

Entwicklung und Anwendung eines typunabhängigen, minimalinvasiven Zustandsbewertungsverfahrens für SF₆-Hochspannungsschaltanlagen

von der Fakultät für
Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik
der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von
Thorsten Tabke M. Sc.
aus Moers

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Neumann

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Mai 2017

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20170714-135310-3

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20170714-135310-3>]

Danksagung

Diese Arbeit konnte entstehen, weil Menschen an mich und an dieses Thema – sowohl im wissenschaftlichen als auch im unternehmerischen Sinne – geglaubt haben. Einer langen Zeit der Vorbereitung folgte eine aufregende Zeit der Durchführung, ein Weg, den ich gemeinsam mit Professor Dr. Markus Zdrallek gehen durfte, dem ich nicht nur für die Möglichkeit der Promotion, sondern auch für die stete Zielfokussierung sehr dankbar bin. Als wichtigen Initiator der Arbeit möchte ich Professor Dr. Peter Birkner danken. In seiner ehemaligen Funktion als technischer Geschäftsführer der RWE Rhein-Ruhr Netzservice GmbH hat er allen Widerständen zum Trotz die Basis für das Forschungsprojekt gelegt, dessen Erkenntnisse nun in dieser Arbeit zusammenfließen können. Meinen ganz besonderen Dank will ich auch Dr. Stefan Küppers, heute technischer Geschäftsführer der Westnetz GmbH, aussprechen, der mit einer beeindruckenden Geduld und Ausdauer die nötigen Geldmittel zur Beschaffung von Messmitteln, Software und Laborzeiten zu dieser Arbeit beigetragen hat. Für die Diskussionen, Anregungen und das geschenkte Interesse möchte ich Thomas Marx, Dr. Ulrich Küchler, Hans-Jürgen Wermers und insbesondere Erik Pawlowski Danke sagen. Sehr froh bin ich auch über eine recht zufällige Begegnung mit Professor Dr. Uwe Neumann von der Hochschule Hamm-Lippstadt, der als erfahrener Assetmanager elektrischer Netze mit kritischen Fragen zu meinem Problem- und Lösungsbewusstsein beigetragen hat. Dafür und für die Übernahme des zweiten Gutachtens vielen Dank! Vergessen seien auch nicht die Studenten, die in Form von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten direkt und indirekt zu dieser Arbeit beigetragen haben, sowie Christoph Rezun und meine Eltern, die mich tatkräftig bei den Korrekturen der Dissertation unterstützt haben. Auch euch ein großes Dankeschön.

Abschließend – und daher an der Stelle, die sich ein vielleicht hierhin verirrter Leser am besten merken kann – will ich meiner Frau Diana und meinen Kindern Mika, Polly, Mathilda und Greta Danke sagen. Für das, was ihr getan habt, und für das, was ihr nicht getan habt, damit ich meine Ziele erreichen kann!

Thorsten Tabke, im Januar 2017

Vorwort

Zustandsbewertungen stellen eine wichtige Grundlage für Assetentscheidungen über Instandhaltungs- und Erneuerungsbedarfe in einer technischen Infrastruktur dar, die im Spannungsfeld zwischen minimalen Kosten und maximaler Verfügbarkeit getroffen werden müssen. Die Zustandsbewertung ist abhängig von unterschiedlichsten Einflüssen, so dass die Ausgestaltung eines Zustandsbewertungsverfahrens in Wechselwirkung mit den zu bewertenden Objekten und den erhältlichen zustandsrelevanten Informationen steht.

Die zu bewertenden Objekte dieser Arbeit sind eine konkrete Gruppe von SF₆-Hochspannungsschaltanlagen, die aus insgesamt 198 Schaltfeldern besteht. Allgemein stellen SF₆-Hochspannungsschaltanlagen eine besondere Bauform von Hochspannungsschaltanlagen dar, da alle Betriebsmittel, wie beispielsweise Schaltgeräte und Wandler, innerhalb einer hermetisch verschlossenen metallischen Kapselung installiert sind. Innerhalb der Kapselung befindet sich reines SF₆-Gas. SF₆ – Schwefelhexafluorid – hat sehr gute dielektrische Eigenschaften und erlaubt es daher, Hochspannungsanlagen wesentlich kompakter als in luftisolierter Ausführung zu bauen.

SF₆-Hochspannungsschaltanlagen haben lange Lebensdauern und werden seit über 50 Jahren im Hochspannungsverteilstromnetz für unterschiedliche Schaltaufgaben eingesetzt. Daher zeichnen sich Kollektive von SF₆-Hochspannungsschaltanlagen in der Regel durch unterschiedliche Fabrikate, also durch technologische und bauliche Inhomogenität aus. Hinzu kommen weitere Inhomogenitätsaspekte wie Art und Umfang von verfügbaren zustandsrelevanten Daten. Beschaffungsmöglichkeiten sowie Aktualität und Aussagekraft zustandsrelevanter Daten können sich stark unterscheiden. Dies liegt zum einen an der metallischen Kapselung, die die Anwendung diagnostischer Methoden erschwert und zum anderen an den Einsatzschwerpunkten von SF₆-Hochspannungsschaltanlagen. Diese Einsatzschwerpunkte sind insbesondere im Industrie- und Großstadtbereich, die beide hohe Verfügbarkeitsanforderungen und daher eingeschränkte Freischaltmöglichkeiten haben. Folglich sind viele Methoden der Zustandsdatenbeschaffung nicht oder nur eingeschränkt nutzbar.

