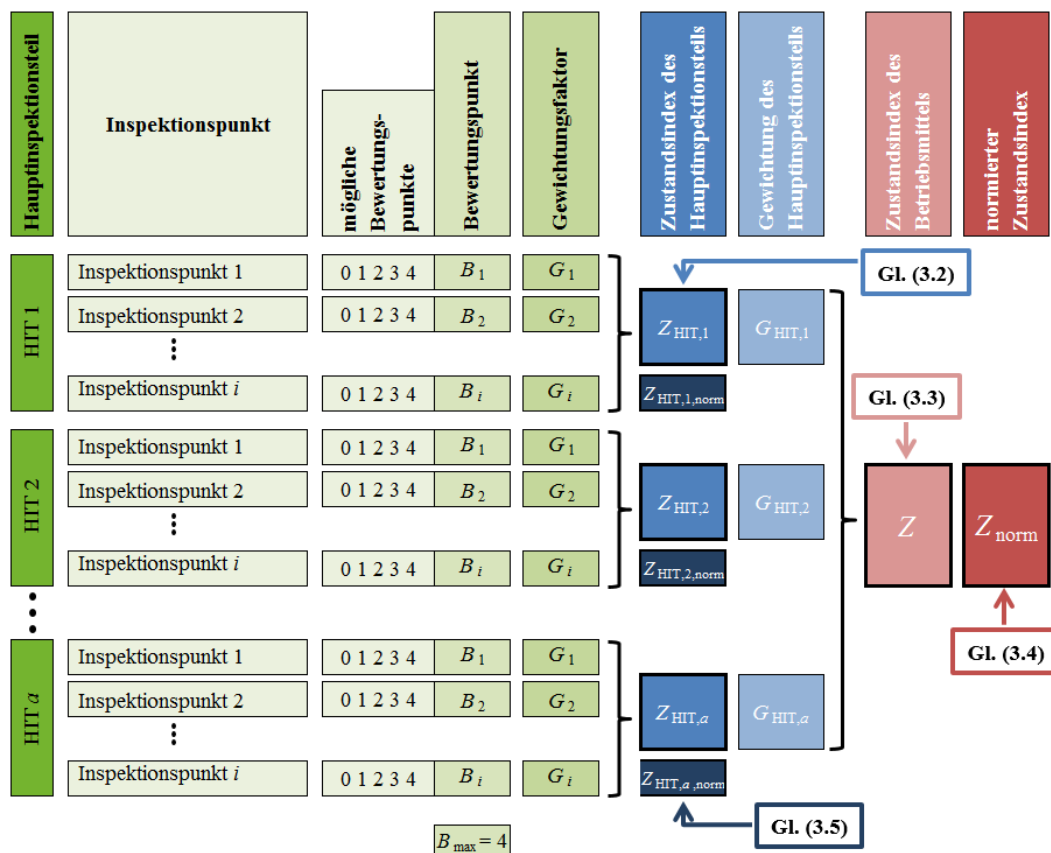


Abbildung 7 – Zusammenfassung der Aggregationssystematik (in Anlehnung an [9])

### 3.2.2 Klassifizierungsschema

Die einzelnen in der Checkliste aufgeführten Inspektionsteile werden vor Ort durch das Instandhaltungspersonal fachkundig bewertet. Doch wie soll das Klassifizierungsschema aufgebaut sein, auch unter dem Aspekt möglichst objektiv zu sein?

Das Instandhaltungspersonal hat die Aufgabe, die einzelnen Komponenten zu inspizieren und dann eine zutreffende Beurteilung abzugeben. Es handelt sich daher um Beurteilungsaufgaben, wobei als Antwortformat häufig eine diskret gestufte Ratingskala verwendet wird. Ratingskalen besitzen meistens mindestens zwei, i. d. R. aber mehr als zwei abgestufte Beurteilungskategorien,

die der Beurteilende markieren muss. Charakteristisch ist auch, dass die Antwortkategorien meist nicht spezifisch für jeden einzelnen Punkt formuliert sind, sondern dass eine einheitliche Form für den gesamten Test gilt [61].

Die Beurteilungsaufgaben haben den Vorteil, dass sie in der Praxis leicht zu handhaben und ökonomisch bezüglich der Auswertungszeit sind. Außerdem kann sich das Instandhaltungspersonal auf eine einheitliche Klassifizierungsskala einstellen und muss sich nicht bei jedem Inspektionpunkt neu orientieren, wodurch die Bearbeitungsdauer verkürzt wird. Beurteilungsaufgaben werden daher auch sehr häufig eingesetzt [61].

Das Format der Klassifizierungsskala führt zu unterschiedlichen Ergebnissen und beeinflusst die durchgeführte Bewertung. Das Format umfasst dabei die Breite der Skala, die Parität der Skala und die Bezeichnung der einzelnen Stufen.

Wird die Skala zu breit gewählt, führt dieses schnell zu einer intellektuellen Überforderung der Bewertenden, da ihnen eine extreme Abstraktionsfähigkeit abverlangt wird. Die Bewertenden können die individuellen Beurteilungen nicht sinnhaft voneinander differenzieren, weil z. B. eine objektive Begründung dafür, warum bei einer Skala mit der Breite von Hundert der Bewertungspunkt 24 und nicht der Bewertungspunkt 25 gewählt wird, nicht nachvollziehbar gegeben werden kann. Zudem besteht bei sehr vielen Stufen die Tendenz, nur jene Stufen auszuwählen, die durch 10 bzw. 5 teilbar sind. Es lässt sich also kein zusätzlicher Informationsgewinn erzielen [61, 62].

Wird die Skala dagegen zu gering gewählt, treten andere Probleme auf. Den Befragten ist häufig z. B. eine Dreierskala zu eng und sie können ihre Bewertung nicht hinreichend differenzieren. Die Skala besteht praktisch nur aus Extrempositionen. Anschließende Auswertungsmöglichkeiten sind nur sehr eingeschränkt gegeben und eine entsprechende Maßnahmengenerierung erschwert [61, 62].

Eine optimale Skalenbreite gibt es aber nicht. Es muss immer ein Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen eingegangen werden. In der Literatur [61, 62] wird eine Skalenbreite von 4 bis höchstens 6 Skalenpunkten empfohlen.

Des Weiteren hat auch die Parität der Skalenbreite einen Einfluss. Bei ungeraden Skalen wird eine Mittelkategorie vorgegeben, die von Bewertenden auch als sog. Fluchtkategorie oder Ausweichoption genutzt wird, wenn sie sich hier nicht für die eine oder andere Seite entscheiden müssen oder wollen. Somit entsteht eine Tendenz zur Mitte. Diese Gefahr besteht bei einer geraden Anzahl nicht. Die Bewerteten werden zu einer tendenziellen Entscheidung gezwungen, mit dem Nachteil, dass ihnen gleichzeitig auch die Chance genommen wird, sich bewusst und zielgerichtet für die mittlere Position zu entscheiden. Dieses kann das Ergebnis ebenfalls verzerren. Somit gibt es auch hier nicht die optimale Lösung [62].

Die Bezeichnung der Skalenpunkte kann prinzipiell numerisch oder verbal erfolgen. Bei der numerischen Skala werden die Stufen mit Zahlen markiert, wodurch der Anschein einer präzisen

Messung erzeugt und das Ziel erreicht werden soll, die Beurteilungsskala wie eine Intervallskala zu verwenden. Den Bewertenden werden die Abstände zwischen den Punkten vor Augen geführt. Dieses ist aber insofern problematisch, da die Antworten streng genommen lediglich ordinal skaliert sind, also nur eine Rangordnung abbilden und ein gleicher Bedeutungsabstand zwischen den Stufen nicht unbedingt unterstellt werden kann. Diese vorgegebenen Abstände stellen nicht sicher, dass die Bewertenden die äquidistanten Abstände in ihrem Urteil zugrunde legen. Die Zuordnung von Zahlen zu den Stufen erleichtert aber die Anwendung von statistischen Auswertungsverfahren, welche aber eine Intervallskalierung voraussetzen [61, 62].

Wenn alle Skalenpunkte verbal umschrieben werden, hat dieses den Vorteil, dass die Interpretation der Skalenpunkte intersubjektiv einheitlicher erfolgt. Den Bewertenden wird vorgegeben, was unter den unterschiedlichen Stufen zu verstehen ist, da die Bedeutung in der Umschreibung ersichtlich ist. Allerdings ist es schwierig, eine passende Beschreibung für jede Stufe zu finden, welche äquidistante Abstände zwischen den Skalenstufen gewährleistet [61].

Auf Basis dieser theoretischen Kenntnisse wird das Klassifizierungsschema abgeleitet. Bei dem hier verwendeten Klassifizierungsschema soll eine Kombination aus beiden Bezeichnungen (verbal und numerisch) angewendet werden, um beide Vorteile nutzbar zu machen. Die Stufen werden mit Zahlen markiert und zudem mit Worten beschrieben, um die Bedeutung der einzelnen Stufen direkt herauszustellen.

Die Zustandsbewertung bei der Inspektion soll dabei nach einem vierstufigen Bewertungsschema erfolgen. Dadurch wird die Bildung einer Mittelkategorie vermieden und die Skalenbreite entspricht den theoretischen Empfehlungen.

Auch ein Vergleich praktizierter Zustandsbewertung in anderen Einsatzbereichen zeigt, dass eine vierstufige Bewertungsskala häufig angewendet wird, um den Zustand zu ermitteln. So werden für die Zustandsbewertung von Wohngebäuden in [63] vier allgemeine Abnutzungsstufen vorgeschlagen, die auch in weiteren verschiedenen Methoden zur Zustandsbeschreibung [64, 65] angewendet werden. Ebenso wird auch in mehreren Veröffentlichungen, die die Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel behandeln, ein vierstufiges Bewertungsschema für Inspektionsergebnisse verwendet [9, 66].

Ein vierstufiges Bewertungsschema und die theoretischen Vorüberlegungen werden auch durch eine eigene und bereits in [67] durchgeführte Vergleichsanalyse von verschiedenen Bewertungsschemen gestützt. In [67] sind drei verschiedene Bewertungsschemen in Feldversuchen an Ortsnetzstationen getestet worden. Die Bewertung erfolgte an ausgewählten Stationen durch das gleiche Instandhaltungspersonal. Anschließend sind die Streuung und die Abweichung zwischen den von verschiedenen Bewertenden erzielten Inspektionsergebnissen für jedes Bewertungsschema analysiert worden. Die Analyse der Streuung sowie der Abweichung der Bewertungspunkte hat gezeigt, dass das Bewertungsschema mit der Skala 0 - 4 die kleinsten Werte bezüglich der Abweichungen lieferte (siehe Abbildung 8). Daher wurde dieses Bewertungsschema ausgewählt, um möglichst objektive Ergebnisse zu generieren.

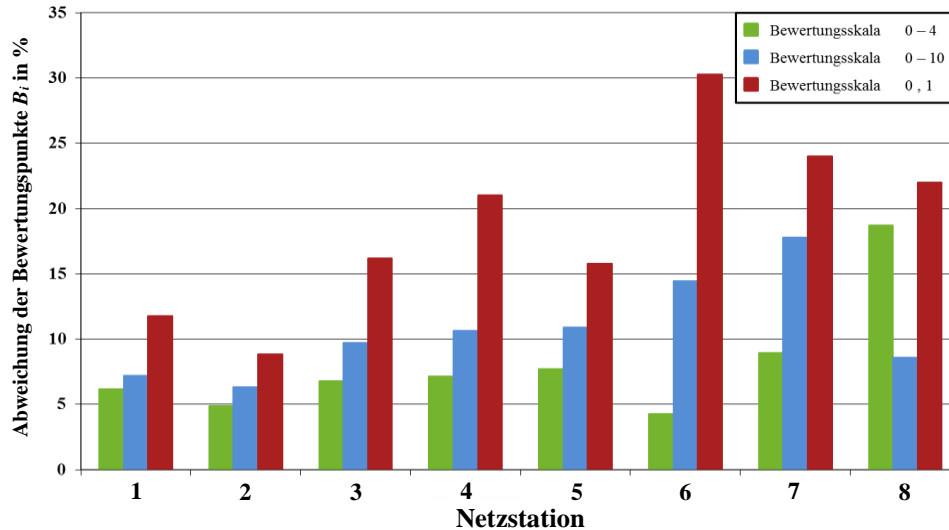


Abbildung 8 – Vergleichsanalyse der Abweichung von Bewertungspunkten ([9], aus [67])

Die Zustandsbeurteilung der einzelnen Inspektionpunkte erfolgt nach einem vorgegebenen vierstufigen Bewertungsschema für festgestellte Mängel sowie nach zwei zusätzlichen Stufen, falls diese Bewertung während der Inspektion nicht abgegeben werden kann. Die vier Stufen werden hinsichtlich der Fristigkeit der Mängelbeseitigung (auch in Anlehnung an [9]) wie folgt bezeichnet und bedeuten (Tabelle 1):

Tabelle 1 – Klassifizierungsschema für festgestellte Mängel

$B_i$	Beschreibung
1	<b>Keine erkennbaren Mängel</b> Der Inspektionpunkt zeigt keine erkennbaren Mängel. Der ordnungsgemäße Betrieb ist sichergestellt und es müssen keine Instandhaltungsmaßnahmen veranlasst werden.
2	<b>Langfristige Mängelbeseitigung erforderlich</b> Es handelt sich um einen Mangel geringen Ausmaßes und dieser wird voraussichtlich nicht den ordnungsgemäßen Betrieb bis zur nächsten Inspektion beeinträchtigen. Er wird daher lediglich dokumentiert und es erfolgt kein vorzeitiger Instandhaltungsauftrag.
3	<b>Kurzfristige Mängelbeseitigung erforderlich</b> Es handelt sich um einen Mangel erheblichen Ausmaßes. Eine differenziertere Beschreibung des Mangels oder eine entsprechende Instandhaltungsempfehlung sind zwingend erforderlich, um einen folgenden Instandhaltungsauftrag generieren und eine Instandhaltung bis spätestens zur nächsten Inspektion durchführen zu können.
4	<b>Sofortige Mängelbeseitigung erforderlich</b> Es handelt sich um einen Mangel kritischen Ausmaßes. Ein Instandhaltungsauftrag wird unverzüglich generiert und eine Instandhaltung muss zeitnah durchgeführt werden. Gegebenenfalls ist bereits die Einleitung der Mängelbeseitigung bzw. die Durchführung von Sicherungsmaßnahmen vor Ort (z. B. wegen Personengefährdung) umgehend erforderlich. Eine differenziertere Beschreibung des Mangels oder eine entsprechende Instandhaltungsempfehlung sind zwingend anzugeben.
0	<b>Durchführung der Inspektion nicht möglich</b>
Ø	<b>Betriebsmittel nicht vorhanden</b>

Die Bedeutung von Lang- und Kurzfristigkeit ist dabei abhängig vom gewählten Inspektionszyklus des Netzbetreibers. Denn die Bewertung eines festgestellten Mangels, ob dieser den ordnungsgemäßen Betrieb bis zur nächsten Inspektion nicht beeinträchtigt ( $B_i = 2$ ) oder bis wann die IH-Maßnahme spätestens durchzuführen ist ( $B_i = 3$ ), wird durch den Inspektionszyklus (bspw. jährlich oder vierjährig) beeinflusst. Zudem werden noch zwei weitere Beurteilungsmöglichkeiten ergänzt. Falls eine Inspektion am Objekt nicht durchzuführen ( $B_i = 0$ ) oder das Betriebsmittel nicht vorhanden ( $B_i = \emptyset$ ) ist, kann eine Zustandsbewertung nicht vorgenommen werden.

Aufgrund der universellen Checkliste sind einige Inspektionpunkte bei zu inspizierenden MS-Betriebsmitteln nicht vorhanden. Das Nicht-Vorhandensein kann durch die Bauform (z. B. Gebäude- oder Maststation) oder des Typs (z. B. luft- oder gasisolierte Schaltanlage; Gießharz- oder Öltransformator) begründet sein. Bei Gießharztransformator fallen bspw. alle ölrelevanten Inspektionpunkte raus. In solchen Fällen wird entsprechend die Stufe  $B_i = \emptyset$  ausgewählt. Wird eine betriebsmittelspezifische Checkliste eingesetzt, ist diese Stufe  $B_i = \emptyset$  nicht erforderlich, bei der universellen Checkliste dagegen schon. Stellt das Nicht-Vorhandensein dagegen einen Mangel dar (z. B. fehlende Schaltstange oder Warnschilder, fehlender Berührungsschutz bei einer NS-Verteilung), muss die entsprechende Fristigkeit der Mängelbeseitigung ( $B_i = 2, 3$  oder  $4$ ) bewertet werden.

Ist die Inspektion dagegen an einem vorhandenen Objekt oder Bauteil nicht durchzuführen, wird die Stufe  $B_i = 0$  ausgewählt. Bspw. können die Sammelschienen, Durchführungen und Schaltgeräte bei einer gasisolierten MS-Schaltanlage durch die metallische Kapselung keiner visuellen Inspektion unterzogen werden. Es können somit keine Mängel an diesen Inspektionpunkten erkannt werden, jedoch kann auch keine Aussage über den ordnungsgemäßen Zustand abgegeben werden.

Das Klassifizierungsschema alleine kann aufgrund der Vielzahl an möglichen, auftretenden Mängeln automatisiert keine Instandhaltungsmaßnahmengenerierung für den Asset Service initiieren, da die explizit erforderliche Gegenmaßnahme je nach Mangel sehr unterschiedlich sein kann. Daher wird ein Bemerkungsfeld bei jedem Inspektionpunkt ergänzt, in dem eine differenzierte Beschreibung eines Mangels möglich ist. Vordefinierte Maßnahmenkataloge und Auswahllisten mit häufigen IH-Maßnahmen unterstützen das Instandhaltungspersonal vor Ort. Sollte dieses nicht ausreichen, können über einen Freitext zusätzliche Kommentare abgegeben werden. Mobile Datenerfassungslösungen ermöglichen auch die Aufnahme von Schadensbildern und deren konkrete, automatische Zuordnung zu dem entsprechenden Inspektionpunkt. Im Nachgang kann somit durch den Anlagenverantwortlichen die Bewertung des Mangels nachvollzogen und ein Instandhaltungsauftrag entsprechend der bewerteten Fristigkeit generiert werden.

### 3.2.3 Gewichtungsfaktoren

Neben dem Klassifizierungsschema und den dazugehörigen Bewertungspunkten stellen die Gewichtungsfaktoren bei der Aggregationssystematik eine zentrale Größe dar, um die einzelnen

Bewertungspunkte geeignet miteinander zu kombinieren und einen Gesamtzustandsindex für das komplette Betriebsmittel zu erhalten. Nicht alle Inspektionpunkte haben die gleiche Relevanz für einen zustandsbeschreibenden Gesamtindex, da sie einen unterschiedlichen Einfluss auf die Betriebsmittelzuverlässigkeit oder auf die Gefährdung von Personen und der Umgebung haben. Zudem verursachen sie unterschiedliche Maßnahmenkosten.

Deshalb werden die Inspektionpunkte unterschiedlich stark gewichtet ( $G_i$  bzw.  $G_{\text{HIT},a}$ ), indem ihnen ein Gewichtungsfaktor zugewiesen wird. Neben der fachgerechten Bewertung der einzelnen Inspektionpunkte (siehe Kapitel 4) stellt die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren eine wesentliche Herausforderung dar und spiegelt das Know-how eines Netzbetreibers wider. Um eine möglichst objektive und nachvollziehbare Zustandsbewertung zu erzielen, stellt sich die Frage, wie bei der Vielzahl von Parametern die Gewichtungsfaktoren bezüglich ihrer absoluten Höhe und ihres Verhältnisses zueinander gebildet werden.

Bei der Bildung der Gewichtungsfaktoren handelt es sich um eine Problemstellung multi-kriterieller Natur. Deshalb wird die Problemstellung zunächst in verschiedene (Unter-) Kriterien zerlegt.

Die Gewichtung erfolgt zuerst anhand der drei folgenden Kriterien:

- Anfallende Maßnahmenkosten
- Einfluss auf die Betriebsmittelzuverlässigkeit
- Gefährdungspotenzial (Personen und Umgebung; juristische Folgen)


Diese Kriterien können subjektive wie auch objektive Faktoren berücksichtigen und es werden sowohl qualitative als auch quantitative Informationen mit einbezogen. Objektive Faktoren, die sich aus quantitativen Informationen (Kosten, Statistiken, historischen Daten etc.) ableiten lassen, sind dabei in der Regel zu bevorzugen, weil sie nachvollziehbar sind. Da jedoch die Datengrundlage und -quellen häufig nicht in adäquater Form und Differenzierung vorliegen, werden qualitative Informationen (z. B. Expertenbefragungen) mit hinzugezogen, die jedoch einem subjektiven Einfluss bei der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren unterliegen. Die Einschätzung unter dem Kriterium Gefährdungspotenzial lässt sich bspw. schwierig anhand quantitativer Daten durchführen und beruht meist rein auf qualitativen Informationen. Es werden daher für die einzelnen Kriterien zusätzlich entsprechende, unabhängige Expertenbefragungen durchgeführt. Die Experten decken dabei die unterschiedlichen Bereiche Instandhaltung, Netzbetrieb und Asset Management ab, um die jeweiligen unterschiedlichen Interessenlagen der einzelnen Bereiche abzubilden.

Um die Gewichtungsfaktoren systematisch auf Basis der Expertenbefragungen festzulegen, können Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung solche Problemstellungen strukturieren und lösen. Daher wird eine Variante des Analytic Hierarchy Process [68], das auf dem Grundprinzip des paarweisen Vergleichs funktioniert, angewendet, um die nicht zu

vermeidende Subjektivität bei der Gewichtungvergabe zu reduzieren [57]. Dabei wird jeder Parameter mit allen anderen Parametern verglichen. Es ist jeweils zu beurteilen, ob ein Parameter „wichtiger“, „gleich wichtig“ oder „weniger wichtig“ als ein anderer Parameter ist. Mit der Methode des paarweisen Vergleichs lassen sich schwierige Bewertungen systematisch und objektiver durchführen als bei direkter Gewichtung der Parameter. Die Festlegung der Faktoren wird dokumentiert und ist so auch später nachvollziehbar. Eine ähnliche Methode stellt auch die Bewertungsmatrix dar, die ebenfalls auf dem Prinzip des paarweisen Vergleichs basiert [12, 57].

Die Methode erstellt eine Prioritätsrangfolge der einzelnen Inspektionpunkte innerhalb eines Hauptinspektionsteils. Ausgehend von einer bestimmten Fragestellung, z. B. „Welcher der Inspektionpunkte übt bei einem vorliegenden Mangel einen größeren Einfluss auf den Zustandsindex aus?“ werden die einzelnen Inspektionpunkte jeweils paarweise mit den anderen verglichen. Der Inspektionpunkt, der „wichtiger“ ist, erhält eine höhere Anzahl an Punkten, der unwichtigere eine geringere. Sind beide Inspektionpunkte gleich wichtig, erhalten beide gleich viele Punkte. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt bis alle Inspektionpunkte eines Hauptinspektionsteils direkt miteinander verglichen worden sind. Anschließend wird für jeden Inspektionpunkt die Summe der Punkte ermittelt und der mit der höchsten Summenpunktzahl stellt den wichtigsten Inspektionpunkt dar bzw. hat den größten Einfluss auf den jeweiligen Hauptinspektionsteil. Somit ergibt sich als Ergebnis eine Prioritätenrangfolge der Einzelinspektionpunkte innerhalb eines Hauptinspektionsteils. Die Aufstellung dieser Rangfolge der gegebenen Inspektionpunkte hinsichtlich eines bestimmten Kriteriums ist das primäre Ziel.

Das prinzipielle Verfahren zur Ermittlung einer Prioritätsrangfolge veranschaulicht die folgende Abbildung 9 am Beispiel der Hauptinspektionsteile:



wichtiger als

0 nein  
1 gleich  
2 ja

		A	B	C	D	E	F	vorläufig		gewählt	
		Außenanlage der Station	Innenraum der Station	MS-Schaltanlage	Verteiltransformator	NS-Verteilung	Zubehör/Ausrüstung	$\Sigma$	G <sub>HIT</sub>	G <sub>HIT</sub>	
A	Außenanlage der Station	1	0	0	0	0	2	3	8,3%	8%	
B	Innenraum der Station	2	1	0	0	0	2	5	13,9%	12%	
C	MS-Schaltanlage	2	2	1	2	2	2	11	30,6%	35%	
D	Verteiltransformator	2	2	0	1	1	2	8	22,2%	20%	
E	NS-Verteilung	2	2	0	1	1	2	8	22,2%	20%	
F	Zubehör/Ausrüstung	0	0	0	0	0	1	1	2,8%	5%	
								$\Sigma$	36	100%	

Abbildung 9 – Prinzipielle Bewertungsmatrix der Methode des paarweisen Vergleichs



Diese Methodik wird unabhängig von mehreren Experten von verschiedenen Verteilnetzbetreibern angewendet, um die jeweiligen Rangfolgen zu ermitteln. Um nun die abschließenden Gewichtungsfaktoren aus den Prioritätenrangfolgen abzuleiten, werden im ersten Schritt die jeweiligen Summenpunktzahl für die Hauptinspektionsteile betrachtet und in Relation zur Gesamtzahl gesetzt. Diese Prozentwerte geben eine erste Näherung wieder. Anschließend werden die Prozentwerte noch aus Expertensicht verifiziert und ihr Verhältnis zueinander analysiert, wodurch leichte Anpassungen durchgeführt werden können. Entweder werden diese finalen Gewichtungsfaktoren nun als Prozentwerte verwendet oder noch in Gewichtungsfaktoren (z. B. einheitliche Skala 1 - 10) umgerechnet.

An einem Beispiel soll die beschriebene Vorgehensweise der Ermittlung der Gewichtungsfaktoren exemplarisch dargelegt werden. Hier soll die MS-Schaltanlage einer Netzstation präsentiert werden (Tabelle 3). Die Gewichtung erfolgt zuerst anhand der drei Unterkriterien.

#### **Kriterium: Anfallende Maßnahmenkosten**

Die Gewichtung erfolgt anhand des durchschnittlichen Kostenaufwands für die anstehenden Instandhaltungsmaßnahmen an einer mangelbehafteten Komponente. Bspw. hat ein Schaden an den MS-Schaltgeräten höhere Kosten zur Folge als eine Reinigungsmaßnahme (Sauberkeit). Daher werden für jeden Inspektionsspunkt die durchschnittlichen Kostenangaben zu den einzelnen Instandsetzungsmaßnahmen, die an jedem Inspektionsspunkt ergriffen werden können, abgeschätzt. Die Kosten einer Instandsetzungsmaßnahme setzen sich aus den Material- und Mitarbeiterereinsatzkosten, den Kosten für erforderliche Schaltmaßnahmen, Aggregatseinsatz etc. zusammen. Anschließend werden den Inspektionsspunkten nach einer Skala, wie z. B. in Tabelle 2 gezeigt, die Gewichtungsfaktoren von 1 - 10 zugeordnet. Die Skala ist nichtlinear aufgebaut, weil viele Instandhaltungsmaßnahmen an den Inspektionsspunkten (Beschriftung erneuern, Wechsel HH-Sicherung, Reinigungsmaßnahme, Kabelendverschlüsse nachfüllen) i. d. R. einen geringen Kostenaufwand im Vergleich zu den Kosten für die Mängelbeseitigung an MS-Schaltgeräten verursachen. Um somit nur kleine Gewichtungsfaktoren zu vermeiden und die Differenzierbarkeit untereinander zu erhöhen, wird die Skala in Tabelle 2 zugrunde gelegt.

**Tabelle 2 – Gewichtungsfaktoren nach anfallenden Maßnahmenkosten**

Anfallende Maßnahmenkosten [€]	Gewichtungsfaktor
0 – 99	1
100 – 249	2
250 – 499	3
500 – 999	4
1.000 – 1.499	5
1.500 – 2.499	6
2.500 – 4.999	7
5.000 – 7.499	8
7.500 – 9.999	9
> 10.000	10

**Kriterium: Einfluss auf die Betriebsmittelzuverlässigkeit**

Die Gewichtung erfolgt an dem Kriterium, welchen Einfluss auf die Betriebsmittelzuverlässigkeit ein einzelner Inspektionsspunkt ausübt. Dieses Kriterium spiegelt das Ausfallrisiko wider, also wie hoch das Risiko ist, dass dieser Mangel auch zu einer Beeinträchtigung des ordnungsgemäßen Betriebs der Gesamtstation führt. Dieser Einfluss kann aus [3] oder netzbetreiberindividuellen Schadens- und Störungsstatistiken abgeleitet werden. Allerdings liegen diese Statistiken häufig nicht in ausreichender Qualität und Differenzierung gemäß der Inspektions-Checkliste vor, so dass für eine Vielzahl von Inspektionsspunkten die Auswirkungen eines Mangels auf das Ausfallrisiko der Gesamtstation abgeschätzt werden muss. Diese Abschätzungen werden durch mehrere Experten auf Basis des paarweisen Vergleichs getroffen, wodurch wieder ein subjektiver Einfluss zu beachten ist. Die Beurteilung erfolgt dabei abschließend in Relation zu den Werten, die aus den Statistiken bestimmt werden konnten. So erhalten die Schaltgeräte die höchste Gewichtung, da ein dortiger Mangel das größte Ausfallrisiko für den Betrieb der Gesamtstation darstellt und zudem eine Schaltmaßnahme ggfs. verhindert. Ein defekter Kurzschlussanzeiger oder eine fehlerhafte Beschriftung haben dagegen keine Auswirkungen auf den ordnungsgemäßen (elektrischen) Betrieb der Netzstation.

**Kriterium: Gefährdungspotenzial (Personen und Umgebung; juristische Folgen)**

Die Gewichtung auf Basis des Kriteriums „Gefährdungspotenzial“ lässt sich nur schwierig anhand quantitativer Daten durchführen. Es wird von allen Komponenten erwartet, dass von ihnen keine Gefährdung ausgeht und sie sicher ausgeführt sind. Ein Schaden an Personen oder der Umgebung darf auf keinen Fall eintreten und muss schon im Vorfeld vermieden werden. Diese Vorkehrungen werden bereits bei der Konstruktion sowie in Arbeitsanweisungen berücksichtigt. Es muss also das Risiko einer Gefährdung abgeschätzt werden. Diese Einschätzung beruht auf qualitativen Informationen und daher wird wieder die Befragung der Experten auf Basis der vorgestellten Methode des paarweisen Vergleichs durchgeführt. Es muss dabei beachtet werden, dass das Verständnis dieses Kriteriums unterschiedlich ausgelegt werden kann und daher die Werte zwischen den befragten Experten deutlich variieren können. Beispielsweise ist eine Erdung aller metallischen Bauteile vorgeschrieben (hohe Gewichtung), eine direkte Gefährdung übt dieser Inspektionsspunkt allerdings nur aus (niedrige Gewichtung), wenn auch an anderen Komponenten ein Mangel, d. h. ein zeitlich überlappender Mangel, vorliegt. Im Vorfeld der Anwendung des paarweisen Vergleichs muss also geklärt werden, dass ein einheitliches Verständnis der Kriterien vorliegt.

**Gesamtgewichtungsfaktoren**

Nachdem die Gewichtung anhand der drei Unterkriterien erfolgt ist, ergeben sich die verwendeten Gesamtgewichtungsfaktoren über den Mittelwert (Tabelle 3). Anstatt des Mittelwerts besteht aber für den Asset Manager grundsätzlich auch die Möglichkeit, ein individuelles Verhältnis nach seinen Präferenzen zwischen den drei Unterkriterien einzustellen, um bei der Auswertung den

Fokus eher auf den Bereich Kosten, Auswirkung oder Gefährdung zu legen (beispielhaft 70:20:10). Diese Auswahl muss lediglich einmalig eingestellt werden und wird dann durchgängig verwendet.

**Tabelle 3 – Gewichtungsfaktoren am Beispiel MS-Schaltanlagen (Netzstation)**

Gewichtungsfaktoren MS-Schaltanlage	Gewichtung Kosten	Gewichtung Auswirkung	Gewichtung Gefährdung	Gewichtung gesamt (Mittelwert)
Sammelschiene, Isolatoren, Stützer	4	7	6	6
Durchführungen	4	8	4	5
MS-Schaltgeräte	10	10	10	10
Kugelbolzen/Erdungsschalter	4	2	8	5
HH-Sicherungen	2	7	5	5
SF <sub>6</sub> -Gasdruck (Manometer)	4	6	7	6
Gehäuse, Kapselung	6	2	3	4
Erdung Gehäuse	1	2	5	3
MS-Kabelendverschlüsse	6	8	6	7
kap. Spannungsprüfer	2	2	5	3
Kurzschlussanzeiger	4	0	2	2
Sauberkeit (MS-Schaltanlage)	4	2	1	2
Beschriftung	1	0	3	1

### 3.3 Ergebnisdarstellung

Durch das Bewertungsmodell lässt sich aus den einzelnen Inspektionen ein Gesamtzustandsindex für das MS-Betriebsmittel ermitteln. Der aggregierte Zustandsindex erlaubt somit eine Klassifizierung der Vielzahl von MS-Betriebsmitteln eines Verteilnetzbetreibers und eine Priorisierung der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen. Dadurch wird ein Vergleich innerhalb einer Betriebsmittelgruppe (z. B. Netzstationen) ermöglicht. Bei der Zustandsbewertung dieses MS-Betriebsmittelskollektivs entsteht eine priorisierte Reihenfolge, die eine fundierte Basis für optimierte Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen darstellt und so das immer knapper werdende Instandhaltungs- und Erneuerungsbudget zielgerichtet und optimal verteilt. Außerdem könnte durch das auf das große Kollektiv an MS-Betriebsmitteln angewendete Verfahren versucht werden, in absehbarer Zeit das Alterungsverhalten unter den aktuellen Betriebsbedingungen abzuschätzen [9]. Denn gerade die Betriebs- und spezifischen Umweltbedingungen, die auf die elektrischen Betriebsmittel direkt oder indirekt wirken bzw. gewirkt haben, haben Auswirkungen auf den Zustand eines elektrischen Betriebsmittels.

Um die ermittelte Zustandsindices in der Praxis besser einordnen zu können, wird das Ergebnis der Zustandsbewertung zusätzlich klassifiziert in Form von Ampelwerten „rot“, „gelb“ und „grün“. Dadurch soll ein Hinweis gegeben werden, in welchem Zustand sich das Betriebsmittel im Vergleich zum gesamten Mengengerüst von inspizierten Betriebsmitteln befindet und welche Schritte als Konsequenz daraus als nächstes empfohlen werden.

Ein Zustandsindex von  $Z_{\text{norm}} = 100\%$  (enormer Instandhaltungsbedarf erforderlich) wird sinnvoll nicht erreicht. Es müsste jeder, einzelne Inspektionsspunkt mit der Fristigkeit „sofortige Mängelbeseitigung“ bewertet werden. In der Regel werden nur an einigen, wenigen Inspektionsspunkten Mängel festgestellt und dann die Fristigkeit zur Mängelbeseitigung bewertet. Somit treten bei vollständig ausgefüllten Inspektionsprotokollen höhere Zustandsindices selten auf und die meisten Indices liegen im niedrigen Prozentbereich. Entscheidend dabei ist es, die als „schlecht“ bewerteten Betriebsmittel zu identifizieren, da dort ein erhöhter Handlungsbedarf besteht. Abbildung 10 zeigt einen qualitativen Verlauf der Häufigkeitsverteilung der Zustandsindices.

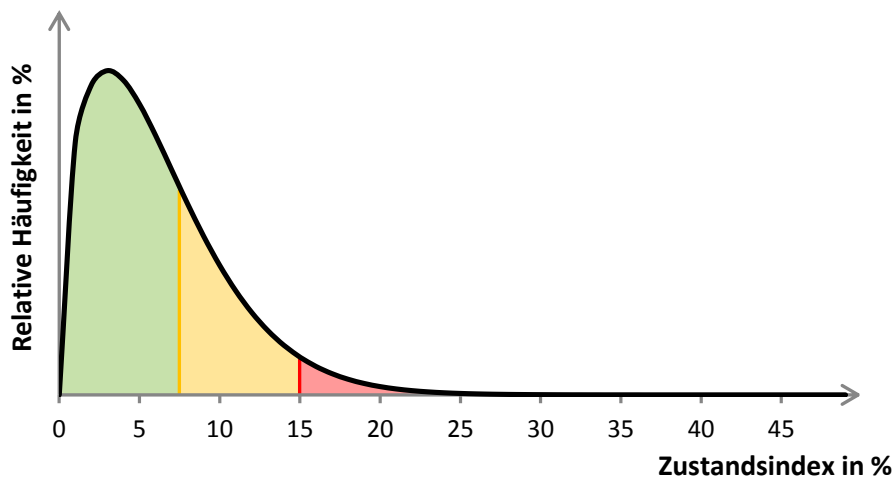





Abbildung 10 – Qualitative Häufigkeitsverteilung der Zustandsindices

Dieser Verlauf und die rechtsschiefe Verteilung der Zustandsindices haben sich in zahlreichen Feldtests bestätigt. Somit ist eine äquidistante Einteilung über den gesamten Bereich nicht zielführend. Um eine optimale Einteilung der Klassen anzunähern, kann der größte ermittelte Zustandsindex von inspizierten Betriebsmitteln als Obergrenze angesehen werden. Ausgehend von diesem Wert erfolgt dann eine äquidistante Einteilung der Klassen zwischen  $Z_{\text{norm}} = 0\%$  und der Obergrenze (z. B.  $Z_{\text{norm,max}} = 27,5\%$ ).




Des Weiteren kann auch eine Einteilung nach einer zur Verfügung stehenden Budgetgrenze oder anderweitiger Vorgaben vom Asset Manager durchgeführt werden, um einen Vergleich zum gesamten Mengengerüst von inspizierten Betriebsmitteln herzustellen. Beispielsweise sollen nur Instandhaltungsmaßnahmen an 20 % der am „schlechtesten“ bewerteten Betriebsmittel durchgeführt werden, unter der Voraussetzung, dass keine sofortige Mängelbeseitigung erforderlich ist (K.O.-Kriterium). Diese werden dann als „rot“ bewertet. Als Erweiterung und Differenzierung können die Grenzwerte eines untersuchten Kollektivs auch auf Basis von Quantilen vergeben werden. Ein Quantil definiert einen bestimmten Teil einer geordneten Datenmenge. Allgemein ist das  $p$ -Prozent-Quantil der Wert, bei dem mindestens  $p$  Prozent der Daten kleinere oder gleiche und mindestens  $(1-p)$  Prozent der Daten größere oder gleiche Werte annehmen [69]. So können für die Ampelwerte  $(1-p)$  Prozent-Quantile (z. B. rot:  $p = 10\%$ , gelb:  $p = 30\%$ ) vorgegeben und die zugehörigen Grenzwerte ermittelt werden.

Die Ergebnisse aus Simulationen und Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass zur Klassifizierung die Ampelwerte „rot“, „gelb“ und „grün“ nach folgenden Klassengrenzwerte sinnvoll festgelegt werden können. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Grenzwerte von den verwendeten Gewichtungsfaktoren und dem Bewertungsmodell abhängen und daher keine Allgemeingültigkeit besitzen. Sie sind individuell zu definieren.

-  „Grün“ (bspw. Zustandsindex von 0 bis 7,5 %)  
Es liegen im Allgemeinen keine größeren Mängel in den stark versorgungszuverlässigkeitsrelevanten Hauptinspektionsteilen vor, lediglich relativ unkritische Mängel an nicht stark gewichteten Inspektionenpunkten treten auf. Allerdings muss dieses bei einem eventuell erforderlichen Instandhaltungsauftrag an den Einzelkomponenten berücksichtigt werden. Das Betriebsmittel befindet sich also in einem guten Zustand. Die Inspektionsintervalle können im Rahmen der gesetzlichen Möglichkeiten sinnvoll angepasst werden, zyklische Wartungsarbeiten können nach hinten verschoben werden.
-  „Gelb“ (bspw. Zustandsindex 7,5 bis 15 %)  
Es liegen bereits Mängel vor, die eine erhöhte Dringlichkeit zur Mängelbeseitigung aufweisen. Das Betriebsmittel befindet sich in einem mittleren Zustand. Die als mangelbehaftet bewerteten Komponenten müssen genauer analysiert werden und zyklische Wartungsarbeiten oder sogar Instandsetzungsmaßnahmen sollten entsprechend der bewerteten Fristigkeit zur Mängelbeseitigung durchgeführt werden.
-  „Rot“ (bspw. Zustandsindex von 15 bis 100 %)  
Das Betriebsmittel befindet sich in einem schlechten Zustand. Es liegen meist bereits mehrere als mangelbehaftet bewertete Komponenten vor, die auch eine hohe Dringlichkeit aufweisen. Die Mängel sind zu analysieren und die zyklischen Wartungsarbeiten oder sogar Instandsetzungsmaßnahmen sollten entsprechend der bewerteten Fristigkeit zur Mängelbeseitigung durchgeführt werden. Es besteht also ein dringender Instandhaltungsbedarf.

Neben der Klassifizierung der Zustandsindices kann die Priorisierung der Instandhaltungstätigkeiten auch rein auf Basis einer priorisierten Liste erfolgen. Es wird also eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie angewendet und der technische Zustand der Anlagen bestimmt die weiteren Aktivitäten. Dieses wird in der folgenden Tabelle 4 an einem Beispiel dargestellt:

Tabelle 4 – Priorisierte Liste einer Auswahl von Betriebsmitteln

Name	Z <sub>norm</sub>	Priorität		
MS-BE-14	27,5%	1		Zustandsindex von 15 bis 100 %
MS-BE-11	17,8%	2		
MS-BE-5	13,1%	3		Zustandsindex von 7,5 bis 15 %
MS-BE-10	10,7%	4		
MS-BE-4	9,0%	5		
MS-BE-9	8,5%	6		
MS-BE-7	6,0%	7		Zustandsindex von 0 bis 7,5 %
MS-BE-1	5,2%	8		
MS-BE-6	4,5%	9		
MS-BE-13	2,6%	10		
MS-BE-8	2,3%	11		
MS-BE-15	1,6%	12		
MS-BE-3	1,2%	13		
MS-BE-12	0,5%	14		
MS-BE-2	0,0%	15		

Der technische Zustand eines Betriebsmittels stellt die Basis aller darauf aufsetzenden Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen dar. Für das Asset Management ist der Zustandsindex als Basisinformation für strategische Analysen und als Entscheidungsgrundlage in der Instandhaltung eine zentrale Eingangsgröße. Für Erneuerungsentscheidungen bedeutet der technische Zustand eines Betriebsmittels auch eine wertvolle Information. Hierfür wird in Abschnitt 6.4 ein spezieller Erneuerungszustandsindex eingeführt, der nur die erneuerungswirksamen Inspektionpunkte bei der Aggregation berücksichtigt. Als Erweiterung für die Instandhaltung können neben dem technischen Zustand auch noch weitere Kenngrößen mit in den Entscheidungsprozess einfließen. Dieses führt dann zu einer zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltungsstrategie (*RCM*) oder risikoorientierten Instandhaltungsstrategie (*RBM*).

Als Exkurs zur weiteren Nutzung der Zustandsindices kommt bei der Anwendung der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltungsstrategie (*RCM*) neben dem technischen Zustand noch die Wichtigkeit der MS-Betriebsmittel auf Basis verschiedener Parameter und Verfahren in Betracht. Die Wichtigkeit spiegelt dabei eine Bewertung eines Betriebsmittels bezüglich dessen Einflusses auf die Versorgungszuverlässigkeit des gesamten Netzes wider und wird häufig mit Hilfe der probabilistischen Zuverlässigkeitsberechnung aus der Kenngröße „Nicht zeitgerecht gelieferte Energie“ abgeleitet [70, 71]. Allerdings ist die Quantifizierung nur mit Hilfe von entsprechenden Software-Tools und ausreichenden Eingangsdaten möglich. Da bei der Wichtigkeitsbewertung im Verteilungsnetz prinzipiell die gleichen Anforderungen an den Aufwand wie bei der Zustandsbewertung gelten und diese zudem sehr stark von der vorhandenen Daten- und Informationsgrundlage abhängig ist, kann der Wichtigkeitsindex alternativ über einfache, ausgewählte Parameter angenähert werden. Zu den Parametern, die im vereinfachten Verfahren in die Bestimmung des Wichtigkeitsindex einfließen, gehören die installierte Leistung, die Höchst-

last, die Netztopologie oder die übergeordnete Bedeutung der MS-Betriebsmittel im Netz. Aus den bewerteten Kriterien wird zur Kombination zum Wichtigkeitsindex der gewichtete Mittelwert bestimmt, wobei die Wichtigkeit mit Zunahme des Indexes steigt [1, 53]. In Abbildung 11 ist eine resultierende RCM-Grafik als Erweiterung der priorisierten Liste aus Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt. Die farblichen Bereiche haben weiterhin die vorgenannte Bedeutung. So sollten die MS-Betriebsmittel im roten Bereich zeitnah einer Wartung bzw. Instandsetzung unterzogen werden. Die MS-Betriebsmittel im grünen Bereich befinden sich hingegen in einem guten Zustand und die Wartungsintervalle können entsprechend gestreckt werden. Im gelben Bereich wird der Wartungszyklus beibehalten. Durch die zusätzliche Wichtigkeit kann bei einem MS-Betriebsmittel (Bsp. MS-BE-10) ein höherer Zustandsindex toleriert werden, weil der Einfluss dieses MS-Betriebsmittels auf die Versorgungszuverlässigkeit gering ist. Außerdem wird die Reihenfolge der Instandhaltungsmaßnahmen durch die kombinierte Betrachtung von Zustand und Wichtigkeit verändert. Über den Abstand eines Punkts (z. B. MS-BE-11) zu einer Gerade (2. Winkelhalbierende) wird die IH-Priorität ermittelt. Bei dieser Winkelhalbierenden haben Zustand und Wichtigkeit den gleichen Einfluss. Durch Veränderungen des Winkels der Geraden kann dieser Einfluss parametrisiert werden. Je größer der ermittelte Abstand, desto größer ist die IH-Priorität des MS-Betriebsmittels.

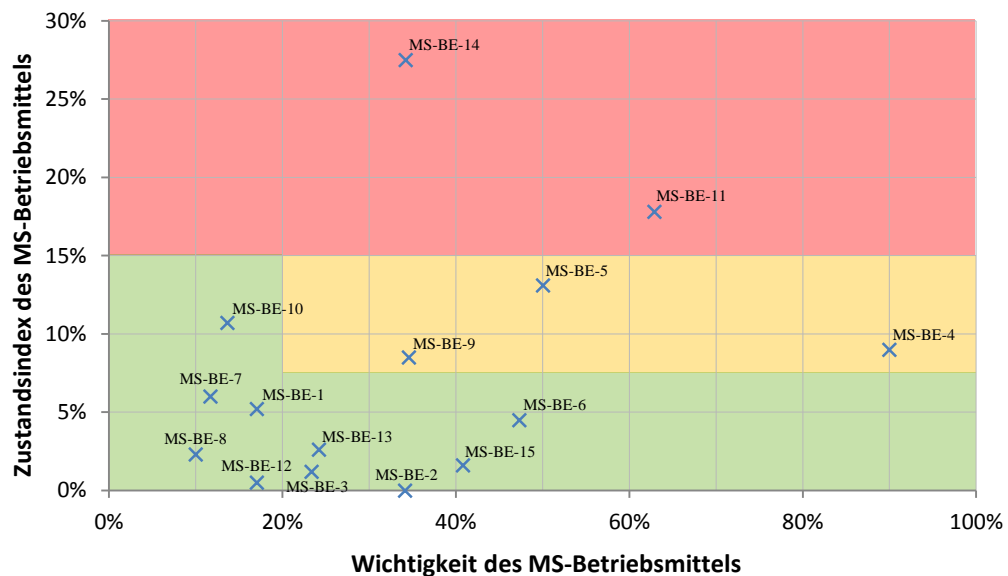


Abbildung 11 – RCM-Grafik einer Auswahl an MS-Betriebsmitteln

Neben der Betrachtung der übergeordneten Gesamtzustandsindizes können auch einzelne Inspektionenpunkte bzw. Komponenten im Detail analysiert werden. So lassen sich umfangreiche Schwachstellenanalysen und Quervergleiche auf Detailebene im Asset Management durchführen. Es kann identifiziert werden, ob ein erhöhter Zustandsindex nur auf den schlechten Zustand einer einzigen Hauptkomponente oder auf eine Vielzahl an kleineren Mängeln an Inspektionenpunkten zurückzuführen ist. Die verantwortlichen Treiber für einen schlechten Anlagenzustand und für

resultierende Instandhaltungsmaßnahmen werden aufgedeckt. Gerade, wenn nur eine einzige Hauptkomponente einen schlechten Zustand aufweist, kann eine gezielte Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt oder sogar eine Teilerneuerung dieser einen Hauptkomponente als geeignete Handlungsempfehlung resultieren.

Für den Asset Service steht dagegen die Ableitung von konkreten Instandhaltungsmaßnahmen im Vordergrund. Daher werden neben dem aggregierten Zustandsindex auch die aufgeführten Maßnahmen zur Mängelbeseitigung für die einzelnen Inspektionen aufgelistet und in einer zusammenfassenden Ergebnisdokumentation für das inspizierte Betriebsmittel archiviert. Auf Grundlage der Fristigkeit und der zugehörigen Maßnahmen kann durch den Anlagenverantwortlichen dann ein Instandhaltungsauftrag eingeleitet werden. Eine voll automatisierte Erzeugung von Handlungsempfehlungen ist dagegen nicht zielführend. Der Anlagenverantwortliche hat zudem noch mehrere Faktoren (Personaleinsatz, Ersatzteile, geplante Maßnahmen etc.) bei der Planung und Umsetzung von Instandhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Der Asset Service hat die Aufgabe, einen sicheren Betrieb und ordnungsgemäßen Zustand der elektrischen Anlagen zu gewährleisten (Verkehrssicherungspflicht). Daher erfordert die Bewertungsstufe „4 - Sofortige Mängelbeseitigung erforderlich“ eine gesonderte Betrachtung. Es handelt sich hierbei um einen Mangel kritischen Ausmaßes (ein sog. K.O.-Kriterium), da ein Instandhaltungsauftrag unverzüglich generiert und sehr zeitnah durchgeführt werden muss. Unverzüglich bedeutet gemäß §121 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) „ohne schuldhaftes Zögern“. Hieraus lässt sich aber noch kein exaktes Zeitlimit für die Behebung des Mangels ableiten, da ein gewisser Spielraum für besondere Umstände gelassen wird [72]. Es bestehen aber keine großen Beeinflussungsmöglichkeiten die erforderlichen Maßnahmen zeitlich zu verschieben oder sogar wegfallen zu lassen. Durch die Aggregationssystematik können aber einzelne, kritische Bewertungspunkte, speziell an niedrig gewichteten Komponenten, rausgemittelt werden. Um dieses zu umgehen, wird die erforderliche, unverzügliche Instandhaltungsmaßnahme farblich separat (rot) mit dem Zustandsindex ausgewiesen. Dadurch wird eine unverzügliche Instandhaltungsempfehlung für das Betriebsmittel, unabhängig vom Zustandsindex, direkt ersichtlich.



## **4 Subjektivität der Zustandsbewertung**

### **4.1 Ursachen der subjektiven Bewertung**

Die meisten Entscheidungen bei einer Inspektion vor Ort sind von heuristischer Natur und beruhen auf dem individuellen, z. T. langjährigen Erfahrungsschatz und Know-how des bewertenden Instandhaltungspersonals und damit einer nicht zu vernachlässigenden subjektiven Beurteilung [1, 9]. Damit ist natürlich die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt, wenn generell unterschiedliche Herangehensweisen und Bewertungsgrundlagen beim Instandhaltungspersonal vorliegen.

Durch die vorgestellte, standardisierte Vorgehensweise bei der Zustandsbewertung und die systematische Analyse und Auswertung der Inspektions-Checklisten wird angestrebt, eine möglichst große Objektivität zu erzielen und das umfangreich vorhandene Betriebsmittelwissen der Mitarbeiter zu quantifizieren. Bereits bei der Erstellung der Inspektions-Checklisten, der Definition des Klassifizierungsschemas und der Ermittlung der Gewichtungsfaktoren sind daher Verfahren und Methoden im Hinblick auf das Ziel der Objektivität anzuwenden. Die Subjektivität wird durch die systematische Vorgehensweise und Methoden zwar reduziert, doch basieren die auf dem Zustandsbewertungsverfahren ermittelten Ergebnisse bei rein visueller Inspektion weiterhin auf den individuellen Erfahrungen und Präferenzen des Instandhaltungspersonals. Die Ausprägung vorhandener Mängel kann unterschiedlich kritisch bewertet oder einzelne Mängel können bei einer Sichtkontrolle nicht erkannt werden.

Welchen Einfluss der individuelle Erfahrungsschatz des Instandhaltungspersonals bei den Inspektionen vor Ort auf das erzielte Ergebnis ausübt und welche Ursachen für eine subjektive Bewertung vorliegen, soll daher im Folgenden beschrieben und untersucht werden. In [9] ist angemerkt, dass ein subjektiver Einfluss bei der Inspektion bemerkbar und dieser zu berücksichtigen ist. Jedoch ist dieser Einfluss der Subjektivität nicht näher spezifiziert.

Wie in [53] am Beispiel von Netzstationen dargestellt, wird aus diesem Grund in einem ersten Feldtest das Verfahren an realen, in Betrieb befindlichen Netzstationen angewendet. Eine stichprobenartige Auswahl von 26 Netzstationen wird anhand der entwickelten Inspektions-Checkliste durch die Inspektoren begutachtet. Dabei sind Netzstationen mit unterschiedlichen Bauformen (Gebäudestationen, Kompaktstationen und Maststationen), Schaltanlagentypen, Ausstattungen und Alter ausgewählt.

Die ausgewählten Netzstationen werden im Rahmen des Feldtests jeweils von sechs Personen unabhängig voneinander einer Inspektion (Sichtkontrolle) unterzogen. Um speziell den subjektiven Einfluss bei der Bewertungsabgabe zu untersuchen, werden den durchführenden Personen das Klassifizierungsschema und das Zustandsbewertungsverfahren zunächst nur rudimentär erläutert. Auf eine ausführliche Darstellung, wie einzelne Inspektionspunkte und

typische Mängel zu bewerten sind, wird bewusst verzichtet. Die Bewertung soll nach eigenem Ermessen erfolgen. Außerdem kommen während des Feldtests erfahrene und junge Inspektoren unterschiedlicher Unternehmen zum Einsatz, um zu überprüfen, ob einheitliche Bewertungsgrundsätze und Erfahrungen bei der Inspektion vorliegen oder ob betriebsintern die subjektiven Einflüsse geringer ausfallen. Ziel dieses Feldtests ist also nicht die Überprüfung der Inspektoren, sondern die Bestimmung der Subjektivität bei der Inspektion.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Indices selbst für Netzstationen, die subjektiv als in einem schlechten Zustand bewertet werden, hier einen maximalen Wert von ca. 40 % annehmen (siehe Abbildung 12). Es lässt sich weiterhin erkennen, dass die sechs unterschiedlichen Inspektoren eine Netzstation fast nie einheitlich bewerten. In Abbildung 12 wird die Abweichung aufgrund des subjektiven Einflusses der Bewertungen explizit veranschaulicht. Dargestellt ist für jede Netzstation der Mittelwert der Bewertungen der sechs Inspektoren (roter Balken) sowie der minimale und maximale Index eines Inspektors. Die Spannweite der Indices wird dadurch ersichtlich (grüner Balken). Die Subjektivität bei der Bewertung hat offensichtlich einen maßgeblichen Einfluss auf den Zustandsindex. Der Zustandsindex ist somit stark abhängig von der Person, die die Bewertung durchführt, und keinesfalls objektiv. Damit ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse stark eingeschränkt, wenn generell unterschiedliche Herangehensweisen und Bewertungsgrundlagen beim Instandhaltungspersonal vorliegen.