Diese Arbeit zeigt, wie die angesprochenen Inhomogenitäten durch die Kombination eines funktionsorientierten Modellierungsansatzes mit Datenverarbeitungsregeln der Evidenztheorie aufgelöst werden können. Die erzeugten Bewertungsergebnisse sind

trotz technischer Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagenfabrikaten miteinander vergleichbar und ermöglichen damit die Priorisierung von Handlungsmaßnahmen insbesondere bei Budgetrestriktionen. Die Anwendung des Bewertungsverfahrens ist an 66 Schaltfeldern der oben genannten SF₆-Hochspannungsschaltanlagen erfolgt, sodass die Einsatzfähigkeit und Praxisnähe des entwickelten Verfahrens realitätsgerecht demonstriert werden kann. Außerdem kann gezeigt werden, dass auch ältere Anlagen noch gute Zustandsergebnisse aufweisen und die individuelle, typunabhängige Betrachtung eine bessere Ausnutzung der Anlagen und damit wirtschaftliche Vorteile für den Netzbetreiber ermöglicht.

Aufgrund der Verfügbarkeitsanforderung der Anlagen kommt der minimalinvasiven Vorgehensweise, also einer Vorgehensweise, die nur geringe Rückwirkungen auf den Anlagenbetrieb hat, eine besondere Bedeutung zu. Diese wird anhand verschiedener diagnostischer Verfahren näher beschrieben und mit anderen Informationsquellen verglichen. Durch beispielhaft gezeigte Anwendungsmöglichkeiten der Zustandsergebnisse darf der Leser von der Entwicklung bis zur Anwendung eine umfangreiche Variantenbeschreibung eines typunabhängigen, minimalinvasiven Zustandsbewertungsverfahrens für SF₆-Hochspannungsschaltanlagen erwarten.

Preamble

Condition assessments are an important basis for decisions which concern maintenance and demand for replacements based on achieving maximal availability to minimal costs. The condition assessments depend on several aspects, accordingly the design of the assessment method and the assessed objects as well as the available condition relevant data which are interrelated.

During the work on this project a certain group of SF₆-high voltage substations (gas insulated substations – GIS) with 198 bays were assessed. Generally, GIS are a special design of substations, because all equipment like switchgears and instrument transformers work inside a metallic enclosure which is filled with SF₆ gas. SF₆ – sulfur hexafluoride – has very good dielectrical properties and allows to construct GIS which are significant smaller than air insulated substations.

GIS have a life expectancy of more than 50 years and are used for different switching tasks. Thus groups of GIS often could be characterized by technical and structural in-

homogeneity due to different types in use. Sourcing possibilities, actuality and significance of incoming condition relevant data are additional inhomogeneity aspects. In particular, the sourcing possibilities are limited due to very high availability requirements during operation in industrial- and urban areas.

This work shows how inhomegenities can be solved by a function oriented modelling approach utilizing data processing rules of the evidence-theory. The generated assessment results allow comparability between the different types and therefore the maintenance or replacement decisions can be prioritized objectively taking into account budget restrictions. The application of assessment measures was conducted with 66 bays of above mentioned substations which allows concluding practical utilizability in the field. Moreover, it is shown that even older substations show a good condition and the individual, type independent assessment leads to a better utilization and therefore economic advantages for distribution system operators.

Due to availability requirements of the GIS the minimal invasive approach is of special importance. This is described in more detail by means of diagnostic processes with other information sources. The reader may expect the comprehensive description of a type independent, minimal invasive condition assessment method for GIS from development to the application on use cases.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Vorwort.....	III
Preamble	IV
Inhaltsverzeichnis	VII
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
1.3 Einordnung und Struktur der Arbeit	8
2 Zustandsmodell für SF₆-Hochspannungsschaltfelder	11
2.1 Funktionsorientierter Modellierungsansatz	11
2.1.1 Grundlagen und Begrifflichkeiten.....	11
2.1.2 Funktionsstruktur von SF ₆ -Hochspannungsschaltfeldern.....	14
2.1.3 Prüfkriterien zur Funktionsbeurteilung	21
2.1.4 Beurteilungsstufen für Prüfkriterien	25
2.2 Diagnoseverfahren	27
2.2.1 Suche nach geeigneten Diagnoseverfahren.....	27
2.2.2 Auswahlkriterien für geeignete Diagnoseverfahren.....	28
2.2.3 Verwendete Diagnoseverfahren	30
2.3 Mathematische Modellbildung	42
2.3.1 Begriffe und Definitionen	42
2.3.2 Einführung in die Evidenztheorie	43
2.3.3 Berücksichtigung des Hinweisers	45
2.3.4 Kombination von Bewertungsergebnissen.....	47
2.3.5 Aggregation von Bewertungsergebnissen.....	50
2.3.6 Bestimmung des Zustandsindex.....	54
2.3.7 Berücksichtigung nicht vorhandener Hauptfunktionen	55
2.4 Entwicklung von Massezahlen	59
2.4.1 Umfang der Massezahlbestimmung.....	59
2.4.2 Quellen für Unsicherheiten	61
2.4.3 Standardisierte Massezahlverläufe.....	63
2.4.4 Bestimmung von Massezahlen am Beispiel der SO ₂ -Messung	66

2.5	Abschließende Betrachtungen zum Zustandsbewertungsmodell.....	70
3	Anwendung im realen Schaltfeldkollektiv	73
3.1	Softwaregestützte Umsetzung des Zustandsbewertungsverfahrens.....	73
3.1.1	Grundsätzlicher Aufbau.....	73
3.1.2	Eingabe zustandsrelevanter Informationen	74
3.1.3	Ausgabe der Zustandsergebnisse.....	77
3.2	Betrachtung des realen Schaltfeldkollektivs	79
3.2.1	Gesamtstruktur	79
3.2.2	Störungsaufkommen.....	82
3.2.3	Ermittelte Zustandsergebnisse.....	84
3.3	Möglichkeiten und Grenzen des Zustandsbewertungsverfahrens.....	94
4	Verwendung der Zustandsergebnisse.....	99
4.1	Assetmanagement	99
4.1.1	Zustandsorientierte Erneuerungsstrategie.....	99
4.1.2	Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie	101
4.1.3	Operationalisierung von Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategie	104
4.2	Assetservice.....	105
4.3	Aufwandsbetrachtung	109
4.3.1	Leistungsinhalt und Dauer der minimalinvasiven Zustandsbewertung... ..	110
4.3.2	Ausbildung von Zustandsbewertungspersonal	112
5	Zusammenfassung und Ausblick	115
6	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	119
7	Anhang.....	127
7.1	Verwendete Abkürzungen.....	127
7.2	Verwendete Formelzeichen.....	128
7.3	Prüfkriterien, Gewichtungsfaktoren und Massezahlen	131

Einleitung

Betreiber elektrischer Energieversorgungsnetze streben einen optimalen Ausgleich zwischen Maximierung der Versorgungssicherheit und Minimierung der Netzkosten unter Berücksichtigung von Verbraucherfreundlichkeit, Effizienzsteigerung und Umweltverträglichkeit an. Dieser Ausgleich findet in allen Betriebs- und Geschäftsprozessen der Netzbetreiber Berücksichtigung. Insbesondere wirken sich Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen auf das Optimierungsergebnis aus, da sie in der Regel mit kapitalintensiven Maßnahmen verbunden sind. Dies wird in technischen Normen wie beispielsweise der DIN 31051 zur Instandhaltung sowie in internationalen Standards des Managements (zum Beispiel ISO 55000) aufgegriffen. Folglich bündeln viele Netzbetreiber infrastrukturelle Entscheidungen über Instandhaltung und Erneuerung in sogenannten Assetmanagementabteilungen.

Ein besonders werthaltiges Infrastruktursegment stellen die sehr kompakten, metallgekapselten SF₆-gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen¹ dar. Dies begründet sich dadurch, dass sie hohen Anschaffungskosten unterliegen und bauartbedingt häufig an wichtigen Knotenpunkten verschiedenste Schaltaufgaben übernehmen. Seit der Entwicklung dieser Anlagenbauform in den 1960er Jahren sind die Lebensdauererwartungen kontinuierlich gestiegen. Noch heute befinden sich Anlagen der ersten Generation im Einsatz, was zu einer hohen Vielfalt an unterschiedlichen Fabrikaten und Technologien geführt hat. Fehler an SF₆-Hochspannungsschaltfeldern führen oft zu starken Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung und das Instandhaltungsbudget, da wegen der metallischen Kapselung, der kompakten Bauform sowie der geringeren Personal- und Ersatzteilverfügbarkeit - verglichen mit konventionellen luftisolierten Schaltanlagen - Reparaturen deutlich länger dauern und mit wesentlich höheren Kosten verbunden sind.

Zustandsorientierte Ansätze zur Entscheidungsfindung im Assetmanagement sind heute weit verbreitet. Allerdings stellt die benötigte Ausprägung des Zustandsbewertungsverfahrens insbesondere für SF₆-Hochspannungsschaltfelder hohe Anforderungen an den Anwender. Zum einen sind verschiedene diagnostische Methoden verfügbar, zum anderen sind viele SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektive hinsichtlich Fabrikat und Schalt-

¹ Eine Schaltanlage besteht aus mehreren Schaltfeldern. Einzelne Schaltaufgaben können einzelnen Schaltfeldern zugeordnet werden. Daher ist für die Versorgungssicherheit insbesondere die Betrachtung der einzelnen Schaltfelder wichtig.

aufgabe sehr inhomogen. Zur Bewältigung dieser Anforderungen leistet diese Arbeit einen Beitrag.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Grundlage dieser Arbeit bildet das 110-kV-Hochspannungsverteilstromnetz eines deutschen Verteilnetzbetreibers, in dem eine konkrete Gruppe von 198 metallgekapselten SF₆-Hochspannungsschaltfeldern zum Zweck der Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung untersucht wird. Sie

- besitzen einen Wiederbeschaffungswert von insgesamt etwa 50 Mio. €,
- sind zu 60% älter als 30 Jahre,
- bestehen aus 17 verschiedenen Fabrikaten von sechs verschiedenen Herstellern,
- haben Einsatzschwerpunkte in Großstädten, bei Industriekunden sowie Kraftwerkseinspeisungen und
- zeigen ein sehr niedriges Störungsaufkommen.

Diese Schaltfelder, als Teil der elektrischen Versorgungsinfrastruktur der Öffentlichkeit, unterliegen regulatorischen Anforderungen, die sich aus dem Energiewirtschaftsgesetz [EnWG05, §12] und der Anreizregulierungsverordnung [ARegV07; PwC07, S. 244 ff.] ableiten lassen:

- a. Fähigkeit des Netzes, die Nachfrage nach elektrischer Energie zu erfüllen
- b. Beitrag zur Versorgungssicherheit durch Zuverlässigkeit
- c. Beitrag zur Senkung der Energiekosten durch Senkung der Netzkosten

Im Fokus dieser Arbeit stehen die Punkte b. und c. bezogen auf das bereits skizzierte Kollektiv der SF₆-Hochspannungsschaltfelder. Folglich stellt sich für den Netzbetreiber ein Spannungsfeld zwischen „Versorgungssicherheit“ und „Kostensenkung“ ein, da mit Erhöhung der Versorgungssicherheit die Kosten steigen bzw. Kostensenkungen zu einem höheren Ausfallrisiko führen [KFH+15; BL04] können. Dieses Spannungsfeld wird in der Anreizregulierung [ARegV07] in Form der sogenannten Q-Komponente aufgegriffen. Die Q-Komponente ist ein Effizienzmerkmal, welches durch die zuständige Regulierungsbehörde bewertet wird, und kann sich für den Netzbetreiber negativ auf die regulatorisch erlaubte Erlösbergrenze auswirken. Die regulatorischen Mechanismen sind für vorliegende Arbeit nicht von Interesse und können beispielsweise in [PwC07]

nachgelesen werden. Im Folgenden soll sich der Frage gewidmet werden, wie der Netzbetreiber sich im Spannungsfeld zwischen Kosten und Zuverlässigkeit der Effizienzanforderung bewegen kann.