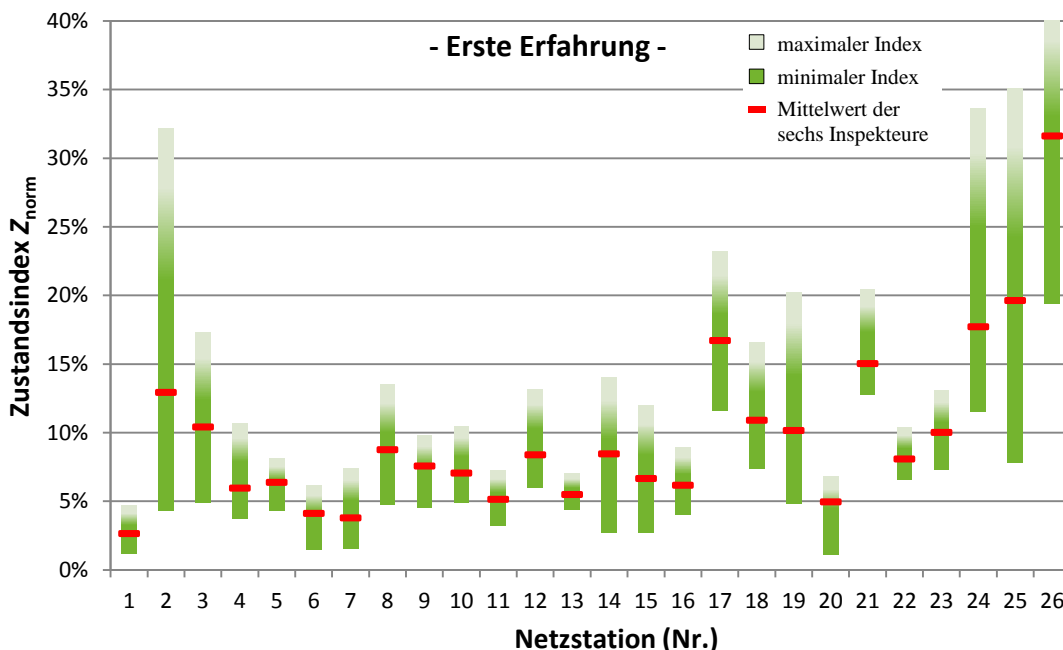


Abbildung 12 – Abweichung der Zustandsindices bei Netzstationen im ersten Feldtest

Es bestätigt sich also wie erwartet die Hypothese, dass die Bewertungsergebnisse weiterhin aufgrund der „rein“ visuellen Inspektion („Soft-Facts“) einer nicht zu vernachlässigenden subjektiven Beurteilung unterliegen [53]. So werden vorhandene, identifizierte Mängel bei einem Inspektionsspunkt je nach Inspektor nach unterschiedlicher Fristigkeit gemäß dem Klassifizierungsschema bewertet, weil unterschiedliche Erfahrungen und Bewertungsgrundsätze vorliegen.

Der Einfluss aufgrund unterschiedlicher Erfahrungen lässt sich an den untersuchten Netzstationen 24-26 in Abbildung 12 verdeutlichen. Bei diesen drei handelt es sich um Maststationen. Der Inspekteur, zu dessen täglichen Aufgaben u. a. auch die Arbeit an Maststationen gehört (viel Erfahrung), weist immer die minimalen Zustandsindices bei den drei Netzstationen auf. Die maximalen Indices resultieren dagegen durch einen anderen Inspekteur, der erstmalig im Rahmen des Feldtests eine solche Maststation bewertet (wenig Erfahrung). Maststationen sind bedingt durch Witterungseinflüsse häufig optisch in einem schlechteren Zustand, was jedoch keinen gravierenden Mangel darstellen muss. Die größten Abweichungen zwischen den Inspektoren über alle Netzstationen lassen sich bei den Inspektionen Berührungsschutz, MS-Kabelendverschlüsse, Ölauffangwanne und allgemein Sauberkeit feststellen. Teilweise werden auch einzelne Mängel an Inspektionen bei der Sichtkontrolle von einzelnen Inspektoren nicht erkannt bzw. nicht als gravierend bewertet. Da die entwickelte Bewertungssystematik nun auf diesen Einzelbewertungen aufsetzt und diese aggregiert, haben die subjektiven Einzelbewertungen natürlich einen deutlichen Einfluss auf den Zustandsindex der jeweiligen Netzstation, den es durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren gilt. Die erzielten Ergebnisse sind nicht zufriedenstellend, da keine valide Entscheidungsgrundlage bedingt durch die große Spannweite der Zustandsindices gegeben ist. Es stellt also unsicheres Wissen dar.

Geprägt von individuellen Erfahrungen, Einschätzungen und Einstellungen erfolgt die subjektive Wahrnehmung und Verarbeitung eines Mangels durch die einzelnen Personen und die anschließende Einordnung nach der Prognose, wie lange das Betriebsmittel seine Funktion in Zukunft noch ausüben kann, gemäß dem einheitlichen Klassifizierungsschema. Das Instandhaltungspersonal setzt also seine Sinneswahrnehmungen bei der Detektion von potenziellen Mängeln und bei der Zustandsbewertung ein (Wahrnehmen) und gibt auf dieser Grundlage eine Erwartung ab (Urteilen). Beide Prozesse unterliegen einem subjektiven Einfluss und werden nun expliziter betrachtet. Für weiterführende Erläuterungen sei auf die im Folgenden angegebenen Quellen verwiesen.

Allgemein lassen sich bei der Informationsverarbeitung des Menschen nach [73] verschiedene Stufen unterscheiden. Das Wahrnehmen und das Urteilen sind zwei dieser Stufen und gliedern sich, wie in Abbildung 13 ersichtlich, in den Prozess der Informationsverarbeitung ein:

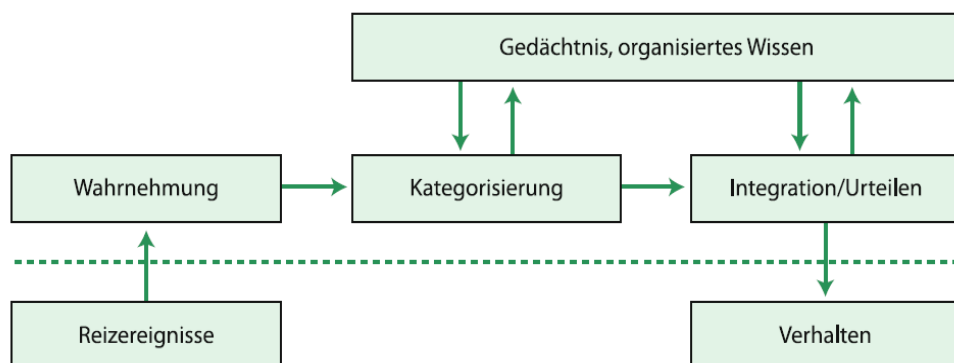


Abbildung 13 – Die Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung (nach Bless, Fiedler & Strack) [74]

**Definition Wahrnehmung:**

„Wahrnehmung ist ein Prozess, mit dem wir die Informationen, die von den Sinnessystemen bereitgestellt werden, organisieren und interpretieren.“ [75]

Über die Sinneswahrnehmungen erfährt der Mensch, was in seiner Umwelt passiert. Die physikalische Welt besteht aus Atomen, Molekülen, Schwingungen usw., die Signale/Reize erzeugen. Diese Reizereignisse treffen auf die Sinnesorgane und werden nur wahrgenommen, wenn sie eine bestimmte Reizschwelle überschreiten. Erst dann lösen sie eine bestimmte Empfindung aus. Der Mensch empfindet Farben, Töne, Gerüche usw., die in der physikalischen Welt so nicht existieren. Jede Art von Reizereignis (z. B. Schallwellen) entspricht also einer bestimmten Art von Empfindungen (z. B. Töne, Lautstärke) [76]. Folgende Arten der Wahrnehmung, die in der Psychologie [75] unterschieden werden, finden bspw. bei der Zustandsbewertung Anwendung:

- Visuelle Wahrnehmung (Sehen) - Sichtkontrolle von Mängeln
- Auditive Wahrnehmung (Hören) - z. B. hörbare TE-Geräusche
- Olfaktorische Wahrnehmung (Riechen) - z. B. Ozongeruch, Schimmel
- Taktile Wahrnehmung (Fühlen) - z. B. Raumtemperatur
- Haptische Wahrnehmung (Berühren) - z. B. kühle Wandflächen

Prinzipiell ist diese Wahrnehmung objektiv, da jeder Mensch mit denselben Sinnesorganen die Reizereignisse aus der Umwelt aufnimmt. Dieses gilt jedoch nur unter der strengen Bedingung, dass keine Störungen, Veränderungen oder Verletzungen der Sinnesorgane vorliegen (wie z. B. Rot-Grün-Blindheit, Schwerhörigkeit u. ä.). Doch im realen Kontext ist die Wahrnehmungsleistung bei den einzelnen Menschen unterschiedlich stark ausgeprägt. Als Beispiel sei hier die Veränderung der Wahrnehmungsleistung mit dem Alter genannt, hier z. B. bei der Tonwahrnehmung (Stichwort „Schwerhörigkeit“) oder Sehstärke. Zudem schwankt die Wahrnehmungsschwelle (z. B. Schmerzen) bei jedem Beobachter individuell, die Wahrnehmung ist nicht gleich empfindlich. Die Wahrnehmungen der Reizereignisse sind folglich individuell und damit subjektiv [75].

Auf den Menschen wirken in der Umwelt eine Vielzahl an unterschiedlichen Reizereignissen, die dieser verarbeiten muss. Um mit dieser Reizflut effizient umzugehen, ist die selektive Wahrnehmung und Aufmerksamkeit eine Grundvoraussetzung und hat damit einen großen Einfluss auf die Subjektivität [77]. So werden beim Autofahren z. B. die relevanten Informationen, die für das Fahren entscheidend sind, selektiert und die anderen (irrelevanten) Informationen ausgeblendet. Diese Fokussierung auf Umweltreize bzw. Informationen kann durch das Reizereignis selbst initiiert werden (z. B. lauter Knall) oder durch den Menschen bewusst gesteuert werden. Es werden diejenigen Reizereignisse, die in der relevanten Handlung von Bedeutung sind, bewusst wahrgenommen und gleichzeitig hinsichtlich ihrer Bedeutung interpretiert. Bei der selektiven Wahrnehmung spielen frühere Erfahrungen eine große Rolle. Nach [77] erhalten Reizereignisse automatisch erhöhte Aufmerksamkeit, wenn sie von persönlicher Relevanz sind. Zudem leiten

unsere Erwartungen die Aufmerksamkeit. Ebenso ziehen unerwartete, inkonsistente und negative Reizereignisse die Aufmerksamkeit auf sich. Daneben werden noch salienten (in Relation zum Kontext auffallenden) sowie vividn (lebhaften, bunten, emotionalen) Reizen mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Mängel und Störungen stellen demnach unerwartete (da selten), negative und saliente Reizereignisse dar und fokussieren die Aufmerksamkeit.

Die selektive Wahrnehmung trägt aufgrund der genannten personalen Faktoren einen Beitrag zur Subjektivität bei. Die Fähigkeiten der Sinnesorgane sind interindividuell verschieden. Zudem wird die selektive Wahrnehmung durch Erwartungen, Einstellungen, Stimmungen, Bedürfnisse, Werte, Emotionen, Interessen und andere Faktoren beeinflusst [75]. Außerdem kann frühere Erfahrung („geschulte Auge des Fachmanns“) die Wahrnehmung und -leistung beeinflussen. In [75] wird hierzu das Beispiel eines Weinverkosters genannt, der seine Geruchs- und Geschmacks-sinne durch seine alltägliche Tätigkeit schärft.

### **Kategorisierung**

Das so ausgewählte, wahrgenommene Reizereignis wird in der nächsten Stufe vorab encodiert und interpretiert, indem der Urteilende diesem Reizereignis eine Bedeutung zuschreibt. Hierzu wird das wahrgenommene Reizereignis mit dem im Gedächtnis bereits gespeicherten Vorwissen in Verbindung gebracht, wodurch dieses Reizereignis erst zu einer Information wird. Um die Wahrnehmung und neue Informationen zu strukturieren, bilden Menschen zudem Kategorien, um ein wahrgenommenes Reizereignis systematisch zu erfassen. Durch diese Systematisierung wird ein Reizereignis aufgrund seiner bestehenden Ähnlichkeit zu bereits bekannten Reizereignissen zu einer Kategorie zugeordnet. Diese Kategorisierung erlaubt es, aus dem Vorwissen über eine Kategorie auf weitere (nicht direkt ersichtliche) Eigenschaften des Reizereignisses zu schließen [74].

Das Vorwissen des Urteilenden hat bei der Encodierung und Kategorisierung von wahrgenommenen Reizereignissen also einen Einfluss auf den Urteilprozess und weckt Erwartungen an ein folgendes Urteil. Menschen tendieren dabei dazu, Urteile zu treffen, die ihre Erwartungen decken. Folglich leistet auch das Vorwissen des Bewertenden einen Beitrag zur Subjektivität [74].

### **Definition Urteilen:**

„Mit Urteilen bezeichnen wir den psychologischen Prozess, der zugrunde liegt, wenn Menschen einem Urteilsobjekt einen Wert auf einer Urteilsdimension zuordnen und das daraus resultierende Urteil explizit zum Ausdruck bringen.“ [74]

Die ausgewählten, wahrgenommenen Reizereignisse bilden die Basis für das Urteilen. Wenn Menschen Urteile abgeben, stehen ihnen i. d. R. viele Informationen aus verschiedenen Umweltquellen zur Verfügung, die sie zuerst wahrnehmen und anschließend in ein Urteil integrieren müssen. In der Psychologie sind Wahrnehmen und Urteilen oft eng miteinander verbunden [74]. Jedoch beinhaltet Urteilen meistens Prozesse, die über das Wahrnehmen hinausgehen. Das Urteil,

zwei wichtige Urteilsdimensionen sind z. B. Bewertung und Wahrscheinlichkeit, stellt das Endresultat des psychologischen Prozesses dar, ohne sich mit möglichen Handlungskonsequenzen zu beschäftigen, d. h. es führt nicht notwendigerweise zu einer Handlung. Darin besteht der Hauptunterschied zu Situationen, in denen Urteiler auch gleichzeitig die Entscheider sind [74].

Die Trennung zwischen Urteiler und Entscheider stellt gleichzeitig einen wesentlichen Vorteil des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens zur Zustandsbewertung von MS-Betriebsmitteln dar und liefert gleichzeitig die erforderliche Grundvoraussetzung, um Verantwortlichkeiten zwischen den Rollen im Asset Management-Prozess (Abschnitt 2.1) festzulegen. Das Instandhaltungspersonal vor Ort gibt eine Zustandsbewertung (Urteil) über die einzelnen Komponenten eines inspizierten MS-Betriebsmittels ab. Die Bewertung einer mangelbehafteten Komponente erfolgt danach, ob durch diesen festgestellten Mangel ein ordnungsgemäßer Zustand des Betriebsmittels gefährdet wird. Das Instandhaltungspersonal muss dieses entsprechend bewerten und bei Erfordernis erforderliche Maßnahmen zur Mängelbeseitigung aufzeigen. Die Entscheidung, ob und wann die entsprechende Gegenmaßnahme durchgeführt wird, obliegt aber meist nicht dem Instandhaltungspersonal selbst, sondern dem zuständigen Anlagenbetreiber. Der Anlagenbetreiber trägt nach [54] die Verantwortung für den sicheren Betrieb einer elektrischen Anlage. Denn bei der Entscheidung über die Durchführung müssen nun auch die Konsequenzen, ob die erforderlichen (finanziellen, personellen etc.) Ressourcen ausreichend vorhanden sind, berücksichtigt werden. Nur durch eine objektive und nachvollziehbare Bewertung können die Verantwortlichkeiten zwischen bspw. Asset Service und Asset Management geregelt bzw. übertragen werden.

Der Urteilsprozess stellt generell eine komplexe Informationsverarbeitung dar. Eine Vielzahl von Informationen aus der Umwelt, aber auch aus dem Gedächtnis (organisiertes Wissen), müssen verarbeitet, interpretiert, gewichtet und anschließend zu einem Urteil kombiniert werden. Der Urteilsprozess unterliegt dabei auch einem subjektiven Einfluss. So werden bspw. aufgrund von Erfahrungen oder Überzeugungen bestimmte, wahrgenommene Reize als wichtige und andere als unwichtige Informationsquelle betrachtet. Außerdem überfordert diese Vielzahl in den meisten Fällen die menschliche Informationskapazität, daher wenden Menschen in komplexen Situationen bei der Urteilsbildung vereinfachende Urteilsstrategien (Heuristiken) an. Die Psychologie versteht unter Heuristiken sogenannte Faust- oder Daumenregeln, um in komplexen, unsicheren Situationen ein Urteil treffen zu können. Sie sind dabei vereinfachend und kapazitätssparend, erlauben aber in den meisten Situationen eine hinreichende Genauigkeit. Jedoch kann deren Anwendung auch zu systematischen Urteilsfehlern („kognitive Täuschung“, „Bias“, „Verzerrungen“) führen [74, 78]. Kahneman und Tversky [78] haben in ihrem „*Heuristics-and-Biases*“-Ansatz verschiedene zentrale Heuristiken beschrieben:

- **Verfügbarkeitsheuristik (*availability*)**

Urteile über Ereignisse sowie die Schätzung von Wahrscheinlichkeiten werden bevorzugt auf Basis von Informationen getroffen, die aus dem Gedächtnis besonders leicht und schnell abgerufen werden können

Beispiel: Wahrscheinlichkeit von einem Schaden, an den man sich gut erinnern kann, wird als tendenziell kritischer eingeschätzt, als ein Schaden, an den man sich nicht so leicht erinnert.

- **Repräsentativitätsheuristik (*representativeness*)**

Urteile über Ereignisse sowie die Schätzung von Wahrscheinlichkeiten werden aufgrund der Repräsentativität abgeleitet, mit der ein einzelnes Ereignis zu einer allgemeinen Klasse von Ereignissen gehört, wobei häufig auch die Basisrateninformation vernachlässigt wird.

Beispiel: Lottozahlen [Wahrscheinlichkeit 1-2-3-4-5-6 (↓) oder 3-12-19-22-37-40 (↑)]

- **Anker- und Anpassungsheuristik (*anchor and adjustment*)**

Urteile über Ereignisse sowie die Schätzung von Wahrscheinlichkeiten werden auf der Basis eines willkürlich gesetzten Ausgangswerts (Anker) abgegeben. Alle nachfolgenden Urteile werden dann in Relation zu diesem Anker gesetzt.

Beispiel: Festhalten an einer Diagnose

Multiplikation zweier Zahlenfolgen innerhalb weniger Sekunden

$1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8$  (↓) oder  $8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 3 \times 2 \times 1$  (↑)

Darüber hinaus gibt es noch weitere kognitive Täuschungen und Verzerrungen, die im Rahmen der Urteilsfindung diskutiert werden (z. B. Halo-Effekt: Überstrahlung des Urteils durch ein Merkmal). Jedoch führt die Anwendung der Heuristiken nur in bestimmten (eher seltenen) Fällen zu diesen systematischen Fehlern, sie müssen aber beachtet werden [74].

Es sei an dieser Stelle auch der Prinzipal-Agent-Ansatz erwähnt, der in den Wirtschaftswissenschaften Anwendung findet. Dieser Ansatz behandelt mögliche Probleme, die sich in Organisationen aus der Delegation von Aufgaben ergeben können, da zwischen dem Prinzipal (Auftraggeber, hier: Asset Management) seinem Agenten (Auftragnehmer, hier: Asset Service) asymmetrische Informationsstände vorliegen, die auf dem Informationsmangel des Prinzipals beruhen. Der Agent verfügt über quantitativ oder auch qualitativ bessere Informationen. Diese Informationsasymmetrie kann oder will der Prinzipal aus Kostengründen nicht beseitigen, wodurch dem Agenten ein Handlungsspielraum eingeräumt wird. Liegen nun Zieldivergenzen zwischen den Parteien vor, so wird in der Theorie angenommen, dass der Agent diesen Spielraum zum eigenen Vorteil ausnutzt, um seinen individuellen Nutzen zu maximieren. Dadurch können aber negative Effekte für den Nutzen des Prinzipals entstehen, da sein Nutzen von der Qualität und Richtigkeit des Ergebnisses der delegierten Aufgaben abhängt. Der Prinzipal kann aber die Handlungen zur Ergebniserreichung nicht bzw. nur eingeschränkt beobachten oder beurteilen,

wodurch eine Unsicherheit besteht. Eine Verminderung dieser Unsicherheit kann aber durch ein Angleichen der Interessen beider Parteien erreicht werden [79, 80].

Wenn Expertenmeinungen im Informationsverarbeitungsprozess eingebunden werden, ist also immer ein subjektiver Einfluss und eine mögliche Beeinflussung durch den Experten zu berücksichtigen. Zusammenfassend lassen sich allgemein folgende Ursachen und Determinanten für die Subjektivität festhalten: [74, 75, 80, 81]

- Individuelle, bisherige Erfahrungen
- Fachliches (Vor-)Wissen und Qualifikation der Bewertenden
- Wahrnehmungsleistung („körperlicher Zustand“)
- Eigene Erwartungen und Motivation
- Emotionen, Stimmung
- Risikobereitschaft des Bewertenden
- Organisationsinterne Faktoren
  - Ziele und Prioritäten des Experten
  - Engagement im Unternehmen
  - Verbundenheit zum Unternehmen
  - Prinzipal-Agent-Ansatz

Ungeachtet der subjektiven Einflussfaktoren wird die Leistungsfähigkeit der Wahrnehmung und des Urteilens eines Menschen meist von technischen Systemen nicht erreicht. In vielen Bereichen unterstützen technische Systeme die Wahrnehmung des Menschen (z. B. Sicherheitskontrolle am Flughafen, MRT-Befunde), jedoch erfordert speziell die Interpretation der Ergebnisse das Eingreifen des Menschen, da die technische Nachbildung in ein Erkennungssystem schwierig ist [75]. Zudem hat sich die menschliche Logik im täglichen Leben bewährt. Die angewendeten Heuristiken, die in den speziellen Untersuchungen zu Urteilsfehlern führen, haben in der realen Welt ihren Sinn und ihre Berechtigung. Die Urteilsfehler resultieren daraus, dass uns im Alltag schnelles und einfaches Handeln ermöglicht wird, da mit wenigen Informationen noch relativ gute bzw. ausreichende Urteile getroffen werden können [82].

Um die Urteilsfehler wesentlich zu verringern und die Subjektivität zu reduzieren, müssen daher verschiedene Gegenmaßnahmen umgesetzt werden. Diese werden im Folgenden präsentiert.

## **4.2 Wirksame Maßnahmen zur Reduktion der Subjektivität**

### **4.2.1 Organisatorische Maßnahmen**

Die Subjektivität bei der Bewertung kann durch verschiedene organisatorische Maßnahmen reduziert werden. Diese zielen auch auf die Prinzipal-Agent-Problematik ab. Denn die Organisation muss den Rahmen für die Inspektion und Zustandsbewertung setzen und sinnvolle Regelungen und Strukturen vorgeben, um die Unternehmensziele zu erreichen [81].



Zuerst muss ein einheitlicher Rahmen und eine einheitliche Vorgehensweise bei der Durchführung von Inspektionen geschaffen werden, damit jede Inspektion den gleichen Abläufen unterliegt und einheitliche Dokumentationsstandards verwendet werden. Hierbei bietet die Anwendung einer einheitlichen, universellen Inspektions-Checkliste, die detailliert aufgebaut ist, die grundlegende Voraussetzung, um ein Anlagenkollektiv zu bewerten. Eine detailliert aufgebaute Checkliste sorgt für einen definierten Rahmen, welche Punkte zu begutachten sind. Zudem kann explizit ausgedrückt und damit nachvollzogen werden, welche Inspektionspunkte durch den Bewertenden als mangelbehaftet eingestuft werden. Bei einer weniger detaillierten Liste ist die Ursache eines erhöhten Bewertungspunktes ohne weitere Informationen kaum nachvollziehbar, bspw. kann ein erhöhter Bewertungspunkt für eine MS-Schaltanlage nur aufgrund von Sauberkeit oder aber aufgrund eines defekten Schaltgeräts durch den Bewertenden abgegeben worden sein. Eine detaillierte Checkliste erlaubt hier eine differenziertere Betrachtung und Auswertung und reduziert zudem den Halo-Effekt (bspw. schlechte Sauberkeit überstrahlt nicht alle weiteren Inspektionspunkte, da sie differenziert beurteilt werden muss).

Um die Differenzierung und die Nachvollziehbarkeit der Bewertungspunkte  $B_i$  noch weiter zu erhöhen, sollten neben den Bewertungspunkten auch die konkreten Bemerkungsfelder mit hinzugezogen werden und automatisch auswertbar sein. Freitexte sind sehr individuell und nur eingeschränkt automatisiert auswertbar. Hierbei helfen vordefinierte Maßnahmenkataloge und Auswahllisten dem Instandhaltungspersonal vor Ort und es werden einheitliche Dokumentationsstandards erreicht. Mobile Datenverarbeitungslösungen und Workforce Management Systeme verbessern zusätzlich die einheitliche Datenerfassung und ermöglichen darüber hinaus auch die Aufnahme von Schadensbildern. Dadurch wird die Transparenz der erhobenen Daten gesteigert und für die weitere Verarbeitung objektiv nachvollziehbar. Die Informationsasymmetrie und -verarbeitung innerhalb des Asset Service (durchführende Person und Anlagenverantwortlicher) sowie zwischen Asset Service und Asset Management wird reduziert bzw. optimiert.

Eine weitere wirksame Maßnahme, um den subjektiven Einfluss bei der Bewertungsabgabe zu verringern, ist, die Bewertungsgrundsätze der jeweiligen Mitarbeiter durch intensive Schulungen zu vereinheitlichen [9]. Jede bewertende Person hat individuelle Erfahrungen und Kenntnisse über MS-Betriebsmitteln im Laufe seiner Tätigkeit gesammelt. Gerade bei der Beurteilung von identifizierten Mängeln und der Prognose, bis wann der Mangel zu beheben ist, d. h. die Komponente also seine Funktion mindestens noch erfüllt, spielt die eigene persönliche Erfahrung aus der Schadenshistorie und den Folgen von Schäden eine wichtige Rolle. So überschätzen Personen in der Regel seltene Ereignisse und Risiken, die ihnen noch gut in Erinnerung sind, dagegen werden alltägliche Risiken einer Gefahrenquelle eher unterbewertet [83, 84]. Aus diesem Grund sollten die Bewertenden sich in regelmäßigen Abständen über ihre Erfahrungen aus vergangenen Ereignissen austauschen, voneinander lernen und die Bewertung typischer Mängel diskutieren und abstimmen, damit einheitliche Bewertungen vorgenommen und diese möglichst unabhängig von

der durchführenden Person werden. Die direkte Face-to-Face-Kommunikation stellt beim Austausch und der Weitergabe impliziten Wissens eine sehr wirksame Methode dar [85].

Hierbei ist es auch generell hilfreich, die Anzahl der bewertenden Personen zu begrenzen und diese zu diesem Zweck zu schulen. Weiterbildungsmaßnahmen verbessern die Qualifikationen der bewertenden Personen [9]. Nur so kann durch die Vielzahl der unterschiedlichen MS-Betriebsmittel eine optimierte und zielgerichtete Bewertung durchgeführt werden.

Neben der inhaltlichen Schulung und Abstimmung untereinander, der Erläuterung des Klassifizierungsschemas sowie der Verwendung des Bemerkungsfeldes ist es auch von großer Bedeutung, den beteiligten Personen die Hintergründe der Datenerfassung und die weitere Verwendung ihrer Bewertungsdaten zu erläutern. Gerade die Intention, dass der Erfahrungsschatz der beteiligten Personen in den Entscheidungsprozess einfließt und genutzt werden soll, muss vermittelt werden. Dieses erhöht die Motivation und Bereitschaft der durchführenden Personen und zeigt die Bedeutung der erhobenen Daten auf. Der Asset Service erhebt schließlich die Daten, die im Asset Management genutzt werden sollen. Daher sind die Zielstellungen und die erforderlichen Eingangsgrößen des Asset Managements zu vermitteln, um die Bewertungsabgabe daraufhin auszurichten. Um dabei eine bewusste oder unbewusste Beeinflussung zu vermeiden, ist im Unternehmen ein Organisationsklima und eine wissensbasierte Organisationskultur zu entwickeln, in der das vorhandene Wissen bereitwillig geteilt und eine Zusammenarbeit gemeinsam auf die Unternehmensziele ausgerichtet wird [85, 86]. Die detaillierte Bewertung der Inspektionpunkte und die definierte Datenerhebung, erweitert um aufgenommene Schadensbilder, verringern ebenfalls die Beeinflussungsmöglichkeit, da die Transparenz der Datenerhebung erhöht wird. Um die Qualität der Daten im Hinblick für die Anwendung im Asset Management zu sichern, kann im Zweifelsfall auch eine neutrale QS-Stelle eingerichtet werden, die eine stichprobenartige Überprüfung durchführt, was allerdings erhöhte Kosten der Informationsgewinnung verursacht. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen und Zielstellungen der Datenerhebung zwischen Asset Service und Asset Management müssen beide Interessenslagen Berücksichtigung finden, um die Datenqualität zu optimieren.

#### **4.2.2 Bewertungsleitfaden**

Um die vorhandenen Bewertungsspielräume bei einer visuellen Inspektion einzugrenzen, bieten sich umfassende Bewertungsleitfäden an, die die bewertenden Personen vor Ort bei der visuellen Bewertung unterstützen. Denn es kommt bei der Datenerfassung über Inspektionen darauf an, das vorhandene Wissen der bewertenden Personen für die weiteren Prozesse nutzbar zu machen. Aus diesem Grund sollte eine Zustandsbewertung immer vergleichend mithilfe von umfassenden Bewertungsleitfäden erfolgen [87]. Die Bewertungsleitfäden beinhalten typische Mängelbeschreibungen und Schadensbilder. Durch deren Anwendung werden die Bewertungsgrundsätze vereinheitlicht und somit die Subjektivität bei der Bewertungsabgabe weiter reduziert.

Die Unterstützung durch einen umfassenden Bewertungsleitfaden bei der Erfassung und Bewertung von Schäden wird beispielsweise auch bei der Begutachtung von Gebäuden (siehe z. B. [64, 88]) oder von Brücken [89] genutzt. Hier wird eine Auswahl an typischen Bauschäden anhand von Kurzbeschreibungen und charakteristischen Schadensbildern dargestellt. Dieses ermöglicht einen Vergleich mit einem individuell vorgefundenen Schadensfall und erleichtert die anschließende Schadensanalyse und -bewertung. Den durchführenden Personen dienen diese als Hilfestellung zur Einordnung von Schäden in eine Zustandsklasse und zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit ihre Bewertungen.

Solche umfassenden Schadens- und Bilderkataloge werden als Bewertungsleitfaden somit auch für das Einsatzgebiet der Zustandsbewertung von MS-Betriebsmitteln entwickelt. In Abstimmung mit mehreren operativen Experten, zu deren täglichen Aufgaben die Durchführung der Inspektionen zählt, werden typisch auftretende Mängel abgestimmt und entsprechend des definierten Klassifizierungsschemas eingeordnet. Die langjährigen Erfahrungen vieler Experten sowie bekannte Auffälligkeiten fließen in die Erstellung im Rahmen verschiedener Feldtests bei unterschiedlichen Verteilnetzbetreiber ein. Die Schadens- und Bilderkataloge werden so sukzessiv erweitert und auch um typische Schadensbilder ergänzt. Dadurch wird ein Referenzkatalog mit typischen, auftretenden Mängeln mit entsprechender Einordnung in das Klassifizierungsschema geschaffen, der als Vergleich bei der Bewertung dient.

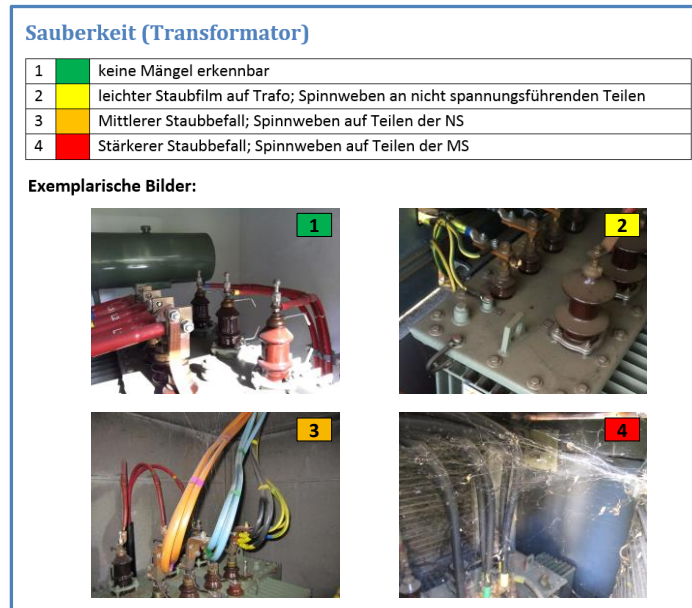
Der Bewertungsleitfaden wird in zwei Ausführungen erstellt. Eine Variante, der sog. Ampelkatalog (Auszug in Abbildung 14) ist eine übersichtliche Form für den Einsatz vor Ort für das IH-Personal und enthält in Kurzform charakteristische Mängelbeschreibungen.

<b>Schadenskatalog MS-Netzstationen</b>	
<b>1. Außenanlage der Station</b>	
<b>1.1. Zugänglichkeit, Wege, Flächen</b>	
1	Zugänglichkeit ohne Gefahr/Einschränkung gegeben
2	leichter Zuwuchs der Station; Zugänglichkeit leicht eingeschränkt
3	Unfallgefahr (durch nasses Laub oder Bewuchs), Stolpergefahr; fehlendes Geländer
4	nicht begehbar, kein sicherer Stand, Fluchtweg nicht gegeben
<b>1.2. Anstrich, Putz, Fassade, Gehäuse</b>	
1	keine Mängel erkennbar
2	Lack-, Anstrichschäden, kleine Risse; Graffiti
3	mittlere Riss- und Lackschäden
4	größere Rissbildung kann zu Feuchtigkeitseintritt führen; Graffiti mit rassistischen oder anzüglichen Bemerkungen

Abbildung 14 – Auszug aus einem entwickelten Bewertungsleitfaden (Bsp. MS-Netzstationen) [53]

Neben dieser schriftlichen Kurzbeschreibung sind nach Möglichkeit und Relevanz auch typische, charakteristische Schadensbilder dokumentiert, die in bildlicher Form die Einordnung zu einem Bewertungspunkt  $B_i$  präsentieren. Als Beispiel sei der Inspektionspunkt „Sauberkeit“ genannt. Eine bloße Beschreibung dieses Mangels ist in diesem Fall schwierig. Hier unterstützen unter-

schiedliche Fotos die Bewertungsabgabe, welche „Sauberkeit“ welchem Bewertungspunkt  $B_i$  zuzuordnen ist (siehe Abbildung 15). Die abgebildeten Bilder sollen diesen Aspekt verdeutlichen.



**Abbildung 15 – Bewertungsleitfaden mit exemplarischen Schadensbildern (Bsp. Sauberkeit Transformator)**

Eine zweite Variante, der sog. Bewertungs- und Schadenskatalog, stellt dagegen die Langfassung des Ampelkatalogs dar. Er enthält neben der übersichtlichen Form ausführlichere Beschreibungen zu einzelnen Inspektionen. Mängel werden expliziter beschrieben. Dieser Bewertungs- und Schadenskatalog dient als Schulungsunterlage und vor allem als Nachschlagewerk. Für die Anwendung vor Ort ist dieser eher zu unhandlich, wie Feldtesterfahrten gezeigt haben [53].

Ein solcher Bewertungsleitfaden stellt eine wirksame Maßnahme dar, um die Subjektivität bei der Bewertung zu reduzieren. Es gibt jedoch keinen vollumfassenden und allgemeingültigen Leitfaden, da neben der Wahrung der Verkehrssicherungspflicht und Normvorgaben Freiheitsgrade bei der Bewertung bestehen. So wird ein Bewertungsleitfaden bspw. mehr oder weniger stark von der gewählten Instandhaltungsstrategie bzw. dem standardmäßig festgelegten Inspektionszyklus bei einem Verteilnetzbetreiber geprägt, da nach der Fristigkeit der Mängelbeseitigung bewertet werden sollte. Ein Leitfaden muss also auch immer unternehmensinterne Prinzipien und Vorgehensweisen enthalten, wie Inspektionen zu bewerten sind.

Die unternehmenseigene Erstellung hat den zusätzlichen Vorteil, dass diese Bewertungsleitfäden inkl. Schadens- und Bilderkataloge dabei helfen, ein Wissensmanagement im Unternehmen aufzubauen. Das vorhandene Erfahrungswissen der Mitarbeiter bildet implizites, persönliches Wissen einer Person ab. So wird in [85] als Schätzung erwähnt, dass bis zu 80 % des Wissens in Unternehmen von impliziter Natur ist. Eine große Herausforderung an das Wissensmanagement ist es nun, dieses implizite Wissen in explizites Wissen zu überführen. Denn erst wenn Wissen in expliziter Form (z. B. dokumentiert in Datenbanken, als detaillierte Prozessbeschreibungen, Qualitätsdokumente oder eben ein Leitfaden zur Zustandsbewertung) vorliegt, ist es für

Unternehmen verfügbar und unabhängig von einzelnen Personen nutzbar [86]. Die umfassenden Bewertungsleitfäden dienen also neben der Anwendung als Referenzkatalog zusätzlich als Dokumentation und Sammelwerk an Erfahrungen in einem Unternehmen mit unterschiedlichen Betriebsmitteln. Gerade die Einarbeitung von neuen Mitarbeitern in den Inspektionsprozess wird dadurch erheblich erleichtert.

Ein Bewertungsleitfaden ersetzt natürlich nicht die fachkundige Bewertung vor Ort, da ein Mangel erst von dem IH-Personal überhaupt detektiert und in geeigneter Weise beurteilt werden kann. Der Leitfaden unterstützt aber bei der Einordnung des festgestellten Mangels in das Klassifizierungsschema. Zudem kann dieser Leitfaden nicht alle potenziellen Mängel, die an MS-Betriebsmitteln auftreten können, vollständig und umfassend abdecken und behandeln. Er umfasst charakteristische und in der Regel häufig auftretende Mängel und führt hier typische Beispiele an. Daher ist auch die permanente Weiterentwicklung des Bewertungsleitfadens von großer Bedeutung, wenn neue, bisher nicht erfasste Mängel auftauchen. Die Einordnung nicht aufgelisteter Mängel muss somit erst durch den Fachexperten erfolgen und stellt daher weiterhin einen gewissen Spielraum bei der Bewertung dar.

### **4.2.3 Einsatz einfacher Messtechnik**

Der Einsatz einfacher Messtechnik und dessen Integration in den Inspektions- und Erfassungsprozess stellt einen erheblichen Mehrwert für die Zustandsbewertung dar. In Kombination mit der visuellen Bewertung („Soft-Facts“) wird eine tieferegreifende und fundierte Zustandsbewertung der einzelnen Komponenten durch die gewonnenen Messergebnisse („Hard-Facts“) ermöglicht. Speziell die betriebsrelevanten elektrischen Komponenten können visuell nur eingeschränkt analysiert werden, da Mängel an diesen schwer bzw. erst bei sehr starker Ausprägung erkennbar sind. Die Aussagefähigkeit der Eingangsdaten wird wesentlich erhöht und zugleich der subjektive Einfluss der visuellen Inspektion weiter abgeschwächt.

Die Integration von konkreten Messergebnissen, die durch Methoden der technischen Diagnostik erhoben werden, stellt keine prinzipielle Neuerung für die MS-Zustandsbewertung dar und wird z. B. in [1, 9] angeführt. Die Datenerhebung dieser Messergebnisse wird jedoch in der Praxis aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht durchgeführt. Zudem sind die meisten Methoden der technischen Diagnostik nur im Rahmen einer Freischaltung, d. h. bei einer Wartung, anwendbar, sodass die Messwerte nur diskontinuierlich in großen Zeitabständen vorliegen. Daher gilt im Folgenden als zentrale Anforderungen an die Messverfahren, dass diese ohne vorheriges Freischalten der Betriebsmittel aussagekräftige Ergebnisse liefern, möglichst kostengünstig sind, die visuellen Inspektionsergebnisse ergänzen und dabei den zeitlichen Rahmen einer Inspektion nicht zu sehr ausdehnen.

Unter diesen Prämissen werden nach einer umfangreichen Markt- und Produktanalyse sowie anschließender intensiver Laborversuche folgende Messverfahren zur Zustandsbewertung von Mittelspannungs-Betriebsmittel als geeignet und tauglich eingestuft [2, 33, 53, 90, 91]:

- Akustische Teilentladungsdetektion
- Detektion von Transienten Ableitsspannungen
- Thermografische Analysen
- Erdschleifenmessungen

Diese Verfahren werden kurz vorgestellt, um die Anwendbarkeit im Rahmen der Inspektionen zu zeigen. Für weitere Informationen zu den Verfahren sei auf die weiterführenden Literaturquellen [92, 93, 94, 95, 96, 97, 98] verwiesen.

Die Teilentladungsmessverfahren sind für die Analyse von MS-Schaltanlagen und -Komponenten in Netzstationen sowie Umspannanlagen am besten geeignet. Die Thermografie findet dagegen vornehmlich für NS-Verteilungen (Sicherungskontakte, Sammelschienenverbindungen etc.) und Verteiltransformatoren Anwendung, wobei aber auch MS-Komponenten überprüft werden können. Die Erdschleifenmessung mit einer Erdungsmesszange wird verwendet, um die Qualität der Erdungsanlage zu überprüfen [2, 33, 90, 91].

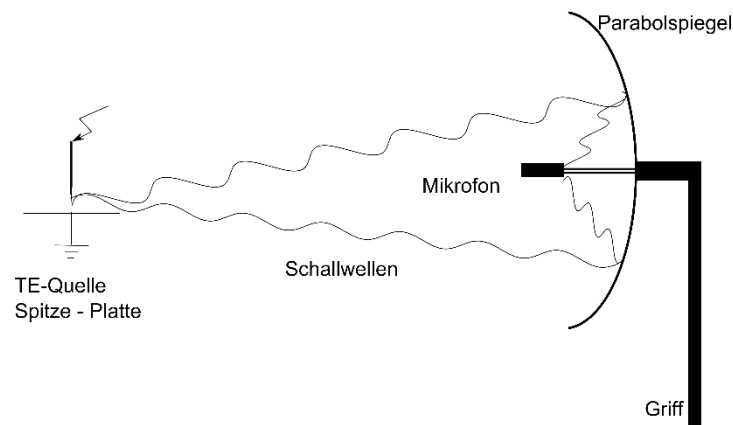
### **Erdschleifenmessung**

Um eine qualitative Aussage über den Zustand einer Erdungsanlage treffen zu können, ist eine rein visuelle Betrachtung nicht ausreichend. Der Großteil der Erdungsanlage ist unterirdisch verlegt und damit nur eingeschränkt optisch zugänglich. Das konventionelle Erdungsmessverfahren nach DIN VDE 0100-610 stellt hier eine geeignete, aber recht aufwendige Methode dar und erfordert zudem ein Auftrennen der Erdverbindung, wodurch ein Freischalten der Anlage erforderlich wird. Als Alternative wird daher die Erdschleifenmessung bzw. die spießlose Erdungsmessung angeführt, die im Betrieb der Anlage und damit während einer Inspektion durchgeführt werden kann. Somit wird der Arbeits- und Zeitaufwand wesentlich reduziert. Das Verfahren misst allerdings den Erdschleifenwiderstand und nicht den exakten Erderwiderstand, da neben diesem Erderwiderstand zusätzlich dazu alle parallel geschalteten Erdverbindungen mit gemessen werden. Je mehr parallel geschaltete Erdverbindungen vorhanden sind, desto geringer wird deren Einfluss und damit genauer die Messung. Nichtsdestotrotz liefert dieses Verfahren eine quantitative Aussage über die Güte der Erdungsanlage bzw. des Erdungswiderstandes und stellt einen Mehrwert für die Zustandsbewertung dar [90, 98].

### **Teilentladungsdetektion**

Teilentladungen entstehen durch eine lokale Überhöhung der elektrischen Feldstärke an einem Dielektrikum (bspw. leitfähige Spitzen) oder aufgrund einer lokalen Minderung der elektrischen Festigkeit (bspw. durch Hohlräume oder Risse in Isolierstoffen) [18]. Somit stellen Teilentladungen Hinweise auf eine Verschlechterung des Anlagenzustands dar, die frühzeitig erkannt werden sollten. Die akustische Teilentladungsdetektion nutzt hier die Eigenschaft aus, dass äußere Teilentladungen Emissionen sowohl im hörbaren, als auch vor allem im Ultraschallbereich erzeugen, die von einer Teilentladungsquelle ausgesendet werden. Die ausgesendeten Ultraschallwellen können über geeignete (Richt-)Mikrofone oder Ultraschallaufnehmer, die eine

hohe Sensitivität im Ultraschallbereich besitzen, detektiert werden. Störende Umgebungsgereusche werden so nahezu ausgeblendet. In Abbildung 16 ist die prinzipielle Funktionsweise beim Richtmikrofon dargestellt. Die ausgesendeten Ultraschallwellen der TE-Quelle werden an dem Parabolspiegel so reflektiert, dass diese gebündelt auf das Mikrofon treffen. Je genauer die Teilentladungsquelle angepeilt wird, desto mehr Ultraschallwellen werden reflektiert und entsprechend vom Mikrofon aufgenommen. Damit sind eine sichere Detektion von Teilentladungen sowie eine gleichzeitige Ortung des Teilentladungsursprunges möglich [33, 93].



**Abbildung 16 – Schematische Darstellung der Funktionsweise der akustischen TE-Detektion [33]**

Das Verfahren wird im Betrieb der Anlage angewendet und ist damit für den Inspektionsprozess geeignet. Der Teilentladungspegel wird akustisch über Kopfhörer oder auf einer Anzeige in der Einheit „dB<sub>µV</sub>“ ausgegeben. Es muss dabei ein direkter Zugang zu den teilentladungsbehafteten elektrischen Komponenten gegeben sein, um eine ungehinderte Ausbreitung der Schallwellen zum Richtmikrofon und damit eine präzise Ortung zu gewährleisten. Das Verfahren ist somit für die Detektion äußerer Teilentladungen (Korona-, Oberflächenentladungen, leitende Partikel) an luftisolierten MS-Komponenten prädestiniert.

Neben den äußeren Teilentladungen, die durch die akustischen Verfahren detektiert werden können, ist es auch möglich, innere Teilentladungen (bspw. Hohlräumentladungen) über einfache Messverfahren im Betrieb mit Hilfe von Transienten Ableitspannungen (Transient Earth Voltage, kurz TEV) zu detektieren. Dieser Name geht auf Dr. John Reeves zurück, der diese elektromagnetischen Impulse 1974 beobachtete [95]. Teilentladungen senden elektromagnetische Emissionen aus. Diese Teilentladungen, z. B. innerhalb von metall-gekapselten oder luft-feststoffisolierten Schaltanlagen, induzieren durch die elektromagnetischen Impulse in das Metallgehäuse kleine Spannungsimpulse im Bereich zwischen einigen Millivolt und wenigen Volt. Diese transienten Ableitspannungen können auf die Außenseite der Metalloberfläche der MS-Schaltanlage von einem kapazitiven TEV-Sensor gemessen werden. Nach [95] verhalten sich diese TEVs proportional zur Stärke der Teilentladung [90]. Im Rahmen von Inspektionen können mit dem Verfahren Teilentladungen innerhalb von metall-gekapselten oder luft-feststoffisolierten MS-Schaltanlagen festgestellt werden (siehe auch [33, 36]).

### **Thermografie**

Thermografische Analysen von elektrischen Anlagen gehören bereits heute zum Stand der Technik [97, 99]. Auch für die Instandhaltung und Zustandsbewertung von MS-Betriebsmitteln stellt die Thermografie ein sinnvolles Instrument dar. Denn sobald Strom über einen elektrischen Widerstand fließt, entsteht Wärme (Joule'sches Gesetz:  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ ). Erhöht sich nun der Strom  $I$  oder der Widerstand  $R$ , wird entsprechend mehr Wärme  $Q$  erzeugt. Alle stromdurchflossenen Komponenten erwärmen sich also durch den elektrischen Widerstand des Leiters sowie zusätzlich durch Übergangswiderstände (Kontakte, Verbindungen etc.). Wenn eine stromführende Komponente oder Kontaktstelle einen Defekt (Korrosion, lockere Verbindung etc.) aufweist, erhöht sich der Widerstand an dieser Stelle und es führt zu einer erhöhten Wärmeentwicklung an der Komponente. Dieses kann zu einer beschleunigten thermischen Alterung oder sogar zur Zerstörung der Komponente führen. Zudem kann Aufschluss über eine zu hohe Belastung gegeben werden.

Durch die thermografische Analyse mit einer Wärmebildkamera können solche Fehlstellen, die zu einer erhöhten Wärmeentwicklung führen, ohne großen zeitlichen Mehraufwand großflächig bei einer Inspektion aufgedeckt werden. Um eine ordnungsgemäße Absoluttemperaturmessung durchzuführen, müssen dazu korrekte Emissions-, Reflexions- und Transmissionsfaktoren berücksichtigt werden. Wie aber in [2] angeführt wird, ist die Absoluttemperatur nicht alleine maßgebend, da die Belastung der Komponenten häufig weit unter Bemessungsstrom liegt. Die Temperaturdifferenzen zwischen Komponenten gleichen Typs bei annähernd gleicher Belastung liefern meist aussagekräftigere und vorbeugende Erkenntnisse. Eine heterogene Temperaturverteilung zwischen den Phasen eines Abgangs deutet dann bereits auf eine Auffälligkeit hin, auch wenn noch keine Verletzung der zulässigen Absoluttemperaturgrenzwerte vorliegt. Zudem brauchen bei Anwendung der Temperaturdifferenzen keine genauen Emissions-, Reflexions- oder Absorptionsfaktoren eingestellt werden, da diese auf alle Phasen den gleichen Einfluss haben, was den Einsatz in der Praxis vereinfacht [90].

### **Einbindung der Messtechnik in das Bewertungsmodell**

Durch den Einsatz der Messtechnik werden also konkrete Messergebnisse („Hard-Facts“) gewonnen, die die rein visuelle Sichtkontrolle des IH-Personals („Soft-Facts“) punktuell erweitern. Durch die Kombination aus Sichtkontrolle und Messwerten können die elektrischen Komponenten fundiert und realitätsgerecht einer Zustandsbewertung unterzogen werden. Durch die Erfahrungen der bewertenden Personen können visuelle Mängel aufgedeckt werden, die über die Messgeräte nicht erfasst werden können (bspw. nicht berührungsgeschützte NS-Verteilungen, zu geringer Ölstand bei MS-Kabelendverschlüssen). Umgekehrt werden Mängel an der Isolation (bspw. Teilentladungen an MS-Kabelendverschlüssen) oder Kontaktverschlechterungen (bspw. erhöhte Temperatur eines Kabelanschlusses) nur über die eingesetzten Messverfahren identifiziert, weil noch keine visuelle Beschädigung erkennbar ist. Die Verfahren zur Bewertung ergänzen sich und liefern in Kombination eine fundierte und realitätsgerechte Zustandsbewertung.



Die gemessenen Werte liegen jedoch noch in unterschiedlichen Größen vor. Um sie in das Bewertungsmodell einfließen zu lassen, werden Grenzwerte für die einzelnen Bewertungspunkte festgesetzt und die gemessenen Werte in Zustandsklassen nach der Fristigkeit zur Mängelbeseitigung eingeordnet [2, 91]. Es liegt also das gleiche Klassifizierungsschema wie bei der visuellen Inspektion zugrunde und die gemessenen Werte lassen sich interpretieren. Über die entsprechenden Zustandsklassen und Bewertungspunkte kann eine Weiterverarbeitung mittels des Bewertungsmodells durchgeführt werden.

Das prinzipielle Vorgehen zur Einbeziehung und Kombination der „Hard-Facts“ und „Soft-Facts“ in das Bewertungsmodell, die beide während der Inspektion erhoben werden, wird in Abbildung 17 exemplarisch veranschaulicht. Die Messtechnik lässt sich nicht auf alle Inspektionpunkte der Checkliste anwenden und wird daher auf Inspektionpunktebene integriert. Inspektionpunkt 1 wird lediglich visuell bewertet (z. B. Beschriftungen, Anzeigeelemente, Öldichtigkeit etc.). Inspektionpunkte 2 und 3 werden dagegen visuell vom IH-Personal inspiziert und ebenfalls unter Einsatz von Messtechnik bewertet (z. B. Kabelendverschlüsse, Schaltgeräte, Sammelschiene etc.). Der Zustandsindex des Inspektionpunktes  $Z_{IP,i}$  berechnet sich in diesem Fall nach der folgenden Gleichung:

$$Z_{IP,i} = B_{i,SK} \cdot R_{SK} + B_{i,M} \cdot R_M \tag{4.1}$$

wobei:

- $B_{i,SK}$  – Bewertung (Sichtkontrolle) des  $i$ -ten Inspektionpunktes
- $B_{i,M}$  – Bewertung (Messtechnik) des  $i$ -ten Inspektionpunktes
- $R_{SK}$  – Relationsgröße (Sichtkontrolle)
- $R_M$  – Relationsgröße (Messtechnik)

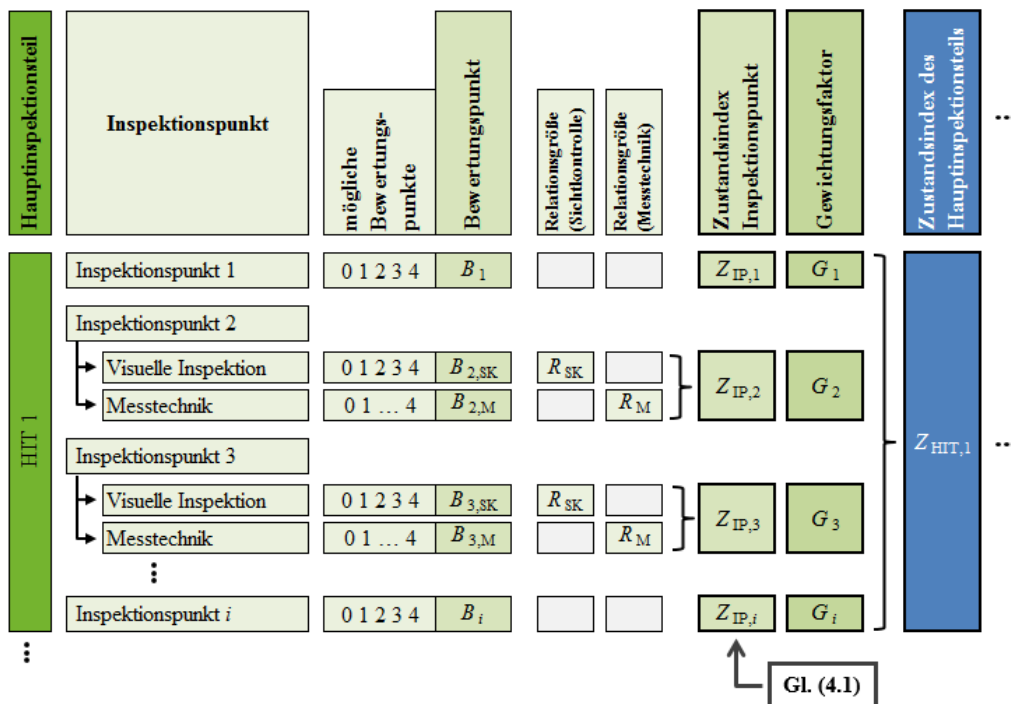


Abbildung 17 – Einbindung der Messtechnik in das Bewertungsmodell

Die Gewichtungsfaktoren  $G_i$  der Inspektionpunkte bleiben unverändert. Die Relevanz der inspizierten Komponenten an sich und deren Beitrag zum Gesamtzustandsindex werden durch die Einbindung von Messtechnik weder erhöht noch verringert. Lediglich die Art der Mangelerkennung (durch die Sichtkontrolle oder durch Einsatz einfacher Messtechnik) und somit die resultierende Bewertungsabgabe unterscheidet sich.

Die Relationsgröße  $R$  zwischen visueller und messtechnischer Bewertung spiegelt den Einfluss auf den Zustandsindex des Inspektionpunktes wider. In Summe gilt für beide Relationsgrößen:  $R_{SK} + R_M = 100\%$ . Die elektrischen Komponenten, die messtechnisch analysiert werden, sind in der Regel relativ schwierig durch eine reine Sichtkontrolle zu bewerten. Hier sei das Beispiel der Erdungsanlage genannt, die zum Großteil unterirdisch verlegt ist. Einige Fehlstellen können visuell einfach nicht erkannt werden. Unter Einsatz von Messverfahren werden diese identifizierbar. Die Bewertungsqualität und -aussagekraft der Messverfahren wird generell höher eingeschätzt. Daher werden beide Methoden nicht gleich (also 50/50 %) gewichtet, sondern die messtechnisch ermittelten Bewertungspunkte erhalten eine stärkere Gewichtung. Es wird ein Verhältnis von 30/70 % (Sichtkontrolle/Messtechnik) gewählt. Simulationsergebnisse und Feldtesterfahrungen stützen diese Auswahl, da bei diesem Verhältnis die größte Auswirkung auf eine Reduzierung des subjektiven Einflusses erzielt wird (vgl. Abschnitt 4.3). Zudem fließen die Ergebnisse der Sichtkontrolle noch ausreichend stark mit ein. Ein gravierender Mangel, der eine sofortige Mängelbeseitigung erforderlich macht, wird - unabhängig ob visuell oder messtechnisch festgestellt - mit ausgewiesen, da die Komponente den Betrieb gefährdet (siehe Kapitel 3.3). Abschließend wird der durch die Gewichtung ermittelte Zustandsindex  $Z_{IP,i}$  im Bewertungsmodell weiterverarbeitet.

### 4.3 Systemimmanente Subjektivität und Unsicherheit

Nachdem die theoretischen Ursachen und entsprechenden Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der Subjektivität erläutert worden sind, wird nun die Wirksamkeit dieser Gegenmaßnahmen verdeutlicht [53].

Die Subjektivität, also die unterschiedliche Bewertungen des IH-Personals, drückt sich durch die Streuung der Zustandsindices aus und wird in diesem Kapitel nun anhand der mittleren absoluten Abweichung als Streuungsparameter quantifiziert. Sie ist für die beschreibende Statistik besser geeignet als die Varianz bzw. Standardabweichung, da durch das Quadrieren der Abweichungen bei der Varianz bzw. Standardabweichung große Abweichungen verstärkt einfließen [100]. In Abbildung 12 wird die Spannweite der Ergebnisse (Differenz zw. größtem und kleinstem Wert) verdeutlicht. Die mittlere absolute Abweichung  $MAD$  gibt hingegen die durchschnittliche Abweichung einer Reihe von Merkmalsausprägungen/Beobachtungen von ihrem Mittelwert, hier vom Median, an. Der Median wird gewählt, da dieser robuster gegen Ausreißer ist als der arithmetische Mittelwert. Während der Feldtests hat sich nämlich gezeigt, dass ein Zustandsindex

häufig stark von den restlichen Werten abweicht. Ein Inspekteur bewertet sehr kritisch, wohingegen die restlichen Inspektoren ähnlich bewerten.  $MAD$  ist damit ein Maß für die Streuung innerhalb einer Datengruppe, hier einer Netzstation  $j$  [69].

$$MAD_{ONS,j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{x}| \quad (4.2)$$

wobei:

- $n$  – Anzahl der Merkmale
- $x_i$  – Merkmalsausprägung
- $\tilde{x}$  – Median

Im Rahmen der Feldtests bei verschiedenen Verteilnetzbetreibern sind jeweils zahlreiche Netzstationen von verschiedenen Personen inspiziert worden. Für jede inspizierte Netzstation wird die mittlere absolute Abweichung der ermittelten Zustandsindices der Inspektoren nach Gleichung (4.2) ermittelt. Anschließend werden über alle Netzstationen der Mittelwert dieser mittleren absoluten Abweichungen nach Gleichung (4.3) bestimmt. Somit liegt eine Kennzahl vor, die den subjektiven Einfluss verdeutlicht und auch eine Vergleichbarkeit ermöglicht.

$$\bar{x}_{MAD} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n MAD_{ONS,j} \quad (4.3)$$

wobei:

- $n$  – Anzahl der bewerteten Netzstationen  $j$
- $MAD_{ONS,j}$  – Mittlere absolute Abweichung einer Netzstation  $j$

Abbildung 18 gibt die Ergebnisse aus den verschiedenen Feldtests übersichtlich wieder. Es lässt sich eine starke Reduzierung der Mittelwerte der mittleren absoluten Abweichungen  $\bar{x}_{MAD}$  und damit der Subjektivität durch die durchgeführten Maßnahmen erkennen. Bereits eine erste Version eines Bewertungsleitfadens (in Abbildung 18 daher als teilw. Leitfaden bezeichnet) und eine Schulung sowie ein Austausch des Instandhaltungspersonals untereinander führen zu einer Objektivierung der Ergebnisse (2. Feldtest). Ein eindeutiger, positiver Trend zu einer einheitlicheren Bewertungsabgabe lässt sich bereits dadurch festhalten. In weiteren Feldtests war durch die Weiterentwicklung des Bewertungsleitfadens in der vorgestellten Form (charakteristische Schadensbilder, Aufnahme weiterer Mängel) und die geschulte Anwendung der systematischen Zustandsbewertung (Erfahrung + Leitfaden) eine weitere Reduzierung der Subjektivität um bis zu 35 % festzustellen. Somit lässt sich eine weitgehend personenneutrale und damit objektive und nachvollziehbare Zustandsbewertung erzielen [53].

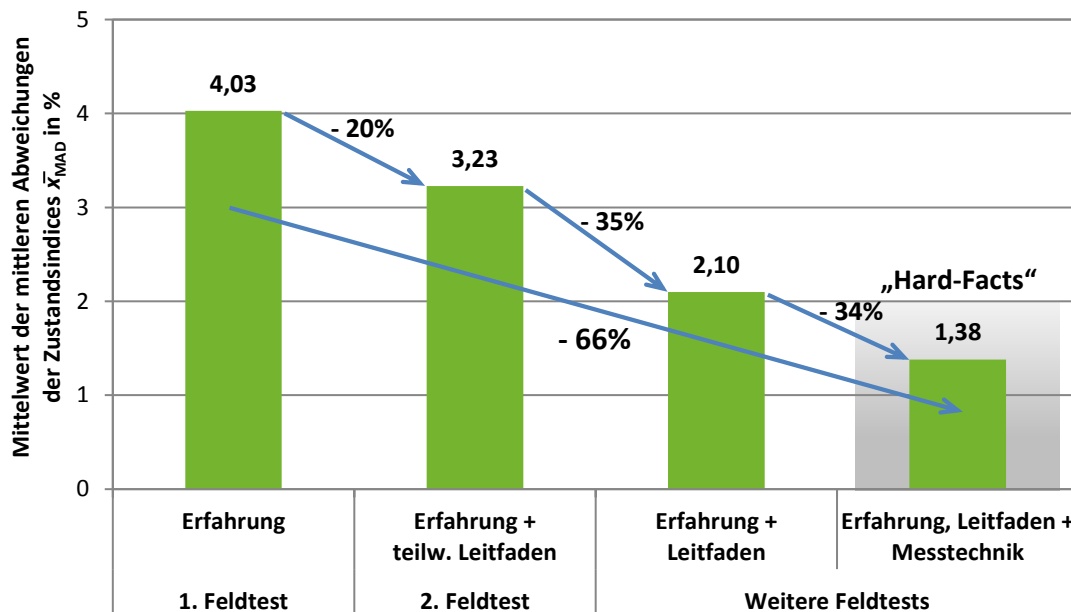


Abbildung 18 – Auswirkungen der Gegenmaßnahmen zur Reduktion des subjektiven Einflusses

Auch die Wirksamkeit des Einsatzes von einfacher Messtechnik zur Verringerung des subjektiven Einflusses bei der Zustandsbewertung wird deutlich erkennbar. „Hard-Facts“ haben einen größeren Einfluss auf die Inspektionpunkte und stellen zudem objektive Werte dar. Wenn neben der objektivierten Sichtkontrolle (Erfahrung + Leitfaden) diese „Hard-Facts“ nun zusätzlich hinzugezogen werden, verringert sich die Abweichung  $\bar{x}_{MAD}$  der Bewertungsergebnisse um weitere 34 %. Doch neben der Reduzierung des subjektiven Einflusses stellt die gleichzeitig erhöhte generelle Aussagefähigkeit einer Inspektion einen wesentlichen Mehrwert dar, da durch die Messtechnik auch Auffälligkeiten aufgedeckt werden, die bei einer rein visuellen Inspektion nicht erkennbar sind [53, 90].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Reduzierung der Abweichung  $\bar{x}_{MAD}$  zwischen den verschiedenen Bewertungen um etwa 66 % gegenüber der rein erfahrungsbasierten Bewertung erreicht werden kann, wenn die organisatorischen Gegenmaßnahmen (Abschnitt 4.2.1) umgesetzt, die Inspektion durch einen umfangreichen Bewertungsleitfaden (Abschnitt 4.2.2) unterstützt und einfache Messtechnik (Abschnitt 4.2.3) in das Bewertungsmodell integriert werden. Durch das Zusammenspiel von objektivierter, systematischer Sichtkontrolle und dem Einsatz einfacher, aber aussagekräftiger Messtechnik ist eine fundierte, nachvollziehbare und realitätsgerechte Zustandsbewertung von Mittelspannungs-Betriebsmitteln möglich.

Jedoch muss aufgrund der dargelegten Anforderungen an die Eingangsdaten ein verbleibender, subjektiver Einfluss bzw. eine Unsicherheit beachtet werden, die kaum weiter reduzierbar ist. Abbildung 18 zeigt deutlich auf, dass - selbst bei großem Aufwand und Umsetzung der verschiedenen Gegenmaßnahmen - eine Restunsicherheit verbleibt und unvermeidbar ist. Die visuelle Inspektion ist weiterhin durch individuelle Erfahrungen sowie durch subjektive Einflussfaktoren geprägt, jedoch kann dieser Einfluss durch wirksame Gegenmaßnahmen wesentlich

reduziert werden. Bspw. ist die Wahrnehmung von Reizen trotz aller Maßnahmen nicht normiert und bleibt damit personenabhängig. Neben der Unsicherheit durch den subjektiven Einfluss fließt durch den Einsatz von Messverfahren auch die Messungenauigkeit mit ein. Daher muss die Unsicherheit bei der Zustandsbewertung berücksichtigt und im Modell verarbeitet werden. Dieses geschieht ausführlich in Kapitel 5.

Wie dargestellt, hat die Subjektivität einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Einzelbewertungen vor Ort und es könnte die Ansicht vertreten werden, dass eine visuelle Inspektion als Entscheidungsgrundlage nicht geeignet sei. Doch in den meisten praktisch relevanten Entscheidungssituationen, so auch im Asset Management, liegen häufig aber gar keine vollständig „objektiven“ Daten vor oder sind nur mit erheblichem Aufwand zu generieren. Hierbei sei bspw. erwähnt, dass selbst die Interpretation von vermeintlich objektiven Messwerten durch Personen einer subjektiven Beurteilung unterlegen ist. In praktischen Entscheidungssituationen kann also gar nicht auf „subjektive“ Daten und Expertenmeinungen verzichtet werden, da diese einen erheblichen Informationswert für die Entscheidungsunterstützung darstellen [80]. Die Ergebnisse in realen Situationen unterliegen also immer einer gewissen, unvermeidbaren Unsicherheit (vgl. Abbildung 18).

Unsicherheiten im Ingenieurbereich lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, wobei die Ursache für die Unsicherheit das wesentliche Differenzierungsmerkmal ist: [101, 102, 103, 104]

Unter **aleatorischen Unsicherheiten** werden Unsicherheiten verstanden, die auf Zufälligkeit eines betrachteten Ereignisses basieren. Sie werden auch als objektive, zufällige oder stochastische Unsicherheiten bezeichnet und sind weder reduzierbar, noch vermeidbar.

Unter **epistemischen Unsicherheiten** werden dagegen Unsicherheiten verstanden, die durch Informationsdefizite bzw. aus unvollständigem Wissen, aus konfliktbehafteten Informationen oder ungenauen Informationen resultieren [105]. Sie werden auch als subjektive oder erkenntnistheoretische Unsicherheiten bezeichnet, die wesentlich vom derzeitigen Wissensstand abhängen und lassen sich durch Hinzunahme zusätzlicher Informationen reduzieren.

In dieser Arbeit werden beide Kategorien der Unsicherheit bei der Zustandsbewertung behandelt. Es stellt sich die Frage, mit welcher Sicherheit ein unscharfer Ausdruck (Bewertungspunkt  $B_i$ ) gilt, d. h. mit welcher Sicherheit kommen die Experten zu gleichen Urteilen. Diese Fragestellung grenzt die Unsicherheit z. B. von der Vagheit oder Unschärfe (Fuzzy-Theorie) ab [106]. Durch die Gegenmaßnahmen und weitere Informationen kann diese (epistemische) Unsicherheit weiter reduziert werden.



## 5 Evidenz-Theorie zur Modellierung von Unsicherheit

Aufgrund der Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Zustandsbewertung im Verteilungsnetz stehen für die Modelle in der Regel keine umfangreichen, vollständig vorhandenen Eingangsdaten zur Verfügung und damit liegen Unsicherheiten vor. Die Evidenz-Theorie unterscheidet grundsätzlich zwischen Mangel an Sicherheit und Unwissenheit über die Eingangsdaten und erlaubt die Berücksichtigung und Darstellung von unvollständigen bzw. unsicheren Informationen. So wird bspw. zur Verarbeitung unsicheren medizinischen Wissens die Evidenz-Theorie angewendet [107]. Nach [104, 108] ist die Evidenz-Theorie insbesondere auch zur Einbeziehung von Expertenwissen als epistemische Unsicherheit geeignet. Doch neben den epistemischen Unsicherheiten können auch aleatorische Unsicherheiten mit behandelt werden. Durch die Verwendung von Glaubens- und Plausibilitätsfunktionen werden mathematische Grundlagen zur Verarbeitung beider Arten von Unsicherheiten bereitgestellt [102, 105].

Außerdem stehen im Bereich der Zustandsbewertung eine Vielzahl verschiedener Informationsquellen (visuelle Inspektionen, verschiedene Messverfahren etc.) in unterschiedlicher Qualität und Aussagefähigkeit zur Verfügung. Diese heterogenen Hinweise auf einen Zustand und die inhärente unterschiedliche Datenqualität der Quellen können unter Anwendung der Evidenz-Theorie zu einer einheitlichen Aussage kombiniert werden. Somit wird die Glaubwürdigkeit der zugrundeliegenden Quellen in das Bewertungsmodell mit eingebunden [102, 104]. Für das Asset Management wird die „Verlässlichkeit“ der ermittelten Zustandsindices als zusätzliches Bewertungskriterium deutlich.

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen kurz erläutert und die Modellierung und Adaptierung für das Zustandsbewertungsmodell dargestellt.

### 5.1 Theoretische Grundlage der Evidenz-Theorie

Die Evidenz-Theorie ist von Shafer [109] aufbauend auf einer grundlegenden Arbeit von Dempster [110] entwickelt worden. Sie wird daher häufig auch als Dempster-Shafer-Theorie bezeichnet. Sie ist ein probates Modell für plausibles Schließen und wird verwendet, um Aussagen über Plausibilität und Unwissenheit tätigen zu können. Sie stellt eine Verallgemeinerung der Wahrscheinlichkeitstheorie nach Bayes dar [111].

Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist die klassische Theorie zur Verarbeitung von Unsicherheiten und Wahrscheinlichkeiten. Ihr grundlegender Nachteil besteht allerdings darin, dass exakte Werte für Wahrscheinlichkeiten vorliegen müssen und dass nicht zwischen aleatorischer Unsicherheit und von der durch fehlendes Wissen bedingten (epistemischen) Unsicherheit (Unwissenheit) unterschieden wird. Wenn zwei Ereignisse  $A$  oder  $\bar{A}$  eintreten können, bedeutet dieses, dass bei einer gegebenen Eintrittswahrscheinlichkeit  $p(A)$  sich die Wahrscheinlichkeit für das Komplement  $p(\bar{A})$  nach den Axiomen von Kolmogoroff ergänzen ( $p(A) + p(\bar{A}) = 1$ ). Das Ereignis

$A$  oder dessen Gegenereignis  $\bar{A}$  treten mit Gewissheit ein. Bei der Verwendung von Wahrscheinlichkeiten geht also auch immer das konkrete Wissen über die Grundgesamtheit mit ein. Es besteht also kein Unterschied zwischen der Unwissenheit einer Aussage und Informationen, die das Komplement unterstützen. Fehlende Unterstützung für  $A$  bedingt Unterstützung für  $\bar{A}$ . Bei vollständiger Unwissenheit über das Ereignis  $A$  bzw.  $\bar{A}$  würde eine Gleichverteilung der Wahrscheinlichkeit  $p(A) = p(\bar{A}) = 0,5$  angenommen werden, obwohl über beide Ereignisse keinerlei Informationen vorliegen [31, 107, 112].

Die Evidenz-Theorie schafft hier Abhilfe, indem Glaubens- und Plausibilitätsfunktionen eine explizite Repräsentation von Unsicherheit erlauben. Neben den Glaubensgraden für und gegen eine Aussage wird noch eine weitere Größe, die Unsicherheit, betrachtet. Diese Unsicherheit kann weder dem Ereignis  $A$  noch dessen Komplement  $\bar{A}$  eindeutig zugeordnet werden, beide Zugehörigkeiten sind möglich. Ein schwacher Hinweis für ein Ereignis bedeutet nicht automatisch einen starken Hinweis für dessen Komplementereignis.

Ausgangspunkt der Evidenz-Theorie ist eine endliche Grundmenge aller sich gegenseitig ausschließenden Ereignisse oder Aussagen  $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , die in einer betrachteten Situation auftreten können. Diese Grundmenge wird auch als Wahrnehmungsrahmen (*frame of discernment*) bezeichnet und beinhaltet alle möglichen, in Frage kommenden Ereignisse oder Aussagen. Im Unterschied zur Wahrscheinlichkeitstheorie wird nun nicht jeder einzelnen Aussage von  $\Theta$  eine Wahrscheinlichkeit  $p(A_n)$  zugewiesen, wobei deren Summe wieder 1 ergeben muss, sondern die Verteilung erfolgt auf alle möglichen Kombinationen/Teilmenge von Aussagen  $A$  aus  $\Theta$ . Das hat den Vorteil, dass, wenn nun ein Hinweis gegen die Aussage  $A_1$  spricht, die Wahrscheinlichkeit der anderen Aussagen  $A_2, \dots, A_n$  nicht erhöht werden, sondern stattdessen das Vertrauen in die komplementäre Teilmenge  $\{A_2, \dots, A_n\}$  höher bewertet wird. Die Menge aller möglichen Teilmengen wird Potenzmenge  $2^\Theta$  genannt und allen Teilmengen  $A$  von  $\Theta$  können Massezahlen  $m(A)$  bzw. Basis-Wahrscheinlichkeits-Zuweisungen (*basic probability assignment, bpa*) zugeordnet werden. Die Werte für  $m(A)$  liegen zwischen 0 und 1 [31, 104, 112].

Massezahlen stellen die Basismaße der Evidenz-Theorie dar und liefern die Bausteine für die Glaubens- und Plausibilitätsfunktionen. Ein Basismaß wird auch als Evidenz bezeichnet. Sie können als Mengenfunktion  $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$  beschrieben werden und müssen die folgenden Bedingungen erfüllen: [112]

$$m(\emptyset) = 0 \quad (5.1)$$

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (5.2)$$

Die Größe  $m(A)$  heißt Massezahl von  $A$  und gibt den Grad der Sicherheit bzw. das Maß der Unterstützung an, das exakt der Menge (bzw. der Aussage)  $A$  entgegengebracht wird, nicht aber einer speziellen Teilmenge davon. Die Teilmengen mit  $m(A) > 0$  heißen auch fokale Elemente. Der Wert  $m(A) = 0$  bzw. die leere Menge  $\emptyset$  bedeutet dagegen keine Unterstützung. Ein Wert von



$m(A) = 1$  repräsentiert entsprechend die vollkommene Unterstützung einer Aussage  $A$ . Ein kompletter Satz von Massezahlen für  $\Theta$  heißt Evidenzkörper (*body of evidence*). Für einen Evidenzkörper werden auch die Begriffe Evidenzquelle oder Hinweis gebraucht [31].

Mithilfe der Massezahlen  $m(A)$  werden noch zwei weitere Funktionen im Rahmen der Evidenz-Theorie definiert, die Glaubens- und Plausibilitätsfunktionen. Die Glaubensfunktion (*belief*) ist wie folgt definiert:

$$Bel : 2^\Theta \rightarrow [0,1], \quad Bel(A) = \sum_{T \subseteq A} m(T) \quad (5.3)$$

Der Glaubensgrad (*degree of belief*)  $Bel(A)$  ist das Maß an Glauben, das mit Sicherheit der interessierten Menge (bzw. der Aussage)  $A$ , auch einer speziellen Teilmenge  $T$  davon, zugewiesen wird oder anders ausgedrückt, wie stark die Hinweise für die Aussage  $A$  sprechen.  $Bel(A)$  resultiert aus der Gesamtsumme aller Massezahlen, die ausschließlich Hinweise für die Aussage  $A$  liefern, d. h. also von Massezahlen aller echten Teilmengen  $T$  von  $A$ . Im Glaubensgrad werden also die Massezahlen derjenigen Mengen berücksichtigt, die ganz in  $A$  liegen [31, 104, 111, 112].

Der Plausibilitätsfunktion (*plausibility*) erweitert die Glaubensfunktion und ist wie folgt definiert:

$$Pl : 2^\Theta \rightarrow [0,1], \quad Pl(A) = \sum_{T \cap A \neq \emptyset} m(T) \quad (5.4)$$

Der Plausibilitätsgrad (*degree of plausibility*)  $Pl(A)$  gibt also das Maß an Plausibilität an, das möglicherweise der interessierten Menge (bzw. der Aussage)  $A$  zugewiesen werden kann oder anders ausgedrückt, welche Hinweise die Aussage  $A$  prinzipiell überhaupt möglich machen. Dieses Maß beinhaltet also zusätzlich auch die Mengen, die mit  $A$  überlappen.  $Pl(A)$  resultiert somit aus der Gesamtsumme der Massezahlen aller Teilmengen  $T$ , die eine Schnittmenge mit  $A$  aufweisen, jedoch nicht leer sind. Alle Hinweise, die in den Glaubensgrad eingehen, gehen auch in den Plausibilitätsgrad ein, da  $A$  selbst sowie alle echten Teilmengen  $T$  von  $A$  eine nichtleere Schnittmenge mit  $A$  aufweisen. Zusätzlich gehen noch die Massezahlen der Mengen mit ein, die nicht ganz in  $A$  liegen, sondern sich nur zum Teil mit  $A$  überschneiden [31, 104, 111, 112].

Somit ist auch sichergestellt, dass der Glaubensgrad nicht größer sein kann als der Plausibilitätsgrad und es gilt:

$$0 \leq Bel(A) \leq Pl(A) \leq 1, \quad \forall A \subseteq \Theta \quad (5.5)$$

Der Plausibilitätsgrad spiegelt also die Summe der Massezahlen wider, die nicht gegen die Aussage  $A$  (d. h. also für  $\bar{A}$ ) sprechen bzw. Aussage  $A$  nicht widerlegen. Glaubens- und Plausibilitätsgrad sind somit nicht unabhängig voneinander, sondern dual und es besteht folgender Zusammenhang:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (5.6)$$

$$\text{sowie } Pl(\bar{A}) = 1 - Bel(A) \quad (5.7)$$

Durch die Glaubens- und Plausibilitätsfunktionen ergibt sich also für die Aussage  $A$  ein Intervall  $[Bel(A), Pl(A)]$ . Die untere Grenze ist durch  $Bel(A)$ , die obere Grenze durch  $Pl(A)$  gegeben. Die Differenz  $Pl(A) - Bel(A)$  kann als ein Gradmesser für die Unsicherheit bzgl.  $A$  angesehen werden. In diesem Intervallbereich liegen ausschließlich Hinweise vor, die nicht vollkommen der Aussage  $A$  zugeordnet werden können, sondern lediglich eine gemeinsame Schnittmenge besitzen. Je breiter das Intervall ist, desto weniger vertrauenswürdig ist die Aussage  $A$ . Das gesamte Intervall  $[Bel(A), Pl(A)] = [0,1]$  drückt vollständige Unsicherheit aus. Im Grenzfall, wenn Glauben und Plausibilität zusammenfallen, geht der Ansatz in die Wahrscheinlichkeitstheorie über [31, 107, 111].

Abbildung 19 veranschaulicht abschließend in übersichtlicher Form die Unterschiede der dargestellten Evidenz-Theorie gegenüber der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie.

	Hypothese: $A$ : Instandhaltungsbedarf vorhanden <span style="margin-left: 100px;"><math>\bar{A}</math> : kein Instandhaltungsbedarf vorhanden</span>	
	Klassische Wahrscheinlichkeitstheorie	Evidenz-Theorie
Grundbegriffe	Eintrittswahrscheinlichkeiten für $p(A)$ und gegen $p(\bar{A})$	Massezahlen $m(A)$ , $m(\bar{A})$ , $m(U)$ Glaubensgrad $Bel(A)$ , $Bel(\bar{A})$ Plausibilitätsgrad $Pl(A)$ , $Pl(\bar{A})$
Ergebnisdarstellung	<p style="text-align: center;">Bewertungsergebnis</p>	<p style="text-align: center;">Intervall Bewertungsergebnis</p>

Abbildung 19 – Vergleich von Wahrscheinlichkeits- und Evidenz-Theorie (in Anlehnung an [31])

Die Evidenz-Theorie erweitert die Wahrscheinlichkeitstheorie also um einen zusätzlichen Bereich, der die Unsicherheit der Hinweise und des Bewertungsergebnisses darstellt. Jeder Hinweis aus einer Informationsquelle (z. B. visuelle Inspektion, eingesetzte Messverfahren) über die betrachtete Aussage wird durch die drei Massezahlen  $m(A)$ ,  $m(\bar{A})$  und  $m(U)$  beschrieben. Die Werte sind aber wie beschrieben nicht mit Eintrittswahrscheinlichkeiten gleichzusetzen. Als Endresultat ergeben sich daraus ein Glaubensgrad und ein Unsicherheitsbereich für die Aussage. Die Erweiterung des Glaubensgrades um den Unsicherheitsbereich führt zum Plausibilitätsgrad. Es entstehen je ein Plausibilitätsgrad und ein Glaubensgrad für die Aussage und die zugehörige Gegenaussage. Die Ergebnisdarstellung gilt sowohl für einen einzelnen Hinweis bzw. Satz von Massezahlen, als auch für die Kombination von mehreren, unterschiedlichen Hinweisen [31].

## 5.2 Kombination von unterschiedlichen Hinweisen

Ein zentraler Vorteil der Evidenz-Theorie ist die Möglichkeit zur Kombination von z. T. auch widersprüchlichen Hinweisen auf eine Aussage aus unterschiedlichen Informationsquellen. Zur Kombination dieser unterschiedlichen Hinweise gibt es mehrere unterschiedliche Typen von Kombinationsregeln, die sich prinzipiell darin unterscheiden, wie mit speziellen Problemen - vor allem widersprüchlichen Hinweisen - umgegangen wird, um eine aggregierte Gesamtaussage zu treffen. Eine Übersicht über verschiedene Regeln und weiterführende Literaturangaben sind in [102], [113] und [114] zu finden.

Die klassische Regel der Evidenz-Theorie zur Kombination von unabhängigen Hinweisen ist die Dempster'sche Regel [109]. Neben dieser sollen im Folgenden noch die Yager'sche Regel, die Dubois und Prade'sche Regel sowie die PCR5-Regel nach Smarandache und Dezert kurz vorgestellt und auf ihre Eignung im Kontext der Zustandsbewertung an einem Beispiel überprüft werden. In Abschnitt 5.2.6 werden die Ergebnisse des Beispiels dann gegenübergestellt und diskutiert. Das Beispiel (Abbildung 20) zeigt zwei Hinweise und den zugehörigen Satz an Massezahlen, die relativ widersprüchliche Hinweise (Verhältnis rot und grün) darstellen. Denn der Hinweis  $m_1$  unterstützt die Aussage  $A$  ( $m_1(A) = 0,6$ ), wohingegen der Hinweis  $m_2$  die komplementäre Aussage  $B$  unterstützt ( $m_2(B) = 0,8$ ). So kann bspw. Hinweis  $m_1$  aus einer Sichtkontrolle („Soft-Fact“) und Hinweis  $m_2$  aus einem messtechnischen Ergebnis („Hard-Fact“) stammen.

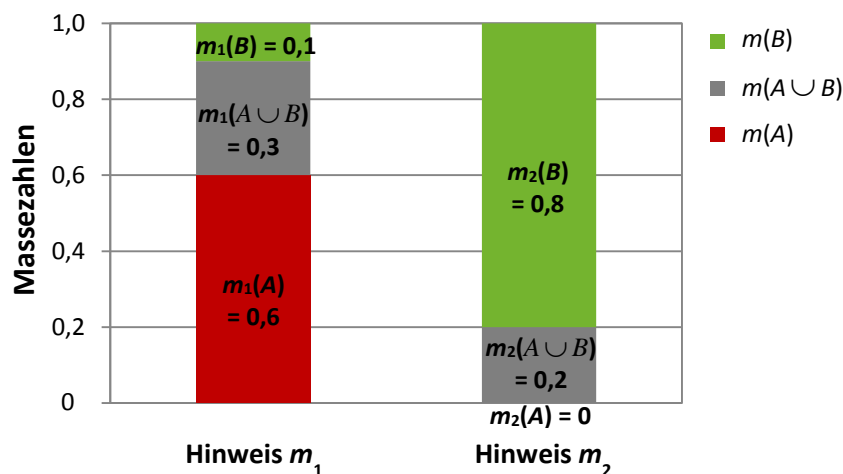


Abbildung 20 – Beispielhafte Massezahlen für die Kombination von Hinweisen

### 5.2.1 Dempster'sche Regel

Die Dempster-Regel zur Kombination ist die klassische und am weitesten verbreitete Regel. Sie kombiniert die unterschiedlichen Quellen, die im gleichen Betrachtungsrahmen (*frame of discernment*) liegen, aber unabhängige Hinweise voneinander für das Ereignis  $A$  darstellen. Nach folgender Definition werden bspw. zwei Massezahlen nach der Dempster-Regel miteinander aggregiert:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2)}{1 - K} & \text{wenn } A \neq \emptyset \\ 0 & \text{wenn } A = \emptyset \end{cases} \quad (5.8)$$

$$\text{wobei } K = \sum_{T_1 \cap T_2 = \emptyset} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) \quad (5.9)$$

Im Zähler werden alle Produkte der Massezahlen  $m_1(T_1)$  bzw.  $m_2(T_2)$  aufsummiert, deren Hinweise für das Ereignis  $A$  sprechen. Hierbei werden auch die Massezahlen mit berücksichtigt, deren Hinweise mit Unsicherheit verbunden sind. Der Nenner behandelt alle Produkte der Massezahlen, wenn die beiden Hinweise in Konflikt stehen, sich also bzgl. Aussage  $A$  widersprechen. Die Schnittmenge beider Hinweise ist in dem Fall null. Der Nenner  $(1 - K)$  wird auch als Normierungsfaktor bezeichnet und skaliert alle anderen Massezahlen, um wieder die Summe 1 zu erhalten. Der Konflikt aus den widersprüchlichen Hinweisen wird dadurch beseitigt bzw. ignoriert und der leeren Menge zugeordnet. Beispielsweise ist die Dempster-Regel für  $K = 1$  (Widerspruch) nicht definiert. Bei stark konfliktbehafteten Informationsquellen kann dieses zu nicht intuitiven Gesamtaussagen führen. Der Umgang mit solchen konfliktbehafteten Hinweisen hat zur Entwicklung alternativer Regeln geführt [31, 104, 111].

Für das aufgeführte Beispiel ergibt sich unter Anwendung der Dempster-Regel:

$$\begin{aligned} m_{12}(A) &= \frac{m_1(A) \cdot m_2(A) + m_1(A) \cdot m_2(A \cup B) + m_1(A \cup B) \cdot m_2(A)}{1 - (m_1(A) \cdot m_2(B) + m_1(B) \cdot m_2(A))} \\ &= \frac{0,6 \cdot 0 + 0,6 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0}{1 - (0,6 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0)} \\ &= \frac{0,12}{1 - 0,48} = \underline{\underline{0,231}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{12}(B) &= \frac{m_1(B) \cdot m_2(B) + m_1(B) \cdot m_2(A \cup B) + m_1(A \cup B) \cdot m_2(B)}{1 - (m_1(A) \cdot m_2(B) + m_1(B) \cdot m_2(A))} \\ &= \frac{0,1 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,8}{1 - (0,6 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0)} \\ &= \frac{0,34}{1 - 0,48} = \underline{\underline{0,654}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{12}(A \cup B) &= \frac{m_1(A \cup B) \cdot m_2(A \cup B)}{1 - (m_1(A) \cdot m_2(B) + m_1(B) \cdot m_2(A))} \\ &= \frac{0,3 \cdot 0,2}{1 - (0,6 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0)} \\ &= \frac{0,06}{1 - 0,48} = \underline{\underline{0,115}} \end{aligned}$$

$$m_{12}(\emptyset) = 0$$

Es können aber natürlich auch mehr als zwei Hinweise miteinander kombiniert werden. Da die Verknüpfung  $\oplus$  assoziativ und kommutativ ist, kann die Kombination von mehr als zwei Hinweisen aus verschiedenen Quellen sukzessive und ohne Berücksichtigung der Reihenfolge der einzelnen Kombinationen erfolgen. Dieses verdeutlicht die folgende Gleichung für  $n$  Hinweise:

$$m_{1,\dots,n} = (\dots((m_1 \oplus m_2) \oplus m_3) \oplus \dots m_n) \quad (5.10)$$

Durch jede weitere Kombination, d. h. durch jedes zusätzliche Wissen über die Aussage  $A$ , wird die Unsicherheit bzgl. der Aussage verringert und in der Regel die Glaubwürdigkeit der Aussage erhöht. Lediglich die Kombination mit vollständiger Unwissenheit ( $m(A \cup B) = 1$ ) führt zu keiner Veränderung der vorherigen Massezahlen [30, 109, 112].

### 5.2.2 Yager'sche Regel

Die Kombinationsregel von Yager [115] interpretiert den auftretenden Konflikt zwischen Hinweisen als Unsicherheit über die resultierende Gesamtaussage. Es kann keine eindeutige bzw. sichere Aussage durch diese Kombination getroffen werden, weil sich die Hinweise widersprechen. Es erfolgt daher keine Normierung ( $1 - K$ ) wie bei der Dempster-Regel, d. h. eine Verteilung auf die anderen Massezahlen, sondern der Konflikt wird vollständig dem Grad der Unsicherheit zugeordnet. Die leere Menge aus der konfliktbehafteten Kombination wird der Menge aller Hypothesen zugeordnet, womit die Summe wieder 1 ergibt. Die Yager-Regel ist für  $A, T_1, T_2 \subset \Theta$  wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} m_1 \oplus m_2(\emptyset) &= 0 \\ m_1 \oplus m_2(A) &= \sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) \\ m_1 \oplus m_2(\Theta) &= m_1(\Theta) + m_2(\Theta) + \sum_{T_1 \cap T_2 = \emptyset} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Durch das Zuordnen des Konflikts zur Unsicherheit kann dieses dazu führen, dass nur sehr unspezifische Aussagen getroffen werden können. Die Unsicherheit ist in der Regel dann wesentlich größer als bei der Dempster-Regel. Dieses verdeutlicht auch das Zahlenbeispiel.  $m_{12}(A)$  und  $m_{12}(B)$  entsprechen dem Zähler bei der Dempster-Regel, da auf die Normierung verzichtet wird.

$$\begin{aligned} m_{12}(A) &= 0,12 \\ m_{12}(B) &= 0,34 \\ m_{12}(A \cup B) &= 0,06 + 0,48 = 0,54 \end{aligned}$$

### 5.2.3 Dubois & Prade'sche Regel

Diese Regel [116] geht von der Annahme aus, dass beide Informationsquellen zuverlässig sind, wenn sie nicht in Konflikt stehen. Sind nun die beiden Informationsquellen aber bei einer Aussage

widersprüchlich, liefert wenigstens eine Informationsquelle die richtige Aussage. Daher wird bei dieser Regel das Konfliktmaß nicht der Unsicherheit wie bei der Yager-Regel, sondern der Menge  $T_1$  oder  $T_2$  zugeordnet und ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} m_1 \oplus m_2(\emptyset) &= 0 \\ m_1 \oplus m_2(A) &= \sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) + \sum_{\substack{T_1 \cup T_2 = A \\ T_1 \cap T_2 = \emptyset}} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Für den Wahrnehmungsrahmen  $\Theta = 2$ , wie auch im Zahlenbeispiel gegeben, führen die Regel nach Dubois & Prade und die Regel nach Yager zum gleichen Ergebnis. Für größere Wahrnehmungsrahmen werden dagegen die internen Konflikte separat betrachtet und nicht nur der gesamte Konflikt verteilt.

#### 5.2.4 Proportional Conflict Redistribution rule (PCR5)

Smarandache und Dezert [114] haben noch weitere Methoden entwickelt, die sich der proportionalen Umverteilung des Konfliktmaßes widmen. Diese werden auch als *Proportional Conflict Redistribution rules* (PCR) bezeichnet. Zuerst werden dabei, wie bei den vorgenannten Regeln, die Produkte der Massezahlen  $m_1(T_1)$  bzw.  $m_2(T_2)$  nach der konjunktiven Regel aufsummiert. In einem zweiten Schritt erfolgt anschließend die Umverteilung des Konfliktmaßes auf die übrigen Massezahlen. Die mathematisch exakteste Regel ist dabei die PCR5, die wie folgt definiert ist:

$$\begin{aligned} m_1 \oplus m_2(\emptyset) &= 0 \\ m_1 \oplus m_2(A) &= \sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) + \sum_{T_1 \cap T_2 = \emptyset} \left( \frac{m_1(T_1)^2 \cdot m_2(T_2)}{m_1(T_1) + m_2(T_2)} + \frac{m_2(T_1)^2 \cdot m_1(T_2)}{m_2(T_1) + m_1(T_2)} \right) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Die Kombination lässt sich übersichtlich am besten an dem Zahlenbeispiel aus Abbildung 20 verdeutlichen. Der auftretende Konflikt  $K = 0,48$  wird auf die Elemente verteilt, die auch an dem Konflikt beteiligt sind, d. h. auf  $A$  und  $B$  (nicht aber  $A \cup B$ ) zugeordnet und deren Massezahl somit erhöht. Dabei erfolgt die Verteilung proportional zur Massezahl der zugrundeliegenden Quelle unter Berücksichtigung der Teilkonflikte. Für das Beispiel bedeutet dieses also:

$$K = \underbrace{m_1(A) \cdot m_2(B)}_{k_1} + \underbrace{m_1(B) \cdot m_2(A)}_{k_2} = 0,6 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0 = 0,48 \quad (5.14)$$

Der gesamte Konflikt  $K$  besteht somit aus den zwei Teilkonflikten  $k_1$  und  $k_2$ . Für diese Teilkonflikte werden nun die Gewichtungsfaktoren für die Verteilung auf  $A$  und  $B$  entsprechend der zugrundeliegenden Massezahlen  $m(A)$  bzw.  $m(B)$  bestimmt. Dabei stellt  $x$  den Anteil des Konfliktmaßes für die Verteilung auf  $A$  dar und  $y$  den Anteil auf  $B$ . Da im Beispiel der Hinweis  $m_2(A) = 0$  ist, liegt Teilkonflikt  $k_2$  nicht vor ( $k_2 = 0$ ) und somit braucht keine Verteilung auf  $A$  und

$B$  erfolgen. Für Teilkonflikt  $k_1$  ( $k_1 \neq 0$ ) erfolgt dagegen eine Verteilung des Konflikts und es ergibt sich [115]:

$$\begin{aligned}
 k_1: \quad \frac{x_{1,A}}{m_1(A)} &= \frac{y_{1,B}}{m_2(B)} & k_2: \quad k_2 &= m_1(B) \cdot m_2(A) = 0,1 \cdot 0 = 0 \\
 \frac{x_{1,A}}{0,6} &= \frac{y_{1,B}}{0,8} = \frac{0,6 \cdot 0,8}{0,6 + 0,8} = 0,343 & & \\
 x_{1,A} &= 0,343 \cdot 0,6 = 0,206 & x_{2,A} &= 0 \\
 y_{1,B} &= 0,343 \cdot 0,8 = 0,274 & y_{2,B} &= 0
 \end{aligned}$$

$$\text{Probe: } K = x_{1,A} + x_{2,A} + y_{1,B} + y_{2,B} = 0,48$$

In Summe folgt aus der Kombination nach der PCR5-Regel folgendes Ergebnis:

$$\begin{aligned}
 m_{12}(A) &= 0,12 + 0,206 = 0,326 \\
 m_{12}(B) &= 0,34 + 0,274 = 0,614 \\
 m_{12}(A \cup B) &= 0,06
 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der konfliktbehafteten Massezahlen in die Gleichung 5.13 ergibt sich ebenfalls dieses Ergebnis.

### 5.2.5 „Worst/Best-Case“-Regel

Diese Regel geht auch wieder von der Annahme aus, dass beide Informationsquellen zuverlässig sind, wenn sie nicht in Konflikt stehen. Tritt dagegen ein Konflikt zwischen den Informationsquellen auf, so wird dieser umverteilt. Diese Regel stellt nun einen Spezialfall der Umverteilung des Konfliktmaßes dar, denn der auftretende Konflikt aus den widersprüchlichen Hinweisen wird einer der beiden Aussagen ( $A$  bzw.  $B$ ) zugeordnet. [114] Wie bei allen vorgestellten Regeln werden zuerst die Produkte der Massezahlen  $m_1(T_1)$  bzw.  $m_2(T_2)$  nach der konjunktiven Regel aufsummiert. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Verteilung des auftretenden Konfliktmaßes, hier nun lediglich auf die Massezahlen der Aussage  $A$ , nicht aber auf die Aussage  $B$ . Diese Annahme könnte aber analog für den konträren Fall  $B$  zugrunde gelegt werden. Es ergibt sich für Aussage  $A$  entsprechend:

$$\begin{aligned}
 m_1 \oplus m_2(\emptyset) &= 0 \\
 m_1 \oplus m_2(A) &= \sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) + \sum_{T_1 \cap T_2 = \emptyset} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) & (5.15) \\
 m_1 \oplus m_2(\Theta) &= m_1(\Theta) + m_2(\Theta)
 \end{aligned}$$

Wenn die Hinweise nicht im Widerspruch sind, unterstützen beide die Aussage  $A$  und es ergeben sich die gleichen Ergebnisse wie bei der Dempster-Regel. Tritt nun ein Widerspruch auf, d. h. nur einer von beiden Hinweisen ( $m_1$  oder  $m_2$ ) deutet stark auf die Aussage  $A$  hin, wird der resultierende Konflikt  $K$  der kombinierten Massezahl  $m_{12}(A)$  zugeordnet. Der Konflikt an sich zwischen

den Informationsquellen ist hier prinzipiell nicht entscheidend, sondern es werden nur die Hinweise für die Aussage  $A$  berücksichtigt. Für das Zahlenbeispiel ergeben sich durch diese Regel folgende Ergebnisse:

$$m_{12}(A) = 0,12 + 0,48 = 0,60$$

$$m_{12}(B) = 0,34$$

$$m_{12}(A \cup B) = 0,06$$

### 5.2.6 Diskussion der Kombinationsregeln für die Zustandsbewertung

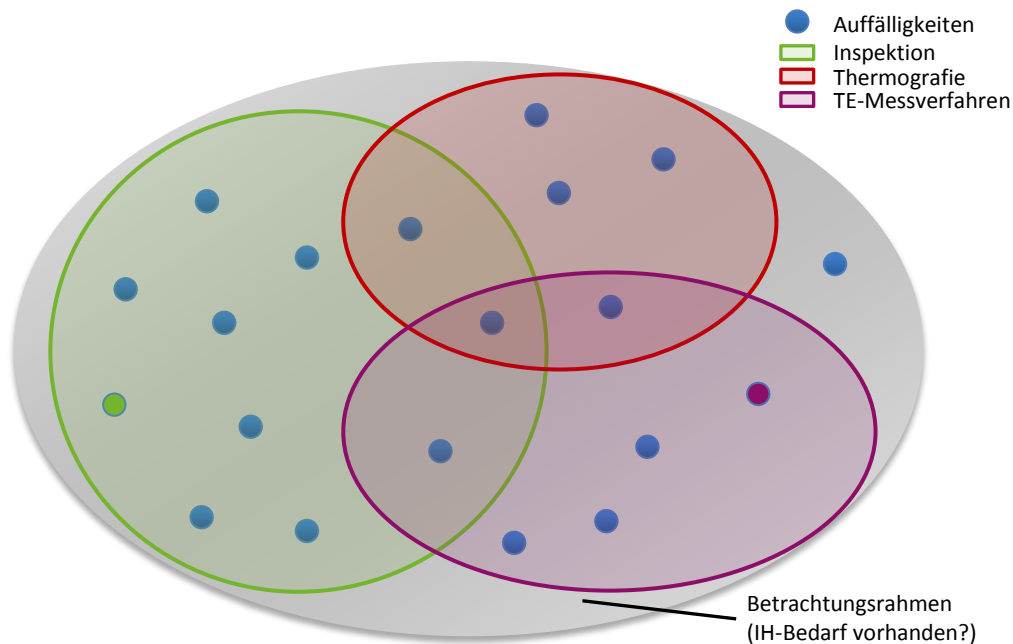
Die Wahl der Kombinationsregel hat einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtaussage. Hierbei spielt der unterschiedliche Umgang mit Konflikten bei der Kombination von Evidenzen eine entscheidende Rolle. Generell gibt es dabei in der Forschung keinen Leitfaden, welche Kombinationsregel in welchem Anwendungsfall am besten geeignet ist und muss deshalb individuell geprüft werden [102, 114].

Die Dempster-Regel hat ihr Vorteile bei der Kombination von Evidenzen, die sich nur gering widersprechen und wenn dieser Konflikt nur eine geringe Bedeutung hat. Der auftretende Konflikt wird durch die Normierung ignoriert. Liegt kein Konflikt vor, führen die vorgestellten Regeln zu gleichen Ergebnissen. Die Yager-Regel berücksichtigt den auftretenden Konflikt, jedoch führt dieses zu einem sehr starken Anstieg der Unsicherheit. Dadurch fällt es schwer, eine geeignete Gesamtaussage daraus abzuleiten. Ähnliches tritt bei der Regel von Dubois & Prade auf. Die PCR5-Regel verteilt den Konflikt proportional, die „Worst/Best-Case“-Kombinationsregel vollständig auf eine der beiden Aussagen.

Im Vorfeld muss also der Grad und die Relevanz von Konflikten begutachtet werden, um die am besten geeignete Kombinationsregel auszuwählen. Denn obwohl ein Konflikt vorliegt, muss dieser nicht unbedingt relevant für die betrachtete Situation sein [102]. Im Kontext der Zustandsbewertung wird der auftretende Konflikt nun näher analysiert und anschließend wird ermittelt, welche der angeführten Kombinationsregel unter Berücksichtigung des auftretenden Konflikts zu zufriedenstellenden Ergebnissen bzw. zu einer adäquaten Gesamtaussage für die Zustandsbewertung führt.

Bei der Zustandsbewertung sollen durch die Kombinationsregel die Hinweise aus einer visuellen Inspektion (durch den Experten, „Soft-Facts“) und die Hinweise aus dem Einsatz von verschiedenen Messverfahren („Hard-Facts“) zu einer Gesamtaussage über den Instandhaltungsbedarf bei der betrachteten Komponente aggregiert werden. Es muss dabei der gleiche Betrachtungsrahmen (IH-Bedarf vorhanden?) gelten. Daher können auch unterschiedliche Hinweise eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen, da die Ergebnisse aus Soft-Facts und Hard-Facts sich durchaus widersprechen können. Abbildung 21 verdeutlicht dieses grafisch in einfacher Form am Beispiel eines MS-Kabelendverschlusses.





**Abbildung 21 – Kombination von Eingangsgrößen aus unterschiedlichen Informationsquellen**

Der gesamte Betrachtungsrahmen enthält angenommen 20 verschiedene Auffälligkeiten, die einen Instandhaltungsbedarf am MS-Kabelendverschluss erforderlich machen. Diese Auffälligkeiten können durch unterschiedliche Informationsquellen (Inspektion, Thermografie und TE-Messverfahren) detektiert werden. Von diesen 20 Auffälligkeiten können hier 11 durch eine visuelle Inspektion (d. h. die Auffälligkeiten sind Elemente der Menge „Inspektion“) festgestellt werden. Beispielsweise können aber auch Teilentladungen durch ein Messverfahren detektiert werden, die bei der rein visuellen Inspektion nicht erkannt bzw. übersehen/überhört werden (Differenzmenge, z. B. der lila Punkt in Abbildung 21). Ebenso ist der umgekehrte Fall möglich, dass über die Inspektion durch den Experten beispielsweise am MS-Kabelendverschluss eines Papier-Masse-Kabels ein gravierender Öl-Austritt festgestellt wird, der ins Erdreich sickert und behoben werden muss, aber über die Messverfahren an diesem MS-Kabelendverschluss trotzdem (noch) keine elektrischen Auffälligkeiten detektiert werden (z. B. grüner Punkt in Abbildung 21). Natürlich stellen dieses Extremfälle zwischen unterschiedlichen Bewertungen dar und einige Auffälligkeiten können sowohl durch die Inspektion als auch den Einsatz von unterschiedlichen Messverfahren gleichermaßen erkannt werden (Schnittmenge von Inspektion und TE-Messverfahren). Die Auffälligkeit, die von allen drei Informationsquellen ermittelt werden kann (Schnittmenge), lässt sich entsprechend sehr gesichert feststellen. Jedoch müssen diese Konfliktsituationen ebenfalls zufriedenstellend zu einer realitätsgerechten Aussage über den Instandhaltungsbedarf an der Komponente führen.

Diese Konfliktsituation wird am besten durch die „Worst/Best-Case“-Kombinationsregel gelöst, da der Konflikt der Hypothese „A: Instandhaltungsbedarf erforderlich“ zugeordnet wird. In einer Konfliktsituation liefert eine Informationsquelle Hinweise für einen Instandhaltungsbedarf (z. B. visuelle Inspektion  $B_i = 3$ ), die andere Informationsquelle liefert dagegen keinen Hinweis dafür

(z. B. Messverfahren  $B_i = 1$ ). Die Informationsquellen können z. T. nämlich unterschiedliche Auffälligkeiten (die Hinweise für einen Instandhaltungsbedarf bedeuten) detektieren. Daher ist dieser Widerspruch an sich zwischen den Informationsquellen im Kontext der Zustandsbewertung auch prinzipiell nicht entscheidend, sondern ein Worst-Case bzw. pessimistischer Ansatz ist zielführender, d. h. die (wenn auch nur schwachen) Hinweise für einen Instandhaltungsbedarf aus einer Informationsquelle müssen im kombinierten Ergebnis berücksichtigt werden. Ein solcher Ansatz, der die positiven Hinweise (d. h. kein Instandhaltungsbedarf erforderlich) abschwächt, wird in [29] auch im Hinblick auf die Vermeidung von Betriebsmittelausfällen als plausibel angesehen.

In Abbildung 22 werden die Ergebnisse des Zahlenbeispiels (Abschnitte 5.2.1- 5.2.5) noch mal aufgegriffen und übersichtlich gegenübergestellt. Das Zahlenbeispiel verdeutlicht, dass die gewählte Kombinationsregel im Kontext der Zustandsbewertung am besten geeignet ist.