Kosten lassen sich durch Reduzierung von Instandhaltungstätigkeiten und Verlängerung von Laufzeiten leicht senken. Allein durch Senkung der Erneuerungskosten können bereits erhebliche Einsparungen erzielt werden, was direkt zur Senkung von Netzkosten beiträgt. Allerdings folgt dieser Ausnutzung der Kosteneinsparpotenziale eine negative Auswirkung auf die Versorgungssicherheit, also ein erhöhtes Betriebsunterbrechungs- oder Ausfallrisiko [CD13]. Als Grundlage zur Bestimmung des Ausfallrisikos wird in den einschlägigen technischen Normen [DIN14a; DIN12a; DIN10] der Begriff des Zustands für die Beurteilung einer „(Betrachtungs-) Einheit“ genutzt². Ausgehend vom Istzustand werden Abnutzungsprognosen erstellt und damit ein Ausfallrisiko bestimmt. Das Prinzip ist normativ verankert und muss für den jeweiligen Anwendungsfall praktisch umgesetzt werden.

Die einfachste Möglichkeit zur Bestimmung eines Fehlzustands besteht im Abwarten eines Ausfalls^{3,4}. Einem funktionierenden Schaltfeld wird folglich ein guter Zustand unterstellt und einem nicht funktionierenden Schaltfeld ein schlechter Zustand zugesprochen. Für diese Strategie spricht das (bisher) geringe Störungsaufkommen. Dagegen sprechen die erfahrungsgemäß hohen Reparaturkosten und Ausfalldauern im Schadensfall [BMW+86].

Um einen Zustand zu prognostizieren, muss eine zeitliche Betrachtung zur Zustandsbestimmung hinzugezogen werden. Dies kann durch eine direkte Kopplung der Betriebsjahre⁵ an den Grad des Zustands realisiert werden. In dieser Betrachtungsweise gilt: Je jünger ein Schaltfeld, desto besser ist der Zustand. Allerdings bestätigen Betriebserfahrungen im betrachteten Schaltfeldkollektiv veröffentlichte Untersuchungen [NRB12a; NRB12b], dass sich der tatsächliche Zustand am erwarteten Lebensende - bei gleicher Instandhaltungsstrategie - fabrikatabhängig unterscheidet. Bisherige statistische Unter-

² Hinweis zum Zustands-Begriff: In DIN 31051 [DIN12a] ist der Begriff Zustand nicht direkt enthalten. Dieser wird indirekt durch die Größe „Abnutzungsvorrat“ beschrieben, für den aber die Kenntnis des „Istzustandes“ erforderlich ist. DIN EN 13306 [DIN10] kennt die Begriffe des „funktionsfähigen Zustandes“ und des „gefährlichen Zustandes“.

³ Begrifflichkeiten werden entsprechend der DIN 31051 [DIN12a] verwendet.

⁴ Diese Vorgehensweise entspräche einer ereignisorientierten Instandhaltungsstrategie [BS11].

⁵ Dies ist z.B. bekannt als zeitbasierte oder zyklische Instandhaltungsstrategie.

suchungen helfen nur wenig, eine quantitative Verbindung zwischen Betriebsdauer und Zustand zu erstellen, da entweder die Datenbasis zu klein [siehe Kapitel 3.2.2] oder nicht nach Fabrikaten differenzierbar ist [Run12; KKF08; Che00]. Daher steht keine ausreichende Datenbasis zur Verfügung, um mit statistischen Mitteln verlässliche Zustandsinformationen für einzelne SF₆-Hochspannungsschaltanlagen abzuleiten. Folglich muss die Zustandsinformation vor Ort am Schaltfeld selbst gewonnen werden.

Die Erhebung einer Zustandsinformation am Schaltfeld kann als technische Diagnostik bezeichnet werden. Diese bedingt den Einsatz von Verfahren und Geräten, die eine möglichst zuverlässige Aussage ohne Zerstörung des Prüflings erlauben [Por96]. Der Anspruch an Zerstörungsfreiheit soll an dieser Stelle noch schärfer gefasst werden: Aufgrund der zu Beginn in diesem Abschnitt genannten Einsatzschwerpunkte muss die Auswirkung auf den Betrieb eines Schaltfeldes durch die Erhebung der Zustandsinformation so klein wie möglich – also minimalinvasiv – ausfallen. Damit besteht eine Einschränkung in der Wahl der diagnostischen Mittel. Weitere Einschränkungen können sich in der Praxis aus dem notwendigen Qualifikationsprofil des Diagnostikers und dem vorhandenen Budget ergeben.

Allein aus der Auswahlmöglichkeit verschiedener diagnostischer Mittel lässt sich eine unterschiedliche Qualität in einer entsprechenden diagnostischen Aussage annehmen. In Folge dessen muss nicht nur eine Diagnose gestellt, sondern dem Diagnoseergebnis auch eine Verlässlichkeit zugeordnet werden. Die (minimalinvasiv gewonnene) zustandsrelevante Information muss also nach ihrer Aussage selbst und nach ihrer Aussagekraft beurteilt werden.