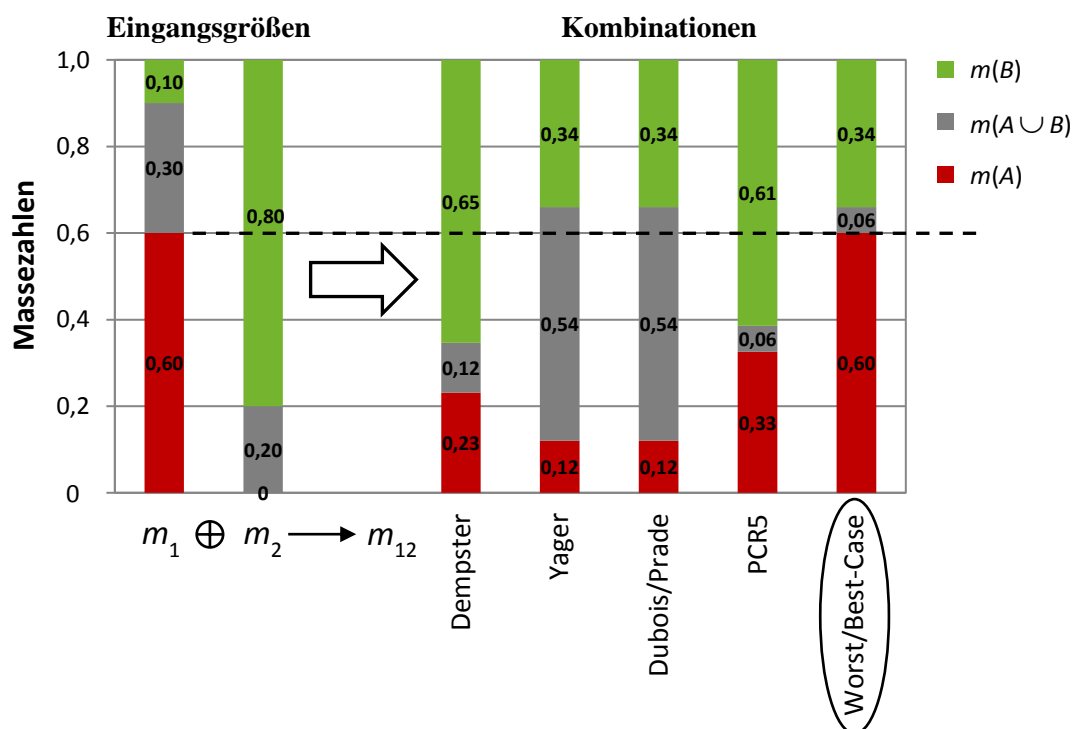


Abbildung 22 – Grafische Darstellung der Kombination von Evidenzen

Die gewählte Kombinationsregel sorgt dafür, dass der Konflikt  $K$  (im Zahlenbeispiel  $K = 0,48$ ) der Hypothese „A: Instandhaltungsbedarf erforderlich“ zugeordnet wird. Wenn beide Hinweise einen Instandhaltungsbedarf feststellen, so wird die resultierende Unterstützung für A erhöht und die Unsicherheit wird stark reduziert. Die Hinweise unterstützen beide die Hypothese A und ohne Widerspruch ergeben sich bei allen alternativen Regeln die gleichen Ergebnisse wie bei der Dempster-Regel. Es liegen konsistente Hinweise und eine sehr große Schnittmenge zwischen den Informationsquellen vor. Dieses gilt ebenfalls für den konträren Fall für  $\bar{A}$ . Tritt nun ein Widerspruch auf, d. h. nur einer von beiden Hinweisen ( $m_1$  oder  $m_2$ ) deutet stark auf einen Instandhaltungsbedarf hin, so sorgt dieses - wie in Abbildung 22 ersichtlich wird - bei fast allen Regeln

für eine Abschwächung der resultierenden Unterstützung für  $A$  durch beide Hinweise. Dieser Effekt ist im Rahmen der Dempster'sche Regel nachvollziehbar und zulässig, weil ein starker Widerspruch nicht die Unterstützung erhöhen kann, sondern es wird die Unsicherheit über die „wahre“ Aussage vergrößert. Über eine geeignete Wahl des Wahrnehmungsrahmens und von Massezahlen kann dieser Effekt reduziert bzw. ausgeschlossen, nicht aber vollständig vermieden werden. Bei der Zustandsbewertung liegt der Fokus aber auf dem Interesse, ob überhaupt ein Hinweis für einen Instandhaltungsbedarf vorliegt (Grundprinzip: ODER-Verknüpfung). Ein schwacher Hinweis für einen Instandhaltungsbedarf (bspw. durch eine unsichere Sichtkontrolle) darf durch einen starken Gegenhinweis (bspw. exakter Messwert) nicht zu stark untergewichtet werden. Die eingehende Massezahl  $m(A)$  eines Hinweises gibt schließlich den Grad der Sicherheit an, dass diese Aussage auch definitiv zutrifft, wenn auch aufgrund der größeren Unsicherheit bzw. geringeren Glaubwürdigkeit mit einem geringeren Wert für  $m(A)$ . Aus diesem Grund ist die „Worst/Best-Case“-Kombinationsregel für die Zustandsbewertung am besten geeignet. In Abbildung 22 wird anhand der Beispielwerte grafisch erkennbar, dass der Hinweis für Hypothese „A: Instandhaltungsbedarf erforderlich“ durch den zusätzlichen Hinweis nicht abgeschwächt wird. Die resultierende Unsicherheit  $m(U)$  geht aber trotzdem stark zurück, weil durch den starken Gegenhinweis zusätzliche Informationen über die betrachtete Komponente und somit keine Hinweise für einen weiteren Instandhaltungsbedarf vorliegen. In Abschnitt 6.2.2 werden die Effekte am Zustandsbewertungsmodell noch einmal veranschaulicht. Somit wird in dieser Arbeit die „Worst/Best-Case“-Kombinationsregel für das Zustandsbewertungsmodell angewendet. Die in allgemeiner Form angegebene Gleichung (5.15) für die Kombination von zwei Hinweisen und dem jeweiligen zugehörigen Satz an Massezahlen wird wie folgt adaptiert und im Bewertungsmodell verwendet:

$$\begin{aligned} m_{12}(A) &= m_1 \oplus m_2(A) \\ &= m_1(A) \cdot m_2(A) + m_1(A) \cdot m_2(A \cup B) + m_1(A \cup B) \cdot m_2(A) \\ &\quad + m_1(A) \cdot m_2(B) + m_1(B) \cdot m_2(A) \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} m_{12}(B) &= m_1 \oplus m_2(B) \\ &= m_1(B) \cdot m_2(B) + m_1(B) \cdot m_2(A \cup B) + m_1(A \cup B) \cdot m_2(B) \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} m_{12}(A \cup B) &= m_1 \oplus m_2(A \cup B) \\ &= m_1(A \cup B) \cdot m_2(A \cup B) \end{aligned} \quad (5.18)$$

Diese Gleichungen verdeutlichen die Kombination von zwei Bewertungsergebnissen (z. B. Sichtkontrolle und ein Messverfahren). Es können aber natürlich auch mehr als zwei Hinweise (weitere Messverfahren etc.) sukzessiv nach Gleichung (5.10) miteinander kombiniert werden.

### 5.3 Modellbildung für die Zustandsbewertung

In diesem Kapitel soll die Adaptierung der vorgestellten Evidenz-Theorie im Rahmen der Modellbildung für die Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln präsentiert werden, basierend auch auf [29, 30, 31, 32, 37].

Bei der Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln des Mittelspannungsnetzes steht neben der Überprüfung einer Einzeldiagnose an den unterschiedlichen Bewertungspunkten insbesondere der Einfluss dieser einzelnen Bewertungspunkte auf den gesamten Betriebsmittelzustand im Vordergrund und ob ein Handlungsbedarf vorliegt. Würde bspw. jede Einzeldiagnose an jedem Inspektionpunkt als eigene Aussage des Wahrnehmungsrahmens einfließen, so würde der relevante Betrachtungsrahmen  $\Theta$  (z. B. bei 73 Inspektionpunkten einer Checkliste) sowie die Potenzmenge  $2^{\Theta}$  (Menge aller Teilmengen) zu groß und damit impraktikabel und komplex werden. Außerdem muss für alle Hinweise der gleiche Betrachtungsrahmen bei einer Komponente gelten. Aus diesem Grund lässt sich der Wahrnehmungsrahmen  $\Theta$  auf eine Hypothese („Instandhaltungsbedarf“) festlegen. Die „positive“ Aussage  $A$  lautet „Es ist ein Instandhaltungsbedarf vorhanden“ und die assoziierte Gegenaussage  $\bar{A}$  „Es ist kein Instandhaltungsbedarf vorhanden“. Für den Wahrnehmungsrahmen lässt sich also schreiben:

$$\Theta = \{A, \bar{A}\} \quad (5.19)$$

Die Menge aller möglichen Teilmengen von  $\Theta$  reduziert sich somit auf die Potenzmenge  $2^{\Theta} = 4$ :

$$2^{\Theta} = \{\emptyset, \{A\}, \{\bar{A}\}, \{A, \bar{A}\}\}, \quad (5.20)$$

wobei die Teilmenge  $\{A, \bar{A}\}$  die Unsicherheit der Hypothese beschreibt. Nur diese Teilmengen können entsprechend auftreten und diesen müssen die Massezahlen (basic probability assignments) zugeordnet werden. Es gilt damit, dass für die beiden Aussagen  $A$  und  $\bar{A}$  die Massezahlen gleichzeitig auch den Glaubensgrad beschreiben, dass an einer betrachteten Komponente ein Instandhaltungsbedarf, kein Instandhaltungsbedarf oder Unkenntnis über jenen Bedarf besteht.

Die verschiedenen Informationsquellen des Zustandsbewertungsmodells, wie die einzelne Expertenmeinung (visuelle Inspektionsbewertung) oder die messtechnische Prüfung verschiedener Inspektionpunkte, liefern Hinweise für die Hypothese „Instandhaltungsbedarf“ und leisten somit ihren entsprechenden Beitrag zur Gesamtbewertung des Betriebsmittels bzw. der betrachteten Hauptinspektionsteile. Jeder Hinweis für einen Inspektionpunkt  $i$  aus einer Informationsquelle (visuelle Inspektion, einzelne Messverfahren) zeichnet sich durch drei Massezahlen aus:

- $m_i(A)$  für die Aussage „Es ist Instandhaltungsbedarf vorhanden“
- $m_i(\bar{A})$  für die Gegenaussage „Es ist kein Instandhaltungsbedarf vorhanden“
- $m_i(U)$  für die Unsicherheit dieser Aussage

Die Massezahlen  $m(A)$  und  $m(\bar{A})$  charakterisieren die quantitative Beziehung im Bereich  $[0, 1]$  zwischen der zugehörigen Eingangsgröße und dem Zustand der betrachteten Komponente, wobei der Zustand hier wiederum über den Grad des Instandhaltungsbedarfs definiert ist. Je größer der Grad an Instandhaltungsbedarf an einem Betriebsmittel ist, desto schlechter wird auch der Zustand dieses betrachteten Betriebsmittels angesehen. Hierbei spiegelt der Wert Null im Gegensatz zur Wahrscheinlichkeitsrechnung kein unmögliches Ereignis wider, sondern besagt lediglich, dass kein Hinweis vorhanden ist, der die Hypothese „Instandhaltungsbedarf“ direkt unterstützt. Der Wert  $m_i(A) = 1$  gibt entsprechend eine vollkommene Unterstützung dieser Hypothese an. Die Summe aller Massezahlen ist dabei stets 1 ( $m_i(A) + m_i(\bar{A}) + m_i(U) = 1$ ). Der noch verbleibende (Grau-)Bereich wird als Unsicherheit interpretiert (siehe Abbildung 23). Die Abbildung zeigt auch die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendete Darstellung von Massezahlen und Glaubensgraden (Evidenzgrößen). Zur eindeutigen Differenzierung werden die kombinierten sowie aggregierten Bewertungsergebnisse (Glaubensgrade  $Bel_i$ ) normiert prozentual angegeben, die Massezahlen der Eingangsgrößen  $m_i$  dagegen als Dezimalwerte von 0 bis 1.

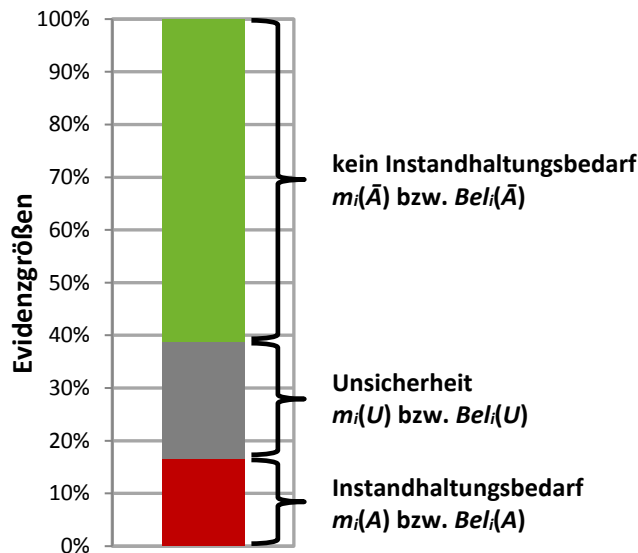


Abbildung 23 – Prinzipielle Darstellung der Evidenz-Theorie

Liegen lediglich Hinweise aus einer einzigen Informationsquelle (z. B. visuelle Inspektion) für einen Inspektionspunkt  $i$  vor, so beschreiben die Massezahlen ( $m_i(A)$ ,  $m_i(\bar{A})$ ,  $m_i(U)$ ) dieser Quelle gleichzeitig auch die Glaubensgrade ( $Bel_i(A)$ ,  $Bel_i(\bar{A})$ ,  $Bel_i(U)$ ). Mehr Informationen bzw. Hinweise liegen in diesem Fall nicht vor und die Massezahlen der verfügbaren Informationsquelle bestimmen die Glaubensgrade. Bei sehr glaubwürdigen Hinweisen (z. B. bauliche Inspektionen) reicht dieses häufig auch aus, nicht aber bei elektrischen Inspektionen.

Gerade bei den elektrischen Inspektionen (Schaltgeräte, Durchführungen, Kabelendverschlüsse, Erdungsanlage etc.) liegen durch den zusätzlichen Einsatz von Messtechnik nun mehrere Informationsquellen (visuelle Inspektion, Teilentladungsmessung, Thermografie, Erdschleifenmessung), die Hinweise über einen Instandhaltungsbedarf liefern. Die Massezahlen dieser verschiedenen Informationsquellen werden dann nach der im vorherigen Kapitel

definierten Kombinationsregel miteinander kombiniert, falls solche Hinweise von verschiedenen Informationsquellen verfügbar sind. Da die Kombinationsregeln assoziativ und kommutativ sind, ist das Bewertungsmodell modular erweiterbar. So können ohne größeren Mehraufwand weitere Informationsquellen (Wartungsergebnisse, zusätzliche Messverfahren wie z. B. konventionelle Erdungs- oder Teilentladungsmessung, Störungsstatistiken, Alter etc.) mit hinzugezogen werden. Dadurch wird das Bewertungsergebnis noch fundierter bzw. glaubwürdiger, ist aber auch mit einem erhöhten Aufwand für die Datenerhebung verbunden.

Für das Bewertungsmodell, welches ausführlich in Kapitel 3.2 erläutert worden ist und die Aggregation der verschiedenen Inspektionenpunkte zum Gesamtzustandsindex umsetzt, bedeutet die Anwendung der Evidenz-Theorie, dass jetzt nicht mehr nur ein Bewertungspunkt  $B_i$  für einen Inspektionenpunkt vorliegt, sondern jeder Inspektionenpunkt durch drei Größen beschrieben wird, die weiterverarbeitet werden. Zudem ermitteln sich die drei Größen nicht nur auf Basis einer einzigen Informationsquelle (visuelle Expertenbewertung), sondern es wird auch die Kombination von Hinweisen aus mehreren Informationsquellen unter Berücksichtigung ihrer Glaubwürdigkeit bzw. Aussagefähigkeit implementiert. Das in Abbildung 6 dargestellte Schema wird durch die Erweiterung um die Evidenz-Theorie, wie in Abbildung 24 gezeigt wird, adaptiert.

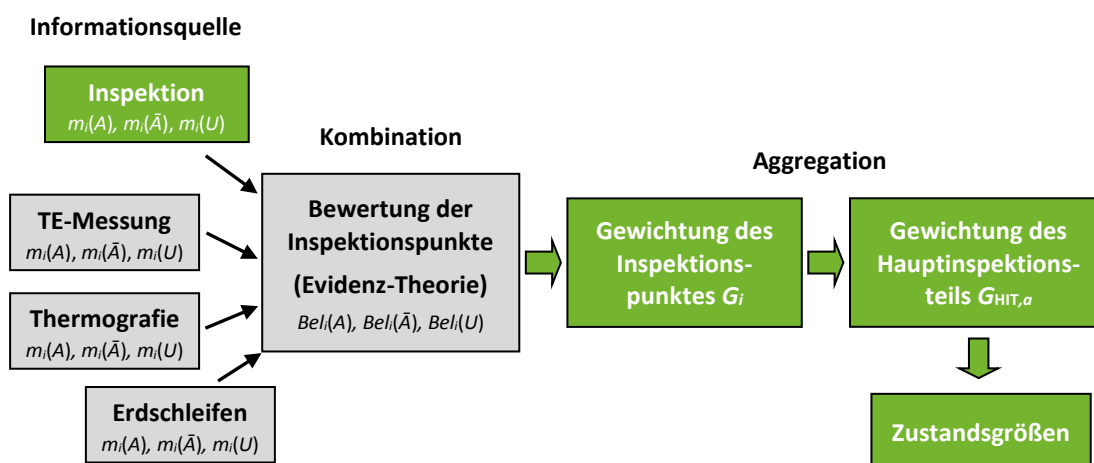


Abbildung 24 – Grundlegendes Schema zur Bestimmung der Gesamtzustandsgrößen

Es liegen somit für jeden Inspektionenpunkt  $i$  Hinweise aus unterschiedlichen Informationsquellen vor, ob an dieser Komponente ein Instandhaltungsbedarf vorliegt oder nicht. Die Massezahl  $m_i(A)$  drückt dabei den Wert aus, wie stark der Hinweis einer Quelle auf einen Instandhaltungsbedarf hindeutet. Zudem fließt über die Massezahl  $m_i(U)$  nun mit ein, wie aussagefähig der vorliegende Hinweis der Quelle überhaupt ist. Eine visuelle Inspektion ist bspw. bei der Bewertung der Außenfassade eines Gebäudes aussagekräftiger als bei der Bewertung eines Fundaments, weil sich dieses zum Großteil unter der Erde befindet und damit nicht beurteilt werden kann. Des Weiteren ist auch der subjektive Einfluss bei einzelnen Inspektionenpunkten unterschiedlich stark ausgeprägt und wird darüber berücksichtigt. Dazu werden bei den elektrischen Inspektionenpunkten neben der visuellen Inspektion noch messtechnische Prüfungen hinzugezogen, wodurch

weitere Hinweise auf einen Instandhaltungsbedarf vorliegen. Diese Hinweise (Massezahlen) aus diesen unterschiedlichen Informationsquellen werden dann auf Basis der ausgewählten Kombinationsregel zu einer Gesamtaussage kombiniert, wodurch die Glaubwürdigkeit der resultierenden Aussage für den betrachteten Inspektionsspunkt  $i$  wesentlich erhöht wird. Somit liegen für die einzelnen Inspektionsspunkte die Glaubensgrade vor. Die weitere Zusammenfassung der Glaubensgrade über die Inspektionsspunkte hinweg erfolgt dann auf Basis der Aggregationssystematik und Gewichtungsfaktoren, wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt.

Die Aggregationssystematik und die Gewichtungsfaktoren berücksichtigen nun die qualitative Verknüpfung der Zustände der einzelnen Inspektionsspunkte zum Gesamtzustand des Betriebsmittels. Auch ein sehr glaubwürdiger Instandhaltungsbedarf an einem Inspektionsspunkt (bspw. MS-Kabelendverschlüsse) führt nicht zwangsläufig zu einer sehr „schlechten“ Zustandsbewertung des gesamten Hauptinspektionsteils (MS-Schaltanlage), weil die Bedeutung des Inspektionsspunktes noch nicht einbezogen ist. Es muss daher abgeschätzt werden, wie die Zustände der einzelnen Inspektionsspunkte auf den Gesamtzustand wirken. Dieses erfolgt auf Basis der in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Gewichtungsfaktoren. Nach [29] ist hierfür eine exakte und vollständige Abbildung aller Komponentenabhängigkeiten nicht entscheidend, sondern eine Abschätzung des Einflusses auf den Gesamtzustand ist hinreichend genau.

### 5.3.1 Bildung von Massezahlen für die Informationsquellen

Die Bildung von Massezahlen für die Informationsquellen soll nun behandelt werden. Wie diese Massezahlen im Rahmen der Evidenz-Theorie generell zu bestimmen sind, darauf kann keine allgemeingültige Antwort gegeben werden [31]. Im Folgenden sollen die Massezahlen für die dargestellten Informationsquellen aber abgeleitet und prinzipiell dargestellt werden.

Ein wesentlicher Indikator für einen vorliegenden Instandhaltungsbedarf resultiert aus der Informationsquelle „Visuelle Inspektion“. Alle Inspektionsspunkte der Checkliste werden vor Ort durch das Instandhaltungspersonal anhand eines einheitlichen Klassifizierungsschemas bewertet. Der Datenerfassungsprozess durch das Instandhaltungspersonal soll prinzipiell nicht verändert werden. Somit liegt nach der Inspektion für jeden Inspektionsspunkt ein diskreter Bewertungspunkt  $B_i = \{\emptyset, 0, 1, 2, 3, 4\}$  vor (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dieser Bewertungspunkt muss für die Anwendung der Evidenz-Theorie in die entsprechenden Massezahlen  $m_i(A)$ ,  $m_i(\bar{A})$  und  $m_i(U)$  umgesetzt werden.

Aus den Bewertungspunkten  $B_i$  und den zugehörigen Bedeutungen muss also abgeleitet werden, in welchem Grad die Aussage „Instandhaltungsbedarf“ unterstützt bzw. abgelehnt wird oder in welchem Maße die Aussage unsicher ist. Der Bewertungspunkt  $B_i = 1$  repräsentiert dabei, dass keine Hinweise für einen Instandhaltungsbedarf ( $m_i(A) = 0$ ) vorliegen und der Bewertungspunkt  $B_i = 4$  beschreibt den größten Instandhaltungsbedarf, d. h. keine Unterstützung der Gegenaussage ( $m_i(\bar{A}) = 0$ ). Es lassen sich dabei verschiedene Funktionsverläufe formulieren, wie die Bewertungspunkte auf die Höhe der Massezahl abgebildet werden. Einige Funktionsverläufe im Bereich

der Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel sind beispielsweise in [19, 31, 117] dargestellt. Die Unsicherheit stellt nun ein entscheidendes Maß für die Evidenz-Theorie dar und muss praktikabel für die Zustandsbewertung bestimmt werden. Doch wie lässt sich diese bestimmen?

Für die Unsicherheit, die einer visuellen Inspektion innewohnt und dadurch die Vertrauenswürdigkeit der Bewertung beeinflusst, wird in dieser Arbeit angenommen, dass sie

- einerseits durch die bereits ausführlich dargestellte **Subjektivität** (Kommen die durchführenden Personen unabhängig zu gleichen Einschätzungen?) begründet ist,
- andererseits aber auch die **Aussagefähigkeit** einer Inspektion (**Ungewissheit**) (Was kann überhaupt beurteilt werden?) generell von der betrachteten Komponente abhängt.

### Subjektivität bei der Inspektion

Um die Unsicherheit, hervorgerufen durch den subjektiven Einfluss, zu quantifizieren, werden Feldtestergebnisse von Netzstationen herangezogen. Im Rahmen der verschiedenen Feldtests bei unterschiedlichen Netzbetreibern werden insgesamt 123 Netzstationen jeweils von mehreren Experten (bis zu sechs Personen) inspiziert (vgl. Abbildung 12). Somit liegen für die Inspektionspunkte Mehrfachbewertungen bei einer Netzstation vor und es lässt sich die Übereinstimmung der Experten bei der Beurteilung bestimmen. Hierfür können verschiedene Maße zur Bestimmung der Beurteilerübereinstimmung angegeben werden [118]. Im Folgenden wird die prozentuale Übereinstimmung verwendet. Sie gibt den prozentualen Anteil der Fälle an, in denen die Experten die exakt gleiche Beurteilung ( $B_i$ ) abgeben. Eine vollständige Übereinstimmung liegt also vor, wenn jeder betrachtete Inspektionspunkt  $i$  von allen  $m$  Experten den gleichen Bewertungspunkt  $B_i$  zugewiesen bekommt. Sie ist wie folgt definiert [118]:

$$P\ddot{U}_i = \frac{\text{Anzahl Übereinstimmungen}}{\text{Anzahl der abgegebenen Beurteilungen}} \cdot 100 \% \quad (5.21)$$

Es lässt sich dadurch für jeden Inspektionspunkt  $i$  und jeden Bewertungspunkt  $B_i = \{1, 2, 3, 4\}$  ermitteln, ob ein abgegebener Bewertungspunkt  $B_i$  eines Experten auch dem entsprechenden richtigen Bewertungspunkt  $B_{i,\text{richtig}}$  entspricht und damit wie zuverlässig die visuelle Inspektionsbewertung eines Experten ist. Die Unsicherheit resultiert dann aus:

$$m_i(U) = 1 - \frac{P\ddot{U}_i}{100\%} \quad (5.22)$$

In Tabelle 5 wird die prinzipielle Bestimmung der Übereinstimmung  $P\ddot{U}$  eines Inspektionspunktes für die einzelnen Bewertungspunkte an einem Beispiel dargestellt. Sechs Experten haben bei zehn Netzstationen jeweils den Inspektionspunkt “MS-Kabelendverschlüsse” bewertet. Doch welcher Bewertungspunkt  $B_{i,\text{richtig}}$  ist richtig und damit welche Übereinstimmung? Bei der prozentualen Übereinstimmung wird in der Regel der am häufigsten auftretende Bewertungs-



punkt  $B_i$  als „richtig“ bzw. „wahrer“ Wert interpretiert. Doch hierbei wird nicht berücksichtigt, dass sich auch die Mehrzahl an Experten irren kann. So können bei der Sichtkontrolle Mängel auch übersehen bzw. als unkritisch angesehen werden, wodurch der Bewertungspunkt  $B_i = 1$  den häufigsten Bewertungspunkt bei den sechs beurteilenden Experten darstellt. Die Sichtkontrolle ist unabhängig voneinander durch die Experten durchgeführt worden, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden. Bewerten nun z. B. zwei von sechs Experten einen Mangel (bspw.  $B_i = 3$ ), so liegt es nahe, dass dieser Mangel auch tatsächlich vorliegt und den anderen vier Experten dieser Mangel lediglich nicht aufgefallen ist. Warum sollten die beiden Experten sonst die Mängelbewertung vorgenommen haben? Bei einem Experten könnte es noch als Ausreißer interpretiert werden. Zudem sind die detektierten Mängel im Bemerkungsfeld dokumentiert, wodurch die Bewertungsabgabe nachvollzogen werden kann. Im Rahmen der Feldtests ist der Bewertungsleitfaden aufgebaut worden, wodurch die einzelnen Mängel im Nachgang mit den Experten diskutiert worden sind. Durch diese Diskussion und die Auswertung der Bemerkungsfelder kann die Bestimmung des „richtigen“ Bewertungspunkts  $B_{i,\text{richtig}}$  unterstützt und über alle durchführenden Experten bestimmt werden. In dem Beispiel ergeben sich somit die Anzahl der richtigen Übereinstimmungen (48) sowie die Anzahl der abgegebenen Beurteilungen (60), was zu einer prozentualen Übereinstimmung  $P\ddot{U}_i$  über alle Bewertungspunkte in diesem Beispiel von  $P\ddot{U}_i = 80\%$  führt.

Tabelle 5 – Beispiel zur Bestimmung der Unsicherheit bei der Sichtkontrolle

### Inspektionspunkt „MS-Kabelendverschlüsse“

N = 10	Abgegebene Beurteilungen (Experten $m = 6$ )				Übereinstimmung	
	$B_i = 1$	$B_i = 2$	$B_i = 3$	$B_i = 4$	$B_{i,\text{richtig}}$	Anzahl
Netzstation 1	6	0	0	0	1	6
Netzstation 2	6	0	0	0	1	6
Netzstation 3	5	1	0	0	1	5
Netzstation 4	3	3	0	0	2	3
Netzstation 5	5	1	0	0	1	5
Netzstation 6	1	0	5	0	3	5
Netzstation 7	0	0	0	6	4	6
Netzstation 8	0	1	4	1	3	4
Netzstation 9	3	1	2	0	3	2
Netzstation 10	6	0	0	0	1	6
Anzahl aller abgegebenen Beurteilungen = 60				Anzahl Übereinstimmung = 48		
	$P\ddot{U}_{i,1}$	$P\ddot{U}_{i,2}$	$P\ddot{U}_{i,3}$	$P\ddot{U}_{i,4}$	$P\ddot{U}_i$	<u>80 %</u>
	82 %	50 %	85 %	86 %		

Diese prozentuale Übereinstimmung lässt sich auch für die vier Urteilskategorien „Bewertungspunkte“ ( $P\ddot{U}_{i,1-4}$ ) ermitteln, bei welchem Bewertungspunkt die Experten die höchste Übereinstimmung bzw. geringste Unsicherheit aufweisen. Diese lässt sich ermitteln, indem die Anzahl der richtigen Übereinstimmungen, d. h. z. B. Bewertungspunkt  $B_i = B_{i,\text{richtig}} = 1$ , durch die Anzahl aller abgegebenen Bewertungspunkte  $B_i = 1$  dividiert wird.

Diese Vorgehensweise wird für alle Inspektionpunkte über alle 123 Netzstationen (570 Einzelbewertungen) angewendet, für die Mehrfachbewertungen unabhängiger Experten (max. sechs Experten) vorliegen (siehe auch Abschnitt 6.2.1). Zuerst wird der „wahre“ Wert bei einem Inspektionpunkt pro Netzstation bestimmt und anschließend die Übereinstimmung der Experten mit diesem Wert ermittelt. Dadurch lässt sich der subjektive Einfluss bei der Bewertungsabgabe im Rahmen der visuellen Inspektion quantifizieren. Um die Grundgesamtheit  $N$  weiter zu erhöhen, wird die Unsicherheit nicht pro Inspektionpunkt und jeweiliger Urteilkategorie gebildet, sondern es werden zuerst die einzelnen Inspektionpunkte, die ähnliche prozentuale Übereinstimmungen und Eigenschaften aufweisen, nochmals zusammengefasst und klassifiziert. Die Klassen sind:

- **Baulicher Teil**

Hierunter fallen alle Inspektionpunkte, die bei einer Inspektion gut begutachtet werden können, sodass die Aussagefähigkeit der Bewertungsabgabe relativ hoch ist. Typische Inspektionpunkte sind Zugänglichkeit, Außenfassade, Dach, Gebäude Innenraum, Bewuchs, Türen, Beschriftungen, Ableseeinrichtungen etc. Hier spielt hauptsächlich der subjektive Einfluss der Bewertung eine Rolle.

- **Elektrische Komponenten**

Hierzu zählen die elektrischen Komponenten eines MS-Betriebsmittels, die zwar einer vollständigen Sichtkontrolle unterzogen werden können, jedoch ist diese wenig aussagekräftig, da Auffälligkeiten oft visuell nicht erkannt werden können. Daher bedeutet der Einsatz einfacher Messtechnik einen großen Mehrwert für die Aussagefähigkeit der Inspektion. Typische Inspektionpunkte sind MS-Schaltgeräte, Durchführungen, Sammelschienen, Transformatoren etc.

- **Sauberkeit**

Die Sauberkeit wird als separater Punkt aufgeführt, da diese Inspektionpunkte einer sehr starken subjektiven Beeinflussung unterliegen und die geringste prozentuale Übereinstimmung aufweisen. Außerdem stellt die Sauberkeit eine der häufigsten Mängelbewertungen dar.

Für diese Klassen wird nun auf die beschriebene Art und Weise der subjektive Einfluss bei der Bewertungsabgabe für die jeweilige Urteilkategorie ( $B_i = \{1, 2, 3, 4\}$ ) bestimmt. Dadurch ergibt sich die resultierende Unsicherheit der visuellen Inspektion, d. h. dass der abgegebene Bewertungspunkt nicht „richtig“ ist (Subjektivität). Die Ergebnisse aus den Feldtestdaten sind in Abbildung 25 dargestellt.

Für die Interpretation der Werte bedeutet dieses, dass wenn der Bewertungspunkt  $B_i = 4$  bei einer elektrischen Komponente abgegeben wird, dass zu 75 % dieser Bewertungspunkt auch der „richtigen“ Bewertung entspricht ( $B_i = 4 = B_{i,\text{richtig}}$ ) und damit glaubwürdig ist. Zu 25 % ist die Bewertungsabgabe subjektiv geprägt bzw. unsicher, d. h. der „wahre“ Wert entspricht entweder dem Punkt  $B_{i,\text{richtig}} = 1, 2$  oder  $3$  ( $B_i = 4 \neq B_{i,\text{richtig}}$ ). Der abgegebene Bewertungspunkt wird also zu kritisch gesehen. Es lässt sich auch erkennen, dass Bewertungen, die eine dringliche Mängel-

beseitigung erfordern, weniger unsicher sind, d. h. kritische Mängel werden also gesicherter erkannt. Zu erläutern ist auch noch die ermittelte Unsicherheit  $m_i(U)$  der Sauberkeit beim Bewertungspunkt  $B_i = 2$ . Hier ist die Unsicherheit bei der Bewertung der Sauberkeit am geringsten, weil der Bewertungspunkt  $B_i = 2$  sehr häufig und dabei übereinstimmend durch die Experten abgegeben wird. Somit ist die subjektive Abweichung untereinander gering und demnach objektiv.

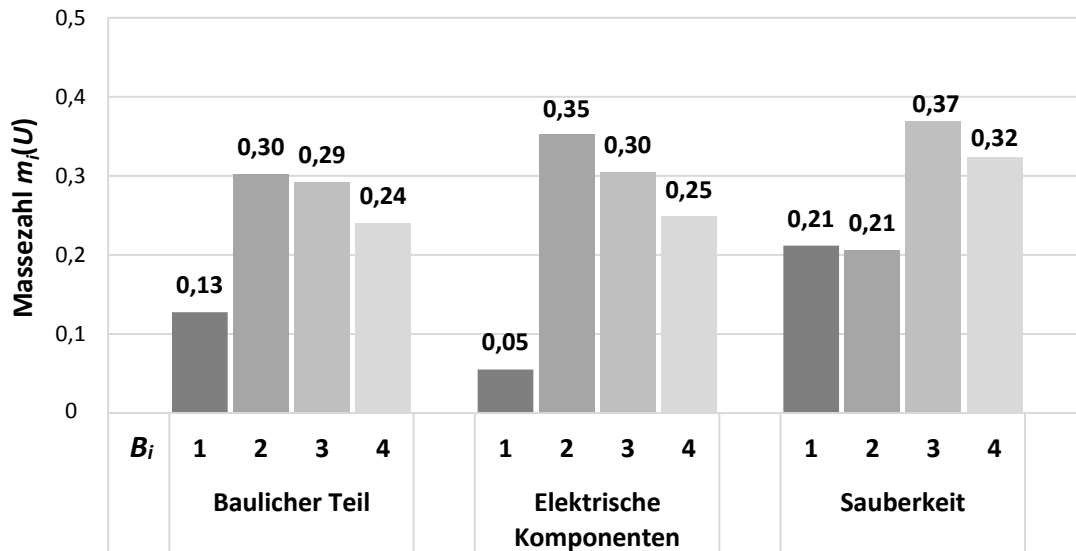


Abbildung 25 – Unsicherheit der visuellen Inspektion (Subjektivität)

In Abbildung 25 ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass die Subjektivität beim Bewertungspunkt  $B_i = 1$  (keine Mängel erkennbar) mit großem Abstand beim „Baulichen Teil“ und bei den „Elektrischen Komponenten“ am geringsten ausfällt. Die prozentuale Übereinstimmung der Experten untereinander ist bei den zugehörigen Inspektionen also sehr groß. Dieses ist aber vor allem darauf zurückzuführen, dass der Bewertungspunkt  $B_i = 1$  sehr viel häufiger als die anderen Bewertungspunkte abgegeben wird (siehe auch Abschnitt 6.2.1). Die große Übereinstimmung besagt also lediglich, dass mehrere Experten zum gleichen Urteil (keine Mängel erkennbar) kommen (objektiv sind), jedoch nichts darüber, ob dieses auch richtig ist, z. B. weil ein Mangel visuell nicht erkennbar ist.

#### Aussagefähigkeit einer Inspektion (Ungewissheit)

Wenn ein Mangel visuell nicht erkennbar ist, muss auch der zweite Aspekt der Unsicherheit der Inspektion, wie aussagefähig die visuelle Inspektion bei MS-Betriebsmitteln überhaupt ist (Ungewissheit), berücksichtigt werden. Um die Aussagefähigkeit und Wirksamkeit einer Inspektion abzuleiten, können hierzu als hilfreiche Informationen z. B. [3] oder Unternehmensschadensstatistiken herangezogen werden. In [3] ist eine umfangreiche Schadensstatistik für die Betriebsmittel des Verteilungsnetzes auf Basis der Daten mehrerer Verteilnetzbetreiber aufgebaut worden. Hier ist bei der Auswertung ebenfalls analysiert worden, was der Anlass der Schadensmeldung war. So konnten bspw. 90 % aller gemeldeten Schäden an baulichen Komponenten einer Netzstation während einer visuellen Inspektion festgestellt werden. Bei elektrischen Komponenten einer Netzstation (in [3] z. B. für Lastschalter) dagegen konnten nur 60 % aller gemeldeten

Schäden während einer Inspektion (Sichtkontrolle) detektiert werden. Dieses zeigt, dass die Aussagefähigkeit und Wirksamkeit der Inspektion unterschiedlich ist und von der betrachteten Komponente abhängt. Da die Wirksamkeit der Inspektion in [3] aber nicht in detaillierterer Form auch für Einzelkomponenten einer Netzstation angegeben ist und somit nicht explizit den einzelnen Inspektionen direkt zugeordnet werden kann, wird die Wirksamkeit der Inspektion den zusammengefassten Klassen und darüber den zugehörigen Inspektionen zugewiesen.

Wenn das Instandhaltungspersonal aber einen Mangel identifiziert und entsprechend des Klassifizierungsschemas mit  $B_i = 2, 3$  oder  $4$  bewertet, ist diese Bewertung sehr zuverlässig und unterliegt nur dem subjektiven Einfluss des bewertenden Instandhaltungspersonals. Es liegt keine zusätzliche Ungewissheit vor, da ein Mangel bereits visuell durch das Instandhaltungspersonal erkannt ist. Wird vom Instandhaltungspersonal dagegen kein Mangel erkannt und somit kein IH-Bedarf ( $B_i = 1$ ) bewertet, stellt sich die zusätzliche Frage, ob sie bei der visuellen Inspektion an der betrachteten Komponente überhaupt einen Mangel hätten erkennen können. Als Grund sei hier bspw. angeführt, dass aufgrund des einzuhaltenen Sicherheitsabstandes zu der sich im Betrieb befindlichen Anlage eine Sichtkontrolle zumeist erschwert ist. Die gesamte Unsicherheit des Bewertungspunktes  $B_i = 1$  muss daher höher als in Abbildung 25 sein. Dieses fließt in die Bestimmung der Unsicherheit über die Feldtestdaten ein, in dem unterstellt wird, dass bei den abgegebenen Bewertungspunkten  $B_i = 1$  entsprechend der zugehörigen Klasse in 10 % („Baulicher Teil“) bzw. 40 % („Elektrische Komponenten“) aller Fälle doch ein Mangel am jeweiligen Inspektionenpunkt vorliegen könnte (Ungewissheit des Bewertungspunktes), der visuell nicht erkennbar ist. Aus dem subjektiven Einfluss (Feldtestdaten, Abbildung 25) sowie der dargestellten Ungewissheit ergibt sich unter Annahme des Superpositionsprinzips die resultierende Unsicherheit der visuellen Inspektion (Abbildung 26), d. h. dass der abgegebene Bewertungspunkt nicht „richtig“ ist. Diese in Abbildung 26 dargestellten Unsicherheiten  $m_i(U)$  werden für die Massezahlen der visuellen Inspektion verwendet.

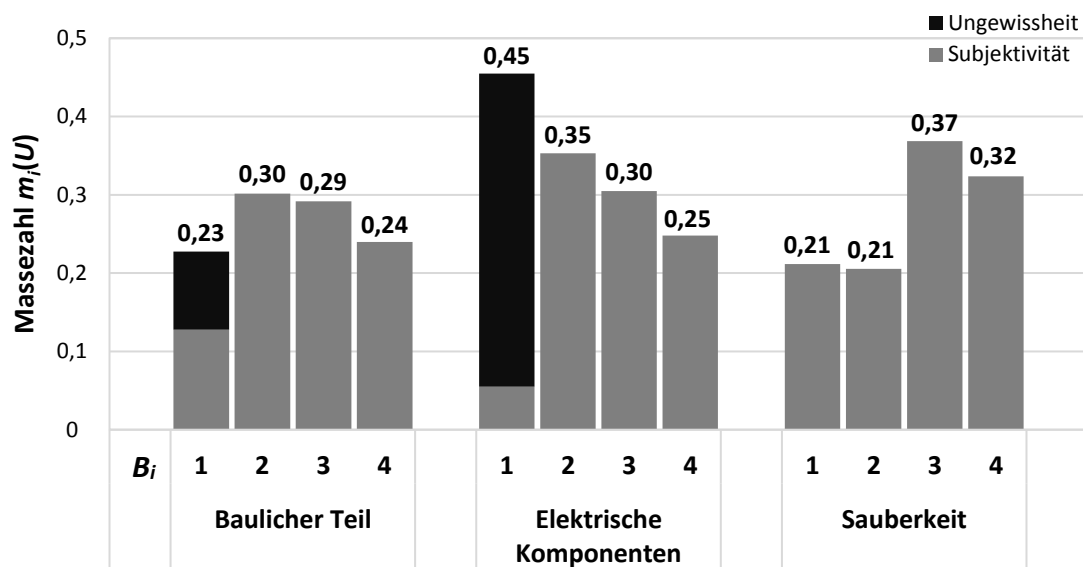


Abbildung 26 – Unsicherheit der visuellen Inspektion (keine Übereinstimmung)

### Unsicherheit der Messverfahren

Doch nicht nur über die visuelle Inspektion wird ein Hinweis für einen IH-Bedarf generiert, sondern auch über die „Hard-Facts“ der Messverfahren. Die in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Messverfahren können nur für bestimmte Inspektionpunkte eingesetzt werden und unterstützen hier die visuelle Inspektion. Dadurch wird die Aussagefähigkeit der Zustandsbewertung extrem erhöht, speziell für die elektrischen Komponenten. Um die Unsicherheit  $m_i(U)$  auch für diese Messverfahren zu bestimmen, sind diese in umfangreichen Labor- und Feldtests überprüft worden. Die Unsicherheiten der Messverfahren resultieren bei ordnungsgemäßer Anwendung der Verfahren vor allem aus den Messungenauigkeiten der eingesetzten Messgeräte sowie aus der Detektionsfähigkeit (Ungewissheit). In [91] sind Unsicherheiten für die dargestellten Verfahren erläutert und aufgeführt:

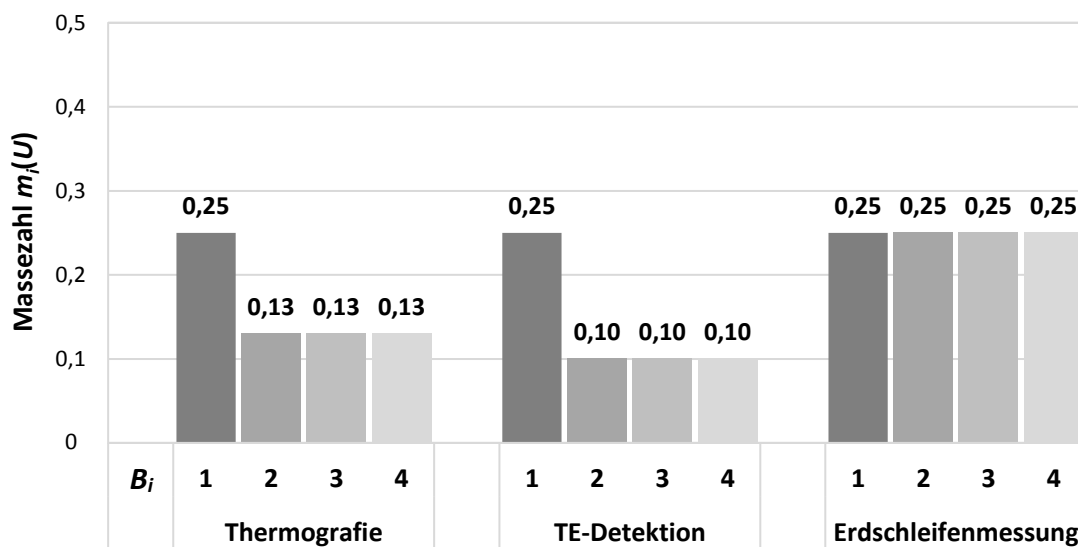


Abbildung 27 – Unsicherheit der einfachen Messverfahren

### Ableitung der weiteren Massezahlen

Die Unsicherheiten  $m_i(U)$  werden so also für die visuelle Inspektion und die eingesetzten Messverfahren abgeleitet. Für die diskreten Bewertungspunkte  $B_i = \{1, 2, 3, 4\}$  aus der jeweiligen spezifischen Informationsquelle (visuelle Inspektion, Thermografie, TE-Detektion, Erdschleifenmessung) sind die Massezahlen der Unsicherheit  $m_i(U)$  bestimmt. Für die Anwendung der Evidenz-Theorie müssen noch die beiden Massezahlen  $m_i(A)$  für die Aussage „Es ist Instandhaltungsbedarf vorhanden“ und  $m_i(\bar{A})$  für die Gegenaussage „Es ist kein Instandhaltungsbedarf vorhanden“ bestimmt werden.

Diese beiden Massezahlen drücken über geeignete Funktionsverläufe [19] die quantitative Beziehung des abgegebenen Bewertungspunkts zum Grad an Instandhaltungsbedarf aus, d. h. in welchem Grad die Aussage „Instandhaltungsbedarf“ in Abhängigkeit des Bewertungspunkts  $B_i$  unterstützt ( $A$ ) bzw. abgelehnt ( $\bar{A}$ ) wird. Es wird zunächst die Massezahl  $m_i(A)$  für die Aussage „Es ist Instandhaltungsbedarf vorhanden“ betrachtet. Je größer dieser Wert ist, desto größer ist das Maß der Unterstützung für diese Aussage, d. h. dass ein Instandhaltungsbedarf vorliegt. Die

Höhe der Massezahl  $m_i(A)$  ist dabei abhängig vom abgegebenen Bewertungspunkt  $B_i$ . Beim Bewertungspunkt  $B_i = 1$  werden keine Mängel erkannt und somit liegen auch keine Hinweise für einen Instandhaltungsbedarf vor. Dem Bewertungspunkt  $B_i = 1$  wird also entsprechend die Massezahl  $m_i(A) = 0$  zugeordnet. Der Bewertungspunkt  $B_i = 4$  beschreibt dagegen den größten Instandhaltungsbedarf und die Massezahl  $m_i(A)$  nimmt einen maximalen Wert an. Mit ansteigenden Bewertungspunkten wächst also das Maß der Unterstützung für einen Instandhaltungsbedarf. Zwischen diesen extremen Werten wird ein linearer Funktionsverlauf nach [19, 31, 117] angenommen. Prinzipiell sind auch andere Verläufe denkbar. Die Massezahl  $m_i(A)$  steigt daher linear mit zunehmendem Bewertungspunkt  $B_i$  an. Dieser grundlegende Funktionsverlauf von der Massezahl  $m_i(A)$  in Abhängigkeit der Bewertungspunkte ist in Abbildung 28 dargestellt.

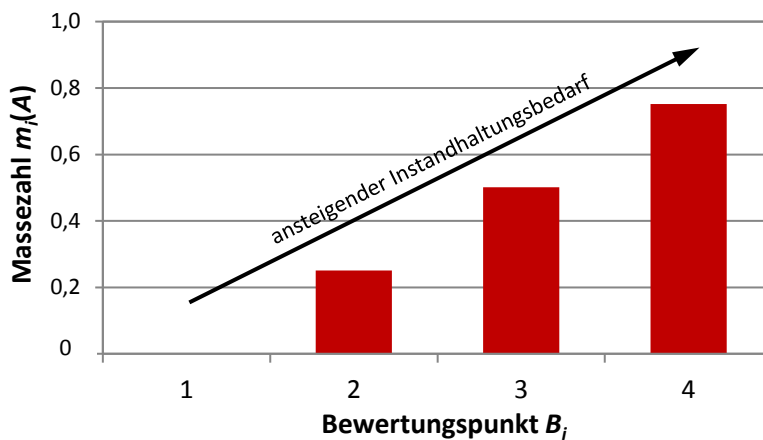


Abbildung 28 – Funktionsverlauf der Massezahl  $m_i(A)$  in Abhängigkeit des Bewertungspunkts  $B_i$

Nachdem der grundlegende Funktionsverlauf der Massezahl  $m_i(A)$  erläutert ist, werden im Folgenden alle drei Massezahlen kombiniert betrachtet, die in das Zustandsbewertungsmodell einfließen. Die Summe aller drei Massezahlen für jeden diskreten Bewertungspunkt  $B_i$  ist stets  $m_i(A) + m_i(\bar{A}) + m_i(U) = 1$ . Unter dieser Bedingung und des angenommenen linearen Funktionsverlaufs lassen sich alle drei Massezahlen ermitteln. Dieses wird in Abbildung 29 am Beispiel der Massezahlen für die visuelle Inspektion der „Elektrischen Komponenten“ zusammenfassend verdeutlicht.

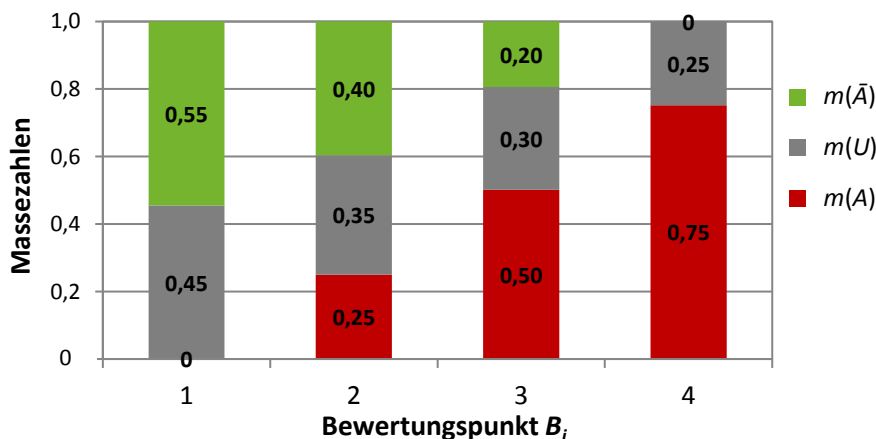


Abbildung 29 – Verlauf der Massezahlen der visuellen Inspektion (Elektr. Komponenten)

Die Massezahlen der Unsicherheit  $m_{i,1-4}(U)$  der visuellen Inspektion von „Elektrischen Komponenten“ sind auf Basis der Feldtestergebnisse ermittelt und in Abbildung 26 abgebildet. Bei dem Bewertungspunkt  $B_i = 1$  erhält die Massezahl  $m_{i,1}(A)$  - wie erläutert - den Wert Null, da kein Hinweis für einen IH-Bedarf spricht. Da  $m_i(A) + m_i(\bar{A}) + m_i(U) = 1$  gilt, resultiert somit der Wert für das Gegenereignis  $m_{i,1}(\bar{A})$  aus der Differenz  $m_{i,1}(\bar{A}) = 1 - m_{i,1}(U)$ . Demgegenüber stellt der Bewertungspunkt  $B_i = 4$  den konträren Fall hierzu dar, d. h. die Massezahl  $m_{i,4}(\bar{A})$  nimmt den Wert Null an. Es liegen keine Hinweise vor, dass kein IH-Bedarf vorhanden ist, weil ein sehr kritischer Mangel identifiziert wird. Dieser identifizierte Mangel stellt das kritischste Bewertungsergebnis dar und die Massezahl  $m_{i,4}(A)$  für einen vorhandenen IH-Bedarf wird maximal. Jedoch unterliegt der Bewertungspunkt  $B_i = 4$  einem subjektiven Einfluss (Unsicherheit  $m_{i,4}(U) \neq 0$ ) und die Massezahl  $m_{i,4}(A)$  ermittelt sich aus der Differenz  $m_{i,4}(A) = 1 - m_{i,4}(U)$ . Zwischen diesen beiden extremen Werten erfolgt eine lineare Interpolation der Massezahl  $m_i(A)$  gemäß des angenommen Funktionsverlaufs, um die Massezahlen für die diskreten Bewertungspunkt  $B_i = 2$  und  $B_i = 3$  zu erhalten. Die Massezahl  $m_i(A)$  steigt linear mit zunehmendem Bewertungspunkt  $B_i$  an. Da die Summe aller drei Massezahlen für jeden diskreten Bewertungspunkt  $B_i$  stets 1 ist, lassen sich entsprechend auch die Massezahlen  $m_{i,2}(\bar{A})$  und  $m_{i,3}(\bar{A})$  ermitteln. Somit resultieren die drei Massezahlen für jeden Bewertungspunkt aus einer Informationsquelle.

Als ein weiteres Beispiel zur Verdeutlichung der Massezahlen wird in Abbildung 30 die TE-Detektion visualisiert. Die Massezahlen der Unsicherheit  $m_{i,1-4}(U)$  sind in Abbildung 27 genannt. Ansonsten wird nach der gleichen beschriebenen Methode verfahren, um von den aufgeführten Unsicherheiten auf die weiteren Massezahlen  $m_{i,1-4}(B)$  und  $m_{i,1-4}(\bar{B})$  zu schließen. Die TE-Detektion weist dabei im Vergleich zu der visuellen Inspektion bei elektrischen Komponenten geringere Unsicherheiten auf. Das Messverfahren liefert also verlässlichere Hinweise, vor allem bei einer identifizierten Auffälligkeit ( $B_i = \{2, 3, 4\}$ ). Die Unsicherheit resultiert aus der Messgenauigkeit. Aus diesem Grund ist auch die Massezahl  $m_{i,4}(B) = 0,9$  für den IH-Bedarf beim Bewertungspunkt  $B_i = 4$  größer als bei der visuellen Inspektion ( $m_{i,4}(A) = 0,75$ ), da die Aussage der TE-Detektion gesicherter ist.

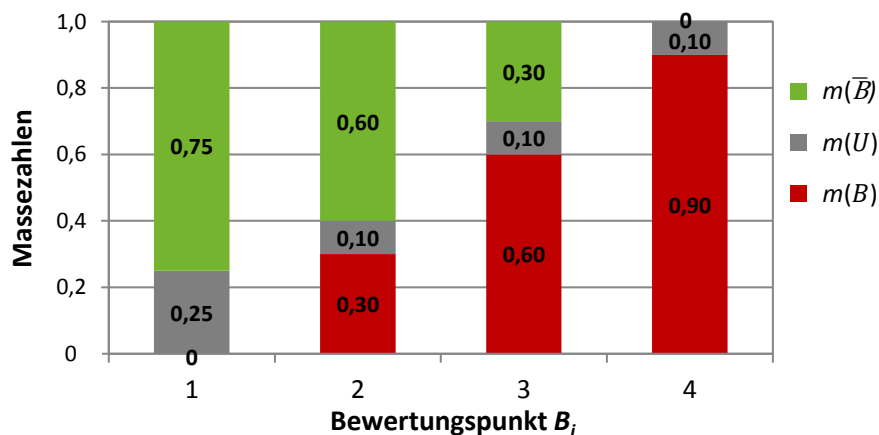


Abbildung 30 – Verlauf der Massezahlen der TE-Detektion

### 5.3.2 Behandlung fehlender Eingangsgrößen

Neben der Behandlung von unsicheren Eingangsgrößen muss das Model aber auch mit fehlenden Eingangsgrößen umgehen können. Denn in der Praxis ist es oft nicht möglich, im Rahmen der regelmäßigen Inspektion alle in der Checkliste vorgesehenen Punkte zu bewerten, obwohl diese vorhanden sind. Insbesondere die Analyse von unter Spannung stehenden Komponenten kann erschwert sein oder die Sicht wird durch Abdeckungen versperrt. Als typisches Beispiel seien hier die Komponenten einer SF<sub>6</sub>-MS-Schaltanlage oder verdeckt eingebaute Kabelanschlüsse genannt. Falls die visuelle Inspektion überhaupt möglich ist, ist sie mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Das Instandhaltungspersonal bewertet solche Fälle dann gemäß Klassifizierungsschema (Abschnitt 3.2.2) mit dem Bewertungspunkt  $B_i = 0$  (Durchführung der Inspektion nicht möglich). Der Bewertungspunkt  $B_i = 0$  repräsentiert also eine vollkommene Unsicherheit über die Aussage, ob ein IH-Bedarf vorliegt oder nicht. Es kann keine Tendenz abgegeben werden. Somit wird der Massezahl für die Unsicherheit  $m_i(U) = 1$  zugeordnet, weil sowohl ein IH-Bedarf als auch kein IH-Bedarf möglich ist. Die beiden anderen Massezahlen  $m_i(A)$  und  $m_i(\bar{A})$  erhalten somit den Wert  $m_i(A) = m_i(\bar{A}) = 0$ . In der folgenden Abbildung ist der Bewertungspunkt  $B_i = 0$  ergänzend als übersichtlicher Vergleich zu den Massezahlen für die visuelle Inspektion der „Elektrischen Komponenten“ aus Abbildung 29 aufgeführt.

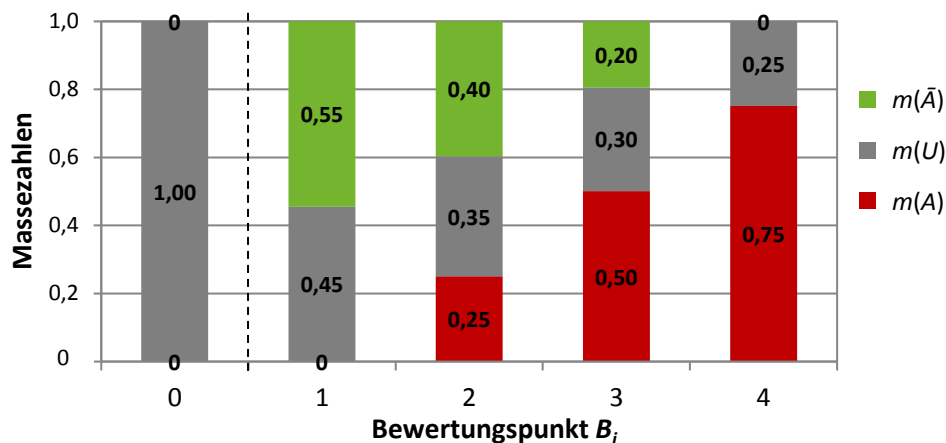


Abbildung 31 – Behandlung fehlender Eingangsgrößen bei der visuellen Inspektion

Dieses Prinzip ermöglicht es, alle Informationsquellen (visuelle Inspektion, einzelne Messverfahren), welche einen Hinweis über einen IH-Bedarf an einer Komponente liefern können, im Bewertungsmodell sowie der Aggregationssystematik zu berücksichtigen, ohne die Systematik selbst zu beeinflussen. Werden nun nicht alle Bewertungsmethoden (z. B. keine Messverfahren) während der Inspektion eingesetzt, hat dieses keinen Einfluss auf die generelle Aggregationssystematik. Denn eine Kombination eines Hinweises  $m_1$  mit einem Hinweis  $m_2$ , der eine vollkommene Unsicherheit repräsentiert, führt bei Anwendung der Kombinationsregeln zu keiner Veränderung, d. h. es gilt in diesem Fall:  $m_1 \oplus m_2(A) = m_1(A)$ . Jede mögliche Informationsquelle bei einer Komponente wird also mit vollkommener Unsicherheit initialisiert und bei nun vorliegenden Hinweisen aus einer Quelle dann mit den ermittelten Massezahlen überschrieben.



Selbst wenn für eine Komponente keine Hinweise aus irgendeiner der Informationsquellen vorliegen, hat dieses keinen Einfluss auf die grundlegende Aggregationssystematik. Beim konventionellen Zustandsindex (Abschnitt 3.2.1) würde bei dem Bewertungspunkt  $B_i = 0$  die Zusammenstellung der Gewichtungsfaktoren für die übergeordnete Hauptkomponente angepasst werden, weil der Gewichtungsfaktor des Inspektionpunkts nicht berücksichtigt werden kann. Bei der Evidenz-Theorie werden die Gewichtungsfaktoren nicht verändert und die Inspektionpunkte, die mit  $B_i = 0$  bewertet werden, fließen in die Aggregationssystematik mit vollkommener Unsicherheit  $m_i(U) = 1$  ein. Die Komponente und deren Einfluss auf die übergeordnete Zustandskennziffer wird durch die fehlenden Informationen, da diese nicht bewertet werden konnte, an sich nicht beeinflusst. Die fehlenden Informationen wirken sich aber auf die Unsicherheit bzw. Aussagekraft aus. Je mehr Inspektionpunkte nicht bewertet werden können, desto größer ist auch die Unsicherheit der Zustandsbewertung der Hauptkomponenten respektive des Gesamtbetriebsmittels. Durch die Beibehaltung der Gewichtungsfaktoren wird die Vergleichbarkeit der Betriebsmittel trotz unterschiedlicher Eingangsgrößen gewährleistet.

Die Gewichtungsfaktoren der Inspektionpunkte werden nur dann nicht berücksichtigt, wenn die Komponente mit  $B_i = \emptyset$  (Betriebsmittel ist nicht vorhanden) bewertet wird. Wenn eine Komponente bauartbedingt nicht vorhanden ist, kann sie auch keinen Einfluss auf die übergeordnete Komponente ausüben, der zugehörige Gewichtungsfaktor muss also ausgeblendet werden. Es ist nun möglich, im Bewertungsmodell zwischen „Inspektion ist nicht möglich“ und „Betriebsmittel ist nicht vorhanden“ zu differenzieren.

### 5.3.3 Berücksichtigung des Informationsalters

Neben fehlenden Eingangsgrößen spielt für die Qualität der Zustandsbewertung auch der Erhebungszeitpunkt der Eingangsgrößen eine zu berücksichtigende Rolle. Inspektionen an elektrischen Betriebsmitteln werden bei Verteilnetzbetreibern im zyklischen Rhythmus durchgeführt, wobei der Zyklus zum Teil auch mehrere Jahre beträgt (z. B. alle vier Jahre). Ein vier Jahre altes Bewertungsergebnis besitzt aber natürlich nicht mehr die gleiche Aussagefähigkeit bzw. Glaubwürdigkeit wie ein aktuelles Bewertungsergebnis. Aktuelle Hinweise besitzen eine höhere Aussagefähigkeit für die Hypothese „Liegt ein IH-Bedarf vor?“ als bereits ältere Hinweise. In der Zwischenzeit können nämlich verschiedene betriebliche Beanspruchungen und Umwelteinflüsse auf die Betriebsmittel gewirkt haben, die einen IH-Bedarf erforderlich machen. Bei der Auswertung über alle Betriebsmittel zum Zeitpunkt  $t_0$  muss also der diskrete Inspektionszeitpunkt  $t_1$  bei langen Zyklen beachtet werden. Werden dagegen die Inspektionen an den Betriebsmittel in einem kurzen Zeitabstand voneinander erhoben (z. B. innerhalb eines Jahres) spielt dieser Effekt nur eine untergeordnete Rolle. Häufig werden aber längere Inspektionszyklen, mitunter von bis zu vier Jahren, angewendet oder bei einem sehr großen Kollektiv an Betriebsmitteln ist ein kurzer Zeitabstand nur mit erheblichem Aufwand realisierbar. Die Unsicherheit der Hinweise (Sichtkontrolle, Messverfahren) muss also im Zeitverlauf größer werden. Beim konventionellen Zustands-

index wird das Informationsalter der Hinweise nicht berücksichtigt. Dieser Einfluss soll im Modell nun integriert und alle Ergebnisse auf den Tag der Auswertung bezogen werden.

Um die Unsicherheit der Eingangsgrößen beim Evidenzmodell im Laufe der Zeit anwachsen zu lassen, stellt die Einführung von Gewichtungsfaktoren für ältere Hinweise eine geeignete Methode dar. Eine Verknüpfung über die Kombinationsregeln der Evidenz-Theorie ist nicht möglich, da dieses nicht zu einem Anwachsen der Unsicherheit führen kann. Denn jeder weitere Hinweis stellt eine zusätzliche Information über eine Aussage dar und verringert somit die Unsicherheit. In Abhängigkeit des Informationsalters wächst die Unsicherheit über die Vertrauenswürdigkeit eines Hinweises an [30, 31]. Hierbei werden zwei Annahmen zugrunde gelegt:

- Erstens werden die Hinweise  $m_i(A)$ , die für das Vorliegen eines IH-Bedarfs sprechen, im Zeitverlauf nicht abgeschwächt. Ein vorliegender IH-Bedarf bleibt bestehen, Selbstheilungseffekte also entsprechend ausgeschlossen [19].
- Zweitens werden aber die Hinweise  $m_i(\bar{A})$ , die dafür sprechen, dass kein IH-Bedarf vorliegt, - je weiter der Erhebungszeitpunkt in der Vergangenheit liegt - reduziert, weil diesen nicht mehr so stark vertraut werden kann [19]. Die Unsicherheit, die durch den in der Vergangenheit erhobenen Hinweis (kein IH-Bedarf vorhanden) reduziert worden ist, muss also anwachsen und führt im Extremfall schließlich zum Aufheben der Reduzierung, d. h. als wenn der Hinweis gar nicht eingetreten wäre (vollkommene Unsicherheit).

Die durchgeführte Sichtkontrolle eines elektrischen Betriebsmittels zum Zeitpunkt  $t_1$  hat keinen IH-Bedarf an einer Komponente festgestellt. Je weiter dieser Hinweis nun in der Vergangenheit liegt, desto geringer ist dessen Aussagefähigkeit über den mangelfreien Zustand des Betriebsmittels. Die Unsicherheit über einen mangelfreien Zustand wächst somit im gleichen Maße an. Die Massezahlen  $m_i(\bar{A})$  und  $m_i(U)$  der Sichtkontrolle bzw. Messverfahren, die in Abschnitt 5.3.1 hergeleitet sind, werden also entsprechend des Informationsalters angepasst, die Massezahlen  $m_i(A)$  bleiben dagegen konstant. Der resultierende Instandhaltungsbedarf  $m_i(A)$  bleibt über den Zeitverlauf konstant, da keine neuen Hinweise mit Sicherheit für einen IH-Bedarf sprechen. Durch die steigende Unsicherheit im Zeitverlauf kann prinzipiell die Möglichkeit für einen höheren IH-Bedarf vorliegen, jedoch liegt kein explizites Wissen darüber vor. Die Berücksichtigung des Informationsalter geschieht nach folgenden Gleichungen: [19, 30]

$$\begin{aligned} m_{i,t_0}(A) &= m_{i,t_n}(A) \\ m_{i,t_0}(\bar{A}) &= c^n \cdot m_{i,t_n}(\bar{A}) \quad \text{mit } 0 < c < 1 \\ m_{i,t_0}(U) &= 1 - m_{i,t_0}(A) - m_{i,t_0}(\bar{A}) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Der Zeitpunkt  $t_0$  repräsentiert dabei den Tag der Auswertung. Die Größe  $n$  (in Jahren) gibt nun den Deltabetrag an, wie viele Jahre die Eingangsgrößen in der Vergangenheit zum Tag der Auswertung liegen. Der konstante Faktor  $c$  drückt den Grad der Anpassung aus, wie stark das Maß für  $m_i(\bar{A})$  („Kein IH-Bedarf“) in Abhängigkeit des Informationsalters reduziert wird. Hier wird angenommen, dass die Massezahl  $m_i(\bar{A})$  pro Jahr um 10 % gegenüber dem Vorjahr abgeschwächt

wird [19]. Diese angenommene Abschwächung sorgt dafür, dass das Maß für  $m_i(\bar{A})$  („Kein IH-Bedarf“) nach 8 Jahren (Wartungszyklus bei Netzstationen [119]) um über 50 % vermindert wird und dementsprechend die Unsicherheit stark ansteigt. Es ist somit keine verlässliche Aussage über „Kein IH-Bedarf“ mehr möglich. Spätestens bei der Wartung werden aber Informationen über einen ordnungsgemäßen Zustand eines MS-Betriebsmittels erhoben. Mit sinkendem Maß für „Kein IH-Bedarf“ erhöht sich nach Gleichung (5.6) auch die Plausibilität für einen IH-Bedarf (Summe aus rot und grau). In Abbildung 32 wird dieses Grundprinzip für die Eingangsgrößen am Beispiel der Massezahlen für die visuelle Inspektion der „Elektrischen Komponenten“ grafisch dargestellt.

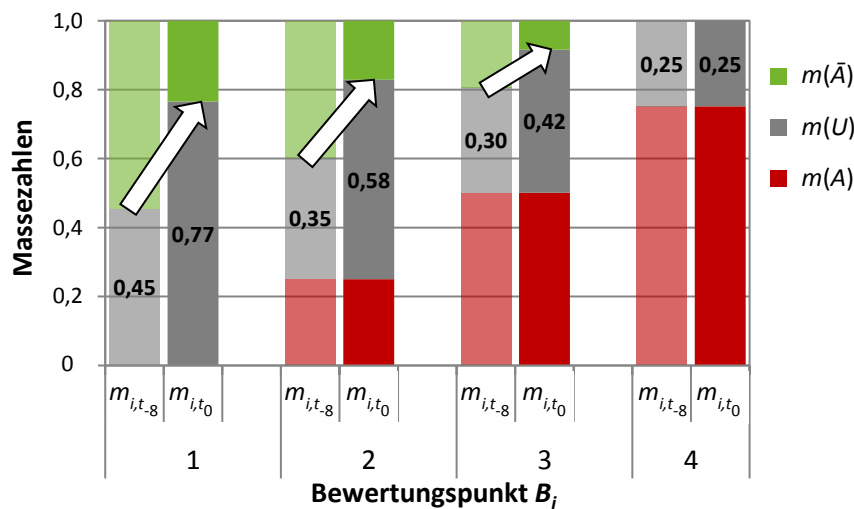


Abbildung 32 – Einfluss des Informationsalters von 8 Jahren auf die Massezahlen (Elektr. Komponenten)

Der Zeitpunkt  $t_{-8}$  gibt die Massezahlen eines Hinweises (Werte hier gemäß Abbildung 29) wieder, die vor 8 Jahren erhoben wurden und damals aktuell waren. Im Zeitverlauf kann diesem Hinweis nicht mehr die gleiche Aussagefähigkeit zugeschrieben werden. Dieser Hinweis wird daher nun immer unsicherer (grauer Bereich  $m_i(U)$  steigt an) und das verlässliche Maß für die Aussage „Kein IH-Bedarf“ (grüner Bereich  $m_i(\bar{A})$ ) wird abgeschwächt. Zum Zeitpunkt  $t_0$  der Auswertung ergeben sich dann nach Gleichungen (5.23) die zum aktuellen Zeitpunkt gültigen Massezahlen.

### 5.3.4 Bestimmung einer Zustandskennziffer

Das evidenzbasierte Bewertungsmodell liefert als Endergebnis die drei Evidenzgrößen Glaubensgrad  $Bel(A)$ , Unsicherheit  $Bel(U)$  sowie resultierend daraus den Plausibilitätsgrad  $Pl(A)$ , ob ein Instandhaltungsbedarf an dem betrachteten Betriebsmittel vorliegt und welche Vertrauenswürdigkeit dieser Aussage innewohnt (vgl. Abschnitt 5.4). Um das riesige Kollektiv an Betriebsmitteln aber noch übersichtlicher und einfacher vergleichen und auswerten zu können, soll zudem noch eine einzige Zustandsgröße pro Gesamtbetriebsmittel bzw. Hauptkomponente ermittelt werden. Diese Zustandsgröße des evidenzbasierte Bewertungsmodell wird im Folgenden als Zustandskennziffer bezeichnet (konventionelles Modell in Abschnitt 3.2.1: Zustandsindex). Die Zustandskennziffer setzt sich aus dem Glaubensgrad  $Bel(A)$  und der Unsicherheit  $Bel(U)$  zusammen. Der

Glaubensgrad  $Bel(A)$  drückt aus, dass ein Instandhaltungsbedarf definitiv vorhanden ist. Der Plausibilitätsgrad  $Pl(A)$  beinhaltet zusätzlich den Unsicherheitsbereich und besagt, wie groß der Instandhaltungsbedarf möglicherweise maximal sein kann. Die Zustandskennziffer muss sich also im Intervall  $[Bel(A), Pl(A)]$  befinden. Die Lage in diesem Bereich ist dabei auch abhängig von der Risikoneigung des Anwenders [19].

Ist der Anwender sehr risikoavers, so betrachtet er den Unsicherheitsbereich als Worst-Case-Variante und bezieht den Unsicherheitsbereich komplett in die Zustandskennziffer mit ein. Der Plausibilitätsgrad  $Pl(A)$  entspricht dann der Zustandskennziffer  $Z(A)$ . Ist er dagegen sehr risikofreudig, so toleriert er den Unsicherheitsbereich. Der Unsicherheitsbereich hat keinen Einfluss auf seine Entscheidung und der Glaubensgrad  $Bel(A)$  entspricht der Zustandskennziffer  $Z(A)$ . Diese beiden Fälle stellen die Extrempunkte dar.

Wird nun ein Betriebsmittel betrachtet, liegt im Unsicherheitsbereich  $Bel(U)$  im speziellen die Form Ungewissheit vor, d. h. es liegen zwar die möglichen Zustände (IH-Bedarf oder kein IH-Bedarf) vor, jedoch keine weiteren Informationen über die Wahrscheinlichkeiten, mit denen diese eintreten. Aus diesem Grund kann die Hurwicz-Regel [59] angewendet werden, die einen Kompromiss zwischen den Extremfällen erlaubt, indem die Risikoneigung des Anwenders über einen geeigneten Parameter  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) einfließt. Es lässt sich für diesen Anwendungsfall schreiben:

$$Z(A) = \alpha \cdot Pl(A) + (1 - \alpha) \cdot Bel(A) \quad (5.24)$$

Der Parameter  $\alpha$  ist dabei vom Anwender festzulegen. Je größer dieser Wert ist, desto risikoaverser ist er. Für  $\alpha = 1$  (risikoavers) ergibt sich  $Z(A) = Pl(A)$ , für  $\alpha = 0$  (risikofreudig) stimmt  $Z(A) = Bel(A)$  überein. Es wird empfohlen, einen niedrigen Wert (z. B.  $\alpha = 0,25$ ) zu verwenden [19]. Damit liegt ein höheres Gewicht auf den gesicherten Hinweisen  $Bel(A)$  und dieser Wert dominiert die Zustandskennziffer, die Unsicherheit gibt aber trotzdem eine Tendenz Richtung eines IH-Bedarfs an. Dieser geschilderte Einfluss der Risikoneigung  $\alpha$  auf die Zustandskennziffer  $Z(A)$  ist in Abbildung 33 einmal grafisch dargestellt.

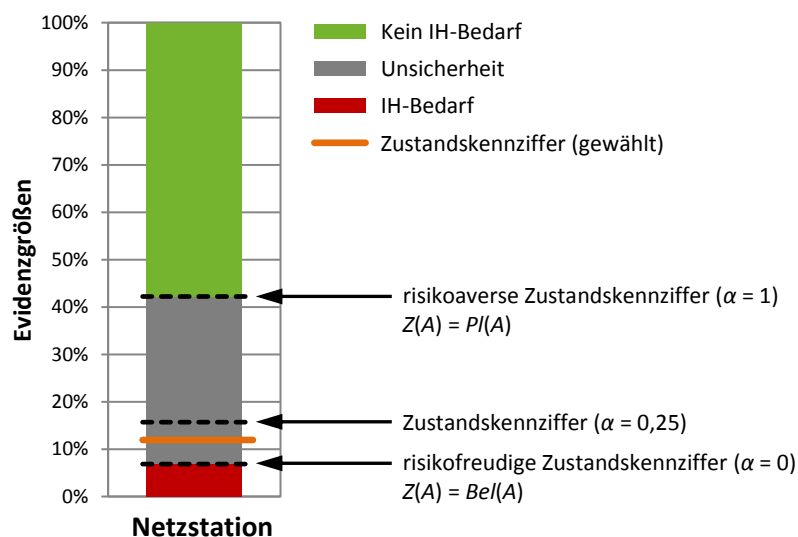


Abbildung 33 – Zustandskennziffer in Abhängigkeit der Risikoneigung

Die Bestimmung des Risikoparameters  $\alpha$  ist in der Praxis meist schwierig. Daher sollen im Folgenden auch die Erfahrungen aus den Feldtests zur Ableitung herangezogen werden (näheres in Abschnitt 6.2.1). Das Hinzuziehen der Feldtestergebnisse sorgt dafür, dass nun keine reine Ungewissheit mehr vorliegt, sondern die Wahrscheinlichkeiten des Eintretens der Zustände abgeschätzt werden können. Die Situation der Ungewissheit wird also in eine Risikosituation transformiert. Der Parameter spiegelt dann nicht mehr die reine Risikoneigung wider, sondern repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, dass ein Mangel an dem Inspektionsspunkt vorliegen könnte. Dazu wird für jeden Inspektionsspunkt die Eintrittswahrscheinlichkeit  $p_i(\text{Mangel})$  bestimmt, indem die Anzahl aller Mängelbewertungen (Bewertungspunkte  $B_i = [2, 3, 4]$ ) durch die Gesamtzahl aller abgegebenen Einzelbewertungen ( $B_i = [1, 2, 3, 4]$ ) dividiert wird.

Somit ergibt sich für jeden Inspektionsspunkt  $i$  die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Mangels  $p_i(\text{Mangel})$ . Um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Mangels für das Gesamtbetriebsmittel zu bestimmen, werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p_i(\text{Mangel})$  der Inspektionsspunkte ebenfalls nach der Aggregationssystematik gewichtet, da so die Bedeutung der Komponente wieder mit einfließt. Somit ergibt sich die gewichtete Eintrittswahrscheinlichkeit eines Mangels für das Gesamtbetriebsmittel  $p_z(\text{Mangel})$ . Dieser Wert wird nun entsprechend als  $\alpha$  angesehen und in die Gleichung eingesetzt. Aus den Feldtestergebnissen resultiert nach dieser Vorgehensweise für den Parameter  $\alpha = 0,1438$ , der im Folgenden in dieser Arbeit weiter verwendet wird (orange Linie in Abbildung 33). Zu einem Anteil von 14,38 % am gesamten Unsicherheitsbereich  $Bel(U)$  wird nun angenommen, dass doch ein IH-Bedarf vorliegt. Entsprechend wird dieser Anteil zur Zustandskennziffer hinzugezogen und es ergibt sich nach Umstellen für  $Z(A)$ :

$$Z(A) = Bel(A) + \alpha \cdot Bel(U) \quad (5.25)$$

Die einzelnen Größen der Evidenz-Theorie werden hierbei standardmäßig berechnet und über die Aggregationssystematik zum Gesamtbetriebsmittel kombiniert. Die Bildung einer Zustandskennziffer  $Z(A)$  stellt den abschließenden Kombinationsschritt dar, um zum Zweck der Auswertung eine Ausgangsgröße aus  $Bel(A)$  und der Unsicherheit  $Bel(U)$  zu erhalten.

## 5.4 Ergebnisdarstellung

Nachdem das evidenzbasierte Bewertungsmodell hergeleitet und ausführlich dargestellt ist, wird nun die Ergebnisdarstellung des Modells ausführlich betrachtet. Hierbei stehen verschiedene Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung und ausgewählte Darstellungen, die in dieser Arbeit Anwendung finden, werden nachfolgend vorgestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden zur eindeutigen Differenzierung die kombinierten sowie aggregierten Bewertungsergebnisse bei der Ergebnisdarstellung normiert prozentual angegeben, die Massezahlen der Eingangsgrößen dagegen als Dezimalwerte von 0 bis 1. Als Mehrwert gegenüber dem klassischen Zustandsbewertungsmodell (Abschnitt 3.3) kann die Qualität der Bewertungen zusätzlich visualisiert dargestellt werden.

Die Darstellung für ein Betriebsmittel (z. B. eine Netzstation) zeigt Abbildung 34. In dieser sind die ermittelten Werte der Glaubensgrade für Instandhaltungsbedarf  $Bel(A)$ , gegen Instandhaltungsbedarf  $Bel(\bar{A})$ , der Unsicherheitsbereich  $Bel(U)$  sowie die entsprechende, sich ergebende Zustandskennziffer  $Z(A)$  abgebildet, nachfolgend als Instandhaltungsbedarf, kein Instandhaltungsbedarf, Unsicherheit und Zustandskennziffer bezeichnet. Durch den Unsicherheitsbereich wird direkt die Qualität bzw. Vertrauenswürdigkeit der Zustandsbewertung deutlich. Je größer der graue Bereich ist, desto unsicherer sind die zugrundeliegenden Eingangsgrößen und damit auch die Zustandsbewertung. Die Zustandskennziffer der Netzstation  $Z_N(A)$  wird gemäß Abschnitt 5.3.4 ermittelt und liegt immer im Unsicherheitsbereich  $[Bel_N(A), Pl_N(A)]$ . Je größer die Zustandskennziffer ist, desto größer ist der IH-Bedarf an dem Betriebsmittel und desto schlechter ist folglich der Zustand. Eine Zustandskennziffer von  $Z(A) = 0\%$  bedeutet einen perfekten Zustand,  $Z(A) = 100\%$  bedeutet entsprechend den schlechtesten aller möglichen Zustände.

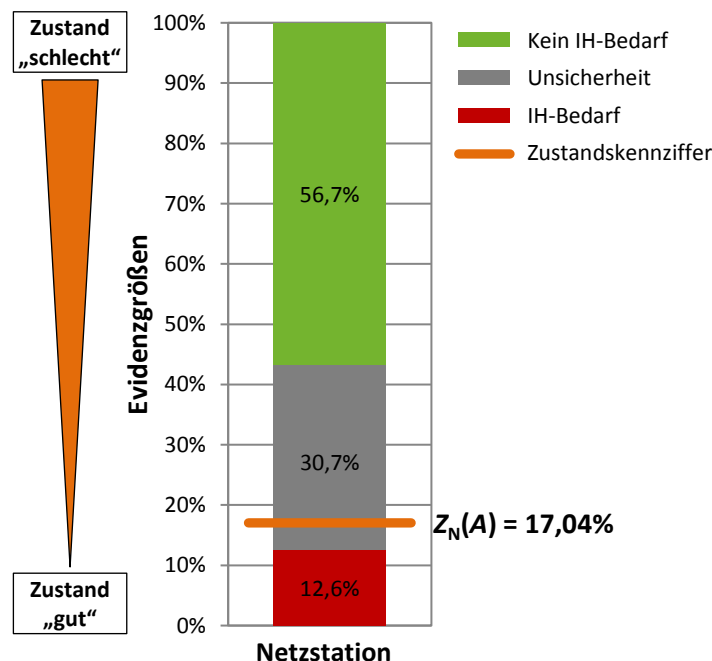


Abbildung 34 – Ergebnisdarstellung des Evidenzmodells für ein Betriebsmittel (Bsp. Netzstation)

Diese Form der Ergebnisdarstellung ist auch für die einzelnen Hauptinspektionsteile im Detail visualisiert darstellbar. So lassen sich auf einen Blick die Treiber eines erhöhten Instandhaltungsbedarfs des Gesamtbetriebsmittels direkt erkennen. Zudem wird ersichtlich, falls bspw. ein Hauptinspektionsteil nicht ausreichend bewertet werden konnte. Dieses stellt einen erheblichen Mehrwert dar, da nun im Gegensatz zum klassischen Bewertungsmodell auch Empfehlungen abgegeben werden können, dass gezielt neue Daten erhoben (erneute Zustandsbewertung) oder weitere Untersuchungen (z. B. Einsatz von weiteren Messverfahren) durchgeführt werden müssen, bevor eine fundierte Entscheidung getroffen werden kann. In Abschnitt 6.2.2.1 werden die evidenzbasierten Ergebnisse eines MS-Betriebsmittels und die Auswirkungen der Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der Subjektivität ausführlich dargestellt. Im Anhang 11.2 ist dazu die

zugehörige Ergebnisübersicht zur Abschlussdokumentation am Beispiel einer inspizierten Netzstation dargestellt, die in übersichtlicher Form auf einer Seite alle Ergebnisse widerspiegelt.

Neben der Ergebnisübersicht werden die festgestellten Mängel und Auffälligkeiten bei einer Inspektion ebenfalls separat zusammengefasst ausgegeben, um dem zuständigen IH-Personal die erforderlichen IH-Maßnahmen mit zugeordneter Fristigkeit mitzuteilen. Dieses erleichtert die operative IH-Maßnahmenplanung für den Asset Service bzw. den Anlagenverantwortlichen und führt auch dazu, dass einzelne Mängel bzw. Auffälligkeiten nicht durch die Aggregation zu einer Zustandskennziffer unberücksichtigt bleiben. Wie in Abschnitt 3.3 erläutert, ist dieser Aspekt besonders bei sofortigen Mängelbeseitigungen erforderlich (Beispiel siehe Anhang 11.2).

Zum Vergleich eines großen Kollektivs an Betriebsmitteln ist dagegen eine übersichtliche Form zu wählen. Gerade im Mittelspannungsnetz liegt ein riesiges Kollektiv vor, das analysiert und verglichen werden muss. Hier ist ein Clustern der Ergebnisse zur Identifizierung der „schlechten“ Betriebsmittel relevant. Die ermittelte Zustandskennziffer kann wieder klassisch als Vergleich der Betriebsmittel untereinander verwendet werden. Dazu bieten sich die bereits in Abschnitt 3.3 dargestellten Methoden der „priorisierten Liste“ oder die *RCM*-Darstellung an. Die Zustandskennziffer dient als Vergleichsgröße bzw. Eingangsgröße der verschiedenen Modelle. Eine weitere Darstellungsform der evidenzbasierten Ergebnisse ist in Abbildung 35 gezeigt, in dem Instandhaltungsbedarf  $Bel(A)$  über der Unsicherheit  $Bel(U)$  aufgetragen wird.

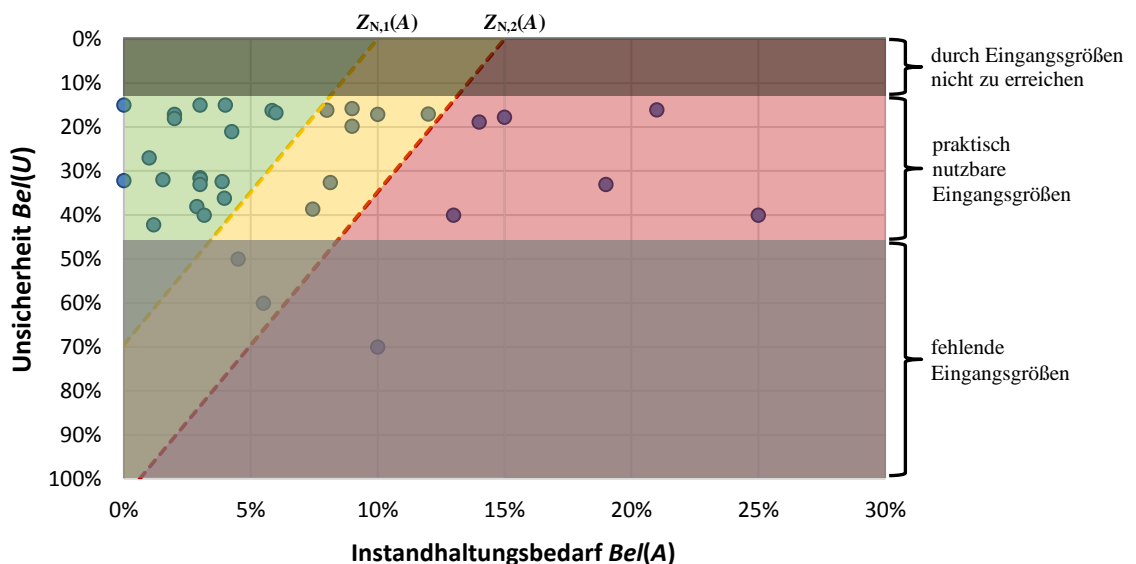


Abbildung 35 – Ergebnisdarstellung des Evidenzmodells für ein Anlagenkollektiv

In dieser Abbildung 35 sind alle inspizierten MS-Betriebsmittel eines Anlagenkollektivs mit ihrem Instandhaltungsbedarf und der zugehörigen Unsicherheit sowie die daraus resultierenden Zustandsklassen dargestellt. Diese Darstellungsform wird nun nachfolgend erläutert, in Abschnitt 6.2.2.2 wird dann auf die expliziten Grenzwerte für das MS-Betriebsmittel Netzstation unter Hinzuziehung der Feldtestergebnisse eingegangen.

Die farblichen Bereiche („rot“, „gelb“ und „grün“) stellen die Zustandsklassen zur Clusterung des Anlagenkollektivs dar und haben die gleiche inhaltliche Bedeutung wie in Abschnitt 3.3. Die einzelnen Bereiche werden durch die gestrichelt eingezeichneten Linien voneinander abgegrenzt. Diese Linien stellen die Grenzwerte der resultierenden Zustandskennziffern aus dem IH-Bedarf und der Unsicherheit nach Gleichung (5.25) dar, bei deren Überschreitung das Betriebsmittel in den gelben bzw. roten Zustandsbereich eingeordnet wird. Die Linien stellen die Grenzwerte der Zustandskennziffern  $Z(A)$  dar. Für Netzstationen bspw. betragen diese Grenzwerte  $Z_{N,1}(A) = 10\%$  und  $Z_{N,2}(A) = 15\%$  (näheres zur Herleitung in Abschnitt 6.2.2.2). Je weiter rechts sich die Punkte in der Abbildung befinden, desto schlechter ist der Zustand des Betriebsmittels. Genau genommen, je größer der Abstand des Punktes rechts von der rot gestrichelten Geraden  $Z_{N,2}(A)$  ist, desto schlechter ist der Zustand (größer die Zustandskennziffer).

Die grau schraffierten Flächen dienen der Interpretation der Unsicherheitswerte  $Bel(U)$  der Zustandsbewertung. Die Zustandsbewertung ist umso verlässlicher, je weiter oben sich der Punkt im Diagramm befindet. Anzustreben ist also eine Punktwolke im oberen linken Bereich, da dort ein MS-Betriebsmittel keinen IH-Bedarf aufweist und diese Bewertung sehr gesichert erfolgt ist. Die Unsicherheitsbereiche werden hierbei durch die Eingangsgrößen abgegrenzt. Im unteren grauen Bereich liegt der Zustandsbewertung eine hohe Anzahl an fehlenden Eingangsgrößen zugrunde. Fehlende Eingangsgrößen stellen z. B. die nicht-durchführbaren Inspektionen ( $B_i = 0$ ) an einzelnen Hauptinspektionsteilen dar, d. h. alle Inspektionpunkte dieser Hauptkomponente sind nicht bewertet ( $m_i(U) = 1$ ). Dieses kann bspw. bei einer Netzstation durch eine versperrte Zugänglichkeit des Verteiltransformators auftreten. Durch diese fehlenden Eingangsgrößen liegt ein sehr unsicheres Ergebnis der Zustandsbewertung vor.

Die Unsicherheitswerte im oberen, dunkleren Graubereich können dagegen auf Basis der vorgestellten Eingangsgrößen (visuelle Inspektion, Thermografie, TE-Detektion, Erdschleifenmessung) nicht erreicht werden, da jeder Bewertung eine zumindest minimale Unsicherheit zugeordnet wird. Um diese noch weiter zu reduzieren, sind zusätzliche Informationen z. B. aus invasiven Messverfahren (konventionelle Erdungsmessung, Mikroohmmessung der Schaltgeräte etc.) erforderlich.

Die Zustandskennziffer dient somit als zentrale Größe, um ein riesiges Kollektiv an MS-Betriebsmitteln untereinander zu vergleichen und erforderliche Maßnahmen zu priorisieren. Für eine gezielte Schwachstellenanalyse von Betriebsmitteln bzw. deren Komponenten ist dagegen speziell der Instandhaltungsbedarf  $Bel(A)$  geeignet. Denn diese Größe beinhaltet alle eindeutig vorliegenden Mängel bzw. Auffälligkeiten und wird nicht durch die Unsicherheit (z. B. durch fehlende oder veraltete Eingangsgrößen) beeinflusst. So können diese übergeordnet analysiert und generelle Handlungsempfehlungen bei Erkennen von Schwachstellen abgeleitet werden.



## 5.5 Grenzen des Modells

Die Ergebnisse und Vorteile des entwickelten Bewertungsmodells sind bereits ausführlich dargestellt worden. Bevor in Kapitel 6 auf die praktische Anwendung eingegangen wird, soll auf die Grenzen des Bewertungsmodells hingewiesen werden.

Das evidenzbasierte Zustandsbewertungsmodell wird in Kapitel 5 anhand des Betriebsmittels Netzstation beispielhaft beschrieben. Das Modell lässt sich auf die anderen MS-Betriebsmittel übertragen. Dabei basiert dieses Modell stets auf einer Inspektions-Checkliste, in der die einzelnen Inspektionpunkte visuell und/oder durch einfache Messverfahren bewertet werden. Inspektions-Checklisten lassen sich auch für MS-Freileitungen und MS-Schaltanlagen in Umspannanlagen einsetzen. Für MS-Kabel dagegen ist die Zustandsdatenerfassung per visueller Inspektion prinzipiell nahezu ausgeschlossen. Die Zustandsbewertung basiert hier daher in der Regel auf statischen Parametern wie Alter, Typ, Anzahl Muffen, Störungsstatistik etc. und/oder Messverfahren [12]. Das präsentierte Zustandsbewertungsmodell ist somit in der Form nicht anwendbar. Jedoch können die theoretischen Grundzüge der Evidenz-Theorie allgemein auch zur Kombination dieser statischen Größen eingesetzt werden, was hier aber nicht weiter behandelt worden ist.

Eine zentrale Anforderung an die Zustandsbewertung von MS-Betriebsmitteln stellt die Wirtschaftlichkeit dar. Die Datenerfassung und -bewertung muss möglichst kosteneffizient und ohne großen zeitlichen Mehraufwand realisierbar sein. Aufgrund der wirtschaftlichen Restriktion erfolgt die Datenerfassung der Eingangsgrößen für das Modell während der zyklischen Inspektionen durch das IH-Personal, d. h. im Betrieb der Anlagen. Dieses schränkt die Detektionsfähigkeit der visuellen Inspektion und der Messverfahren ein. Während der Inspektion muss ein Sicherheitsabstand eingehalten und Komponenten können nicht berührt sowie auseinandergelöst werden, wie es bspw. bei einer Wartung möglich ist. Die einfachen Messverfahren haben ihre Wirksamkeit belegt (siehe z. B. [33, 90]) und detektieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Auffälligkeiten, jedoch können auch hier nicht alle potenziellen Auffälligkeiten detektiert werden. Z. B. können Teilentladungen innerhalb eines Isoliermediums oder mögliche Auffälligkeiten innerhalb einer SF<sub>6</sub>-MS-Schaltanlage (da die Kapselung den Einsatz erschwert) nur eingeschränkt erfasst werden. Somit können prinzipiell auch kritische Auffälligkeiten vorliegen, die aber nicht ins Bewertungsergebnis einfließen. Generell kann die Bewertungssystematik auch im Rahmen von Wartungen eingesetzt werden, wodurch die Aussagefähigkeit erhöht wird. Ebenso können durch die Modularität des Modells bei der Bewertung der Inspektionpunkte weitere Messverfahren ergänzt werden.

In komplexen und dynamischen Situationen, in denen Menschen Entscheidungen treffen müssen, ist Unsicherheit unvermeidbar. Aufgrund von vorherrschenden Rahmenbedingungen (Zeit und Kosten) können selten alle Informationen, die zu einer gesicherten Entscheidung führen, vollständig erhoben werden. Auf Basis der vorliegenden, meist unvollständigen Informationsgrund-

lage muss aber eine Entscheidung abgeleitet werden. Durch das Evidenzmodell wird die Aussagefähigkeit der verschiedenen Hinweise zur Bewertung der Inspektionpunkte berücksichtigt und neben der Zustandskennziffer die Verlässlichkeit der Informationsgrundlage quantifiziert.

Der subjektive Einfluss bei der visuellen Inspektion ist ausführlich behandelt worden und konnte durch die Gegenmaßnahmen erheblich reduziert werden (Kapitel 4). Im Bewertungsmodell ist dieser Einfluss durch die Massezahl der Unsicherheit integriert. Zwar ist die Unsicherheit der visuellen Inspektion auf Basis einer Vielzahl von Felduntersuchungen abgeleitet worden, aber eine Verallgemeinerung ist daraus trotzdem möglicherweise fehlerbehaftet. Die Massezahlen der Unsicherheit stellen eine Orientierung dar, bei welchen Inspektionpunkten die Experten mehr oder weniger objektiv bewerten. Es kann lediglich eine Annäherung an die Werte erzielt werden, wenn neue IH-Experten, die nicht an den Felduntersuchungen teilgenommen haben, hinsichtlich wesentlicher Merkmale (Qualifikation, Gebrauch des Klassifizierungsschemas, Erfahrungen) ähnlich sind [118]. Zudem bewertet in der Praxis immer nur eine Person (evtl. zwei Personen im Team) ein Betriebsmittel. Nach welchen Kriterien (eigene Erfahrung, Interesse, Leitfaden etc.) die Bewertungspunkte vor Ort durch die Person schlussendlich vergeben werden und ob dieses Verhalten im Durchschnitt durch die abgebildeten Massezahlen angenähert wird, kann nicht eindeutig verifiziert werden. Die Abgabe der Bewertungspunkte ist personenabhängig. Daher ist ein gleiches Vorgehen und Verständnis der Experten bei der Zustandsbewertung essentiell. Schulungen und Bewertungsleitfäden sind hilfreiche Instrumente. Ein subjektiver Einfluss bleibt aber trotzdem bestehen und kann das Ergebnis mehr oder weniger stark beeinflussen.

Das Zustandsbewertungsmodell aggregiert die einzelnen Hinweise zu einer einzigen Zustandskennziffer, um eine Entscheidungsunterstützung zu leisten. Die Zusammenhänge zwischen den Inspektionpunkten und dem Gesamtzustand werden durch Gewichtungsfaktoren (siehe Abschnitt 3.2.3) in vereinfachter Form im Modell nachgebildet. Die Zusammenhänge sind in der Praxis aber meist sehr komplex und nicht so eindeutig zu determinieren [9]. Durch die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren ist bereits ein subjektiver Einfluss gegeben. Ein Entscheidungsmodell versucht immer nur sich einem möglichst exakten Abbild der Realität anzunähern [59]. So sind bspw. nicht alle Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge vollständig bekannt. Eine erhöhte Zustandskennziffer bedeutet, dass ein erhöhter IH-Bedarf an dem Betriebsmittel vorliegt. Es kann daraus aber keine eindeutige Korrelation abgeleitet werden, dass dieses auch gleichbedeutend mit einem erhöhten Ausfallrisiko ist. Dieses wäre nur möglich, wenn das Alterungsverhalten („Badewannenkurve“) des Betriebsmittels gesichert bekannt ist, welches aber bisher niemand eindeutig kennt [9]. Daher ist die exakte Höhe der Zustandskennziffer auch von untergeordneter Bedeutung, vielmehr muss eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Bewertungen untereinander gegeben sein. Die Aggregation über Gewichtungsfaktoren schafft zudem Transparenz und Nachvollziehbarkeit und bietet eine optimale Orientierung bei der Entscheidungsfindung.

## 6 Praktische Anwendung des Zustandsbewertungsmodells

### 6.1 Felduntersuchung von Netzstationen

In den vorangegangenen Kapiteln sind die theoretischen Grundzüge und die Entwicklungsschritte hin zum Zustandsbewertungsmodell für MS-Betriebsmittel dargestellt worden. Um nun die Aussagefähigkeit des entwickelten Modells aufzuzeigen und zu validieren, soll jetzt konkret am Beispiel des MS-Betriebsmittels „Netzstation“ die Praxistauglichkeit des Modells anhand von Felduntersuchungen präsentiert werden. Im Rahmen der Felduntersuchungen werden dazu mehrere umfangreiche Feldtests bei verschiedenen Verteilnetzbetreibern an zahlreichen realen, in Betrieb befindlichen Netzstationen durchgeführt. Die Rahmenbedingungen der im Folgenden ausgewerteten Feldtestdaten sollen hier kurz vorgestellt werden.

In den Felduntersuchungen stehen vor allem zwei Untersuchungsgegenstände im Fokus:

- Zum einen ist der subjektive Einfluss bei der Inspektion näher untersucht und quantifiziert worden (siehe auch Kapitel 4). Bei den Verteilnetzbetreibern wurde jeweils eine stichprobenartige Auswahl an Netzstationen anhand der entwickelten Checkliste (Abbildung 5) jeweils von mehreren (bis zu sechs) Experten unabhängig voneinander inspiziert. Dadurch sollte überprüft werden, ob einheitliche Bewertungsgrundsätze und Erfahrungen bei der Inspektion vorliegen und wie stark deren Einfluss auf die Bewertungen ausfällt. Zudem wurden die vorgestellten Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der Subjektivität wie z. B. die nicht-invasive Messtechnik im weiteren Verlauf der Feldtests eingesetzt. Somit liegen für die Analyse des subjektiven Einflusses Mehrfachbewertungen mit einer Grundgesamtheit von 123 Netzstationen (570 Einzelbewertungen) zugrunde. Des Weiteren kann an dieser Grundgesamtheit die Kombination der Hinweise aus verschiedenen Quellen (visuelle Inspektion, Messverfahren) durch das evidenzbasierte Verfahren praxisnah analysiert werden.
- Zum anderen ist die Praxistauglichkeit der Anwendung und die Validierung der Ergebnisse des Zustandsbewertungsmodells weiter untersucht worden. Hierzu ist das Zustandsbewertungsmodell an zahlreichen weiteren Netzstationen verschiedener Verteilnetzbetreiber eingesetzt worden. Dabei sind die wirksamen Gegenmaßnahmen der Subjektivität bereits eingeführt, so dass bei den visuellen Inspektionen durch Schulungen des durchführenden IH-Personals sowie die Anwendung des Bewertungsleitfadens grundsätzlich objektivierte Bewertungen erhoben worden sind. Messverfahren sind hier nur vereinzelt eingesetzt worden. Aus diesen weiteren Feldtests liegt von 995 Netzstationen jeweils eine Einzelbewertung eines Experten vor, wodurch kein subjektiver Einfluss untereinander analysiert werden kann. In Summe werden so mit dem Zustandsbewertungsmodell 1118 Netzstationen (1565 Einzelbewertungen von unterschiedlichen Experten) bewertet.

## 6.2 Ergebnisse der praktischen Anwendung

### 6.2.1 Bewertung der einzelnen Inspektionpunkte

Im Rahmen der gesamten Felduntersuchungen werden insgesamt 73.817 Bewertungspunkte  $B_i = \{1, 2, 3, 4\}$  durch das Instandhaltungspersonal abgegeben (Abbildung 36). Dabei werden 83,50 % aller visuell bewerteten Inspektionpunkte als mängelfrei eingestuft, d. h. es wird kein IH-Bedarf festgestellt. Lediglich in 16,5 % aller Fälle liegt eine Mängelbewertung (IH-Bedarf vorhanden) vor, wobei bei 2,75 % aller Bewertungen bereits ein sofortiger Handlungsbedarf besteht.

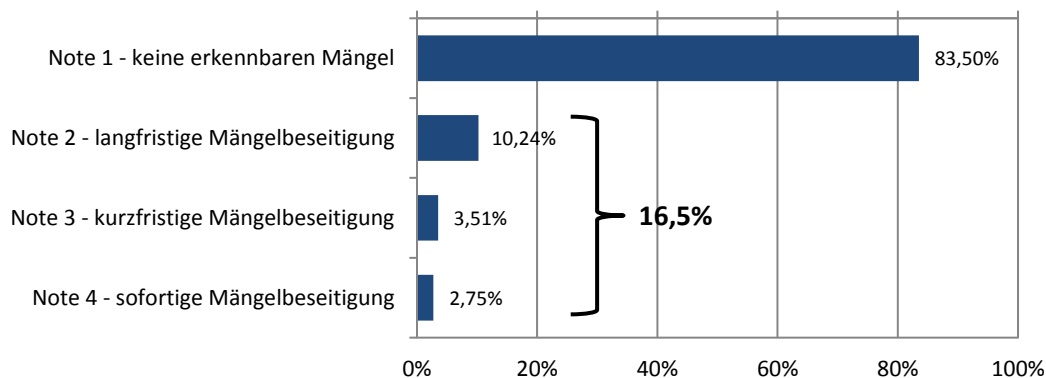


Abbildung 36 – Anzahl der Mängelbewertungen nach Bewertungspunkte (73.817 Einzelbewertungen  $B_i$ )

Um eine genauere Verteilung der identifizierten Mängel ( $B_i = \{2, 3, 4\}$ ) und deren zugehörigen Inspektionpunkte zu erhalten, ist in Abbildung 37 die Verteilung der Mängelbewertungen nach den einzelnen Hauptinspektionsteilen (HIT) einer Netzstation dargestellt. Die Inspektionpunkte des HIT „Baulicher Teil“ (Gebäude außen und innen) weisen die meisten Mängel und damit am häufigsten einen IH-Bedarf auf, gefolgt vom HIT „Verteiltransformator“. Viele Inspektionpunkte beim Verteiltransformator sind aber zudem mit dem Bewertungspunkt  $B_i = 0$  (Inspektion nicht möglich) bewertet, da der Transformator nicht zugänglich ist bzw. nicht eingesehen werden kann (bspw. häufig bei einer Kompaktstation). Ähnlich verhält es sich bei den SF<sub>6</sub>-MS-Schaltanlagen, wo die Kapselung die visuelle Inspektion verhindert. Beim HIT „Zubehör“ erfolgt dagegen vermehrt der Bewertungspunkt  $B_i = \emptyset$ , da diese aufgrund der universellen Checkliste in vielen Netzstationen nicht vorzufinden sind.

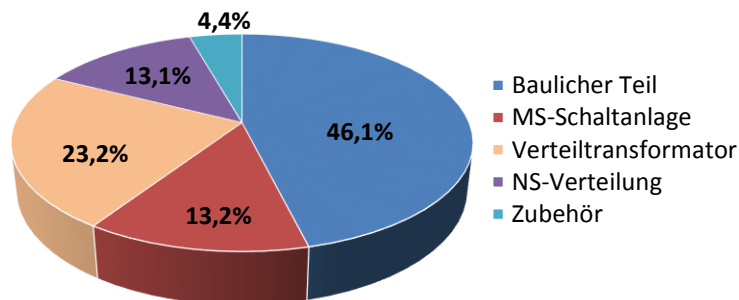


Abbildung 37 – Verteilung der identifizierten Mängel nach Hauptinspektionsteilen

Bei Detailbetrachtung nach einzelnen Inspektionenpunkten verteilen sich die Mängelbewertungen, die aus der visuellen Inspektion erfolgen, inhomogen (siehe Abbildung 38). In der Abbildung ist die zu erwartende Wahrscheinlichkeit  $p_i(\text{Mangel})$  aufgetragen, die aus der Anzahl aller Mängelbewertungen (Bewertungspunkte  $B_i = [2,3,4]$ ) dividiert durch die Gesamtzahl aller abgegebenen Einzelbewertungen ( $B_i = [1,2,3,4]$ ) resultiert.

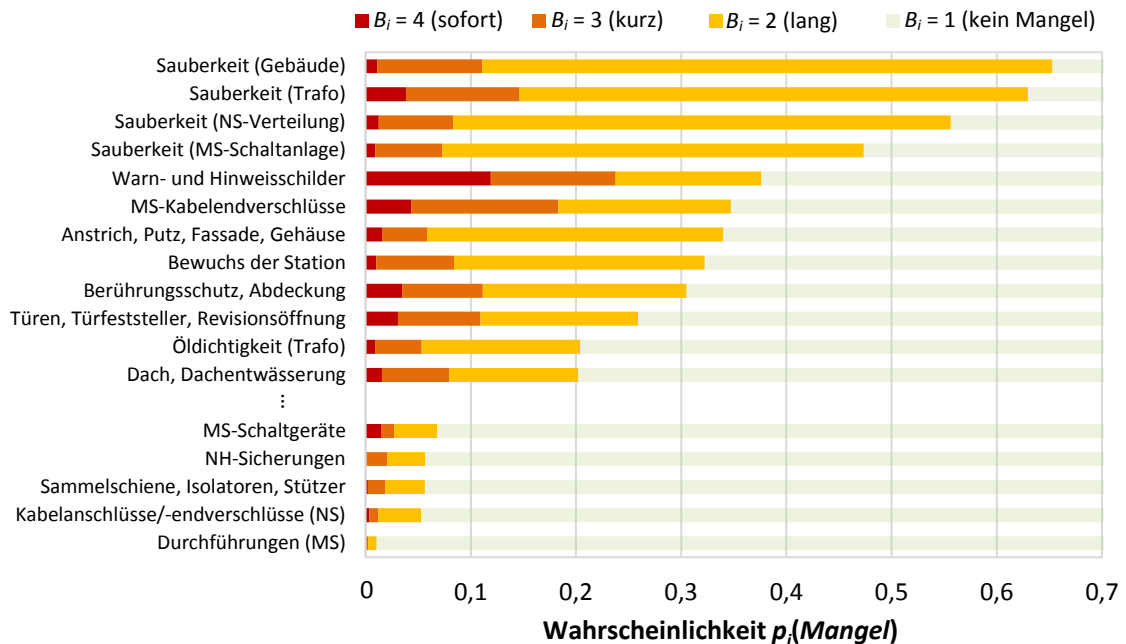
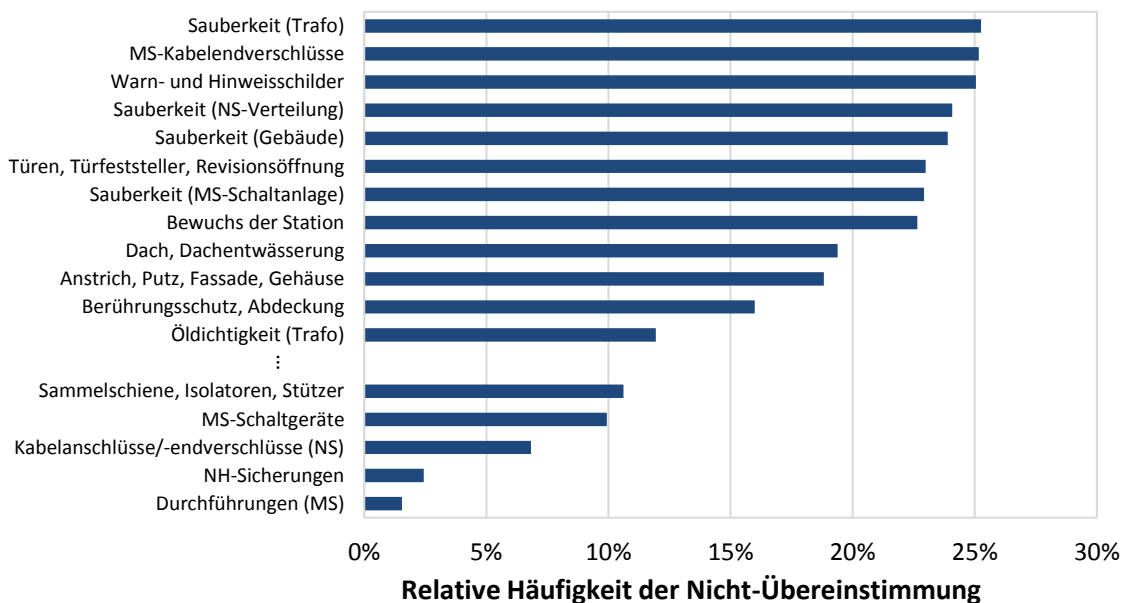


Abbildung 38 – Inspektionenpunkte mit der höchsten Wahrscheinlichkeit einer Mängelbewertung

Es fällt auf, dass vor allem die Inspektionenpunkte „Sauberkeit“ bei den einzelnen Hauptinspektionsteilen häufig als Mangel (vor allem mit  $B_i = 2$ ) bewertet werden. Gründe dafür sind, dass zum einen die „Sauberkeit“ schnell und eindeutig bei einer visuellen Inspektion bewertet werden kann und zum anderen die „Sauberkeit“ einfach eine häufige Mangelursache in Netzstationen darstellt. Bei einer Wartung stellt die Reinigung der Anlage in der Regel eine der klassischen Tätigkeiten dar, um Störungen der Anlage vorzubeugen. Es wird deutlich, dass es zielführend ist, die „Sauberkeit“ als separaten Inspektionenpunkt der einzelnen HIT aufzuführen, um die Reinigung vom Zustand/IH-Bedarf der Komponenten zu trennen. Des Weiteren weisen vor allem bauliche Inspektionenpunkte Mängel auf, da diese ebenfalls effektiv bei einer visuellen Inspektion beurteilt werden können (vgl. auch [3]). Das Gleiche gilt für die MS-Kabelendverschlüsse, bei denen meist festgestellt wird, ob ein Nachfüllen des Masseendverschlusses erforderlich ist. Dieses ist einer der Gründe, warum an diesen Inspektionenpunkten gehäuft Mängel identifiziert werden. Dagegen ist bei den Inspektionenpunkten der elektrischen Komponenten die visuelle Inspektion nur eingeschränkt sinnvoll, somit werden an diesen tendenziell auch weniger Mängel detektiert.