Nach der Erhebung der zustandsrelevanten Informationen müssen die vorhandenen Ergebnisse in geeigneter Weise zusammengefasst werden. Eine geeignete Zusammenfassung berücksichtigt den Informationsadressaten und erlaubt sowohl die Nachvollziehbarkeit des einzelnen Bewertungsergebnisses als auch die Vergleichbarkeit verschiedener Ergebnisse untereinander. Dies stellt eine besondere Herausforderung für das hier betrachtete Schaltfeldkollektiv dar, da die bereits aufgezeigten Inhomogenitäten nach Fabrikat (z.B. nach Antrieben der Leistungsschalter, der Kapselungsart und des SF₆-Gasdrucks) und Funktionsumfang (z.B. ist die Funktionsanforderung an eine Längstrennung eine andere als an ein Kabelschaltfeld) besonders ausgeprägt sind.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass aus derzeitiger Kenntnislage über SF₆-Hochspannungsschaltfelder Kosteneinsparpotenziale durch den Wechsel von einer zeitbasierten in die zustandsorientierte Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategie existieren müssen, welche jedoch quantifiziert werden müssen. Daher ist die Anwendung eines Zustandsbewertungsverfahrens erforderlich. Einschränkungen durch betriebliche (Freischaltmöglichkeiten), technische (Anwendbarkeit bestimmter diagnostischer Verfahren) und organisatorische Grenzen (Personalkapazität) müssen dabei ebenso wie die bereits genannten Inhomogenitäten im betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv berücksichtigt werden. Ein derartiges Verfahren wird in dieser Arbeit entwickelt, angewendet und hinsichtlich seines praktischen Nutzens überprüft.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Für die Zustandserfassung von metallgekapselten SF₆-Hochspannungsschaltanlagen lassen sich zwei wesentliche Vorgehensweisen zur Beschaffung zustandsrelevanter Informationen identifizieren. Die erste Vorgehensweise nutzt statistische Größen, z.B. Fehler- und Erneuerungsraten. Die zweite umfasst die diagnostische Untersuchung mit Hilfe von Messtechnik und visueller Kontrollen. Dabei ist, wie bereits in Kapitel 1.1 aufgezeigt, die Anwendung statistischer Verfahren bei vorliegender Zielsetzung keine Option, da den zugrundeliegenden Daten entweder keine signifikante Verteilung oder aber keine Information über das ausfallverursachende Bauteil zugeordnet werden kann. Folglich ist der tatsächliche Einfluss eines Bauteils, einer Komponente oder einer (Teil-) Funktion für den Zustand der gesamten Betrachtungseinheit nur unzureichend darstellbar. Eine Betrachtung auf Komponentenebenen ist aber notwendig, um neben einer realitätsgerechten Zustandsaussage auch notwendige Instandsetzungsmaßnahmen ableiten zu können [BJZ15; BJZ12; Wel09].

Es sind viele diagnostische Untersuchungsmethoden für Schaltanlagen und -geräte bekannt [OTZ+12; PTZ+14]. Da ein praktischer Ansatz zur Erfassung des Zustandes die Bestimmung von Veränderungen bezogen auf den Neuzustand ist, werden hersteller- bzw. werkseitig eingesetzte Prüfkriterien (sogenannte Typ- oder Stückprüfungen) [Kyn08; DIN12b; DIN09; DIN04; DIN01] bei in Betrieb befindlichen Einheiten wieder in Anwendung gebracht. Zur Untersuchung werden sowohl aus dem Herstellungsprozess bereits bekannte (konventionelle) als auch aufgrund betrieblicher Einschränkungen neue bzw. modifizierte (nicht-konventionelle) messtechnische Methoden verwendet

[Bre04; Neu00; Boe92]. Analog zu den bisher bekannten Häufigkeiten im Störungsaufkommen [Run12; KKF08; Che00] konzentrieren sich die Untersuchungen auf das dielektrische System und die Antriebstechnik der Schaltgeräte [BS11; Küc09]. Folglich beurteilen diagnostische Untersuchungsmethoden in Form von Sichtkontrollen, Funktionskontrollen und Messungen zustandsrelevante Prüfkriterien ([DIN12a] spricht von „Ermittlung bestimmter Merkmalswerte“). Ein Satz an Prüfkriterien kann gegebenenfalls nicht den Anspruch auf eine vollständige Bewertung einer Einheit erfüllen, da betriebliche (z.B. keine Freischaltung), organisatorische (z.B. kein geeignetes Personal) oder sogar technologische Einschränkungen (z.B. keine oder nur eine bedingt geeignete Untersuchungsmethode) existieren [Sch13; BS11]. Damit unterliegt die Bewertung eines Prüfkriteriums einer Unsicherheit, die entweder aus einer nicht durchgeführten, einer „alten“ oder einer Bewertung mit eingeschränkter Aussagekraft resultieren kann [PTZ+15a; PTZ+15b].

Die einzelnen diagnostischen Ergebnisse müssen für die zu bewertende Betrachtungseinheit zusammengefasst werden. Die relevante Betrachtungseinheit zur Zustandsbewertung für diese Arbeit wird als SF₆-Hochspannungsschaltfeld definiert. Diese Abgrenzung ist sinnvoll, da innerhalb eines Schaltfeldes betrieblich geforderte Funktionalitäten gebündelt werden. Das Zustandsbewertungsmodell muss daher zustandsrelevante Prüfkriterien identifizieren und deren Einzelbewertungen ihrer Wirkung nach im Gesamtzustand der Betrachtungseinheit abbilden können. Diese Wirkungszusammenhänge können sowohl nach betriebswirtschaftlichen Kriterien (z.B. Nutzwertanalyse oder Life Cycle Costing), technischen Kriterien (z.B. Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse - FMEA) oder entsprechend ihres funktionalen Zusammenwirkens entwickelt werden [Sch10]. Erfahrungsgemäß sind Kosten zur Zustandsverbesserung vom Typ und vom tatsächlichen Aufbau des Schaltfelds abhängig. Aufgrund der bereits beschriebenen Inhomogenität des betrachteten Schaltfeldkollektivs sind betriebswirtschaftliche Ansätze für ein Zustandsmodell ungeeignet. Auch fehlerbasierte Methoden scheiden für die Modellentwicklung aus. Zum einen ist die Grundgesamtheit an bekannten Fehlern zu klein, zum anderen sind Fehler abhängig von Art und Weise der technischen Realisierung (z.B. Hydraulikantrieb oder Federspeicherantrieb für Leistungsschalter). Der funktionale Modellierungsansatz erlaubt eine Bewertung der für einen Netzbetrieb notwendigen Funktionen unabhängig von eingesetzten Technologien und stellt somit den geeignetsten Ansatz zur Entwicklung eines Zustandsmodelles für das betrachtete Schalt-

feldkollektiv dar. Diese Überlegung für technisch komplexe Systeme wird beispielsweise auch durch [VDI99] gestützt.