Neben der Wahrscheinlichkeit eines Mangels bei einem Inspektionenpunkt  $i$  stellt sich zudem die Frage, welche Inspektionenpunkte verstärkt einem subjektiven Bewertungseinfluss unterliegen und welche recht objektiv durch die Experten bewertet werden können. Hierzu werden nun die Netzstationen analysiert, bei denen Mehrfachbewertungen vorliegen.

Dazu wird zur Quantifizierung des subjektiven Einflusses, wie bereits in Abschnitt 5.3.1 angeführt, die prozentuale Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung der Experten untereinander ermittelt. In diesem Zusammenhang ist es hier ausreichend zu wissen, in wieviel Prozent der Fälle die Experten nicht zu demselben bzw. „wahren“ Urteil kommen [118]. Weichen die Urteile voneinander ab, liegt Unsicherheit über die Bewertung vor. Dabei spielt hier die Höhe der Abweichung eine untergeordnete Rolle, weil das Vorhandensein bereits Unsicherheit für den Auswertenden bedeutet. In Abbildung 39 sind - zwecks Vergleichbarkeit - die gleichen exemplarischen Inspektionpunkte wie in Abbildung 38 mit der relativen Häufigkeit aufgeführt, bei denen die Experten nicht übereinstimmen. So stimmen über 25 % aller abgegebenen Bewertungspunkte bei den ersten drei Inspektionpunkten Sauberkeit (Transformator), MS-Kabelendverschlüsse und Warn- und Hinweisschilder nicht überein, d. h. es wird eine abweichende Bewertung vom definierten „wahren“ Wert abgegeben. Bei Warn- und Hinweisschildern resultiert die abweichende Bewertung bspw. aus einer unterschiedlichen Auffassung der Bewertenden, welche Art der Beschilderung in der Netzstation ordnungsgemäß vorhanden sein muss. Die Experten kommen zu unterschiedlichen Urteilen, wodurch ein subjektiver Einfluss ersichtlich ist. Die aufgelisteten Inspektionpunkte (aber in geänderter Reihenfolge) stellen zum Großteil (die ersten zehn in Abbildung 39) auch die größten relativen Häufigkeiten der Nicht-Übereinstimmung der Bewertungsergebnisse dar, denn ein subjektiver Einfluss wird vor allem dann von Relevanz, wenn ein Mangel überhaupt detektiert wird.



**Abbildung 39 – Inspektionpunkte mit der größten Nicht-Übereinstimmung der Bewertungsergebnisse bei unterschiedlichen Bewertenden**

Die prozentuale Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung zwischen den Experten stellt also ein Maß für den subjektiven Einfluss bei der visuellen Inspektion dar. Liegt keine Übereinstimmung der Experten/Bewertenden vor, handelt es sich um Unsicherheit für den Auswertenden. Aus diesem Grund sind bereits in Abschnitt 5.3.1 auf dieser Basis die Unsicherheiten der visuellen Inspektion abgeleitet worden.

Außerdem lassen sich aus der Detailanalyse der prozentualen Übereinstimmung je Inspektionspunkt Rückschlüsse ziehen, welche Inspektionspunkte vor allem einem subjektiven Einfluss bei der Bewertung unterliegen. Aufgrund unterschiedlicher Erfahrungen und Bewertungsgrundsätze kommt es zu abweichenden Bewertungen. Speziell bei Inspektionspunkten mit hoher Nicht-Übereinstimmung wie Sauberkeit, MS-Kabelendverschlüsse oder Warn- und Hinweisschilder müssen Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der Subjektivität ansetzen. Hier ist bspw. ein Bewertungsleitfaden (Schadens-/Bilderkatalog) als Unterstützung bei der Bewertungsabgabe empfehlenswert, in dem auftretende Mängel näher beschrieben und z. T. mit Bildern veranschaulicht werden. Durch die Gegenmaßnahmen kann hier die Subjektivität (Unsicherheit) verringert werden.

Bei den Inspektionspunkten der elektrischen Komponenten weisen die Experten i. d. R. eine recht hohe prozentuale Übereinstimmung ( $P\bar{U}_i > 89\%$ ) untereinander auf. Dieses liegt zum einen daran, dass, wenn Mängel identifiziert werden, diese meist einheitlich bzw. übereinstimmend bewertet werden. Der subjektive Einfluss ist also relativ gering. Zum anderen liegt es aber sehr stark auch daran, dass die Experten beim Bewertungspunkt  $B_i = 1$  (keine Mängel erkennbar) eine sehr große Übereinstimmung aufweisen. Diese große Übereinstimmung besagt aber lediglich, dass mehrere Experten zu gleichen Urteilen kommen (objektiv sind), jedoch nichts darüber, ob diese auch „richtig“ liegen, z. B. weil ein Mangel visuell nicht erkennbar ist. Daher sollten einfache Messverfahren für eine fundierte Zustandsbewertung der elektrischen Komponenten stets hinzugezogen werden.

Durch den Einsatz der einfachen Messverfahren (Abschnitt 4.2.3) im Rahmen der Felduntersuchungen lassen sich zahlreiche Auffälligkeiten an Komponenten der Netzstationen ermitteln. Diese detektierten Auffälligkeiten verteilen sich entsprechend Abbildung 40 auf die Hauptinspektionsteile bzw. die Erdungsanlage.

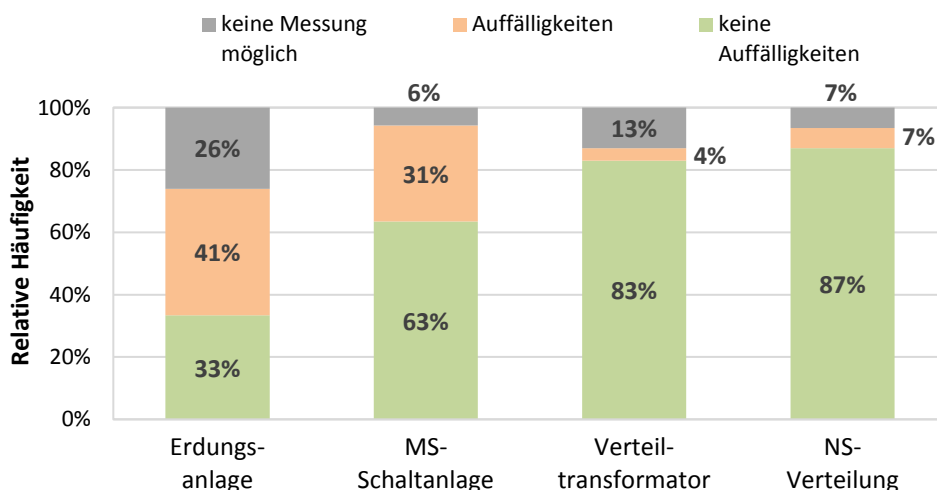


Abbildung 40 – Detektierte Auffälligkeiten durch den Einsatz der Messverfahren

So können in über 30 % aller während der Felduntersuchung mit den Messverfahren überprüften Netzstationen (insgesamt 123 Netzstationen) Auffälligkeiten detektiert werden, wodurch die Wirksamkeit des Einsatzes der Messverfahren deutlich wird (vgl. auch [90]). Zudem werden

lediglich etwa 5 % dieser messtechnisch detektierten Auffälligkeiten auch bei der visuellen Inspektion durch das IH-Personal als ein Mangel bewertet. Visuell sind diese messtechnischen Auffälligkeiten nicht erkennbar. Gerade an MS-Schaltanlagen werden über die TE-Detektion bzw. über die Thermografie zahlreiche Auffälligkeiten festgestellt. Die Erdschleifenmessung ist dagegen mitunter nicht einsetzbar, weil die Prüfzange z. B. das Bandeisen nicht umfassen kann oder die Erdung nicht zugänglich ist. Der zusätzliche zeitliche Mehraufwand für den Einsatz der Messverfahren bewegt sich dabei zwischen 15-30 Minuten pro Netzstation, je nach Ausstattung und Typ der Anlage [90]. Im Vergleich dazu umfasst die visuelle Inspektion dieser Netzstationen mit der Checkliste als Richtwert ca. 30 min, wobei der Zeitaufwand maßgeblich durch die ausführliche visuelle Inspektion geprägt ist und nicht durch das Ausfüllen der Checkliste.

## 6.2.2 Darstellung der evidenzbasierten Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die evidenzbasierten Ergebnisse dargestellt. Zuerst werden die evidenzbasierten Bewertungsergebnisse und die Einflüsse der Gegenmaßnahmen an einer bewerteten Netzstation präsentiert, um die Wirkzusammenhänge und Aussagefähigkeit aufzuzeigen. Anschließend wird das Modell dann auf das gesamte Kollektiv der Felduntersuchungen angewendet. Es werden zuerst die Bewertungsergebnisse (Instandhaltungsbedarf  $Bel(A)$ , Unsicherheit  $Bel(U)$  sowie die daraus resultierende Zustandskennziffer  $Z(A)$ ) veranschaulicht. Anschließend wird der Einfluss der eingesetzten Messverfahren auf die Bewertungsergebnisse verdeutlicht.

### 6.2.2.1 Evidenzbasierte Ergebnisse einer Netzstation

Um die Ergebnisse des Zustandsbewertungsmodells zu veranschaulichen, werden im Folgenden die Einflüsse verschiedener Parameter anhand einer bewerteten Netzstation beispielhaft dargestellt. Die Punkte der Inspektions-Checkliste (Anhang 11.1) der Netzstation (Gebäudestation) werden vor Ort durch das IH-Personal entsprechend des Klassifizierungsschemas mit den Bewertungspunkten  $B_i = [\emptyset, 0, 1, 2, 3, 4]$  bewertet. An folgenden Inspektionen werden dabei Mängel (Tabelle 6, Anhang 11.2) visuell detektiert:

**Tabelle 6 – Visuell identifizierte Mängel durch das IH-Personal an einer Netzstation**

<i>Identifizierte Mängel</i>		<i>Identifizierte Mängel</i>	
<b>Inspektionenpunkt (Baulicher Teil)</b>	<b><math>B_i</math></b>	<b>Inspektionenpunkt (der elektrischen HIT)</b>	<b><math>B_i</math></b>
Zugänglichkeit, Wege, Flächen	3	Gehäuse, Kapselung (MS)	2
Anstrich, Putz, Fassade, Gehäuse	3	Sauberkeit (MS-Schaltanlage)	3
Bewuchs der Station	2	Ölauffangwanne, Gewässerschutzbox	2
Türen, Türfeststeller, Revisionsöffnung	3	Sauberkeit (Transformator)	3
(Not-) Beleuchtung, Steckdosen	3	Berührungsschutz, Abdeckung (NS-Verteilung)	2
Putz, Anstrich, Wände, Decke	2	Sauberkeit (NS-Verteilung)	3
Fußböden (Innenraum)	2	Erdungs- und Kurzschließvorrichtung	3
Sauberkeit (Innenraum)	2		
Warn- und Hinweisschilder (Gebäude)	3		



Die Netzstation weist also vor allem Mängel am baulichen Teil auf, die jedoch keine sofortigen IH-Maßnahmen erforderlich machen. Die elektrischen Hauptinspektionsteile (MS-Schaltanlage, Verteiltransformator, NS-Verteilung) weisen visuell dagegen kaum gravierende Mängel auf. Lediglich die Sauberkeit der Netzstation wird allgemein übergreifend als reinigungsbedürftig eingestuft. Die Sauberkeit wird pro Hauptinspektionsteil als separater Inspektionspunkt bewertet. Die Anzahl der visuell festgestellten Mängel (an 16 Inspektionspunkten) ist aber vergleichsweise groß, wobei die Mängel aber nicht in einem sehr schwerwiegenden Ausmaß ( $B_i \neq 4$ ) vorliegen.

Im Zustandsbewertungsmodell werden allen Bewertungspunkten die zugehörigen Massezahlen (Unsicherheiten gemäß Abbildung 26) zugeordnet und anschließend werden diese Massezahlen gemäß Abbildung 24 über die Gewichtungsfaktoren zu einer Zustandskennziffer für die komplette Netzstation aggregiert. Die Abbildung 41 stellt die Aggregation der Evidenzgrößen über die zugehörigen Gewichtungsfaktoren auf höchster Ebene (von den Hauptinspektionsteilen zur Zustandskennziffer der Netzstation) übersichtlich dar.

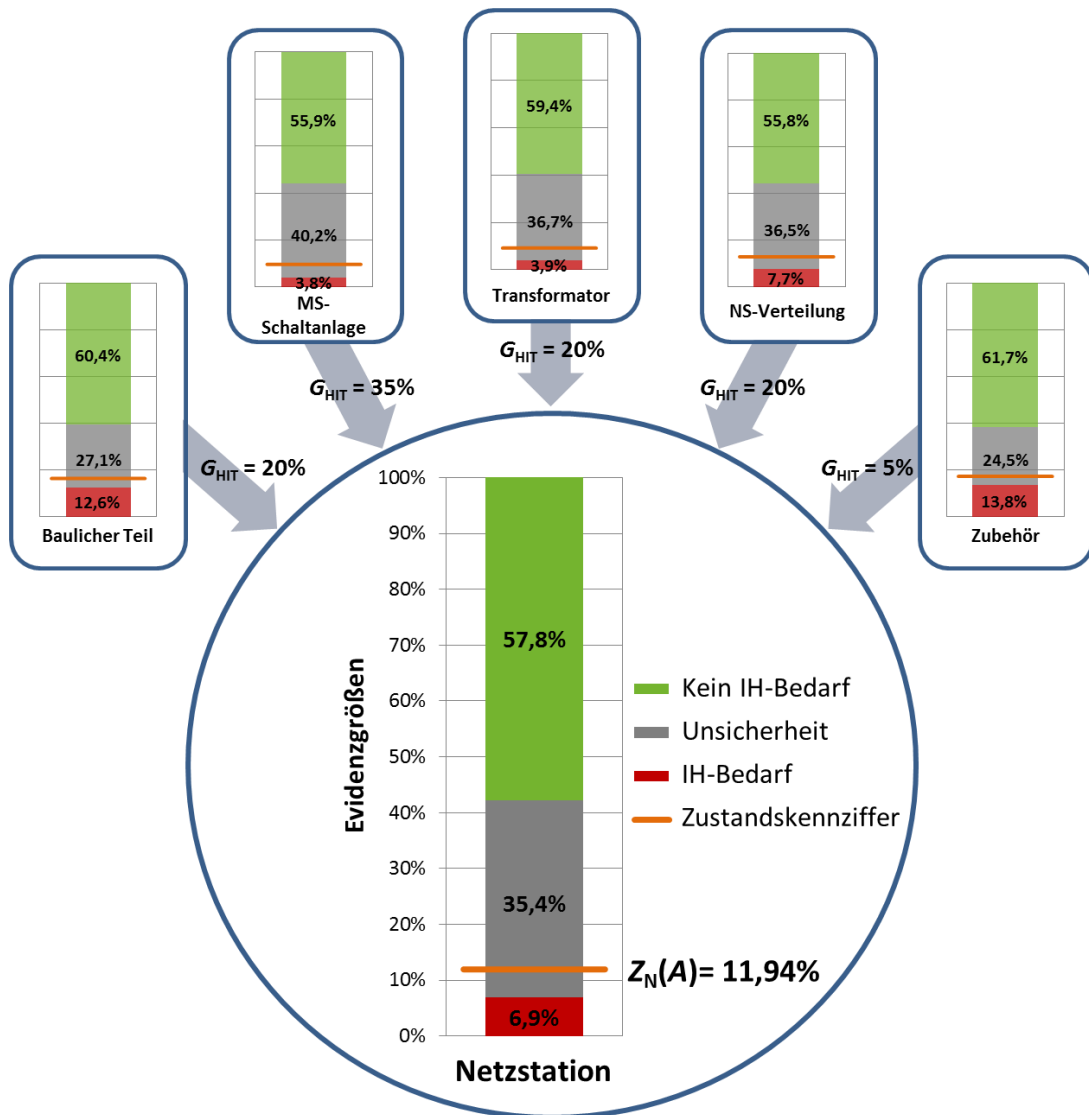


Abbildung 41 – Bildung einer Zustandskennziffer am Beispiel einer Netzstation

Der Instandhaltungsbedarf  $Bel(A)$  am baulichen Teil der Netzstation weist mit den größten Wert auf, weil dort die meisten Mängel detektiert werden. Jedoch ist auch eine Vielzahl der Inspektionpunkte des baulichen Teils in einem unauffälligen Zustand und damit ist der grüne Bereich (kein IH-Bedarf) ausgeprägt. Beim Zubehör liegt ebenfalls ein größerer IH-Bedarf vor, jedoch hat dieser erhöhte IH-Bedarf durch die geringe Gewichtung  $G_{HIT}$  des Zubehörs nur einen untergeordneten Einfluss auf den Zustand der gesamten Netzstation. Bei den elektrischen Hauptinspektionsteilen MS-Schaltanlage, Transformator und NS-Verteilung liegt dagegen nur ein geringer IH-Bedarf vor, da hauptsächlich nur die Sauberkeit bemängelt wird. Der graue Unsicherheitsbereich  $Bel(U)$  ist dagegen bei diesen Hauptinspektionsteilen größer, weil eine Sichtkontrolle bei der Inspektion nur eingeschränkt sinnvoll ist. Der unauffällige Zustand der elektrischen Komponenten kann also auch bedeuten, dass die Mängel lediglich visuell nicht erkennbar sind. Aus diesem Grund und der höheren Relevanz dieser Hauptinspektionsteile für die gesamte Netzstation ( $G_{HIT}$ ) ist auch der Unsicherheitsbereich  $Bel_N(U)$  der gesamten Netzstation relativ groß, weil gerade bei den elektrischen Komponenten eine visuelle Inspektion häufig nur eine eingeschränkte Aussagekraft besitzt. Diese Tatsache wird durch die Anwendung der Evidenz-Theorie im Bewertungsergebnis ausgedrückt, da die Unsicherheit der Eingangsdaten mit berücksichtigt wird. Die resultierende Zustandskennziffer der Netzstation  $Z_N(A)$  liegt innerhalb des Unsicherheitsbereichs und berücksichtigt sowohl den Instandhaltungsbedarf ( $Bel_N(A)$ , roter Bereich) sowie auch die Größe des Unsicherheitsbereichs ( $Bel_N(U)$ , grauer Bereich), d. h. die Plausibilität eines IH-Bedarfs an der Netzstation. Diese, in einer einzigen Bewertungsgröße zusammengefasste Zustandskennziffer ermöglicht es, die Netzstation im Kollektiv mit anderen Netzstationen zu vergleichen (siehe Abschnitt 6.2.2.2).

Eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Hauptinspektionsteile (ohne Berücksichtigung von  $G_{HIT}$ ) erlaubt dagegen, die Treiber für einen IH-Bedarf an der gesamten Netzstation aufzuzeigen und so gezielt die IH-Maßnahmen durchzuführen. So wird bei der Netzstation ersichtlich, dass die elektrischen Hauptinspektionsteile sich in einem guten Zustand (wenig IH-Bedarf) befinden. Am baulichen Teil der Netzstation sollte jedoch in absehbarer Zeit ein IH-Auftrag durchgeführt werden, um die identifizierten Mängel zu beheben. Zudem sollte beim Zubehör die Erdungs- und KurzschlieÙvorrichtung ausgetauscht werden.

### **Objektivierung der visuellen Inspektion (Bewertungsleitfaden)**

Die Unsicherheit  $Bel_N(U)$  der Netzstation weist aufgrund der rein visuellen Inspektion einen großen Bereich auf und stellt ein eher unsicheres Ergebnis dar. Wie in Kapitel 4 ausführlich dargestellt, hat die Subjektivität bei der Bewertung durch das IH-Personal einen Einfluss auf die erfahrungsbasierte Bewertung von Mängeln. Um den Effekt zu reduzieren, stellen organisatorische Maßnahmen und ein Bewertungsleitfaden sehr hilfreiche Instrumente dar. Die Wirksamkeit der Gegenmaßnahmen ist in Abbildung 18 veranschaulicht. Durch die Bewertung der Inspektionpunkte auf Grundlage der Erfahrungen des IH-Personals, die durch organisatorische Maßnahmen (z. B. Schulungen) und einem Bewertungsleitfaden unterstützend ergänzt werden, lässt

sich der subjektive Einfluss (als Teil der Unsicherheit) um 48 % (von 4,03 auf 2,10) reduzieren. Bei intensivem Einsatz und Anwendung der Gegenmaßnahmen kann der subjektive Einfluss auch noch weiter verringert werden. Im Idealfall lässt sich dieser vollständig eliminieren (personenneutral), jedoch bleibt in realen Situationen bei Expertenwissen immer ein gewisser, subjektiver Anteil bestehen (z. B. beim Erkennen und Wahrnehmen der Mängel). Subjektivität kann nicht gänzlich vermieden werden und muss daher weiterhin berücksichtigt werden. Die Ungewissheit dagegen, ob bei einer visuellen Inspektion der Mangel überhaupt erkannt werden kann, bleibt unverändert. Daher wird im Gegensatz zu den anderen Bewertungspunkten  $B_i = 2, 3$  und 4, bei denen ein Mangel bewertet wird, beim Bewertungspunkt  $B_i = 1$  nur der subjektive Anteil der Unsicherheit um 48 % verringert, nicht jedoch die Ungewissheit. Unter Umsetzung und Einsatz der Unterstützungsinstrumente (organisatorische Maßnahmen, Bewertungsleitfaden) lassen sich die in Abbildung 42 aufgeführten Massezahlen der Unsicherheit  $m_i(U)$  für die objektiverte visuelle Inspektion verwenden. Diese beruhen auf den Unsicherheiten  $m_i(U)$  in Abbildung 26, jedoch ist die Subjektivität durch die durchgeführten Gegenmaßnahmen um 48 % reduziert.

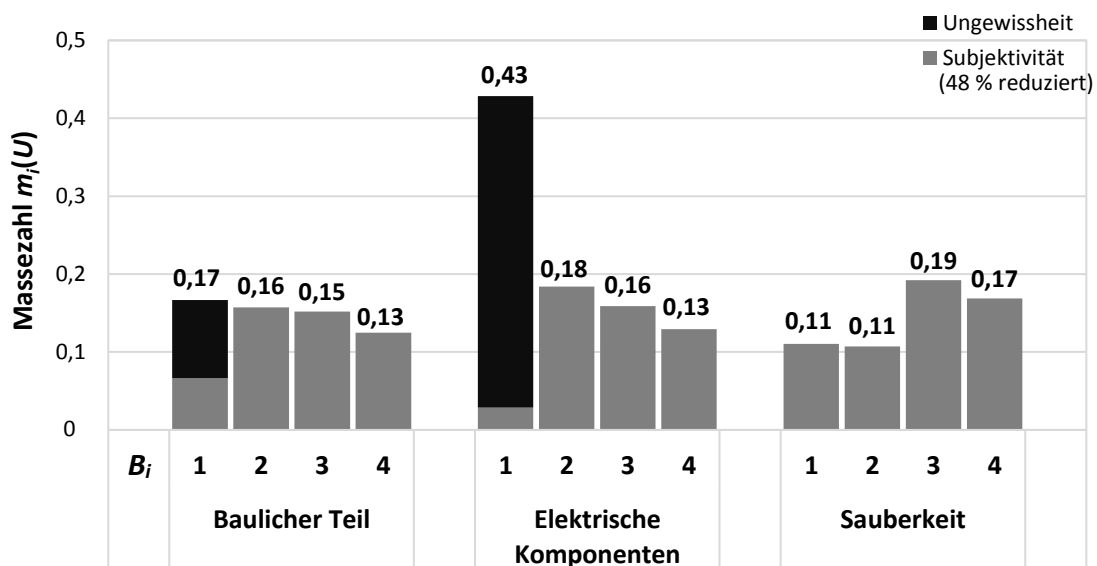


Abbildung 42 – Unsicherheit der visuellen Inspektion (Erfahrung und Bewertungsleitfaden)

### Einsatz einfacher Messtechnik

Die Netzstation wird neben der visuellen Inspektion durch das IH-Personal zusätzlich noch unter Einsatz einfacher Messtechnik analysiert. So können einzelne Inspektionpunkte der Netzstation punktuell durch die Messtechnik intensiver untersucht und dadurch weitere Informationen über deren Zustand erhoben werden. Hierbei können alle vorgestellten Messverfahren bei der Netzstation eingesetzt werden. Die Erdung wird durch die Erdschleifenmessung überprüft, um eine Aussage über Güte der Erdungsanlage treffen zu können. Diese Messung liefert keinen auffälligen Wert. Die thermografische Analyse unter Anwendung einer Wärmebildkamera zeigt an der MS-Schaltanlage sowie am Verteiltransformator ebenfalls keine Auffälligkeiten. Bei der

NS-Verteilung weisen die NH-Sicherungen zwischen den Phasen eines Kabelabgangs bei nahezu symmetrischer Belastung geringe Temperaturdifferenzen auf, die zwar noch nicht kritisch sind, jedoch zukünftig weiter beobachtet werden sollen ( $B_i = 2$ ). Die akustische Teilentladungsdetektion kommt an der luftisolierten MS-Schaltanlage sowie den Anschlüssen des Verteiltransformators zum Einsatz. An den meisten Komponenten werden dabei keine Teilentladungen detektiert. Jedoch wird an einem Schaltgerät ein erhöhter Teilentladungspegel gemessen, der bereits einen kurzfristigen Handlungsbedarf hervorruft ( $B_i = 3$ ). Eine angenäherte Lokalisierung der Teilentladungsstelle deutet auf die Löschrohre des Schaltgerätes hin. Zusammengefasst resultieren folgende messtechnische Bewertungsergebnisse (Tabelle 7):

**Tabelle 7 – Messtechnische Bewertungsergebnisse der betrachteten Netzstation**

<i>Messtechnische Bewertungsergebnisse (<math>B_i</math>) der Netzstation</i>			
<b>Inspektionspunkt (elektrisch)</b>	<b>Erdung</b>	<b>TE-Messung</b>	<b>Thermografie</b>
Erdungsanlage	1		
Sammelschiene, Isolatoren, Stützer		1	1
Durchführungen		1	1
MS-Schaltgeräte		3	1
HH-Sicherungen		1	1
MS-Kabelendverschlüsse		1	1
Trafo-Gehäuse (Anstrich, Dichtigkeit)		1	1
Trafo-Endverschlüsse, Verbindungen		1	1
Temperatur (Transformator)			1
NH-Sicherungen			2
Zuleitungsabsicherung (NS-Verteilung)			1
NS-Kabelanschlüsse/-endverschlüsse			1
Sonstiges (NS-Verteilung)			1

### **Vergleich der evidenzbasierten Ergebnisse (Einfluss der Gegenmaßnahmen)**

Diesen ermittelten Bewertungspunkten werden dann wieder die zugehörigen Massezahlen (Unsicherheiten gemäß Abbildung 27) zugeordnet. Die verschiedenen Hinweise bzw. Massezahlen, die bei einer Komponente aus den unterschiedlichen Quellen (visuelle Inspektion, TE-Messung, Thermografie oder Erdschleifenmessung) vorliegen, werden dann nach der definierten Kombinationsregel sukzessiv miteinander kombiniert. Anschließend werden die kombinierten Bewertungsergebnisse der Inspektionpunkte  $Bel_i(A)$ ,  $Bel_i(U)$  und  $Bel_i(\bar{A})$  gemäß Abbildung 24 über die Gewichtungsfaktoren wieder zu einer gesamten Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  aggregiert. Die folgende Abbildung 43 stellt die Ergebnisse der Netzstation und den Einfluss der Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der Subjektivität vergleichend dar.

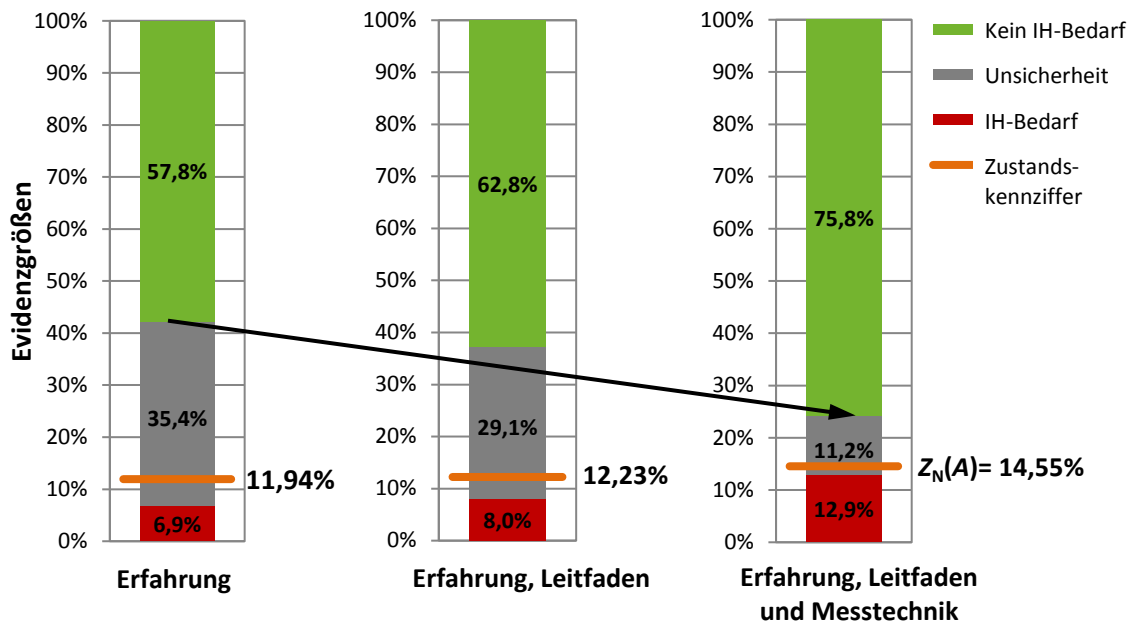


Abbildung 43 – Evidenzbasierte Ergebnisse der Gegenmaßnahmen bei einer Netzstation

Die linke Darstellung stellt die Ergebnisse bei der erfahrungsbasierten Zustandsbewertung der betrachteten Netzstation dar. Durch eine Objektivierung der visuellen Inspektion (Schulungen, Bewertungsleitfaden), in der mittleren Darstellung (Abbildung 43) abgebildet, lässt sich der subjektive Einfluss und dementsprechend die gesamte Unsicherheit  $Bel_N(U)$  für den Auswertenden von 35,4 % auf 29,1 % reduzieren. Diese Verringerung bei der gesamten Netzstation fällt in Anbetracht der reduzierten Unsicherheit der einzelnen Inspektionpunkte verhältnismäßig gering aus. Dieses ist auf die hohe Anzahl an Inspektionpunkten, die mit dem Bewertungspunkt  $B_i = 1$  bewertet werden, zurückzuführen. Hier spielt die Ungewissheit eine dominierende Rolle. Der subjektive Einfluss kommt verstärkt bei der Bewertung eines festgestellten Mangels zum Tragen. Wären bspw. alle Inspektionpunkte mit dem Bewertungspunkt  $B_i = 2$  bewertet, so würde sich eine Reduzierung der gesamten Unsicherheit  $Bel_N(U)$  von 33,0 % (Erfahrung) auf 17,9 % (Erfahrung, Leitfaden) ergeben. In der mittleren Darstellung erhöht sich zudem der Instandhaltungsbedarf für die gesamte Netzstation um 1,1 %. Durch die reduzierte Subjektivität werden die abgegebenen Einzelbewertungen sicherer und damit verlässlicher. Der Glaubensgrad, dass bei der Netzstation ein IH-Bedarf besteht, steigt also an. Dem „wahren“ Wert des IH-Bedarfs an der Netzstation wird sich immer weiter angenähert. Neben der Reduzierung der Unsicherheit liefert die Umsetzung der organisatorischen Maßnahmen (Abschnitt 4.2.1) und der Einsatz eines Bewertungsleitfadens (Abschnitt 4.2.2) aber vor allem überhaupt die wichtige Voraussetzung, dass verschiedene Netzstationen bzw. Betriebsmittel untereinander vergleichbar werden. Bei unterschiedlichen Bewertungsgrundsätzen des eingesetzten IH-Personals ist dieses nicht gewährleistet, da bspw. die Netzstationen von einer Person tendenziell immer schlechter bewertet sind.

In der rechten Darstellung (Abbildung 43) ist neben der Objektivierung der visuellen Inspektion auch der Einsatz von einfachen Messverfahren eingeflossen. Die messtechnischen Bewertungen

der betrachteten Netzstation sorgen dafür, dass die Komponenten verlässlicher analysiert werden können. Die gesamte Unsicherheit beträgt nun nur noch 11,2 %, d. h. das Intervall, in dem der „wahre“ Wert des IH-Bedarfs liegt, wird stark verkleinert. In Relation zur Unsicherheit bei der erfahrungsbasierten Zustandsbewertung (35,4 %) wird diese Unsicherheit um 68 % verringert. Die Qualität der Gesamtaussage/-zustandskennziffer ist also wesentlich verlässlicher und fundierter. Der „grüne“ Bereich (kein IH-Bedarf) wächst stark an, da die eingesetzten Messverfahren ebenfalls keine Auffälligkeiten an den meisten analysierten Komponenten der Netzstation feststellen. Ein großer Anteil des vorherigen Unsicherheitsbereichs wird also dem „grünen“ Bereich zugeordnet, da hier nun verlässlichere Informationen vorhanden sind. Zwei Auffälligkeiten (Schaltgerät, NH-Sicherung) werden jedoch auch detektiert, die visuell nicht erkannt werden. Aus diesem Grund erhöht sich auch der Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  um 6,0 % auf den Wert 12,9 %, da ein erhöhter IH-Bedarf vorliegt. Die Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  erhöht sich entsprechend auch.

Die gesamte Unsicherheit  $Bel_N(U)$  bei der Zustandsbewertung der Netzstation verringert sich also durch den Einsatz der Messtechnik von 29,1 % (Erfahrung, Leitfaden) auf 11,2 %. Die Messverfahren erlauben eine Analyse der elektrischen Komponenten und optimieren die Zustandsbewertung. Der Einfluss der Messverfahren auf die Bewertung der einzelnen Hauptinspektionsteile ist in der Detailbetrachtung in Abbildung 44 aufgeführt.

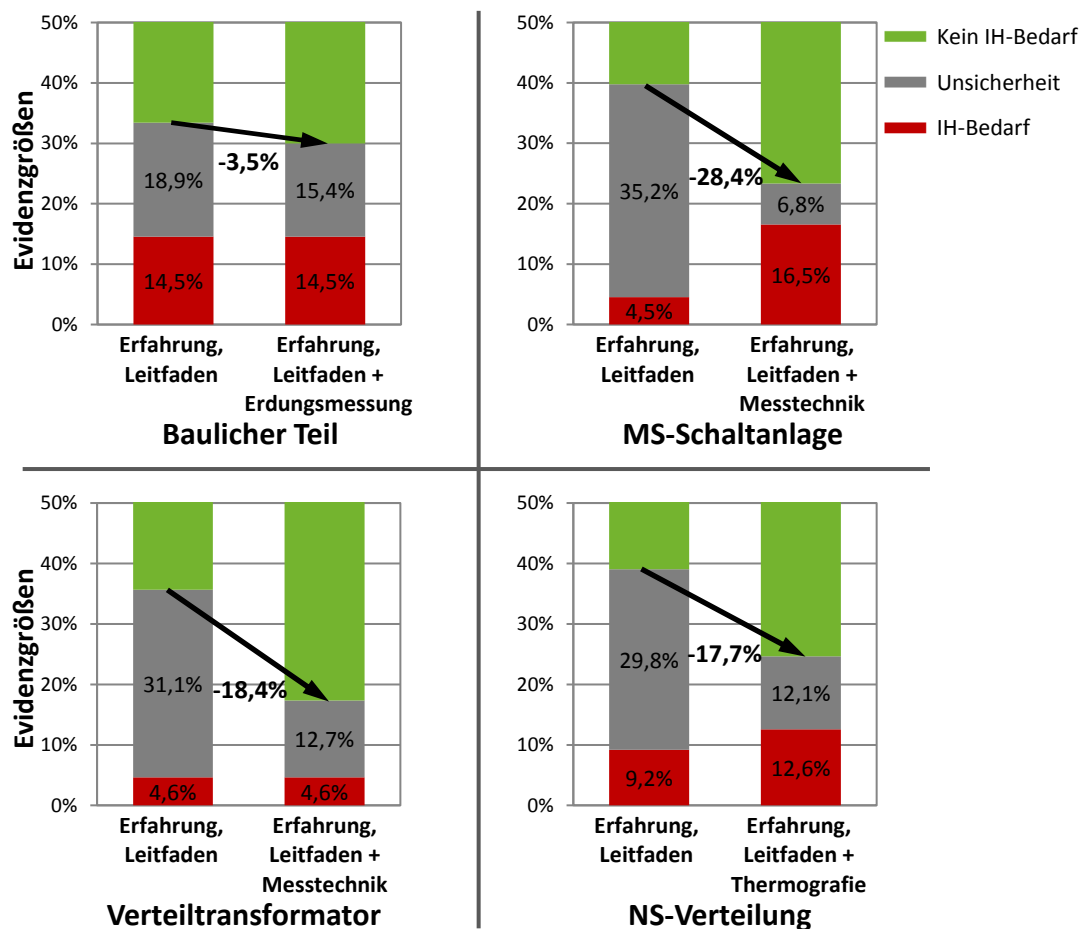


Abbildung 44 – Einfluss der Messverfahren auf die Unsicherheit der Hauptkomponenten

Speziell bei der MS-Schaltanlage liefern die eingesetzten Messverfahren einen großen Beitrag zur Reduzierung der Unsicherheit (minus 28,4 %). Gerade bei den MS-Komponenten ist eine visuelle Inspektion in der Regel nur eingeschränkt aussagekräftig. Hier bieten die Teilentladungsmessung zur Isolationsüberprüfung und die Thermografie zur Überprüfung von Widerstandsüberhöhungen einen großen Mehrwert. Es lässt sich eine wesentlich verlässlichere Aussage über den Zustand treffen. Bei der NS-Verteilung können lediglich Hinweise aus einer neuen Quelle (Thermografie) gewonnen werden, wodurch die Verringerung (minus 17,7 %) nicht ganz so stark ausgeprägt ist. Beim Verteiltransformator können dagegen wieder beide Messverfahren angewendet werden, jedoch können nur wenige Inspektionpunkte der Checkliste auch durch diese analysiert werden. Über das Innere des Verteiltransformators ist im laufenden Betrieb mit diesen Verfahren keine Aussage möglich. Daher verbleibt eine Restunsicherheit beim Verteiltransformator von 12,7 %.

Beim baulichen Teil der Netzstation ist durch die eingesetzten Messverfahren lediglich eine Beurteilung der Erdungsanlage (die dem baulichen Teil zugeordnet ist) über die Erdschleifenmessung möglich. Dieses Verfahren ist jedoch relativ ungenau, durch eine konventionelle Erdungsmessung ist eine gesichertere Aussage möglich. Die anderen Inspektionpunkte des baulichen Teils können dagegen gar nicht mit den eingesetzten Messverfahren analysiert werden. Die Aussagekraft der visuellen Inspektion ist bei den baulichen Inspektionpunkten aber relativ hoch. Durch die Bewertung von Baufachexperten kann die Unsicherheit ggfs. weiter reduziert werden. Aufgrund der Rahmenbedingungen und wirtschaftlichen Restriktionen an die Eingangsparameter bleibt also immer eine gewisse Unsicherheit bei der Zustandsbewertung vorhanden.

#### 6.2.2.2 Evidenzbasierte Ergebnisse eines Anlagenkollektivs

Nachdem die Funktionsweise des Zustandsbewertungsmodells an einer realen Netzstation ausführlich dargestellt worden ist, folgt nun die Auswertung für ein Anlagenkollektiv. Die Zustandsergebnisse basieren auf den Bewertungen des IH-Personals vor Ort, die durch eine visuelle Inspektion (Sichtkontrolle) erhoben und in der Checkliste dokumentiert werden. In Summe liegen so 1565 Checklisten bzw. visuelle Netzstationsbewertungen („Soft-Facts“) vor. 570 dieser Netzstationsbewertungen können zusätzlich durch messtechnische Ergebnisse („Hard-Facts“) unterstützt werden. Die Daten werden dabei im Laufe eines Jahres erhoben, sodass keine zeitliche Bezugnahme erfolgen muss. Der resultierende Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  und die zugehörige Unsicherheit  $Bel_N(U)$  bei einer Netzstation sind in der Abbildung 45 für alle Netzstationen der Felduntersuchung aufgetragen.

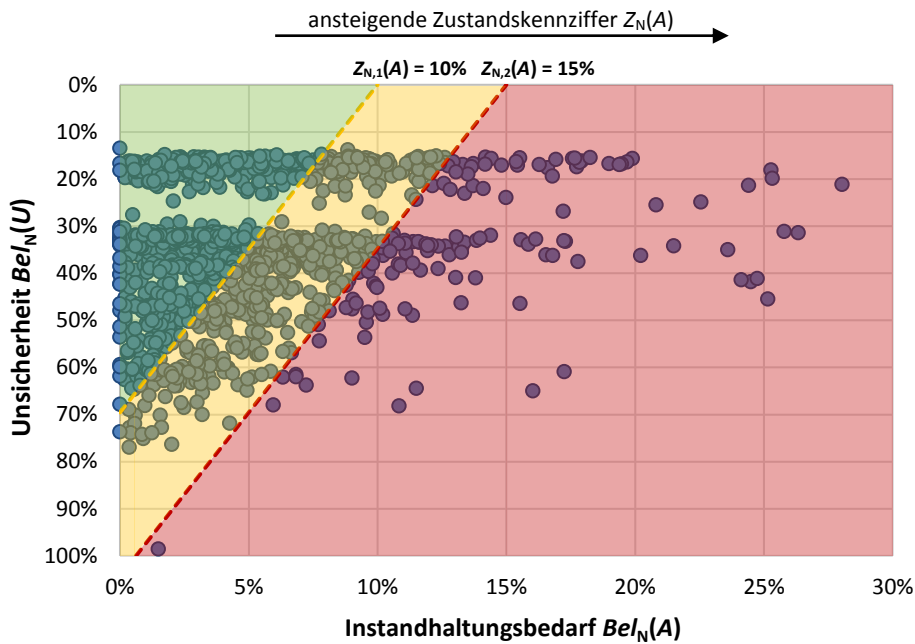


Abbildung 45 – Instandhaltungsbedarf und zugehörige Unsicherheit der inspizierten Netzstationen

Aus der Übersicht lässt sich der Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  an einer Netzstation ablesen und zusätzlich die zugehörige Unsicherheit  $Bel_N(U)$  bei der durchgeführten Netzstationsbewertung erkennen. Je weiter oben sich die Netzstationsbewertung befindet, desto vertrauenswürdiger ist sie (kleinere Unsicherheit). Außerdem ist die Plausibilität für das Vorliegen von weiterem Instandhaltungsbedarf geringer. Je weiter links die Netzstationsbewertung abgetragen ist, desto weniger IH-Bedarf wird an der Netzstation ermittelt, d. h. desto besser ist der Zustand der Netzstation.

Die Instandhaltungsbedarfe  $Bel_N(A)$  der Netzstationen liegen im unteren Prozentbereich. So weist die Punktwolke eine geringe Streuung in diesem Bereich auf. Jedoch ist es vor allem entscheidend, die Netzstationen mit einem hohen Instandhaltungsbedarf („schlechter“ Zustand) zu identifizieren. Der maximale Wert einer Netzstation des Kollektivs bei der Felduntersuchung liegt bei  $Bel_N(A) = 27,61\%$ . Um den ermittelten Instandhaltungsbedarf und die Integration der Unsicherheit bei einer Netzstationsbewertung in der Praxis besser einordnen zu können, werden diese in farbliche Bereiche eingeteilt. Die farblichen Klassen („rot“, „gelb“ und „grün“) haben die gleichen Bedeutungen wie in Abschnitt 3.3, jedoch müssen die Grenzwerte angepasst werden, da es sich um ein neues Modell handelt. Die Grenzwerte - aus denen die farblichen Flächen resultieren - beruhen dabei auf der Zustandskennziffer  $Z_N(A)$ . Da im MS-Verteilungsnetz ein großes Anlagenkollektiv vorliegt, ist die Aggregation zu einer einzigen Größe für eine erste Analyse und Segmentierung zielführend, weshalb die Grenzwerte auf Basis dieser Größe bestimmt werden. So erlaubt die ermittelte Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  dem Netzbetreiber unter Berücksichtigung weiterer Informationen (wie z. B. der Wichtigkeit der Netzstation), unter vergleichender Bewertung der einzelnen, unterschiedlichen Betriebsmittel eine optimale Instandhaltungsstrategie zu erstellen [30].



Die Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  einer Netzstation resultiert nach Gleichung (5.25) aus den beiden aufgeführten Größen Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  und Unsicherheit  $Bel_N(U)$ . Durch die Erfahrungen aus den umfangreichen Felduntersuchungen und Simulationen werden die Grenzwerte ermittelt. Bspw. wenn alle Inspektionpunkte per visueller Inspektion und durch die Messverfahren mit dem Bewertungspunkt  $B_i = 1$  bewertet werden, beträgt der IH-Bedarf entsprechend  $Bel_N(A) = 0 \%$ . Wird nun am MS-Schaltgerät visuell eine gravierende, sofortige Mängelbeseitigung ( $B_{MS\text{-Schaltgeräte}} = 4$ ) festgestellt, kann die Netzstation nicht mehr (gemäß Bedeutung „grün“ in Abschnitt 3.3) im grünen Bereich liegen. Der Instandhaltungsbedarf beträgt in diesem Fall bereits über  $Bel_N(A) \approx 5 \%$ . Ähnlich wird für den roten Bereich verfahren, indem weitere Mängel eingetragen werden. So resultieren aus verschiedenen Szenarien ein Instandhaltungsbedarf von  $Bel_N(A) \approx 10 \%$ , ab dem eine Netzstation im roten Bereich eingeordnet wird. Durch die zusätzliche Integration der Unsicherheit beinhaltet die Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  aber auch noch einen konstanten Anteil der Unsicherheit. Der typische Unsicherheitsbereich in den Felduntersuchungen bei rein visueller Inspektion liegt zwischen 30 und 40 % (im Mittel 35 %) und demnach gehen nach Gleichung (5.25) mit  $\alpha = 14,38 \%$  im Mittel ca. 5 % der Unsicherheit in die Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  mit ein. Bei 0 % Unsicherheit gilt:  $Z_N(A) = Bel_N(A) = P_N(A)$ . Für nicht inspizierte Netzstationen ( $Bel_N(U) = 100 \%$ ) liegen keine Informationen für eine Zustandsbewertung vor und der Zustand ist entsprechend ungewiss. Eine Zustandsbewertung muss daher durchgeführt werden.

In Abbildung 45 sind die so definierten Grenzwerte der Zustandskennziffern von  $Z_{N,1}(A) = 10 \%$  (Übergang vom „grünen“ in den „gelben“ Bereich) und  $Z_{N,2}(A) = 15 \%$  (Übergang vom „gelben“ in den „roten“ Bereich) aufgetragen, um die Netzstationen zu clustern. Bei Anwendung dieser Grenzwerte auf die Felduntersuchungsergebnissen liegen ungefähr 10 % der Netzstationsbewertungen im „roten“ Bereich und 30 % der Netzstationsbewertungen im „gelben“ Bereich. Zu dieser Einteilung führen auch die Grenzwerte des konventionellen Modells (Abschnitt 3.3) bei Anwendung dieses Modells auf die Felduntersuchungsergebnisse und decken sich, wenn bei beiden Modellen Quantile (rot = 10 %, gelb = 30 %) zur Bestimmung der Grenzwerte zum Einsatz kommen würden.

Die weit überwiegende Zahl der inspizierten Netzstationen befindet sich im „grünen“ Bereich und weist nur einen geringen Instandhaltungsbedarf auf. Entscheidend ist es aber, die Netzstationen mit einer erhöhten Zustandskennziffer zu identifizieren, um zielgerichtet IH-Maßnahmen zu veranlassen. Im „roten“ Bereich liegen lediglich 134 der 1565 Zustandsbewertungen von Netzstationen, d. h. ca. 8,6 % aller durchgeführten Stationsbewertungen. Aufgrund der Zustandsbewertung ist an diesen Netzstationen zeitnah eine Wartung bzw. Instandsetzung zu empfehlen. Bei den Netzstationen im grünen Bereich, welche sich gemäß Definition in einem guten Zustand befinden, könnten dagegen die Wartungsintervalle gestreckt werden. Im gelben Bereich sollte der Wartungszyklus beibehalten werden. Auf Basis dieser Klassifizierung können die Wartungs-

intervalle optimiert werden. Neben der Zustandskennziffer kann auch noch die Unsicherheit als weitere Größe einen Einfluss auf die Entscheidungen haben.

Daher werden nun die Unsicherheitswerte  $Bel_N(U)$  der Zustandsbewertung noch näher betrachtet, um diese Kenngröße interpretieren zu können. Wie bereits erwähnt, ist die Netzstationsbewertung verlässlicher, je weiter oben sie im Diagramm abgebildet wird. Die Unsicherheitswerte werden dabei durch die Eingangsparameter bestimmt. Die Einflüsse dieser Parameter auf die Unsicherheit sind am Beispiel einer Netzstation bereits dargelegt (Abschnitt 6.2.2.1). Einen weiteren Einfluss auf die Unsicherheit haben zudem fehlende Eingangsgrößen, d. h. wenn Inspektionpunkte vor Ort nicht inspiziert werden können ( $B_i = 0$ ). Dieser Bewertungspunkt tritt unterschiedlich häufig bei den einzelnen Zustandsbewertungen auf, wodurch eine eindeutige Interpretation der Unsicherheitswerte erschwert ist. Die in Abbildung 46 eingefügten Unsicherheitsbereiche stellen somit keine klare Abgrenzung dar, sondern dienen lediglich als Orientierungsgrößen.

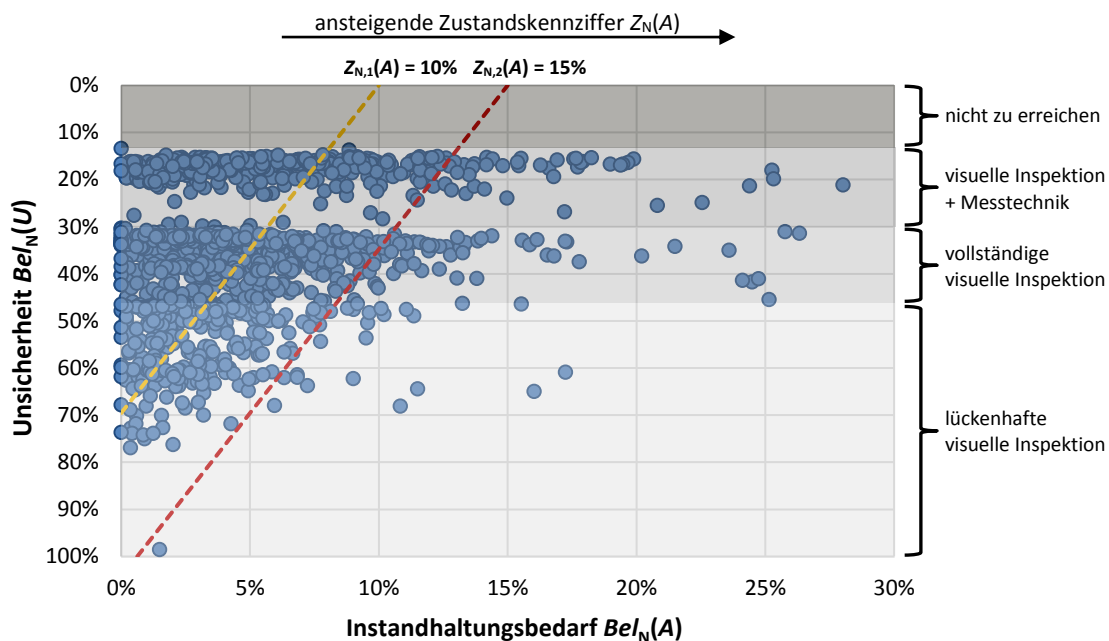


Abbildung 46 – Unsicherheitsbereiche und Zustandskennziffer der inspizierten Netzstationen

Im unteren Unsicherheitsbereich kann keine vollständige visuelle Inspektion durchgeführt werden. Je weiter unten die Werte liegen, desto mehr Inspektionpunkte können vor Ort nicht inspiziert werden. Bei Netzstationsbewertungen mit einer Unsicherheit von über 46 % ist in der Regel mindestens ein Hauptinspektionsteil (häufig der Verteiltransformator) nicht einsehbar und damit bewertet. Eine visuell vollständig bewertete Netzstation hat typischerweise Unsicherheitswerte  $Bel_N(U)$  im Bereich von 30-40 %. Wird die visuelle Inspektion durch den Bewertungsleitfaden und die organisatorischen Maßnahmen objektiviert, so lassen sich die Grenzen der Graubereiche in Abbildung 46 durchschnittlich um 5 % reduzieren. Nur durch den Einsatz von den vorgestellten Messverfahren kann die Unsicherheit bis auf ca. 13 % reduziert werden. Es bleibt aufgrund der Anforderungen an die Eingangsgrößen und dem zu rechtfertigenden Aufwand

für eine Zustandsbewertung im MS-Bereich eine gewisse Unsicherheit. Für eine darüber hinausgehende Unsicherheitsverringering müssen zusätzliche Informationen (invasive Messverfahren, bauliche Prüfungen etc.) eingeholt werden.

Wie erwähnt, liegen auf Basis der Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  von den 1565 Zustandsbewertungen lediglich 134 Zustandsbewertungen von Netzstationen (8,6 %) im „roten“ Bereich, d. h. rechts von der roten Linie  $Z_{N,2}(A)$  in Abbildung 46. Um bei diesen Netzstationen die durchzuführenden IH-Maßnahmen zu planen, bietet sich die Darstellung als „Priorisierte Liste“ an. Die 20 Netzstationen mit der größten Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  sind in absteigender Reihenfolge in Tabelle 8 aufgelistet. Die Unsicherheit drückt dabei die Qualität der Zustandskennziffer aus.

**Tabelle 8 – Priorisierte Liste der 20 schlechtesten Zustandsbewertungen der Netzstationen**

20 Netzstationen mit den größten Zustandskennziffern $Z_N(A)$			
Netzstation	$Z_N(A)$	$Bel_N(A)$	$Bel_N(U)$
Netzstation 97	🔴 31,68%	25,15%	45,42%
Netzstation 304	🔴 31,06%	28,03%	21,11%
Netzstation 39	🔴 30,84%	26,33%	31,39%
Netzstation 93	🔴 30,49%	24,49%	41,75%
Netzstation 87	🔴 30,24%	25,78%	31,07%
Netzstation 123	🔴 30,07%	24,12%	41,39%
Netzstation 160	🔴 27,46%	24,40%	21,32%
Netzstation 105	🔴 26,41%	21,49%	34,18%
Netzstation 292	🔴 26,13%	22,55%	24,87%
Netzstation 1029	🔴 26,00%	17,25%	60,86%
Netzstation 1392	🔴 25,41%	20,21%	36,20%
Netzstation 1036	🔴 25,37%	16,03%	64,96%
Netzstation 592	🔴 22,21%	15,53%	46,40%
Netzstation 328	🔴 22,14%	19,90%	15,63%
Netzstation 46	🔴 22,07%	17,29%	33,21%
Netzstation 349	🔴 22,03%	19,67%	16,36%
Netzstation 81	🔴 22,01%	16,80%	36,20%
Netzstation 1292	🔴 21,99%	17,24%	33,09%
Netzstation 352	🔴 21,88%	19,47%	16,73%
Netzstation 3	🔴 21,72%	16,54%	36,04%

rel. lückenhafte  
Inspektion

rein visuelle  
Inspektion

vis. Inspektion  
+ Messtechnik

Die 20 am schlechtesten bewerteten Netzstationen weisen Zustandskennziffern mit sehr großen Werten auf, zum Teil sind sie doppelt so groß wie der definierte Grenzwert zum „roten“ Bereich. Diese Netzstationen sollten also sehr zeitnah gewartet bzw. instandgesetzt werden. Durch die Aufschlüsselung in Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  und Unsicherheit  $Bel_N(U)$  wird die Zusammensetzung der Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  deutlich. Bereits der Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  dieser Netzstationen befinden sich über 15 % und selbst bei risikofreudiger Einstellung sollten in jedem Fall Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen werden. Die Unsicherheit  $Bel_N(U)$  dagegen liegt in unterschiedlichen Größenordnungen vor, da die Informationsgrundlage differiert. Eine große Unsicherheit bedeutet, dass die Plausibilität für weiteren IH-Bedarf recht hoch ist und somit ein noch größerer IH-Bedarf vorliegen könnte. Die erhöhte Unsicherheit bei den Netzstationen 97, 93 und 123 ist darauf zurückzuführen, dass es sich in diesem Fall um Maststationen handelt und

daher einige Inspektionpunkte aufgrund der großen Entfernung nicht inspiziert werden können. Bei den beiden Netzstationen 1029 und 1036 konnten die Verteiltransformatoren und die NS-Verteilung nicht inspiziert werden. Am baulichen Teil und an der MS-Schaltanlage werden aber bereits dringliche Mängel ermittelt. Bei den Netzstationen mit einer Unsicherheit kleiner 30 % wird durch den Einsatz von Messtechnik eine sehr verlässliche Zustandskennziffer ermittelt. Außerdem werden durch die Messtechnik Auffälligkeiten detektiert, die bei der visuellen Inspektion nicht aufgedeckt werden können. Somit hat der Einsatz von Messtechnik auch einen erheblichen Einfluss auf die Priorisierung der Instandhaltungsmaßnahmen.