Die erzeugten Diagnoseergebnisse müssen nachvollziehbar und festen Regeln folgend zu einer Zustandsbewertung aufgearbeitet werden. Dazu muss das Bewertungsmodell in ein mathematisches Modell überführt werden. Im ersten Schritt sind das Diagnoseurteil und die Qualität des Urteils abzubilden. Für die gemeinschaftliche Abbildung von Aussage und Unsicherheit⁶ stehen zwei grundsätzliche mathematische Konzepte in Form der Evidenztheorie [z.B. Sha76; Dem67] und der Fuzzy-Logik [z.B. Zad65] zur Verfügung. Beiden Konzepten gemeinsam ist, dass eingehende Größen mit Unsicherheit behaftet sein dürfen. Die Evidenztheorie hat aber den signifikanten Vorteil, dass auch fehlende Eingangsgrößen in Form von vollständiger Unsicherheit verarbeitet werden können. Die Unsicherheitsbetrachtung ist vorteilhaft, da die unterschiedliche Qualität, resultierend aus den betrieblichen, organisatorischen und technischen Einschränkungen, dem Informationsadressaten direkt angezeigt werden kann. Weiterhin muss die Bedeutung der einzelnen Informationen für die Zustandsaussage abgeschätzt werden. Diese Bedeutungsfaktoren (allgemeiner: Gewichtungsfaktoren) können mit Hilfe verschiedener Bewertungsmethoden abgeleitet werden. Ein besonders vielversprechender Ansatz ist der Analytisch Hierarchische Prozess (AHP), da dieser den subjektiven Einfluss bei der Festlegung von Gewichtungsfaktoren minimiert [Wel09]. Die Kombination aus Evidenztheorie und Gewichtungsfaktoren ist bereits vereinzelt für Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung angewendet worden [Fei05; FGH01; Neu97].

[Fei05] behandelt die Zustandsmodellierung von Transformatoren und erläutert beispielhaft an einzelnen Messungen und visuellen Inspektionpunkten die Integration der erfassten Information in das evidenztheoretische Modell. Die Modellierung bezieht sich dabei auf die Ableitung möglicher Diagnosen und definiert den Handlungsbedarf anhand der möglichen Fehlerklassen. Eine Anwendung und Überprüfung der Vorgehensweise wird nicht vorgenommen.

Auch [Neu97] zeigt die Möglichkeiten der Evidenztheorie zur Verarbeitung zustandsrelevanter Informationen auf. Für das gewählte Beispiel eines Leistungsschalters werden die Grundzüge eines Modells entwickelt und potenzielle Ergebnisse für einen Auswahlalgorithmus zur optimalen Instandhaltungsstrategie genutzt. Eine tatsächliche Auswahl

⁶ In diesem Zusammenhang finden sich auch Begriffe wie unsicheres Wissen und Unschärfe [BHS07].

relevanter Prüfkriterien sowie deren konkrete Abbildung im Evidenzmodell werden nicht vorgenommen.

[FGH01] greift den Modellierungsansatz von [Neu97] auf und wendet diesen zum Zweck der Intervallbestimmung für Revisionen und Begehungen von 123-kV-Leistungsschaltern an. Die eingehenden Daten stammen von verschiedenen Netzbetreibern und stellen qualitative Beurteilungen von Sichtkontrollen, Revisionen und Diagnosen, Meldungen von Überwachungseinrichtungen sowie Statistiken zu Instandsetzungsbedarfen dar. Die Modellierung erfolgt konkret für unterschiedliche Leistungsschalterfabrikate und ist daher nicht typunabhängig.

Die Arbeiten zeigen, dass der evidenztheoretische Ansatz für die Zustandsbestimmung elektrischer Betriebsmittel vielversprechend ist. Allerdings zeigt sich auch die Notwendigkeit von konkreten Ausgestaltungen hinsichtlich des tatsächlich zu untersuchenden Kollektivs, um die existierende Informationslage optimal für Instandhaltungs- und Erneuerungsentscheidungen zu verwenden. Die notwendigen Informationen in einer sachgerechten Tiefe zu erfassen ist aufwändig. Insbesondere über verschiedene Netzbetreiber hinweg ist anzunehmen, dass Informationstiefe bzw. auch der Grad der Informationsdigitalisierung verschieden ist. Dies scheint ein Grund dafür zu sein, dass der evidenztheoretische Ansatz für die Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel bisher nur vereinzelt angewendet worden ist.

1.3 Einordnung und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit erstellt eine strukturierte Verbindung zwischen technischer Diagnostik und Assetentscheidungen eines Netzbetreibers am Beispiel eines vorhandenen SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektivs. Neben vorhandenen Informationen stellen die im folgenden Kapitel vorgeschlagenen minimalinvasiven diagnostischen Methoden eine wichtige Informationsquelle dar. Die einzelnen Verfahren sollen dabei nicht weiterentwickelt werden, sondern hinsichtlich ihrer speziellen Anwendbarkeit und Aussagekraft im Zustandsverfahren für das betrachtete SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv bewertet werden. Auch steht keine Bewertung möglicher Strategie- und Entscheidungswerkzeuge im Vordergrund. Es soll vielmehr eine typunabhängige, also eine sowohl vom Fabrikat als auch von der Schaltaufgabe unabhängige Schnittstelle zwischen technischer Diagnostik und Assetmanagement herausgearbeitet werden, die in der Lage ist, alle verfüg-

baren zustandsrelevanten Informationen in ausreichend aggregierter Form für Assetentscheidungen nutzbar zu machen.