### 6.2.3 Mehrwert des evidenzbasierten Bewertungsmodells

Der Mehrwert und die Ergebnisse des evidenzbasierten Bewertungsmodells sind bereits ausführlich dargestellt worden. Die Berücksichtigung und Quantifizierung der Unsicherheit bei der Zustandsbewertung drückt die Qualität der Bewertung aus. Anhand des Vergleichs mit dem konventionellen Zustandsindex aus Kapitel 3.2, der rein auf den Bewertungspunkten  $B_i$  basiert und keine Unsicherheiten berücksichtigt, soll der Unterschied noch einmal deutlich gemacht werden.

Der Zustandsindex (konventionelles Modell) und die Zustandskennziffer (evidenzbasiertes Modell) können jedoch nicht direkt zahlenmäßig miteinander verglichen werden, da sie modellbedingt unterschiedlich sind. Über beide Größen kann aber eine „Priorisierte Liste“ von instandhaltungsbedürftigen Netzstationen erstellt werden. Die beiden so entstehenden Listen werden nun miteinander verglichen und die Ränge analysiert. An den am schlechtesten bewerteten Netzstationen werden zuerst IH-Maßnahmen vorgesehen (höchste IH-Priorität) und folglich in absteigender Reihenfolge weiter verfahren, bis das angenommene begrenzte IH-Budget aufgebraucht ist [32].

Von den 1565 vorliegenden Zustandsbewertungen von Netzstationen entfallen 1209 auf luftisolierte und 356 auf gasisolierte MS-Schaltanlagen. Es wird nun angenommen, dass eine zyklische Wartung an den Netzstationen durchgeführt wird und dieser Wartungszyklus abhängig vom Schaltanlagentyp ist, d. h. Netzstationen mit einer luftisolierten Schaltanlage werden alle 8 Jahre und Netzstationen mit einer gasisolierten Schaltanlage alle 10 Jahre einer Wartung unterzogen. Daraus folgt, dass jährlich 187 Netzstationen gewartet werden müssten. Diese jährliche Anzahl wird im Folgenden als begrenztes „IH-Budget“ angesehen.

Die Zustandsbewertungsergebnisse (rein visuelle Inspektion) für die 20 am schlechtesten eingestuften Netzstationen sind in absteigender Reihenfolge des konventionellen Zustandsindex in Tabelle 9 aufgelistet. Zudem ist der Rang dargestellt, den die Netzstation innerhalb des jeweiligen Zustandsmodells bei 1565 Zustandsbewertungen von Netzstationen einnimmt.

Tabelle 9 – Vergleich der priorisierten Listen der Zustandsgrößen der Modelle

Netzstation (reine Sichtkontrolle)	Konventioneller Zustandsindex		Evidenzbasierte Zustandskennziffer	
	$Z_{norm}$	Priorität	$Z_{N(A)}$	Priorität
Netzstation 1236	100,0%	1	15,7%	105
Netzstation 1036	43,6%	2	25,4%	12
Netzstation 304	41,6%	3	31,1%	1
Netzstation 97	40,7%	4	31,7%	2
Netzstation 1029	39,9%	5	26,0%	10
Netzstation 93	39,7%	6	30,5%	4
Netzstation 592	39,4%	7	22,2%	17
Netzstation 123	38,1%	8	30,1%	6
Netzstation 39	35,4%	9	30,8%	3
Netzstation 296	35,1%	10	21,1%	13
Netzstation 87	34,4%	11	30,2%	5
Netzstation 292	33,6%	12	26,1%	7
Netzstation 160	32,2%	13	27,5%	8
Netzstation 1103	30,6%	14	20,8%	24
Netzstation 105	30,1%	15	26,4%	9
Netzstation 1210	29,3%	16	14,7%	146
Netzstation 1392	28,8%	17	25,4%	11
Netzstation 81	25,8%	18	22,0%	20
Netzstation 352	25,6%	19	21,9%	14
Netzstation 328	25,0%	20	22,1%	15

Es lässt sich erkennen, dass (bezogen auf die 1565 Bewertungen) auf ähnliche IH-Prioritäten geschlossen werden kann und an allen aufgeführten 20 Netzstationen IH-Maßnahmen durchgeführt werden sollten. Beide Modelle sortieren nämlich die ersten 20 Netzstationen in die gleiche Klasse („rot“) ein und diese befinden sich zudem auch unter den 187 jährlich zu wartenden Netzstationen. Somit decken sich die Ergebnisse der beiden Modelle.

Durch die Verwendung des evidenzbasierte Bewertungsmodell ergibt sich aber eine signifikant veränderte und realitätsgerechtere Reihenfolge der „Priorisierten Liste“ und damit wird eine optimierte IH-Strategie erzielt. Dieses wird besonders an den Netzstationen 1236 und 1210 (schwarze Kreise in Tabelle 9) deutlich, bei denen das konventionelle und das evidenzbasierte Bewertungsmodell stark voneinander abweichen. Die Ursache liegt darin, dass das konventionelle Modell nicht zwischen Unsicherheit und Zustand differenzieren kann. In den genannten Netzstationen wird eine Vielzahl an Inspektionen nicht inspiziert, bei Netzstation 1236 z. B. war die Zugänglichkeit nicht gegeben. Die mit  $B_i = 0$  bewerteten Inspektionen fließen nach Gleichung (3.2) beim konventionellen Modell nicht mit ein, wodurch einzelne, inspizierte Mängel einen sehr starken Einfluss haben. Hauptgrund ist hier jedoch die fehlende Inspektion der übrigen Komponenten. Es wird nicht zwischen den Bewertungen  $B_i = \emptyset$  (nicht vorhanden) und einer nicht-durchführbaren Inspektion ( $B_i = 0$  bedeutet 100 % Unsicherheit) im Modell unterschieden. Dieses wird durch das evidenzbasierte Modell aber direkt ersichtlich, da IH-Bedarf und Unsicherheit separat ausgegeben werden. Bei Netzstation 1210 beträgt  $Bel_N(A) = 7,7 \%$  und die Unsicherheit  $Bel_N(U) = 48,2 \%$ , bei Netzstation 1236  $Bel_N(A) = 1,5 \%$  und  $Bel_N(U) = 98,5 \%$ .

Auch der Einsatz von Messtechnik kann einen erheblichen Einfluss auf die Priorität ausüben und dadurch die IH-Maßnahmenplanung maßgeblich beeinflussen. Durch messtechnisch detektierte Auffälligkeiten steigt der Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  und Netzstationen rücken in der IH-Priorität deutlich nach oben. Gleichzeitig reduziert der Einsatz von Messtechnik auch maßgeblich die Unsicherheit der Zustandsbewertung (wie z. B. Abbildung 43 ersichtlich), wodurch der „wahre“ Wert des IH-Bedarfs weiter angenähert wird und die Zustandskennziffer verlässlicher wird. Diese Qualität der zugrundeliegenden Informationen wird durch das evidenzbasierte Bewertungsmodell direkt ersichtlich und für den Auswertenden ausgegeben. Beim konventionellen Modell ist diese Ausgabe für den Auswertenden nicht möglich.

### 6.3 Unsicherheit als zusätzliches Steuerungsinstrument

Das evidenzbasierte Zustandsbewertungsmodell gibt als Ergebnis nicht nur den Instandhaltungsbedarf an einem Betriebsmittel aus, sondern die Unsicherheit dieses Ergebnisses wird ebenfalls mit quantifiziert. Die Unsicherheit kann als zusätzliches Steuerungsinstrument genutzt werden, um als Auslöser für eine neue Zustandsbewertung zu dienen. Denn neben der optimalen Festlegung der Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen, um den identifizierten IH-Bedarf zu beheben bzw. vorzubeugen, können auch die Inspektionszyklen optimal abgestimmt werden [30]. Im Rahmen der gesetzlichen Rahmenbedingungen liegt die Festlegung der Zyklen in Eigenverantwortung eines Netzbetreibers [46]. Bei der Inspektion werden die Informationen für die Zustandsbewertung erhoben; dabei sind aktuelle Informationen als verlässlicher anzusehen als veraltete. Den Resultaten einer Inspektion vor vier Jahren kann weniger Glauben geschenkt werden als einer aktuellen Inspektion, da im Laufe der Zeit verschiedene Einflüsse auf die Betriebsmittel gewirkt haben können. Die Aussage darüber, ob immer noch kein IH-Bedarf an den Komponenten besteht, kann somit nach vier Jahren weniger verlässlich abgegeben werden. Aus diesem Grund fließt das Informationsalter bei den Massezahlen der Eingangsdaten (siehe Abschnitt 5.3.3) ein, indem die Aussagekraft für „kein IH-Bedarf“ im Zeitverlauf abgeschwächt wird. Das führt natürlich auch im Gesamtergebnis dazu, dass der Glaubensgrad  $Bel_N(\bar{A})$ , dass kein IH-Bedarf vorliegt, im Zeitverlauf absinkt. Demgegenüber erhöht sich entsprechend die Unsicherheit des Bewertungsergebnisses  $Bel_N(U)$  mit größer werdender, zeitlicher Entfernung vom Zustandsbewertungszeitpunkt. Der identifizierte Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  wird dagegen nicht beeinflusst. Die Zustandskennziffer nimmt gemäß ihres Anteils aufgrund der ansteigenden Unsicherheit leicht zu. Abbildung 47 zeigt den Effekt der „Alterung“ von Zustandsbewertungsergebnissen (Bewertung zum Zeitpunkt  $t_0$  entspricht Bewertung in Abbildung 41) grafisch auf, in dem der Zustandsbewertungszeitpunkt immer weiter in die Vergangenheit verlegt wird [19, 30, 120].

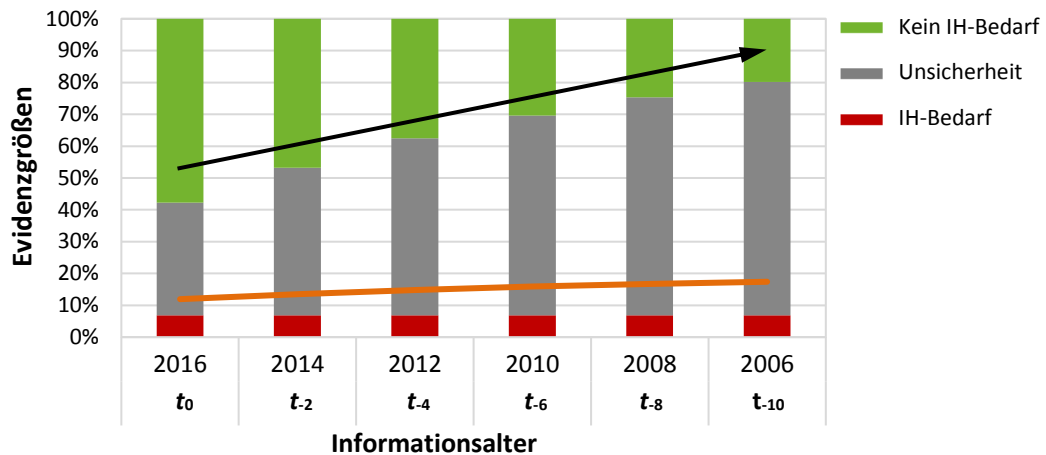


Abbildung 47 – Einfluss des Alters einer Zustandsbewertung auf Ergebnisse

Die Unsicherheit wächst also an, je weiter die Zustandsbewertung in der Vergangenheit (bezogen auf den Auswertzeitpunkt) liegt und ab einem gewissen Zeitpunkt dominiert die Unsicherheit die Zustandsbewertungsergebnisse. Es können auf der Basis dann keine verlässliche Entscheidungen mehr getroffen werden. Diese zeitliche Entwicklung der Zustandsbewertungsergebnisse kann als Auslöser einer neuen Zustandsbewertung bzw. Inspektion genutzt werden, um aktuelle Informationen über ein Betriebsmittel zu erhalten. Hierzu können Grenzwerte definiert werden, ab deren Überschreiten ein Triggersignal für eine neue Zustandsbewertung ausgelöst wird. Diese Grenzwerte können auf Basis der Unsicherheit oder des Glaubensgrads für kein IH-Bedarf  $Bel_N(\bar{A})$  (Mindestmaß) erfolgen, da diese sich mit dem Informationsalter ändern (siehe Abschnitt 5.3.3). Beispielweise kann eine erneute Zustandsbewertung auf Basis der Unsicherheit erfolgen, wenn diese einen maximal tolerierten Grenzwert (z. B.  $Bel_N(U) = 50\%$ ) überschreitet [19]. Dieses ist in Abbildung 48 dargestellt.

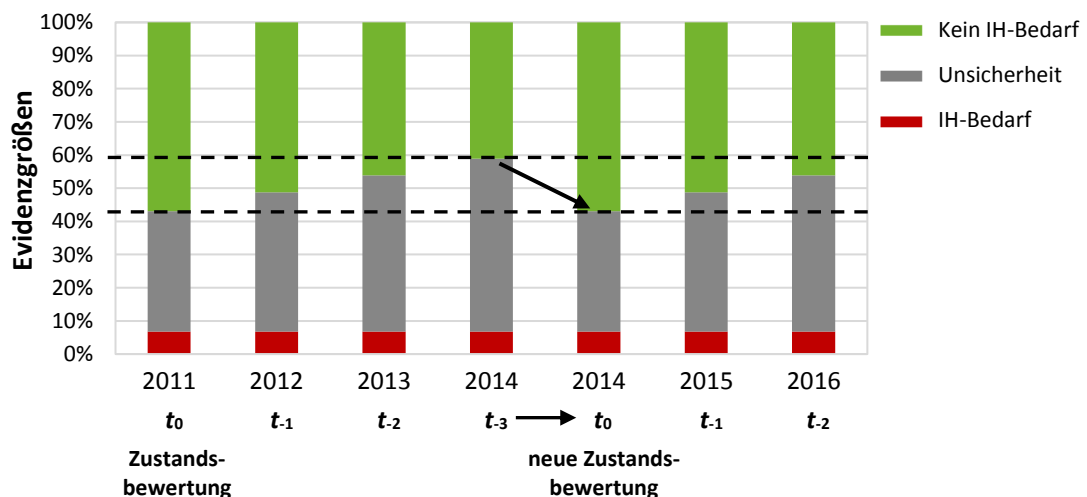


Abbildung 48 – Ableitung einer neuen Zustandsbewertung durch die zeitliche Entwicklung der Unsicherheit

Im Jahr 2011 ist eine visuelle Zustandsbewertung durchgeführt worden. Mit der Zeit wird die Aussagekraft dieser Zustandsbewertung immer geringer und die Unsicherheit steigt an. Im Jahr 2014 übersteigt die Unsicherheit dieser Zustandsbewertung den tolerierten Grenzwert von 50 %.

Aus diesem Grund wird eine neue Zustandsbewertung im Jahr 2014 initiiert. Wird die Zustandsbewertung nun erneut durchgeführt (gleiche Bewertung wie zuvor angenommen), reduziert sich die Unsicherheit wieder auf den Anfangswert. Bei dieser Netzstation erfolgt also alle 3 Jahre eine Inspektion.

Durch den Einsatz der Messtechnik wird die Unsicherheit wesentlich reduziert. Das hat entsprechend zur Folge, dass der maximal tolerierte Grenzwert  $Bel_N(U)$  deutlich später überschritten wird und damit eine erneute Inspektion später erfolgen kann. Auf dieser Basis besteht durch eine gesichertere Zustandsbewertung also die Möglichkeit, die Inspektionszyklen zielgerichtet anzupassen und eventuell zu strecken. Durch die Einsparung von Inspektionen können Kosten eingespart werden. Um dabei aber einen festgelegten maximalen Turnus nicht zu überschreiten, kann bei Einsatz von Messtechnik zusätzlich definiert werden, dass bei Verdopplung der Unsicherheitskenngröße ebenfalls eine erneute Zustandsbewertung ausgelöst wird, obwohl die maximale Unsicherheit noch nicht überschritten wird. Dieses wäre bei der zugrunde gelegten Annahme der Alterung von Informationen nach ca. 4 Jahren der Fall.

#### **6.4 Zustandskennziffer für Erneuerungsentscheidungen**

Bisher ist die Zustandsbewertung vordringlich für die Entscheidungsunterstützung im Rahmen von optimalen Instandhaltungsstrategien entwickelt und dargestellt worden. Viele betriebsrelevante und verkehrssicherungspflichtige Parameter sind in die Checklisten und die Ermittlung der Zustandsgrößen eingeflossen. Eine weitere Strategie betrifft aber auch die Erneuerung. In der Regel gibt es dabei historisch festgelegte Investitionszyklen, um den Asset-Bestand kontinuierlich zu erneuern, um nicht „von der Substanz zu leben“. Hier stehen verschiedene Werkzeuge (Asset-Simulationen etc.) zur Verfügung, um das jährliche Mengengerüst zu bestimmen, welches in den einzelnen Anlagenklassen und bei Betriebsmitteln zur Erneuerung ansteht. Auf Basis des ermittelten Mengengerüsts wird dann das Erneuerungsbudget festgelegt [1]. Die Erneuerungsentscheidung und die Festlegung des Mengengerüsts sind dabei von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren (Wirtschaftlichkeit, Anreizregulierung, Zielnetzplanung, gesetzliche Vorgaben usw.) abhängig, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind. Jedoch kann die Zustandsbewertung einen wertvollen Beitrag bei der Bestimmung des Mengengerüsts leisten.

Die Zustandsbewertungsergebnisse können auch für eine Erneuerungsentscheidung genutzt werden. Allerdings sind für diese viele Inspektionspunkte, die in der Checkliste aufgeführt sind, von geringer Relevanz, da ein Mangel an diesen Inspektionspunkten nicht zu einer Erneuerung führt. Beispielsweise gehören hierzu die Inspektionspunkte „Sauberkeit“, jegliche Warnschilder/Beschriftungen oder Zubehörteile, die durch eine Reinigungsmaßnahme behoben bzw. einfach und ohne großen Kostenaufwand nachgerüstet werden können. Mängel an diesen werden im Rahmen einer IH-Maßnahme behoben, führen aber nicht zu einer (Teil-)Erneuerung der gesamten Netzstation. Aus diesem Grund wird eine neue Zustandskennziffer - die Erneuerungszustands-



kennziffer  $Z_{N,E}(A)$  - eingeführt, bei der nur die erneuerungswirksamen Inspektionpunkte in die Bildung der Zustandskennziffer einfließen. Folgende Inspektionpunkte aus der Checkliste werden dabei für eine Netzstation noch betrachtet (Tabelle 10).

**Tabelle 10 – Erneuerungswirksame Inspektionpunkte für eine Erneuerungsentscheidung**

Inspektionpunkte (Baulicher Teil)	Inspektionpunkte (MS-Schaltanlage)
Anstrich, Putz, Fassade, Gehäuse (außen)	Sammelschiene, Isolatoren, Stützer
Fundament der Station	Durchführungen
Dach, Dachentwässerung	MS-Schaltgeräte
Türen, Türfeststeller, Revisionsöffnung	Kugelbolzen/Erdungsschalter
Mast (Zustand, Standsicherheit)	SF <sub>6</sub> -Gasdruck (Manometer)
Putz, Anstrich, Wände, Decke (innen)	Gehäuse, Kapselung (Schaltanlage)
Fußböden (Innenraum)	MS-Kabelendverschlüsse
Flucht-/Rettungsweg	kap. Spannungsprüfer
Kabelabdeckung/-schacht	
Erdungsanlage	
Inspektionpunkte (NS-Verteilung)	Inspektionpunkte (Transformator)
Zuleitungsabsicherung (NS-Verteilung)	Trafo-Gehäuse (Anstrich, Dichtigkeit)
Berührungsschutz, Abdeckung	Endverschlüsse, Verbindungen
NS-Kabelanschlüsse/-endverschlüsse	Öldichtigkeit (Trafo)
Beschädigung / Sonstiges (NS-Verteilung)	Ölauffangwanne, Gewässerschutzbox
	Temperatur (Trafo)

Lediglich diese Inspektionpunkte liefern Hinweise für einen Erneuerungsbedarf an der Netzstation; vornehmlich elektrische Komponenten sind hier von Interesse. Die auf dieser Grundlage aggregierte, evidenzbasierte Erneuerungszustandskennziffer  $Z_{N,E}(A)$  zielt explizit auf die Erneuerung ab. Sie liefert in Kombination mit dem Bemerkungsfeld (konkrete Erneuerungsmaßnahme) eine zugeschnittene Kenngröße. Speziell die objektiven Messwerte durch den Einsatz von Messtechnik sind für eine Erneuerung von großem Nutzen und bieten hier einen noch größeren Mehrwert. Denn vor allem die erneuerungswirksamen Inspektionpunkte werden durch die messtechnische Analyse fundiert analysiert und entsprechende Auffälligkeiten detektiert. Die Inspektionpunkte, die vor allem die Verkehrssicherungspflicht und die Unfallverhütung betreffen, sowie die baulichen Inspektionpunkte werden dagegen vermehrt rein visuell bewertet. Diese Anpassung der Eingangsparameter (Inspektionpunkte, Gewichtungen) hat somit den Vorteil, dass die speziellen Erneuerungsanforderungen eine stärkere Berücksichtigung finden, aber auf die bestehenden Eingangsdaten zurückgegriffen werden kann. Eine zusätzliche Erhebung muss nicht erfolgen.

In Abbildung 49 ist der Unterschied zwischen der bisherigen Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  (Fokus Instandhaltung) und der Erneuerungszustandskennziffer  $Z_{N,E}(A)$  (Fokus Erneuerung) vergleichend für eine Netzstation aufgeführt, die auf den gleichen Eingangsdaten basieren.

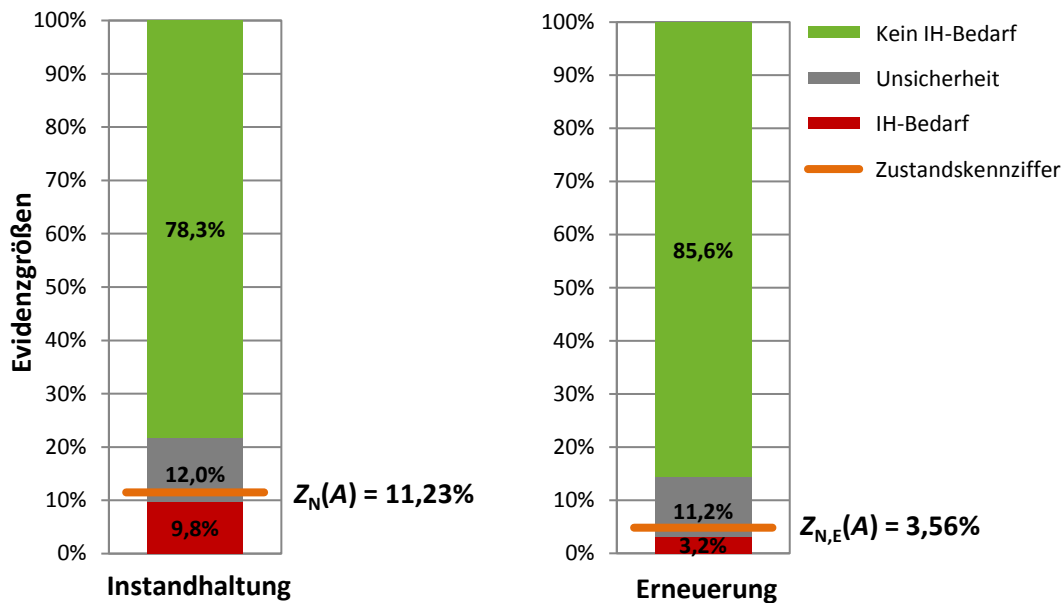


Abbildung 49 – Vergleich der Zustandskennziffern für Instandhaltungs- oder Erneuerungsentscheidung

Bei dieser dargestellten Netzstation sind einige kleinere Mängel am baulichen Teil vorhanden. An der MS-Schaltanlage, dem Verteiltransformator sowie der NS-Verteilung werden dagegen visuell und messtechnisch keine Mängel bzw. Auffälligkeiten festgestellt. Jedoch werden diese drei Hauptinspektionsteile als stark reinigungsbedürftig ( $B_i = 3$ ) eingestuft und eine Erdung des Transformatorgehäuses und der NS-Verteilung fehlt. Es liegen also vor allem Mängel an Inspektionpunkten vor, die z. T. sehr zeitnah eine IH-Maßnahme erfordern und daher befindet sich diese Netzstation gemäß Cluster in einem mittleren (gelben) Zustand nach der Zustandskennziffer  $Z_N(A)$ . Jedoch führen diese genannten Mängel nicht zu einer Erneuerung, denn sie sind zwar für die (kurzfristige) Instandhaltungsplanung relevant, für eine (langfristige) Erneuerungsentscheidung dagegen sind vielmehr die Inspektionpunkte wie z. B. Dach und Fassade der Station, die Lasttrennschalter der MS-Schaltanlage oder der Verteiltransformator von Bedeutung. Diese erneuerungswirksamen Inspektionpunkte befinden sich bei dieser Netzstation visuell und messtechnisch in einen unauffälligen Zustand, weshalb die Erneuerungszustandskennziffer auch lediglich  $Z_{N,E}(A) = 3,56\%$  beträgt. Die unterschiedlichen Anforderungen (Instandhaltung oder Erneuerung) an eine aggregierte Zustandskennziffer werden so im Modell berücksichtigt.

Die Zustandsbewertungsergebnisse  $Bel_{N,E}(A)$  und  $Bel_{N,E}(U)$  sowie die Erneuerungszustandskennziffer  $Z_{N,E}(A)$  der Netzstationen aus den Felduntersuchungen sind zusammenfassend in Abbildung 50 dargestellt.

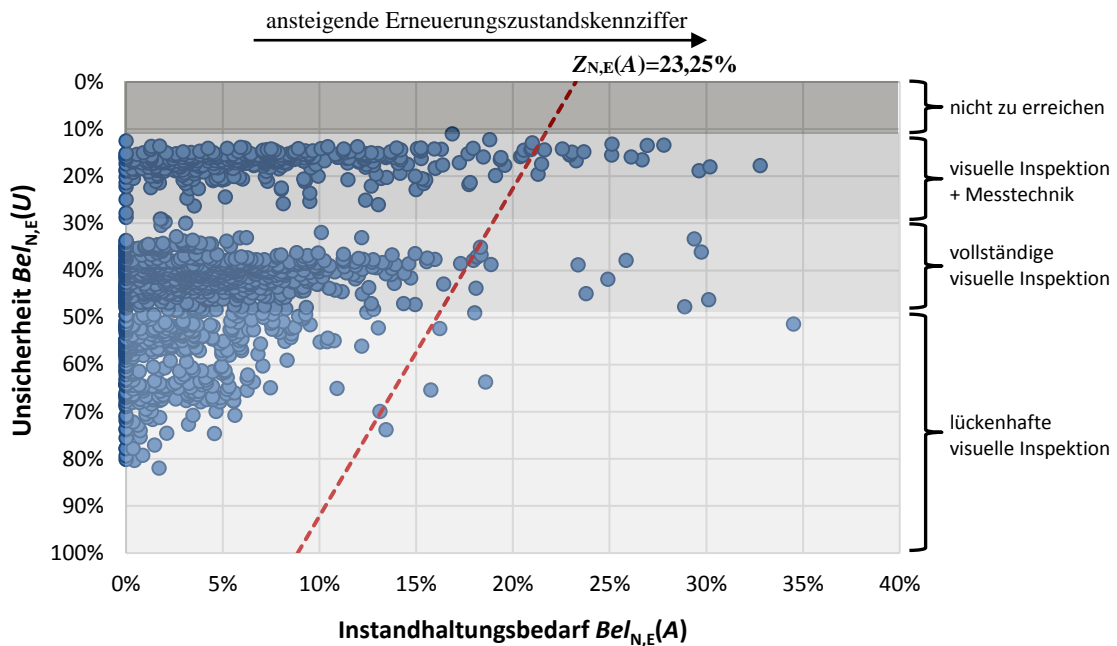


Abbildung 50 – Erneuerungsbedarf und zugehörige Unsicherheit der inspizierten Netzstationen

Zur Bestimmung des Grenzwertes  $Z_{N,E}(A)$  wird eine jährliche, kontinuierliche Erneuerungsrate von 2,5 % der Netzstationen zugrunde gelegt, was einer angenommen, durchschnittlichen Nutzungsdauer von 40 Jahren entspricht [3]. Daraus folgt, dass jährlich mindestens 40 Netzstationen ausgetauscht werden müssen. Bei einem Grenzwert  $Z_{N,E}(A) = 23,25\%$  befinden sich von den 1565 Zustandsbewertungen aus den Felduntersuchungen 40 Netzstationen über dem Grenzwert von  $Z_{N,E}(A)$  (rechts von der Linie in Abbildung 50). Dieses Mengengerüst wird folglich für eine Erneuerung auf Basis der Zustandsbewertungsergebnisse vorgesehen. Der Grenzwert für den roten Bereich (schlechter Zustand ab  $Z_{N,E}(A) = 23,25\%$ ) erhöht sich durch die Anpassung der Eingangsparameter und Gewichtungen etwas und ist nicht direkt vergleichbar. Um nun die konkrete Erneuerungsentscheidung treffen zu können, müssen aber noch weitere Kriterien (Zielnetzplanung, Anreizregulierung etc.) berücksichtigt werden. Eine weitere wichtige Größe für eine Erneuerungsentscheidung stellen auch die anfallenden Instandhaltungskosten dar, die ab einem Grenzwert eine Erneuerung oder Teilerneuerung auslösen können. Diese werden nun im folgenden Abschnitt abgeleitet.

## 6.5 Ableitung eines Instandhaltungs- und Erneuerungsaufwands

Neben der objektiven Zustandsbewertung der MS-Betriebsmittel ist für eine Ableitung und Planung von Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen ebenfalls der Kostenaufwand für die anstehenden Instandhaltungsmaßnahmen von großer Bedeutung. Die Zustandsbewertung erlaubt eine zeitliche Ableitung des IH-Bedarfs einer Netzstation, da die Bewertungspunkte eine zeitliche Prägung (Bewertung nach Fristigkeit der IH-Tätigkeit) aufweisen. Welche Maßnahmenkosten der detektierte IH-Bedarf erfordert (kleine Reparatur vs. Erneuerung), kann daraus nicht quantifiziert werden [9]. Aus diesem Grund wird das Bemerkungsfeld herangezogen, in dem die

anfallenden IH-Maßnahmenkosten auf Grundlage der vordefinierten Maßnahmenkataloge und Auswahllisten abgeschätzt werden.

Für jeden Inspektionspunkt wird eine Auswahl an typischen Gegenmaßnahmen definiert. Anschließend werden jedem dieser Einzelmaßnahmen durchschnittliche Kosten für die Instandhaltung zugeordnet. Diese Kosten beinhalten dabei die ungefähren Material- und Mitarbeiterereinsatzkosten (Anzahl Mitarbeiter und Einsatzdauer vor Ort), die die Instandhaltungstätigkeit oder Erneuerung der Komponente verursachen würde. Anfahrtkosten, Kosten für Schaltmaßnahmen oder die Kosten für den Einsatz von Notstromaggregaten fließen nicht mit ein, da diese in beiden Fällen (Instandhaltung oder Erneuerung) anfallen und sich nicht deutlich unterscheiden. Da eine Vielzahl an unterschiedlichen Mängeln auftreten kann und die einzelnen IH-Kosten auch abhängig vom Typ der betrachteten Komponente (z. B. Gebäude-, Kompakt- oder Maststation) sind, handelt es sich bei den Kosten um pauschale Abschätzungen bzw. mittlere Maßnahmenkosten und keine exakten Kosten. Durch die Kostenabschätzung stellt der resultierende Gesamtaufwand an anfallenden IH-Maßnahmen bei einer Netzstation also immer nur eine Orientierungsgröße dar. Die tatsächlichen Ist-Kosten bei Durchführung der Tätigkeiten können abweichen. Zudem sind die Kosten immer unternehmensspezifisch festzulegen. Einen Auszug anzusetzender Kosten für einige IH-Maßnahmen bietet die folgende Tabelle 11.

**Tabelle 11 – Auszug von angenommenen IH-Maßnahmenkosten an einer Netzstation**

Durchzuführende IH-Maßnahmen	Kosten [€]
kleinere Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten (allg.)	70 €
Stationsgrundstück pflegen, mähen (Grünflächenpflege)	50 €
Reinigungsmaßnahmen in der Station	50 €
Anstricharbeiten - Farbe blättert ab	90 €
Warn- und Hinweisschilder erneuern	20 €
1 MS-Kabelendverschlüsse nachfüllen	130 €
MS-Schaltanlage wechseln (komplett)	13.500 €
NH-Sicherung wechseln	30 €
Berührungsschutz erneuern / nachrüsten	800 €
Ölauffangwanne montieren / nachrüsten	1.200 €

Gemäß Klassifizierungsschema (Kapitel 3.2.2) muss immer, wenn das IH-Personal vor Ort einen Mangel an einer Komponente der Netzstation feststellt und mit  $B_i = [2, 3, 4]$  bewertet, im Bemerkungsfeld auch eine entsprechende Gegenmaßnahme ausgewählt werden. Die Bewertungspunkte  $B_i = [\emptyset, 0, 1]$  erfordern dagegen keine IH-Tätigkeit und verursachen keinen IH-Aufwand. Es hat sich während der Feldtests gezeigt, dass bei der visuellen Inspektion eine Aussage über eine Höhe des Abnutzungsvorrats einer Komponente nur sehr eingeschränkt getroffen werden kann. Jedoch kann eine Aussage über das „Was“ (d. h. welche Gegenmaßnahme oder weitere Analyse wird empfohlen?) und das „Wann“ (Fristigkeit) sehr gezielt abgegeben werden. Es muss aber auch angemerkt werden, dass die Bewertungsfelder z. T. während der Feldtests nicht genutzt

werden, obwohl ein Mangel detektiert wird. Schulungen des IH-Personals und mobile Lösungen, die eine zwingende Eingabe erfordern, können hier eine Verbesserung der Datenlage erzielen.

Bei der kurzfristigen Instandhaltungsplanung wird die Maßnahmenliste für ein Jahr konkretisiert. Eine zeitliche Berücksichtigung unterschiedlicher Auszahlungen (barwertig) ist hier nicht erforderlich. Hier ermitteln sich die gesamten Instandhaltungskosten einer Netzstation durch Addition der IH-Maßnahmenkosten für alle Inspektionpunkte (siehe z. B. [9]). In Abbildung 51 sind der jeweilige Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  und die zugehörige Summe der anfallenden IH-Maßnahmenkosten der einzelnen Netzstationen aufgetragen. Denn nur bei einem festgestellten, gesicherten IH-Bedarf fallen auch entsprechende IH-Maßnahmenkosten an, dem Unsicherheitsbereich lassen sich keine Kosten zuordnen. Daher basieren auch die farblichen Bereiche („rot“, „gelb“, „grün“) in Abbildung 51 auf den Grenzwerten der Zustandskennziffer  $Z_N(A)$ , die in Abschnitt 6.2.2.2 ermittelt sind, jedoch ohne den Anteil der Unsicherheit (im Mittel ca. 5 %). Es sind nur die Netzstationen dargestellt, bei denen die IH-Maßnahmenkosten auf Basis der vorliegenden Bemerkungen eindeutig abgeleitet werden können (Datenbasis 345 Netzstationen).

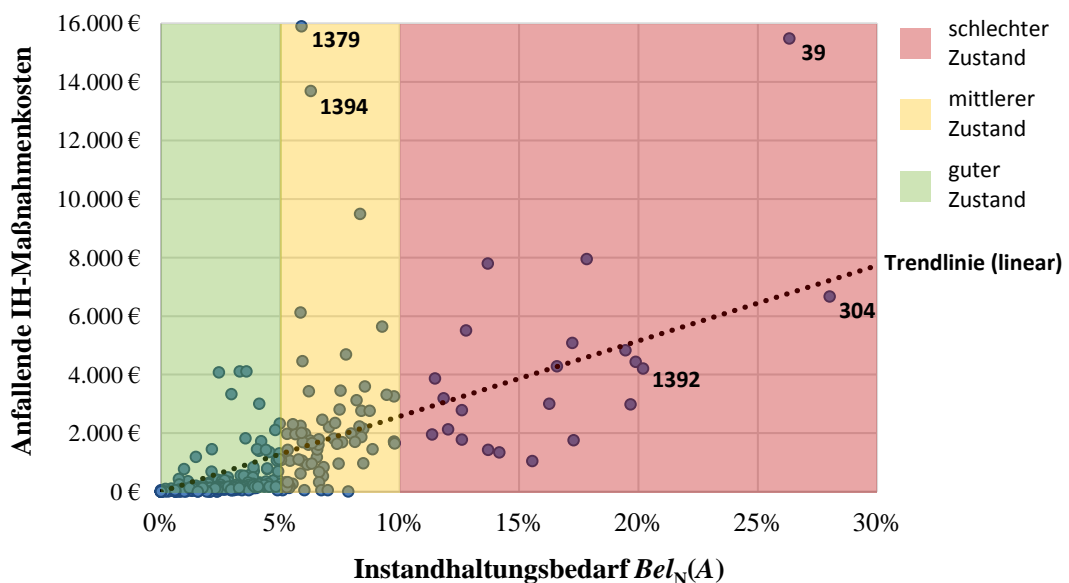


Abbildung 51 – Anfallende IH-Maßnahmenkosten in Abhängigkeit des IH-Bedarfs

So lässt sich ermitteln, dass die anfallenden IH-Maßnahmenkosten für die im roten Bereich (schlechter Zustand) liegenden Netzstationen bei ca. 93.500 € liegen, um alle festgestellten Mängel an diesen zu beseitigen. Die Entscheidung, an welchen Netzstationen in welcher Reihenfolge die Gegenmaßnahmen (Wartung, Instandsetzung, Erneuerung) durchgeführt werden sollen, obliegt letztendlich dem verantwortlichen Anlagenbetreiber.

Bei den zwei Ausreißern (1379, 1394) im gelben Bereich (mittlerer Zustand) handelt es sich um Netzstationen, die sehr hohe IH-Maßnahmenkosten (> 13.500 €) aufweisen. Hier hat das IH-Personal relativ wenige Mängel festgestellt, jedoch sind die Lasttrennschalter in den Stationen mit einer langfristigen Mängelbeseitigung ( $B_i = 2$ ) bewertet. Die Lasttrennschalter sollten gemäß

Empfehlung des IH-Personals langfristig gewechselt werden, wodurch die erhöhten Kosten zustande kommen. Die Funktionsfähigkeit der Schalter ist gegeben, allerdings ist konstruktionsbedingt beim Schalten der Lasttrennschalter mit großer Achtsamkeit vorzugehen. Daher wird dieses durch das IH-Personal aufgezeigt, jedoch mit einer langfristigen Empfehlung. Da eine Erneuerung tendenziell meist höhere Kosten verursacht, kann somit schon frühzeitig ein Erneuerungsbedarf aufgezeigt werden.

Bei der Netzstation 39 (oben rechts) dagegen liegt bereits eine sofortige IH-Maßnahmenempfehlung zum Wechsel der Lasttrennschalter bzw. der MS-Schaltanlage vor. Des Weiteren sind noch verschiedene Mängel am baulichen Teil sowie der Öldichtigkeit des Transformators bewertet, wodurch hier neben hohen IH-Kosten auch gleichzeitig ein hoher Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A) = 26,33\%$  vorliegt. Bei dieser Netzstation sollte zeitnah (aufgrund der hohen anfallenden IH-Maßnahmenkosten) eine Erneuerung durchgeführt bzw. geprüft werden. Die beiden anderen Netzstationen (304 bzw. 1392) mit den höchsten Instandhaltungsbedarfen  $Bel_N(A)$  (28,03 % bzw. 20,21 %) weisen dagegen eine Vielzahl an verschiedenen Mängel auf. So sind vermehrt bereits sofortige oder kurzfristige IH-Maßnahmen bewertet. Somit besteht eine dringliche Fristigkeit zur Mängelbeseitigung. Bei den Gegenmaßnahmen handelt es sich aber vor allem um Reparaturen an vorhandenen Komponenten oder z. B. um das Nachfüllen von Kabelendverschlüssen. Aus diesem Grund liegen die anfallenden Maßnahmenkosten (im Vergleich mit den drei vorgenannten Netzstationen) nur bei 6.554 € bzw. 4.098 €. Ein hoher Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  kann also mit unterschiedlichen anfallenden IH-Maßnahmenkosten verbunden sein.

Die grafische Darstellung unterstützt die Entscheidungsfindung. Daher ist auch zusätzlich die lineare Trendlinie zwischen Instandhaltungsbedarf und anfallende IH-Maßnahmenkosten eingezeichnet. Liegt ein Punkt (Netzstation) unterhalb dieser Linie, ist die Durchführung einer Gegenmaßnahme im Durchschnitt lohnenswerter als bei Punkten oberhalb dieser Linie. Daher sollten die Netzstationen unterhalb der Linie, die im roten Bereich liegen und dabei annähernd gleichen IH-Bedarf  $Bel_N(A)$  aufweisen, entsprechend bevorzugt behandelt werden. Mit weniger Aufwand (Kosten) kann eine gezielte Verbesserung (Reduzierung  $Bel_N(A)$ ) erreicht werden.

Dieser Aspekt ist in Tabelle 12 einmal für 20 Netzstationen, die sich im roten Bereich befinden und bei denen eine zeitnahe Maßnahme (z. B. noch im laufenden Geschäftsjahr) durchgeführt werden sollte, aufgeführt. Die letzte Spalte drückt dabei aus, um wieviel der Instandhaltungsbedarf  $Bel_N(A)$  durch eingesetzte eintausend Euro (IH-Kosten in 1.000 €) reduziert werden kann. Die Wirksamkeit von 1.000 € zur Mängelbeseitigung (IH-Bedarf) wird durch diese Kennzahl ausgedrückt. Somit wird die unterjährige Reihenfolge der IH-Maßnahmenplanung unterstützt.

Tabelle 12 – Wirksamkeit der IH-Kosten auf die Reduzierung des IH-Bedarfs (Netzstationen roter Bereich)

Nr.	Netzstation	IH-Bedarf [%]	IH-Kosten [€]	IH-Bedarf / IH-Kosten [% pro 1.000 €]
1	Netzstation 102	15,57%	1.045 €	14,90
2	Netzstation 315	14,19%	1.333 €	10,64
3	Netzstation 46	17,29%	1.758 €	9,84
4	Netzstation 343	13,71%	1.425 €	9,62
5	Netzstation 325	12,62%	1.778 €	7,10
6	Netzstation 349	19,67%	2.975 €	6,61
7	Netzstation 96	12,04%	2.128 €	5,66
8	Netzstation 323	16,28%	3.000 €	5,43
9	Netzstation 1392	20,21%	4.202 €	4,81
10	Netzstation 157	12,61%	2.776 €	4,54
11	Netzstation 328	19,90%	4.433 €	4,49
12	Netzstation 304	28,03%	6.659 €	4,21
13	Netzstation 352	19,47%	4.828 €	4,03
14	Netzstation 248	16,60%	4.280 €	3,88
15	Netzstation 309	11,85%	3.185 €	3,72
16	Netzstation 1292	17,24%	5.078 €	3,39
17	Netzstation 108	12,79%	5.500 €	2,33
18	Netzstation 355	17,84%	7.946 €	2,25
19	Netzstation 299	13,70%	7.788 €	1,76
20	Netzstation 39	26,33%	15.470 €	1,70
Ø-Wert über alle Netzstationen:				3,89

Für die mittel- und langfristige Instandhaltungsplanung sowie für die Erneuerungsentscheidung hat auch die Fristigkeit der IH-Maßnahmen und damit der Zeitpunkt dieser Auszahlungen einen Einfluss auf die Entscheidungen. Dieser fällt zwar aufgrund des i. d. R. geringen Zeitintervalls zwischen den Zustandsbewertungen (meist < 4 Jahre) nicht sehr ausgeprägt aus, sollte aber berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt der IH-Maßnahmen fließt dabei über eine Diskontierung mithilfe eines Kalkulationszinsfußes ein und damit lassen sich die Barwerte der IH-Maßnahmen ermitteln. Der Barwert  $K_0$  repräsentiert den Wert einer Investition, den diese zukünftige Zahlung in der Gegenwart  $t_0$  besitzt. Er wird gemäß folgender Formel ermittelt: [121]

$$K_0 = \frac{K_t}{(1 + i_z)^t} \quad (6.1)$$

Dabei entspricht  $K_t$  der Zahlung für die anfallenden IH-Maßnahmen zum Zeitpunkt  $t$ ,  $i_z$  dem zugrundeliegenden Kalkulationszinssatz (gewählt: 6 %) und  $t$  der Zeit bis die IH-Maßnahme anfällt. Für die Zeit  $t$  wird ein vierjähriger Inspektionszyklus angenommen, d. h. dass der Bewertungspunkt  $B_i = 4$  eine sofortige IH-Maßnahme ( $t = 0$ ), der Punkt  $B_i = 3$  eine kurzfristige IH-Maßnahme innerhalb von 2 Jahren ( $t = 2$ ) und der Punkt  $B_i = 2$  eine langfristige IH-Maßnahme in vier Jahren ( $t = 4$ ) zur Mängelbeseitigung zur Folge hat. Danach erfolgt eine aktualisierte Datenaufnahme und Zustandsbewertung.

Die Barwerte der anfallenden IH-Maßnahmen können die Budgetplanung für Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen unterstützen. Durch die Bewertung der einzelnen Inspektionspunkte nach der Fristigkeit der Mängelbeseitigung wird der zeitliche Faktor ersichtlich und durch die Verknüpfung mit den zugehörigen IH-Maßnahmenkosten kann das Budget für die Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung optimal ermittelt werden. Im Rahmen der Felduntersuchung der 345 Netzstationen werden so in Summe ca. 286.000 € für die voraussichtlichen IH-Maßnahmen ermittelt. Dabei verteilt sich diese Summe wie folgt gemäß ihrer Fristigkeit (Abbildung 52):

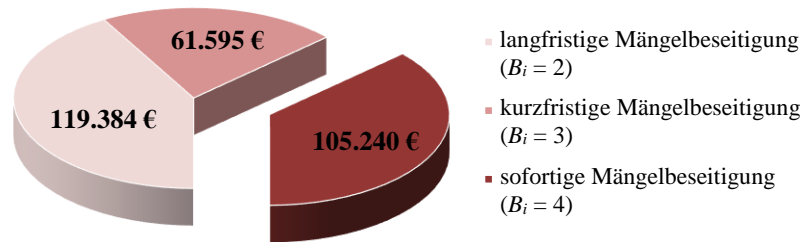


Abbildung 52 – Zeitliche Budgetverteilung für die IH-Maßnahmen

So sollte für sofortige IH-Maßnahmen an Netzstationen im unterjährigen Geschäftsjahr ein Budget von min. 106.000 € zur Verfügung gestellt werden, damit verkehrssicherungspflichtige und betriebsrelevante Maßnahmen direkt umgesetzt werden können. Über die Geschäftsjahre und verschiedene Inspektionszyklen hinweg wird diese Budgetvorgabe immer verlässlicher. Zusätzlich können auch die voraussichtlichen Auszahlungen für IH-Maßnahmen der folgenden Geschäftsjahre abgeschätzt und bei Erfordernis evtl. Maßnahmen sogar vorgezogen werden.

Zudem lässt sich über eine Verknüpfung der Barwerte der IH-Maßnahmen mit der zugehörigen Unsicherheit einer Netzstation die Glaubwürdigkeit der Entscheidungsgrundlage übersichtlich erkennen. Dieses ist in Abbildung 53 dargestellt.

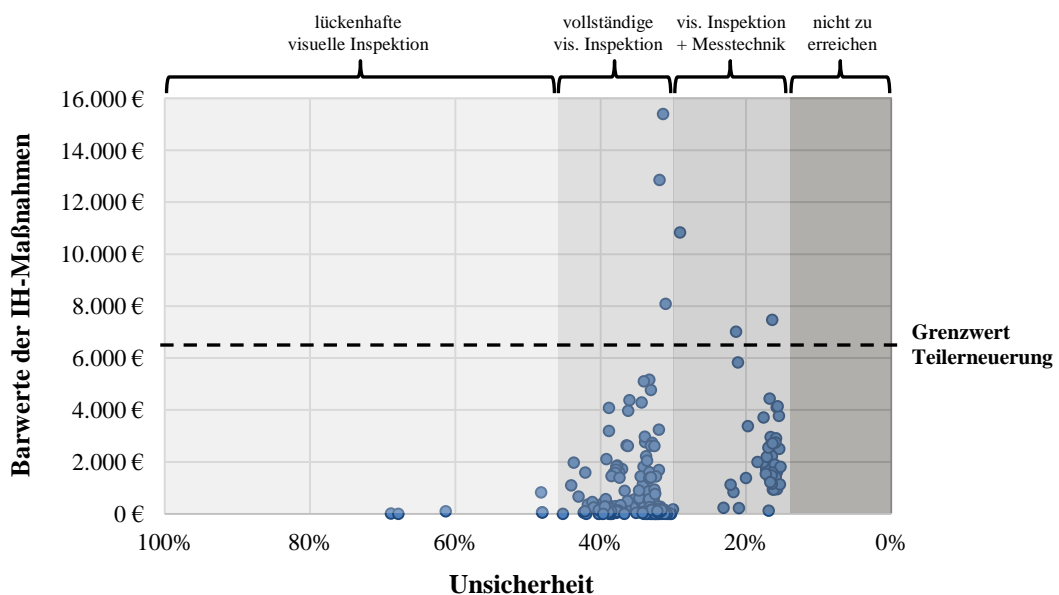


Abbildung 53 – Unsicherheit und Barwerte der anfallenden IH-Maßnahmen der Netzstationen



Die Barwerte für die anfallenden IH-Maßnahmen lassen sich einem Unsicherheitsbereich zuordnen. Wenn die Barwerte unsicher sind, sollten erst noch weitere Informationen über die Netzstation eingeholt werden, um die Entscheidung fundiert treffen zu können. Zudem besteht ein Risiko, dass der IH-Bedarf und somit auch die anfallenden IH-Maßnahmenkosten durch die fehlenden Informationen noch höher ausfallen.

Außerdem ist in Abbildung 53 ein Grenzwert eingetragen, ab welchem eine Teilerneuerung von Komponenten (MS-Schaltanlage, Verteiltransformator) oder aber auch eine komplette Erneuerung der Netzstation sinnvoll ist. Bis zu diesem Wert ist dagegen an der Netzstation prinzipiell eine Instandhaltung empfehlenswert. Der Grenzwert resultiert dabei aus der Annahme, dass ein Verteilnetztransformator die „kleinste“ (im Sinne von kostengünstigste) Einheit darstellt, die separat erneuert werden kann. Die anderen Komponenten werden durch den Austausch des Verteiltransformators nicht beeinflusst [1]. Für die Erneuerung einer Netzstation ohne Transformatoren werden als Investitionskosten 18.000 € und für einen 250 kVA-Transformator 8.000 € angenommen [122]. Die Erneuerung eines Transformators, die langfristig erfolgen soll, stellt also die Untergrenze einer Teilerneuerung von 6.300 € (Barwert der Zahlung in 4 Jahren) dar. Diese Grenze kann aber auch anderweitig festgelegt werden, bspw. als fester Prozentsatz von den Investitionskosten einer neuen Netzstation oder vom Restbuchwert der Netzstation.

Zur Clusterung der betrachteten Netzstationen unter dem Aspekt der Erneuerungsentscheidung bietet sich auch die Abbildung 54 an. Hier sind die Erneuerungszustandskennziffer  $Z_{N,E}(A)$  sowie die Barwerte der IH-Maßnahmen aufgetragen. Der Grenzwert für die Zustandskennziffer  $Z_{N,E}(A)$  beträgt  $Z_{N,E}(A) = 23,25\%$  (siehe Abbildung 50).

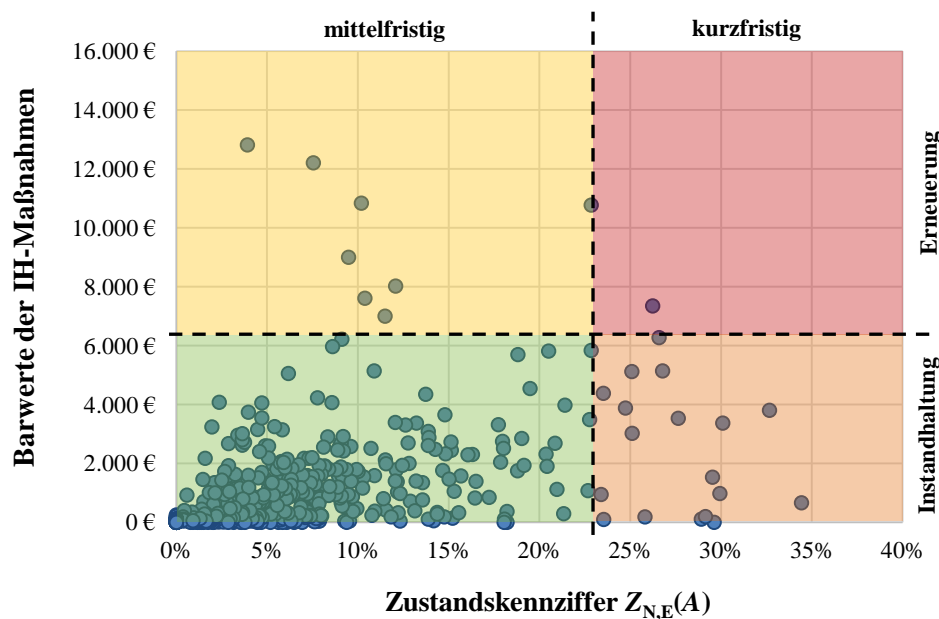


Abbildung 54 – Clustern der Netzstation für eine Erneuerungsentscheidung

Im roten Bereich liegen die Netzstationen, die eine erhöhte Zustandskennziffer  $Z_{N,E}(A)$  aufweisen und an denen zudem über die Barwerte der IH-Maßnahmen eine Teilerneuerung empfehlenswert ist. Da beide Grenzwerte überschritten sind, sollte hier eine kurzfristige Erneuerung durchgeführt werden. Im gelben Bereich dagegen wird eine mittelfristige Erneuerung angeraten, da die Barwerte der anfallenden IH-Maßnahmen eine Erneuerung nahelegen, aber die Erneuerungszustandskennziffern (noch) im niedrigen Prozentbereich liegen. Die identifizierten Mängel sind mit einer längeren Fristigkeit bewertet. Befinden sich die Barwerte der IH-Maßnahmen unter dem Grenzwert einer Teilerneuerung, wird prinzipiell eher eine Instandhaltung empfohlen. Mit relativ geringen Mitteln können die festgestellten Mängel behoben und die Netzstationen wieder in einen ordnungsgemäßen Zustand zurückgeführt werden. Die Höhe der Zustandskennziffer drückt dann die Fristigkeit dieser Maßnahmen aus. Zur Planung der IH-Maßnahmen sollten aber immer die Zustandskennziffer  $Z_N(A)$  sowie die zugehörigen Evidenzgrößen verwendet werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In Anbetracht einer stetigen Effizienzsteigerung bei der Bewirtschaftung des Mittelspannungsnetzes rücken optimierte Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien, deren Basis der aktuelle, technische Betriebsmittelzustand ist, verstärkt in den Fokus. Die objektive und realitätsgerechte Zustandsbewertung von Mittelspannungs-Betriebsmitteln bildet somit eine der zentralen Entscheidungsgrößen zur Asset-Optimierung, um die Planung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen gezielt zu steuern. Aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und der großen Betriebsmittelstückzahlen im Mittelspannungsnetz sind die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten aber eingeschränkt, wodurch unsichere und unvollständige Bewertungsgrundlagen die Folge sind.