Die Bewertungsergebnisse sollen sowohl zur kurzfristigen Maßnahmenplanung als auch für eine mittelfristige Erneuerungsplanung nutzbar sein. Für das einzelne Schaltfeld sollen zustandsbeschreibende Kenngrößen ermittelt werden, aus denen sich ein Zustandsindex und potenzielle Handlungsmaßnahmen zur Zustandsverbesserung ableiten lassen. Des Weiteren können mit Hilfe des funktionsorientierten, typunabhängigen Ansatzes mehr homogene Informationen über die betriebenen Schaltfelder zur Verfügung gestellt werden. Durch die Vergrößerung der Datenbasis kann es zukünftig ermöglicht werden, wieder mit statistischen Methoden nach kritischen Merkmalen zu suchen. Dies leistet einen zusätzlichen Beitrag zur Optimierung von Assetentscheidungen, wie zum Beispiel der Bestimmung von Instandhaltungsinhalten, der Ausgestaltung eines Ersatzteilmanagements und der Festlegung des Weiterbildungsumfangs für Betriebs- und Instandhaltungspersonal.

Ausgehend von der Zielsetzung und den einzuhaltenden Rahmenbedingungen aus Kapitel 0 wird in Kapitel 1 ein typunabhängiges, minimalinvasives Zustandsbewertungsverfahren für SF₆-Hochspannungsschaltfelder entwickelt, in dem im ersten Schritt die geforderten Funktionen des Schaltfelds in Bezug zu einzelnen zustandsrelevanten Prüfkriterien gesetzt werden (Abschnitt 2.1). Zur Bewertung der Kriterien werden bestehende Diagnoseverfahren ausgewählt und hinsichtlich Aussagekraft und Anwendbarkeit bewertet (Abschnitt 2.2). Aufbauend auf den technischen Zusammenhängen wird das Zustandsmodell mathematisch formuliert (Abschnitt 2.3). Im letzten Schritt werden die möglichen eingehenden diagnostischen Ergebnisse für die Verarbeitung im mathematischen Modell aufbereitet und die praktische Umsetzung anhand einzelner Beispiele vorgestellt (Abschnitt 2.4).

Kapitel 1 beinhaltet nach der Vorstellung der operativen Umsetzung des Bewertungsverfahrens (Abschnitt 3.1) eine Einführung in die konkreten Strukturen des aus 198 Schaltfeldern bestehenden Kollektivs und die Anwendung des Zustandsbewertungsverfahrens auf eine Stichprobe von 66 Schaltfeldern (Abschnitt 3.2). Abschließend wird das erprobte Zustandsbewertungsverfahren kritisch diskutiert (Abschnitt 3.3). Kapitel 0 zeigt, wie die ermittelten Zustandsergebnisse genutzt werden können: Zum einen zur Weiterentwicklung von Erneuerungs- und Instandhaltungsstrategien im Assetmanagement (Abschnitt 4.1), zum anderen in der Bestimmung von Instandhaltungsbedarfen

durch den Assetservice am einzelnen Schaltfeld (Abschnitt 4.2). Dem Nutzen steht der Aufwand gegenüber, der durch die Erhebung zustandsrelevanter Informationen entsteht. Da der Aufwand bei der Mehrwertbetrachtung nicht vernachlässigt werden darf, wird dieser in Abschnitt 4.3 betrachtet. Kapitel 1 schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick diese Arbeit ab.

2 Zustandsmodell für SF₆-Hochspannungsschaltfelder

2.1 Funktionsorientierter Modellierungsansatz

2.1.1 Grundlagen und Begrifflichkeiten

Ein SF₆-Hochspannungsschaltfeld stellt ein Produkt dar, das bestimmte Anforderungen im Versorgungsnetz erfüllen muss. Im Zuge der Produktentwicklung hat der Hersteller diese geforderten Produkteigenschaften identifiziert und beschrieben. Die Konstrukteure verknüpfen die gestellten Anforderungen mit konstruktiven Lösungen und wählen diejenige technische Lösung aus, die die gestellten Anforderungen optimal umsetzen. Aus dem Optimierungsansatz folgt, dass es je nach Wertigkeit der verschiedenen Anforderungen unterschiedliche Lösungen geben kann. Allen Lösungen gemeinsam ist, dass eine gewünschte Funktion erfüllt wird. Damit ist die Funktionsbetrachtung ein lösungsunabhängiger Ansatz. In der Produktentwicklung wird dieser Ansatz zur Auswahl der geeignetsten konstruktiven Lösung verwendet und soll daher in dieser Arbeit eine Modellstruktur schaffen, die unabhängig vom Fabrikat auf alle verschiedenen SF₆-Hochspannungsschaltfelder anwendbar ist.