Deswegen ist im Rahmen dieser Arbeit zum ersten Mal ein systematisches Bewertungsmodell für eine objektive, realitätsgerechte Zustandsbewertung von Mittelspannungs-Betriebsmitteln entwickelt worden, das die Verlässlichkeit bzw. Unsicherheit der zugrundeliegenden Informationsquellen berücksichtigt. Ausschließlich geeignete Informationsquellen und deren Bewertungsergebnisse führen erst zu einer einheitlichen, aussagekräftigen und vergleichbaren Zustandsbewertung. Das hierfür entwickelte Bewertungsmodell basiert auf den mathematischen Grundzügen der Evidenz-Theorie, um unsichere, unvollständige oder veraltete Informationen verarbeiten und deren Aussagefähigkeit quantifizieren zu können. Als Resultat wird nicht nur eine Zustandskennziffer für die jeweiligen MS-Betriebsmittel generiert, sondern zusätzlich auch die Qualität der Zustandsbewertung in Form der Unsicherheit aufgezeigt. Dieses bedeutet einen erheblichen Informationsgewinn für die Zustandsbewertung von MS-Betriebsmitteln, da unsichere Zustandsbewertungsergebnisse direkt ersichtlich werden und nicht zu Fehlentscheidungen führen. Die Unsicherheit kann somit als zusätzliche Kenngröße für Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen verwendet werden.

Neben dem Asset Management wird auch der Asset Service durch das Zustandsbewertungsmodell unterstützt, welchem die identifizierten Mängel sowie die erforderlichen Instandhaltungsempfehlungen in Form eines übersichtlichen Ergebnisberichts detailliert aufgelistet werden. Dadurch wird die Planung und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen konkret optimiert. Einzelne, gravierende Mängel werden direkt erkennbar. Zudem ermöglicht das Modell gezielt die Budgetsteuerung im Hinblick auf die voraussichtlichen Kosten der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen.

Das Bewertungsmodell basiert auf den turnusmäßig durchgeführten, visuellen Inspektionen, um den aktuellen Zustand zu erfassen und um die Expertise des Instandhaltungspersonals mit in die Zustandsbewertung zu integrieren. Ergänzend werden in das Bewertungsmodell ausgewählte, einfache Messverfahren eingebunden, die ohne vorheriges Freischalten und damit praktisch ohne großen Zusatzaufwand im Rahmen der Inspektion eingesetzt werden können. Die Hinweise aus

den Messergebnissen („Hard-Facts“) und der visuellen Inspektion („Soft-Facts“) werden unter Berücksichtigung ihrer Aussagefähigkeit zu einer realitätsgerechten Gesamtaussage kombiniert. Hierzu sind verschiedene Kombinationsregeln der Evidenz-Theorie analysiert und geeignet adaptiert worden, um das Zusammenspiel von visueller Inspektion und einfacher Messverfahren in einem fundierten und nachvollziehbaren Zustandsbewertungsergebnis für MS-Betriebsmittel auszudrücken.

Hierfür stellt die Untersuchung der Subjektivität bei der visuellen Inspektion einen zentralen Baustein dar. Allgemein ist Expertenwissen für Entscheidungen in realen Situationen unerlässlich, da i. d. R. nicht alle Informationen vollständig und gesichert (objektiv) vorliegen. Wenn Expertenwissen über die Bewertung durch das Instandhaltungspersonal vor Ort jedoch eingebunden wird und dieses Wissen damit als Bewertungsgrundlage von Entscheidungen zur Asset-Optimierung dient, muss immer ein subjektiver Einfluss beachtet werden, da dieses Wissen immer personenabhängig ist. Dass die Subjektivität dabei einen z. T. erheblichen Einfluss auf die Zustandsbewertung und damit von Asset-Entscheidungen hat, wurde in dieser Arbeit ausführlich aufgezeigt. Die Vergleichbarkeit von Zustandsbewertungen, die von unterschiedlichen Personen durchgeführt wurden, ist stark eingeschränkt. Zur Reduzierung dieses Einflusses sind in dieser Arbeit geeignete Gegenmaßnahmen (Schulungen, Schadens- und Bilderkataloge, Messverfahren) untersucht und dargelegt worden. Durch diese Maßnahmen konnten der subjektive Einfluss in Felduntersuchungen gegenüber rein erfahrungsbasierten Inspektionen um ca. 66 % reduziert und dadurch objektivierete Zustandsbewertungsergebnisse erzielt werden.

Durch die Integration von einfachen, kostengünstigen Messverfahren in den Inspektionsprozess wird ein erheblicher, zusätzlicher Mehrwert erzeugt. Die Messverfahren müssen dabei aussagekräftige Ergebnisse ohne Freischalten der Betriebsmittel bei nur geringem zeitlichem Mehraufwand liefern. Als geeignete Messverfahren wurden hierfür die akustische Teilentladungsdetektion, die Detektion von Transienten Ableitsspannungen, die Erdschleifenmessung sowie die Thermografie identifiziert, wodurch mit vertretbarem Aufwand objektive und belastbare Messwerte für die Zustandsbewertung vorliegen. Mit diesen Messverfahren konnten in mehr als 30 % der überprüften Netzstationen Auffälligkeiten detektiert werden, die mit der visuellen Inspektion nicht erkannt wurden. Dieses verdeutlicht eindrucksvoll den Mehrwert der einfachen Messverfahren, da mit wenig Aufwand ein erheblicher Informationsgewinn und somit auch ein wesentlich valideres Bewertungsergebnis erzielt wird.

Das vorgestellte, entwickelte Zustandsbewertungsmodell auf Basis der Evidenz-Theorie hat seine Praxistauglichkeit im Rahmen von zahlreichen Feldtests bei verschiedenen Verteilnetzbetreibern eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Die praxismgerechte Anwendbarkeit und der Einfluss variierender Eingangsdaten (visuelle Inspektion, Messergebnisse) auf die Zustandsbewertung sind deutlich geworden. Zudem erzeugte das Modell auch bei inhomogener Datengrundlage während der Feldtests vergleichbare Bewertungsergebnisse und vorliegende, unsichere Ergeb-

nisse waren eindeutig von sicheren Ergebnissen zu unterscheiden. Die Zustandskenngrößen und die gezeigte Relevanz der zusätzlich ermittelten Qualität dieser Größen leisten einen wesentlichen Entscheidungsbeitrag zur Asset-Optimierung, um Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen optimal planen zu können.

Generell erzeugt das evidenzbasierte Zustandsbewertungsmodell wesentliche Vorteile und bietet vielfältige Möglichkeiten der Anwendung für die praktische Umsetzung, die am Beispiel der MS-Netzstationen in dieser Arbeit dargestellt sind. So ist das vorgestellte Bewertungsmodell universell erweiterbar, da die Kombinationsregeln eine modulare Anpassung an zur Verfügung stehende Eingangsgrößen erlauben. Somit können zusätzliche Informationen und neue Messverfahren, die einen Beitrag zur Zustandsbewertung leisten, einfach ergänzt werden. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bleibt erhalten, da vor allem die Unsicherheit der Zustandsbewertung reduziert wird.

Aufgrund der Vorteile ist es zudem empfehlenswert, dieses Modell auch auf die anderen MS-Betriebsmittel (Freileitungen, MS-Schaltanlagen) zu übertragen. Inspektions-Checklisten und einfache Messverfahren sind auch bei diesen einsetzbar. Jedoch liegen diese umfangreichen Praxiserfahrungen in der Gänze hier bisher noch nicht vor. Für MS-Kabel stellt die Adaptierung und Entwicklung eines evidenzbasierten Zustandsbewertungsmodells weiteren Forschungsbedarf dar, da die Zustandsdatenerfassung über eine Inspektions-Checkliste prinzipiell nahezu abgeschlossen ist. Alternative Eingangsgrößen können aber auch mit der Evidenz-Theorie kombiniert werden.

Die Wirksamkeit der ausgewählten, einfachen Messverfahren ist ausführlich dargestellt worden. Um hier jedoch noch explizitere Rückschlüsse von Messergebnissen auf den Zustand einer elektrischen Komponente ziehen zu können, stellt die Bestimmung der Detektionsfähigkeit der Messverfahren, die Interpretation von gemessenen Werten und die darauf basierende Ableitung eines konkreten IH-Bedarfs noch weiteren Forschungsbedarf dar, um die realitätsgerechte Zustandsbewertung weiter zu optimieren.

Durch die turnusmäßigen Inspektionen erzielt ein Verteilnetzbetreiber mit dem entwickelten Modell in kurzen Zeitintervallen einen umfassenden, realitätsgerechten Überblick über den Zustand seiner MS-Betriebsmittel. Der aktuelle Betriebsmittelzustand eines Anlagenkollektivs, der auf Basis von objektivierten Inspektions- und konkreten Messergebnissen konsistent über einen längeren Zeitraum erhoben wird, schafft eine fundierte Datenbasis, um daraus Rückschlüsse auf das Alterungsverhalten sowie resultierende Prognosen über die weitere Entwicklung der Betriebsmittel ziehen zu können. Zudem stellen die Zustandskenngrößen sowie die Unsicherheiten Eingangsgrößen für vorhandene Asset-Simulationen und andere Asset-Werkzeuge dar.



## 8 Summary

Considering continuous efficiency enhancements in maintenance and operation of their medium-voltage grid optimized maintenance and replacement strategies will increasingly move more into focus. Basis of these strategies is the actual technical asset condition. The most objective and realistic condition assessment of various electrical equipment of the distribution grid is a major decision-making parameter to control the planning of maintenance and replacement measures specifically. Due to the economic framework and the large quantities of the equipment in a medium-voltage grid the available input data is restricted, whereby uncertain and incomplete basis of assessment will be the consequences.

Therefore in this thesis a systematic assessment model for an objective and realistic condition assessment of medium-voltage equipment is presented for the first time that takes the significance respectively uncertainty of the underlying information sources into account. Only appropriate information sources and their evaluation results lead to an uniform, significant and comparable condition assessment. The specifically developed assessment model is therefore extended to the mathematical principles of the theory of evidence to process uncertain, incomplete or outdated data and quantify their significance. As a result not only a condition index for the relevant medium-voltage equipment is generated, but the quality of the condition assessment is calculated in the form of uncertainty additionally. This means a substantial gain of information for the condition assessment because uncertain evaluation results will be noticed directly and do not result in incorrect decisions. The uncertainty can be used as an additional parameter for maintenance and replacement decisions.

Besides the asset management the asset service is also supported by the assessment model because identified deficiencies and required maintenance recommendations are listed in form of a detailed report. In this way the planning and implementation of maintenance tasks is optimized concretely. Individual serious deficiencies are pointed out. Furthermore the model allows a targeted budget management with regard to expected costs for the required maintenance tasks.

The assessment model is based on periodic visual inspections, in order to determine the actual technical asset condition and to integrate the expertise of the maintenance staff in the condition assessment. In addition, the method is supplemented by suitable simple measurement methods which can be used without any disconnection of the components and thus without much additional effort during an inspection. The indications of measurement results („hard facts“) and of visual inspections („soft facts“) are combined - in consideration of their significance / uncertainty - to a realistic overall statement. Therefore various combination rules of theory of evidence were analysed and suitably adapted in order to be able to express the combination of visual inspections and simple measurement in a well-founded and comprehensible condition assessment result of medium-voltage equipment.

The analysis of the subjectivity is a central element. In general, expert knowledge is essential for decision-making in real situation because normally not all data are complete and reliable (objective). But if expert knowledge is integrated into the on-site condition assessment by the maintenance staff and thus this knowledge is used as a basis for decision-making concerning asset optimization, the subjective influence must be kept in mind because this knowledge depends on the respective person. This thesis has shown that the subjectivity has a considerable influence on the condition assessment and as a result on asset decisions. The comparability of the condition assessments which are carried out by different persons is greatly restricted. To reduce the subjective influence several countermeasures (training, reference catalogue with exemplary faults, measurement methods) have been analysed and presented. With these measures the subjective influence can effectively be reduced minus approximately 66 percent compared with pure experience-based inspections and an objectified condition assessment is achieved.

The integration of simple, cost-effective measurement methods into the inspection process provides a significant added value. Measurement methods must deliver significant results without any disconnection of the components and without much time requirement (economical and easy to operate). The measurement methods acoustic detection of partial discharges, detection of transient earth voltages (TEV), earth-loop testing and thermography have proven to be suitable and by which objective and valid measurement values are provided with justifiable efforts for the condition assessment. By use of these measurement methods deficiencies have been detected on approx. 30 % of components of medium-voltage substations, which have not been detected by visual inspections during the field study. This result impressively shows the added value of the simple measurement methods because with little effort a significant gain of information and also a more valid assessment result is achieved.

The presented assessment model which is based on the theory of evidence has impressively proved its practical suitability within numerous field tests by various distribution system operators. The practical applicability and the influence of the varying input data (visual inspection, measurement results) for the condition assessment have become clear. Furthermore the model generates in spite of inhomogeneous data basis comparable assessment results during the field tests and existing uncertain results could be clearly distinguished from certain results. The condition parameters and the demonstrated relevance of the further determined quality of these parameters make an essential contribution of decision-making to asset optimization in order to enable optimal planning of maintenance and replacement measures.

The evidence-based condition assessment model offers many and diverse possibilities in the practical application which are presented using the example of medium-voltage substations in the field study. For the other medium-voltage equipment the wide practical experience does not yet exist in their entirety. Moreover the model can also be universally extended because the combination rules are designed to be modular and enable a flexible adaptation to available input



data. That is why additional information and new measurement methods which will make a contribution to condition assessment can be added readily. The comparability of the results is ensured because the uncertainty of the condition assessment will mainly be reduced.

In general, the evidence-based condition assessment model creates significant advantages and offers many and diverse possibilities in the practical application which are presented in this thesis using the example of medium-voltage substations. As an example the presented model can be universally extended because the combination rules are designed to be modular and enable a flexible adaptation to available input data. That is why additional information and new measurement methods which will make a contribution to condition assessment can be added readily. The comparability of the results is ensured because the uncertainty of the condition assessment will mainly be reduced.

Due to the benefits it is further advisable to transfer the model to the other medium-voltage equipment (overhead lines, MV switchgears). Inspection checklists and simple measurement methods can be used for these as well. But the wide practical experience does not yet exist here in their entirety. For MV power cables further research is needed for the adaptation and development of an evidence-based condition assessment model because the condition data collection via inspection checklist is in principle nearly excluded. Alternative input data may also be combined by the theory of evidence.

The effectiveness of the selected simple measurement methods has already shown extensively. In order to draw more detailed conclusions from measurement results of the condition of the components, there is a need for further research of the determination of the detection capability of the measurement methods, the interpretation of measured values and the derivation of maintenance requirement based on the measuring data. So the realistic condition assessment is further optimized.

Through regular inspections the network operator gets a comprehensive, realistic overview of the condition of their medium-voltage equipment by the developed model in a short time. The current condition of a collective of assets, which is based on objectified inspection results and concrete measurement results and has been collected consistently over a long period of time, build up a well-founded database to draw conclusions about the aging behaviour and to make forecasts on further performance of the equipment. Furthermore the condition indices as well as the uncertainties are input variables for existing asset simulations and asset instruments.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Balzer, G.; Schorn, C.: *Asset Management für Infrastrukturanlagen - Energie und Wasser*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014
- [2] Beerboom, D.; Johae, C.; Zdrallek, M. et al.: *Realitätsgerechte Zustandsbewertung von Verteilungsnetzen als Basis optimierter Asset-Strategien*. Tagungsband zur ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel", Fulda, 2012
- [3] FGH - Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.: *Technischer Bericht 299: Asset-Management von Verteilungsnetzen - Komponentenverhalten und Analyse des Kostenrisikos*. Mannheim: FGH-Verlag, 2006
- [4] Bühler, J.: *Instandhaltungs- und Erneuerungsoptimierung von städtischen Mittelspannungsnetzen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Aachen: Shaker Verlag, 2013
- [5] Hille, C.: *Simulatorische Analyse und Optimierung von Asset Management Strategien im regulierten Umfeld der Elektrizitätsversorgung*. Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band 21, Aachen, 2012
- [6] Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG): *Versorgungsqualität im deutschen Stromversorgungssystem*. Studie des VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V., Frankfurt, 2006
- [7] Primus, I.-F.: *Netzstationen*. Frankfurt am Main: VWEW Energieverlag GmbH, 2009
- [8] FNN - Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE: *Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität in Deutschland*. Berlin, März 2013
- [9] Kafłowski, G.: *Systematische Zustandsbewertung von Mittelspannungsanlagen als Grundlage einer optimalen Instandhaltungsstrategie*. Dissertation, Universität Siegen. Aachen: Shaker Verlag, 2013
- [10] Schlabbach, J.; Berka, T.: *Reliability-Centred Maintenance of MV Circuit-Breakers*. IEEE Power Tech Conference, Porto, 2001
- [11] Marketz, M.; Polster, J.; Muhr, M.: *Maintenance Strategies For Distribution Networks*. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing (China), 2005

- [12] Dietermann, T.: *Systembezogene Risikobewertung von Betriebsmitteln der Elektrischen Energieversorgung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Aachen: Shaker Verlag, 2012
- [13] Körbler, B.: *Zustandsbewertung von Betriebsmitteln in der elektrischen Energietechnik*. Dissertation, Technische Universität Graz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004
- [14] Federlein, S.: *Modellierung des typspezifischen Störungsaufkommens von Hochspannungs-Schaltgeräten*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2010
- [15] Stürmer, J.: *Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien in Verteilungsnetzen*. Dissertation, Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2001
- [16] FGH - Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.: *AiF/IGF-Vorhaben 16391N - Schlussbericht: Entwicklung typspezifischer Prognosemodelle zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von Betriebsmitteln im Rahmen des Asset Managements in elektrischen Verteilungsnetzen*. Mannheim: FGH-Verlag, 2013
- [17] Wellßow, W. H.; Zdrallek, M.: *Versorgungszuverlässigkeit in Verteilungsnetzen*. In: *Elektrizitätswirtschaft* 98, Nr. 23, pp. 30-35, 1999
- [18] Küchler, A.: *Hochspannungstechnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [19] Pawlowski, E.: *Realitätsgerechte Zustandsbewertung gasisolierter Hochspannungsschaltanlagen*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik, 2016
- [20] Sumereder, C.: *Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik*. OVE-Schriftenreihe für Habilitationen und Dissertationen, Band 3, Wien: Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2010
- [21] Tenbohlen, S.; Heindl, M.; Jovalekic, M. et al.: *Trends in der Diagnostik von Hochspannungs-Betriebsmitteln*. Tagungsband zur ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel", Fulda, 2012
- [22] Straßburg, K.: *Überwachung und Diagnose von Schaltern und Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich*. Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2000

- [23] Zdrallek, M.: *"TÜV für Netze" – Systematische Zustandsbewertung von Mittel- und Niederspannungsnetzen*. Tagung "Netzbetrieb der Zukunft", Paffendorf, 2005
- [24] Muhr, M.; Körbler, B.; Sumereeder, C. et al.: *Basics of condition evaluation in distribution networks*. In: e&i - Elektrotechnik und Informationstechnik. Volume 120, Issue 12, pp. 446-450, Dezember 2003
- [25] Weller, J.: *Automatisiertes Verfahren zur systematischen Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln*. Dissertation, Technischen Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2009
- [26] Krontiris, A.: *Fuzzy systems for condition assessment of equipment in electric power systems*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2011
- [27] Osztermayer, J.: *Zustandsabhängiges, risikobasiertes Asset Management in der Energieversorgung*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, 2007
- [28] Huang, Y.-C.: *Condition assessment of power transformers using genetic-based neural networks*. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, Volume 150, 2003
- [29] Neumann, U.: *Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieübertragungssysteme*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 21 Nr. 249, 1998
- [30] FGH - Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.: *Technischer Bericht: Zustandsmodell für die Instandhaltungsplanung für einen 123-kV-Leistungsschalter*. FGH, Mannheim-Rheinau, 2001
- [31] Feilhauer, W.: *Ein Verfahren zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel*. Dissertation, Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2005
- [32] Handschin, E.; Jürgens, I.; Weller, J. et al.: *Novel Methods for the Condition Based Maintenance of Distribution Networks*. Proceedings of Power Tech Conference, Lausanne, 2007
- [33] Johae, C.; Beerboom, D.; Zdrallek, M. et al.: *Praxiserfahrungen aus dem Einsatz der akustischen Teilentladungsdetektion an Mittelspannungs-Schaltanlagen*. Tagungsband zur ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel", Berlin, 2014

- [34] Köhn, P.; Schnettler, A.; Schultze, N.: *Classification of Distribution Substations by Operational and Environmental Stresses Leading to Failure of Equipment*. Proceedings of the 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), Lyon, 2015
- [35] Hunold, S.; Wienhold, P.: *Fleetscreening an Verteilnetztransformatoren*. Tagungsband zum internationalen ETG-Kongress, Düsseldorf, 2009
- [36] Wölke, B.; Welzbacher, M.: *Einsatz der akustischen Teilentladungs-Diagnostik im Rahmen der Instandhaltung von Mittelspannungsschaltanlagen*. In: netzpraxis. Jg. 54, Heft 9, S. 30-35, September 2015.
- [37] Beerboom, D.; Johae, C.; Zdrallek, M. et al.: *Condition assessment of distribution grids using uncertainty theory*. Proceedings of the 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), Lyon, 2015
- [38] ISO 55000:2014: *Asset management - Overview, principles and terminology*. 2014
- [39] Braun, A.: *Eckpunkte des Asset Managements*. FGH-Forum: Asset Management - Daten und Methoden, Düsseldorf, 29. September 2015
- [40] Schreiner, A.: *Operationale Risiken in der Energieversorgung: Modelle und Methoden zur Berechnung der Risiken mit Hilfe von Value-at-Risk*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Forschungsgruppe Elektrische Energieversorgung, 2012
- [41] Bartlett, S.: *Asset management in a de-regulated environment*. CIGRE Session, Bericht 23-303, Paris, 2002
- [42] Schwab, A. J.: *Elektroenergiesysteme*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [43] Ryll, F.; Götze, J.: *Methoden und Werkzeuge zur Instandhaltung technischer Systeme*. In: Schenk, M. (Hrsg.), *Instandhaltung technischer Systeme*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 103-230, 2010
- [44] DIN 31051: *Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, September 2012
- [45] DIN VDE 0109-1: *Instandhaltung von Anlagen und Betriebsmitteln in elektrischen Versorgungsnetzen - Teil 1: Systemaspekte und Verfahren*. Berlin: VDE Verlag GmbH, September 2014
- [46] DIN V VDE 0109-2 (Vornorm): *Instandhaltung von Anlagen und Betriebsmitteln in elektrischen Versorgungsnetzen - Teil 2: Zustandsfeststellung von Betriebsmitteln/Anlagen*. Berlin: VDE Verlag GmbH, September 2014

- [47] Anders, G.: *Optimal Maintenance Policies for Power Equipment*. In: Anders, G.; Vaccaro, A. (Hrsg.), *Innovations in Power Systems Reliability*. London: Springer-Verlag, pp. 13-58, 2011
- [48] Coccioni, R.: *Instandhaltung von Mittelspannungsschaltanlagen gestern und heute*. In: *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*. Band 115, Heft 10, S. 559-565, Oktober 1998
- [49] Hetzel, S.: *Zur Frage der Identifikation und Bewertung von Investitionsalternativen in Mittelspannungskabelnetzen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, 2012
- [50] Stender, A.: *Netzinfrastruktur-Management: Konzepte für die Elektrizitätswirtschaft*. Wiesbaden: Gabler / GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [51] Lagemann, C.; Zdrallek, M.: *Condition Assessment of MV Transformer Substations to optimize the Investment Strategy*. Proceedings of the 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2007), Wien, 2007
- [52] Brown, R. E.; Frimpong, G.; Willis, H. L.: *Failure Rate Modeling Using Equipment Inspection Data*. IEEE Transactions on Power Systems, Volume 19, Issue 2, pp. 782-787, 2004
- [53] Beerboom, D.; Johae, C.; Zdrallek, M. et al.: *Praxiserfahrungen aus der Zustandsbewertung von Verteilungsnetzen*. Tagungsband zur ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel", Berlin, 2014
- [54] DIN VDE 0105-100: *Betrieb von elektrischen Anlagen - Teil 100: Allgemeine Festlegungen*. Berlin: VDE Verlag GmbH, Oktober 2015
- [55] BGFE - Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik: *Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel*. Köln: Carl Heymanns Verlag KG, 2005
- [56] Verband der Netzbetreiber - VDN - e.V. beim VDEW: *Technische Richtlinie für die Instandhaltung von Betriebsmitteln und Anlagen in Elektrizitätsversorgungsnetzen*. Berlin: VDN-Verlag, 2006
- [57] Eisenführ, F.; Weber, M.: *Rationales Entscheiden*. Berlin [u.a.]: Springer-Verlag, 2003
- [58] Göbel, E.: *Entscheidungen in Unternehmen*. Konstanz: UVK-Verlagsgesellschaft, 2014
- [59] Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: *Entscheidungstheorie*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014

- [60] Uhle, T.; Treier, M.: *Betriebliches Gesundheitsmanagement*. 3. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2015
- [61] Moosbrugger, H.; Kelava, A.: *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [62] Porst, R.: *Fragebogen - Ein Arbeitsbuch*. Wiesbaden: Springer VS, 2014
- [63] Krug, K.-E.: *Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985
- [64] Thiessen, O.: *Untersuchung der Gestaltung des Vertragsendes bei PPP-Hochbauprojekten aus baubetrieblicher Sicht*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften, 2007
- [65] Wilhelm, M.: *Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse: ein Beitrag zur systematischen Bewirtschaftung von Immobilien*. Karlsruher Schriften zur Bau-, Wohnungs- und Immobilienwirtschaft, Band 5, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011
- [66] Brandl, M.: *Konzeption eines Entscheidungsunterstützungssystems für eine vorausschauende Reinvestitionsplanung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2003
- [67] Kajsler, A.: *Systematische Zustandsbewertung von Mittelspannungsnetzen*. Diplomarbeit, Universität Siegen, Institut für Elektrische Energieversorgung, 2005
- [68] Saaty, T. L.: *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980
- [69] Cleff, T.: *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse*. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, 2015
- [70] Balzer, G.; Montebauer, A.; Osterholt, A.: *Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung am Beispiel eines regionalen Netzbetreibers*. ETG-Fachbericht 92 „Zuverlässigkeit in der Stromversorgung“, Mannheim, 2003
- [71] Stötzel, M.; Zdrallek, M.: *Optimierung der Instandhaltungsstrategie von 110-kV-Netzen durch Zuverlässigkeitsanalysen*. ETG-Fachbericht 92 „Zuverlässigkeit in der Stromversorgung“, Mannheim, 2003



- [72] Werner, R.: *Instandhaltung - Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze*. Frankfurt am Main, Berlin: VWEW Energieverlag, VDE Verlag, 2008
- [73] Bless, H.; Fielder, K.; Strack, F.: *Social Cognition: How individuals construct social reality*. Philadelphia: Psychology Press, 2004
- [74] Betsch, T.; Funke, J.; Plessner, H.: *Denken – Urteilen, Entscheiden, Problemlösen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2011
- [75] Hagendorf, H.; Kruppenacher, J.; Müller, H.-J. et al.: *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2011
- [76] Herkner, W.: *Psychologie*. Wien: Springer-Verlag, 1986
- [77] Werth, L.; Mayer, J.: *Sozialpsychologie*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2008
- [78] Tversky, A.; Kahneman, D.: *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Science, Volume 185, Issue 4157, pp. 1124-1131, 1974
- [79] Schreyögg, G.: *Organisation: Grundlagen moderner Organisationsgestaltung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2003
- [80] Laux, H.; Liermann, F.: *Grundlagen der Organisation*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005
- [81] Birker, K.: *Führungsstile und Entscheidungsmethoden*. Berlin: Cornelsen Verlag, 1997
- [82] Schmithüsen, F.: *Lernskript Psychologie*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2015
- [83] Tversky, A.; Kahneman, D.: *Availability: A heuristic for judging frequency and probability*. In: Cognitive Psychology. Academic Press, Volume 5, Issue 2, pp. 207-232, 1973
- [84] Berg, M.; Erdmann, G.; Leist, A. et al.: *Risikobewertung im Energiebereich*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich, 1995
- [85] Büssing, A.; Herbig, B.: *Implizites Wissen und Wissensmanagement - Schwierigkeiten und Chancen im Umgang mit einer wichtigen menschlichen Ressource*. In: Zeitschrift für Personalpsychologie. Hogrefe-Verlag, Band 2, S. 51-65, 2003
- [86] North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung - Wertschöpfung durch Wissen*. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011

- [87] Filounek, A.; Steck-Winter, H.: *Wissensmanagement bei der Instandhaltung von Thermoprozessanlagen*. In: gwi - gaswärme international. Band 63, Nr. 3, 2014
- [88] Ertl, R.; Egenhofer, M.; Hergenröder, M. et al.: *Typische Bauschäden im Bild*. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2014
- [89] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)*. 25.03.2013
- [90] Johae, C.; Beerboom, D.; Zdrallek, M. et al.: *Einsatz geeigneter Messverfahren zur Zustandsbewertung von Mittelspannungs-Ortsnetzstationen*. Tagungsband zur ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel", Berlin, 2014
- [91] Johae, C.; Beerboom, D.; Zdrallek, M. et al.: *Significance of non-invasive diagnostic methods for condition assessment of medium-voltage equipment*. Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Pilsen, Czech Republic, 2015
- [92] Paoletti, G. J.; Baier, M.: *Failure Contributors of MV Electrical Equipment and Condition Assessment Program Development*. IEEE Transactions On Industry Applications, Volume 38, Issue 6, pp. 1668-1676, 2002
- [93] Lundgaard, L. E.: *Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 8, Issue 5, pp. 34-43, 1992
- [94] Hribernik, W.; Berger, K. A.; Pascoli, G.: *Diagnose und Monitoring von Mittelspannungsschaltanlagen mittels Teilentladungsmessung*. In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik. Band 124, Heft 12, S. 430-434, Dezember 2007
- [95] Davies, N.; Jones, D.: *Testing Distribution Switchgear for Partial Discharge in the Laboratory and the Field*. Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, 2008
- [96] Martinez, J.; Lagioia, R.: *Experience performing Infrared thermography in the maintenance of distribution utility*. Proceedings of the 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2007), Wien, 2007
- [97] Bagavathiappan, S.; Lahiri, B. B.; Saravanan, T. et al.: *Infrared Thermography for Condition Monitoring - A Review*. Infrared Physics & Technology, Volume 60, pp. 35-55, 2013

- [98] Göbelhaider, J.: *Die Spießlose Erdungsprüfung*. In: Fachzeitschrift "de" - Der Elektro- und Gebäudetechniker. Ausgabe 5, S. 34-36, 2011
- [99] VDI/VDE 2878 Blatt 2: *Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung - Elektroanlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Mai 2015
- [100] Bourier, G.: *Beschreibende Statistik*. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, 2014
- [101] Knetsch, T.: *Unsicherheiten im Ingenieurberechnungen*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, 2003
- [102] Sentz, K.; Scott, F.: *Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory*. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, Report SAND2002-0835, 2002
- [103] Ayyub, B. M.; Klir, G. J.: *Uncertainty Modeling and Analysis in Engineering and the Sciences*. Boca Raton, Florida: Chapman and Hall/CRC, 2006
- [104] Barthel, R.; Thierfeldt, S.: *Vergleichende Betrachtung der probabilistischen/stochastischen und deterministischen Modellierung von Expositionen im Hinblick auf die Belastbarkeit des Modellergebnisses und die Anforderung an die Qualität der Eingangsdaten - Vorhaben 3609S50002*. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.), Salzgitter, 2015
- [105] Zio, E.; Pedroni, N.: *Literature review of methods for representing uncertainty*. Toulouse (France): CSI - Fondation pour une Culture de Sécurité Industrielle, 2013
- [106] Schlarb, S.: *Unscharfe Validierung strukturierter Daten*. Dissertation, Universität zu Köln, Philosophische Fakultät, 2007
- [107] Spreckelsen, C.; Spitzer, K.: *Wissensbasen und Expertensysteme in der Medizin*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [108] Hester, P.: *Epistemic Uncertainty Analysis: An Approach Using Expert Judgment and Evidential Credibility*. International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, 2012
- [109] Shafer, G.: *A mathematical theory of evidence*. London: Princeton University Press, 1976.
- [110] Dempster, A. P.: *Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping*. The Annals of Mathematical Statistics, Volume 38, Number 2, pp. 325-339, 1967
- [111] Spies, M.: *Unsicheres Wissen : Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 1993

- [112] Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [113] Martin, A.; Osswald, C.; Dezert, J. et al.: *General combination rules for qualitative and quantitative beliefs*. In: *Journal of Advances in Information Fusion* 3, pp. 67-89, 2008
- [114] Smarandache, F.: *An In-Depth Look at Information Fusion Rules and the Unification of Fusion Theories*. Invited speech at NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2004
- [115] Yager, R. R.: *On the Dempster-Shafer Framework and New Combination Rules*. In: *Information Sciences*. Volume 41, Issue 2, pp. 93-137, 1987
- [116] Dubois, D.; Prade, H.: *Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures*. In: *Computational Intelligence*. Volume 4, Issue 3, pp. 244-264, 1988
- [117] Pawlowski, E.; Zdrallek, M.; Tabke, T. et al.: *System-Approach For Realistic Condition Assessment of High-Voltage Gas-Insulated Substations*. Proceedings of the 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), Lyon, 2015
- [118] Wirtz, M.; Caspar, F.: *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität*. Göttingen: Hogrefe Verlag, 2002
- [119] Obergünner, M.: *Bewertung und Optimierung des Instandhaltungsaufwands elektrischer Verteilungsnetze*. Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 102, Aachen, 2005
- [120] Pawlowski, E.; Zdrallek, M.; Tabke, T. et al.: *Validation of a new condition assessment approach for gas-insulated substations (GIS)*. Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Pilsen, Czech Republic, 2015
- [121] Tietze, J.: *Einführung in die Finanzmathematik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [122] Baumann, C.; Geschermann, K.; Hüttenrauch, J. et al.: *Nutzen von Smart-Grid-Konzepten unter Berücksichtigung der Power-to-Gas-Technologie*. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Studie DVGW G3-03-12, Aachen, Freiberg, Karlsruhe, Wuppertal, 2014

# 10 Formelzeichen und Abkürzungen

## Formelzeichen und Symbole

$a$	Hauptinspektionsteil
$\alpha$	Risikoneigung des Auswertenden
$A, \bar{A}$	Aussage, Gegenaussage
$A_n$	Aussage
$Bel(A)$	Glaubensgrad ( <i>degree of belief</i> )
$Bel_i(A)$	Glaubensgrad eines Inspektionpunktes $i$
$Bel_N(A)$	Glaubensgrad (Instandhaltungsbedarf) einer Netzstation
$Bel_{N,E}(A)$	Glaubensgrad (Erneuerung) einer Netzstation
$B_i$	Bewertungspunkt des Inspektionpunktes $i$
$B_{\max}$	maximal mögliche Bewertung des Inspektionpunktes $i$
$c$	zeitlicher Korrekturfaktor
$GB_i$	gewichte Bewertung des Inspektionpunktes $i$
$G_{\text{HIT},a}$	Gewichtung eines Hauptinspektionsteils $a$
$G_i$	Gewichtung des Inspektionpunktes $i$
$h$	Anzahl Hauptinspektionsteile $a$
$i$	Inspektionsteil
$I$	Stromstärke
$i_z$	Kalkulationszinssatz
$K_0$	Barwert der IH-Maßnahmenkosten
$K_t$	Anfallende IH-Maßnahmenkosten zum Zeitpunkt $t$
$MAD$	mittlere absolute Abweichung
$m$	Massezahl bzw. Basismaß
$m_i(A)$	Massezahl eines Inspektionpunktes $i$
$m_{i,t_n}(A)$	Massezahl eines Inspektionpunktes zum Zeitpunkt $t_n$
$m_{i,t_0}(A)$	Massezahl eines Inspektionpunktes bezogen auf den Zeitpunkt $t_0$
$n$	Anzahl der Merkmale
$n_a$	Anzahl der bewerteten Inspektionsteile im Hauptinspektionsteil $a$
$\emptyset$	Leere Menge
$\Theta$	Wahrnehmungsrahmen der Evidenz-Theorie

$p$	Prozent
$p(A), p(\bar{A})$	Eintrittswahrscheinlichkeiten
$p_i(\text{Mangel})$	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Mangels beim Inspektionpunkt $i$
$p_z(\text{Mangel})$	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Mangels für das Gesamtbetriebsmittel
$Pl(A)$	Plausibilitätsgrad ( <i>degree of plausibility</i> )
$Pl_i(A)$	Plausibilitätsgrad eines Inspektionpunktes
$P\ddot{U}$	prozentuale Übereinstimmung
$Q$	Wärmemenge
$R$	Elektrischer Widerstand
$R_{SK}$	Relationsgröße (Sichtkontrolle)
$R_M$	Relationsgröße (Messtechnik)
$t$	Zeit
$T$	Teilmenge des Wahrnehmungsrahmens der Evidenz-Theorie
$T (^{\circ}\text{C})$	Temperatur
$t_o$	Zeitpunkt der Zustandsbewertung
$U$	Unsicherheit
$\tilde{x}$	Median
$\bar{x}$	Mittelwert
$x_i$	Merkmalsausprägung
$Z$	Zustandsindex (konventionell)
$Z_{IP,i}$	Zustandsindex des Inspektionpunktes $i$
$Z_{HIT,a}$	Zustandsindex des Hauptinspektionsteil a (konventionell)
$Z_{HIT,a,norm}$	normierter Zustandsindex des Hauptinspektionsteils a (konventionell)
$Z_N(A)$	Zustandskennziffer einer Netzstation (Evidenz-Theorie)
$Z_{N,E}(A)$	Zustandskennziffer (Erneuerung) einer Netzstation (Evidenz-Theorie)
$Z_{norm}$	normierter Zustandsindex (konventionell)
$\forall$	Allquantor ( <i>für alle</i> )
$\oplus$	Verknüpfungsoperator

Nicht aufgeführte Formelzeichen und Symbole oder abweichende Definitionen mit abschnittsweiser Gültigkeit werden im Text erläutert.

## Abkürzungen

AHP	<i>Analytic Hierachy Process</i>
BGV	Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
F&E	Forschung und Entwicklung
FGH	Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft
HIT	Hauptinspektionsteil
HS	Hochspannung
HH	Hochspannungs-Hochleistung
IH	Instandhaltung
ISO	International Organization for Standardization
KNN	Künstliche Neuronale Netze
MRT	Magnetresonanztomografie
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
NH	Niederspannungs-Hochleistung
QS	Qualitätssicherung
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
TE	Teilentladung
TEV	<i>Transient Earth Voltage</i> (transiente Ableitsspannungen)
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDN	Verband der Netzbetreiber





# 11 Anhang

## 11.1 Inspektions-Checkliste für eine Netzstation (Beispiel)

- Inspektions-Checkliste Netzstation (Seite 1)

**Kundenanschrift**

Name:  
 Straße:  
 PLZ Ort:  
 Telefon / Fax:



**ZUSTANDSBERICHT**

Kunde:		Ort:	
Stationsname:		Datum:	
Monteur:		Unterschrift:	

**Gesamtzustand:**     gut     schlecht  
                            mittel     kritisch

**Stationsbauform:**     Kompaktstation (K)  
                                    Gebäudestation (G)  
                                    Maststation (M)

Zustand von:	Bewertung						Bemerkungen	
	1	2	3	4	0	∅		
<b>Außenanlage der Station</b>							Vorschlag IH-Maßnahme	Freitext
Zugänglichkeit, Wege, Flächen								
Anstrich, Putz, Fassade, Gehäuse								
Fundament								
Bewuchs der Station								
Dach, Dachentwässerung								
Lüftungsgitter, Dachentlüftung								
Lichtschächte, Entwässerung								
Türen, Türfeststeller, Revisionsöffnung								
Schließeinrichtung, Schlüsselkasten								
Beschriftung und Warnschilder								
Mast (Zustand, Standsicherheit)								
Aufstiegshilfe								
Vogelschutzeinrichtung								
<b>Innenraum der Station</b>							Vorschlag IH-Maßnahme	Freitext
Raumklima (Temperatur, Feuchte)								
Be-/Entlüftung, Druckentlastung								
(Not-) Beleuchtung, Steckdosen								
Putz, Anstrich, Wände, Decke								
Fußböden (Innenraum)								
Flucht-/Rettungsweg (innen, außen)								
Panikschloss								
Kabelabdeckung/-schacht								
Erdungsanlage (Sichtkontrolle)								
Sauberkeit (Innenraum)								
Warn- und Hinweisschilder (Gebäude)								
<b>MS-Schaltanlage</b>							Vorschlag IH-Maßnahme	Freitext
Sammelschiene, Isolatoren, Stützer								
Durchführungen								
MS-Schaltgeräte								
Kugelbolzen/Erdungsschalter								
HH-Sicherungen								
SF <sub>6</sub> -Gasdruck (Manometer)								

Bewertung Fristigkeit der Mängelbeseitigung:  
 1 = keine, 2 = langfristig (nächste Inspektion gemäß Zyklus), 3 = kurzfristig (ca. 1 Jahr), 4 = sofort  
 0 = nicht möglich, ∅ = nicht vorhanden

■ Inspektions-Checkliste Netzstation (Seite 2)

**Kundenanschrift**

Name:  
 Straße:  
 PLZ Ort:  
 Telefon / Fax:



**ZUSTANDSBERICHT**

Kunde:		Ort:	
Stationsname:		Datum:	
Monteur:		Unterschrift:	

Zustand von:	Bewertung						Bemerkungen
	1	2	3	4	0	∅	
<b>Fortsetzung MS-Schaltanlage</b>							Vorschlag IH-Maßnahme      Freitext
Gehäuse, Kapselung							
Erdung Gehäuse							
MS-Kabelendverschlüsse							
kap. Spannungsprüfer							
Kurzschlussanzeiger							
Sauberkeit (MS-Schaltanlage)							
Beschriftung							
<b>NS-Verteilung</b>							Vorschlag IH-Maßnahme      Freitext
NH-Sicherung (Abgänge)							
Sicherungsnennströme identisch							
Kenngröße NH-Sicherung							
Dimensionierung Zuleitungsabsicherung							
Berührungsschutz, Abdeckung							
NS-Kabelanschlüsse/-endverschlüsse							
Erdung (NS-Verteilung)							
Beschädigung / Sonstiges							
Sauberkeit (NS-Verteilung)							
Beschriftung, Kennzeichnung							
<b>Zubehör</b>							Vorschlag IH-Maßnahme      Freitext
Halterung Zubehörteile/Schaltstange							
Antriebshebel bzw. Schaltstange							
Erdungs- und Kurzschliefvorrichtung							
Sicherungszange							
Sicherungsaufsteckgriff							
Isolierende Einschubschutzplatten							
Schaltfeldtür-Schlüssel							
MS-Übersichtsschaltplan/Blindschaltbild							
NS-Übersichtsschaltplan							
Reserve-Sicherungen HH/NH							
Feuerlöscher							
Batterieanlage (falls vorhanden)							
Spannungsprüfer							

Bewertung Fristigkeit der Mängelbeseitigung:  
 1 = keine, 2 = langfristig (nächste Inspektion gemäß Zyklus), 3 = kurzfristig (ca. 1 Jahr), 4 = sofort  
 0 = nicht möglich, ∅ = nicht vorhanden

▪ Inspektions-Checkliste Netzstation (Seite 3)

**Kundenanschrift**

Name:  
 Straße:  
 PLZ Ort:  
 Telefon / Fax:



**ZUSTANDSBERICHT**

Kunde:		Ort:	
Stationsname:		Datum:	
Monteur:		Unterschrift:	

Zustand von:	Bewertung						Bemerkungen
	1	2	3	4	0	∅	
<b>Verteiltransformator</b>							
• <b>Trafo 1</b> <input type="checkbox"/> Öl-Transformator <input type="checkbox"/> Hermetiktransformator (Öl) <input type="checkbox"/> Gießharztransformator							
Abschränkung							
Trafo-Gehäuse (Anstrich, Zustand)							
Trafofeststeller							
Endverschlüsse, Verbindungen							
Erdungsfestpunkte MS-seitig							
Erdungsfestpunkte NS-seitig							
Erdung (Trafogehäuse)							
Ölstand							
Öldichtigkeit							
Ölauffangwanne, Gewässerschutzbox							
Temperatur (Transformator)							
Sauberkeit (Transformator)							
PCB-Bericht							
• <b>Trafo 2 (falls vorhanden)</b> <input type="checkbox"/> Öl-Transformator <input type="checkbox"/> Hermetiktransformator (Öl) <input type="checkbox"/> Gießharztransformator							
Abschränkung							
Trafo-Gehäuse (Anstrich, Zustand)							
Trafofeststeller							
Endverschlüsse, Verbindungen							
Erdungsfestpunkte MS-seitig							
Erdungsfestpunkte NS-seitig							
Erdung (Trafogehäuse)							
Ölstand							
Öldichtigkeit							
Ölauffangwanne, Gewässerschutzbox							
Temperatur (Transformator)							
Sauberkeit (Transformator)							
PCB-Bericht							

**Besondere Hinweise:** \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Datum :** \_\_\_\_\_ **Unterschrift :** \_\_\_\_\_

Bewertung Fristigkeit der Mängelbeseitigung:  
 1 = keine, 2 = langfristig (nächste Inspektion gemäß Zyklus), 3 = kurzfristig (ca. 1 Jahr), 4 = sofort  
 0 = nicht möglich, ∅ = nicht vorhanden

■ Inspektions-Checkliste Netzstation (Seite 4 – Messwerteingabe)

**Kundenanschrift**  
 Name:  
 Straße:  
 PLZ Ort:  
 Telefon / Fax:



**ZUSTANDSBERICHT**

Kunde:		Ort:	
Stationsname:		Datum:	
Monteur:		Unterschrift:	

Schaltanlagenart	
<b>Einsatz von Messtechnik</b>	

**Thermografie**

Angewendet bei:

**NS-Schaltanlage** → Bewertung

Auffälligkeit an:

- NH-Sicherung (Abgänge)
- Zuleitungsabsicherung
- Kabelanschlüsse
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
T [°C]	ΔT [K]	Bemerkung:	
I [A]:	L1:	L2:	L3:
Abgang:			

**MS-Schaltanlage** → Bewertung

Auffälligkeit an:

- Schaltanlage
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
T [°C]	ΔT [K]	Bemerkung:	
Abgang:			

**Verteiltransformator** → Bewertung

Auffälligkeit an:

- Transformator
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
T [°C]	ΔT [K]	Bemerkung:	

**Teilentladungsmessung**

Angewendet bei:

**MS-Schaltanlage** → Bewertung

Auffälligkeit an:

- Durchführung
- Kabelendverschlüsse
- Sammelschiene
- MS-Schaltgeräte
- HH-Sicherung
- Sonstiges: \_\_\_\_\_
- TEV
- Parabolspiegel
- Schallaufnehmer

<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
Pegel [dB <sub>μV</sub> ]	Bemerkung:		
Abgang:			

**Verteiltransformator** → Bewertung

Auffälligkeit an T1:

- Endverschlüsse
- Anschlüsse
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
Pegel [dB <sub>μV</sub> ]	Bemerkung:		

Auffälligkeit an T2:

- Endverschlüsse
- Anschlüsse
- Sonstiges: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
Pegel [dB <sub>μV</sub> ]	Bemerkung:		

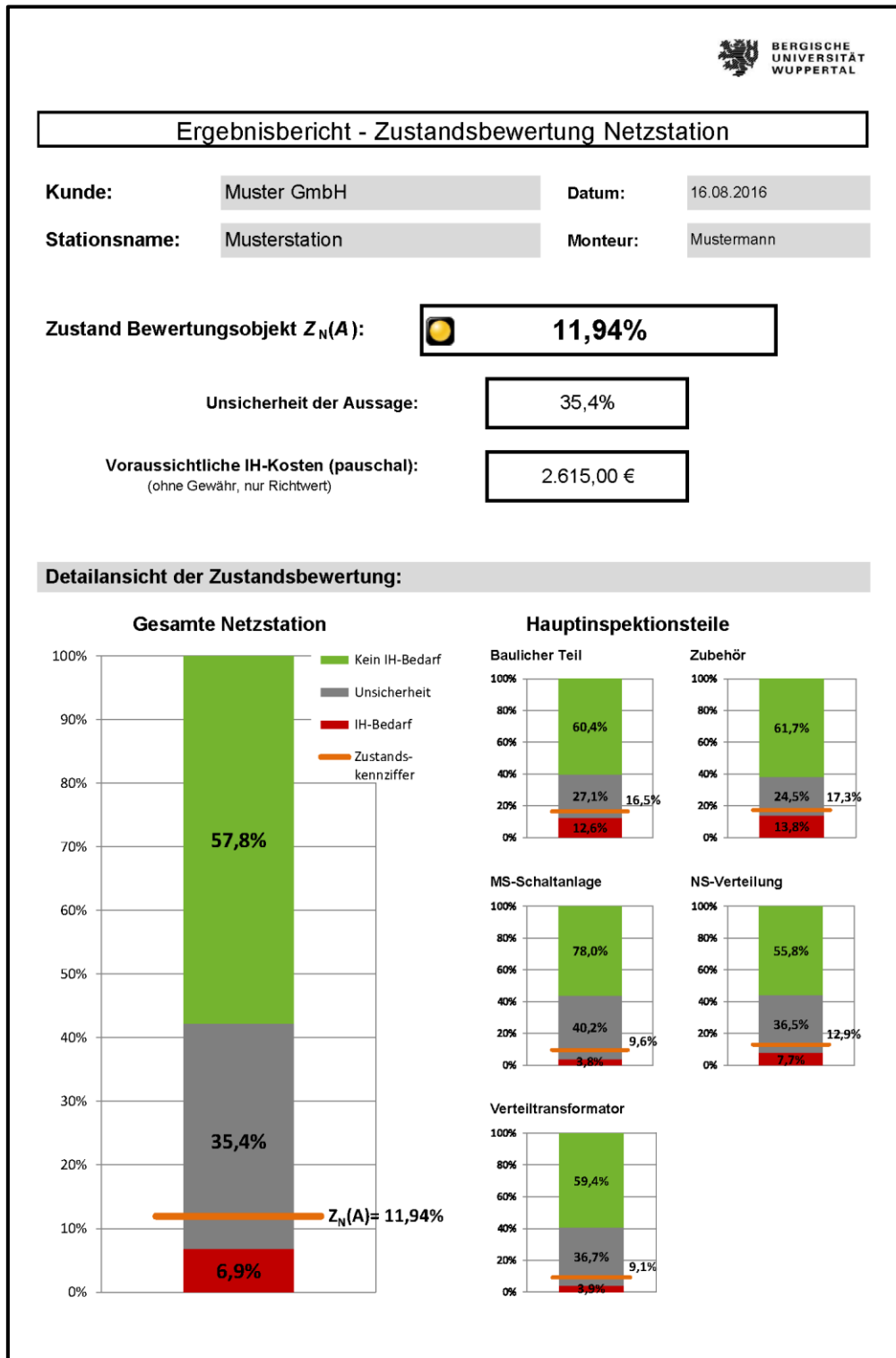
**Erdungsmessung**

Erdungsmessung


I [A]	R [Ω]	Bemerkung:

## 11.2 Abschlussdokumentation Zustandsbewertung von Netzstationen

- Übersicht der Zustandsgrößen für das Asset Management



▪ Übersichtliche Auflistung der anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen



**Ergebnisbericht - Zustandsbewertung Netzstation**

<b>Kunde:</b>	Muster GmbH	<b>Datum:</b>	16.08.2016
<b>Stationsname:</b>	Musterstation	<b>Monteur:</b>	Mustermann

**Auflistung festgestellter Mängel**

	Inspektionspunkt Vorgeschlagene IH-Maßnahme (IH-Personal)	Bemerkung (Freitext)	Note <i>B<sub>i</sub></i>
1.	<b>Zugänglichkeit, Wege, Flächen</b> kleinere Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten	Zuwegung Pflaster abgesackt	<b>3</b>
2.	<b>Anstrich, Putz, Fassade, Gehäuse (außen)</b> Ausbesserungsmaßnahmen - Putz platzt ab		<b>3</b>
3.	<b>Bewuchs der Station</b> Stationsgrundstück pflegen, mähen	leichter Bewuchs der Station	<b>2</b>
4.	<b>Türen, Türfeststeller, Revisionsöffnung</b> Korrosionsschutzmaßnahmen (z. B. Anstrich)	Zugangstür korrodiert	<b>3</b>
5.	<b>(Not-) Beleuchtung, Steckdosen</b> Beleuchtung erneuern / nachrüsten	eine Lampe defekt	<b>3</b>
6.	<b>Putz, Anstrich, Wände, Decke (innen)</b> kleinere Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten	leichte Putzabplatzungen	<b>2</b>
7.	<b>Fußböden (Innenraum)</b> kleinere Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten	eine Doppelbodenplatte wackelt	<b>2</b>
8.	<b>Sauberkeit (Innenraum)</b> Reinigungsmaßnahmen in der Station		<b>2</b>
9.	<b>Warn- und Hinweisschilder (Gebäude)</b> Warn- und Hinweisschilder erneuern	5-Sicherheitsregeln ausgeblichen, aber etwas lesbar	<b>3</b>
10.	<b>Gehäuse, Kapselung (MS)</b> Zellentüren gangbar machen	eine Schaltfeldtür klemmt	<b>2</b>
11.	<b>Sauberkeit (MS-Schaltanlage)</b> Reinigungsmaßnahmen an der MS-Schaltanlage		<b>3</b>
12.	<b>Ölauffangwanne, Gewässerschutzbox</b> Schutzanstrich erneuern		<b>2</b>
13.	<b>Sauberkeit (Transformator)</b> Reinigungsmaßnahmen am Transformator		<b>3</b>
14.	<b>Berührungsschutz, Abdeckung (NS-Verteilung)</b> Berührungsschutz erneuern / nachrüsten	nicht vorhanden	<b>2</b>
15.	<b>Sauberkeit (NS-Verteilung)</b> Reinigungsmaßnahmen an der NS-Verteilung		<b>3</b>
16.	<b>Erdungs- und Kurzschließvorrichtung</b> Erdungs- und Kurzschließvorrichtung erneuern / nachrüsten	beschädigt	<b>3</b>