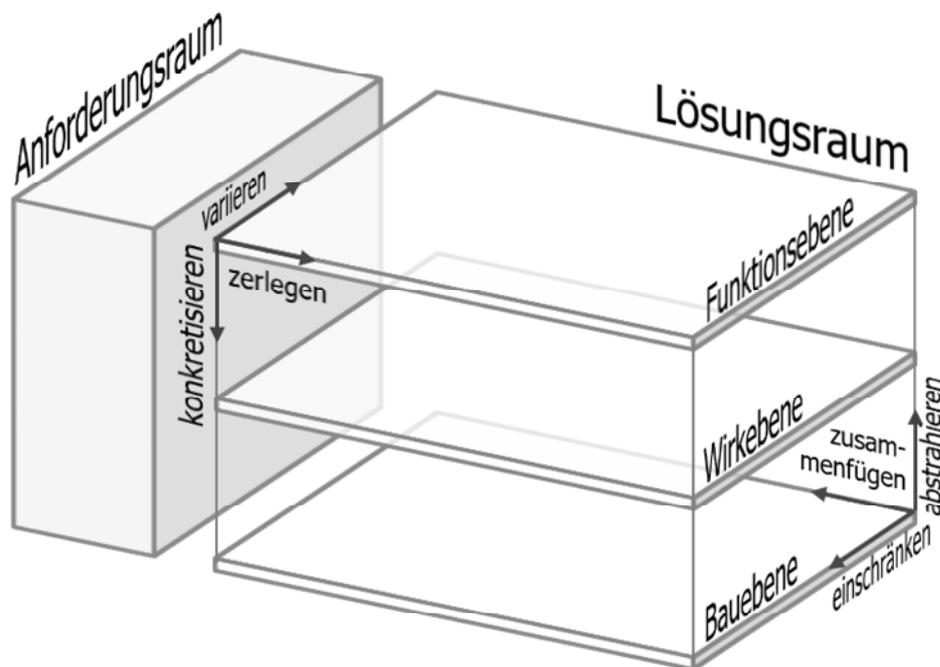


Abbildung 2-1: Münchener Produktkonkretisierungsmodell [nach PL11]

Solch ein strukturschaffender Vorschlag für den Entwicklungsprozess technischer Produkte ist das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM), das hier auf Basis von [PL11] als Grundlage eingeführt wird (siehe Abbildung 2-1). Das MKM besteht aus den Hauptkomponenten „Anforderungsraum“ und „Lösungsraum“. Der „Lösungsraum“ enthält verschiedene Dimensionen (Funktions-, Wirk- und Bauebene), in denen die Aktivitäten „zerlegen / zusammenfügen“, „konkretisieren / abstrahieren“ und „variieren / einschränken“ ausgeführt werden können. Die Funktionsebene beschreibt ein technisches Produkt durch seine einzelnen Funktionen. Die Wirkebene beinhaltet die benötigten physikalischen Effekte in Kombination mit weiteren technischen Merkmalen, die zur Umsetzung von Funktionalitäten dienen können. Auf der Bauebene befinden sich die tatsächlichen Kombinationen aus Bauelementen, die die gewünschte physikalische Wirkung erzeugen.

Für diese Arbeit ist die Funktionsebene von besonderem Interesse. Ausgehend vom Anforderungsraum erfolgt die funktionale Beschreibung einer Hauptfunktion durch seine Teilfunktionen. Sofern eine Hauptfunktion durch verschiedene Teilfunktionen bzw. durch unterschiedliche Verknüpfungen bestimmter Teilfunktionen dargestellt werden kann, liegen mehrere Funktionsvarianten vor. Die Verwendung mehrerer Varianten ist für diese Arbeit ausgeschlossen, um die Vergleichbarkeit der Zustandsergebnisse sicherzustellen. Daraus lässt sich bereits an dieser Stelle die maximale Tiefe der Funktionszerlegung definieren: Die maximale Funktionsbeschreibungstiefe ist dann erreicht, sobald mehr als eine Funktionsvariante zur Abbildung des Schaltfeldkollektivs benötigt wird.

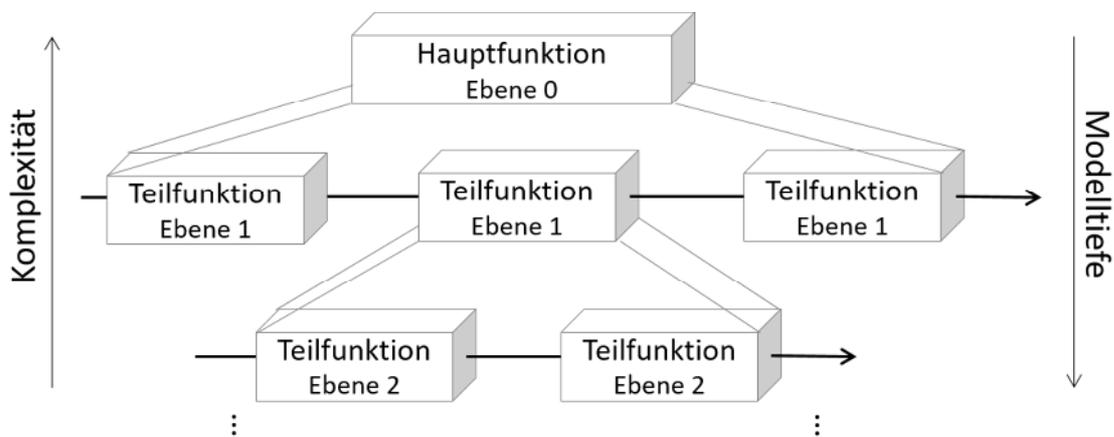


Abbildung 2-2: Zerlegung von Funktionen

Abbildung 2-2 zeigt eine mögliche Zerlegung einer Hauptfunktion in verknüpfte Teilfunktionen. Den Verknüpfungen folgend können (Teil-) Funktionen zum Beispiel Signale oder Energie verändern. Die Tiefe der Zerlegung wird dabei durch die Ebenennummerierung angedeutet.

Die Integration von Umsatzprodukten (Energie, Stoff und Signal) in der Funktionsbeschreibung ist bekannt als umsatzorientiertes Funktionsmodell [nach Ehr09] und ist in Abbildung 2-3 dargestellt. In diesem Modell wird jede Funktion durch mindestens einen Eingangszustand x_1 , mindestens einen Ausgangszustand x_2 sowie einer Operation beschrieben, die eine Eigenschaftsänderung bei einem Stoff ausübt. Die Verbindung der Zustände über die Operation wird dabei als Relation beschrieben und kann verschiedene Umsatzarten darstellen. Zustände werden als Kreise, Operationen als Rechtecke und die jeweiligen Umsatzarten sowie deren Flussrichtungen durch Pfeile abgebildet.

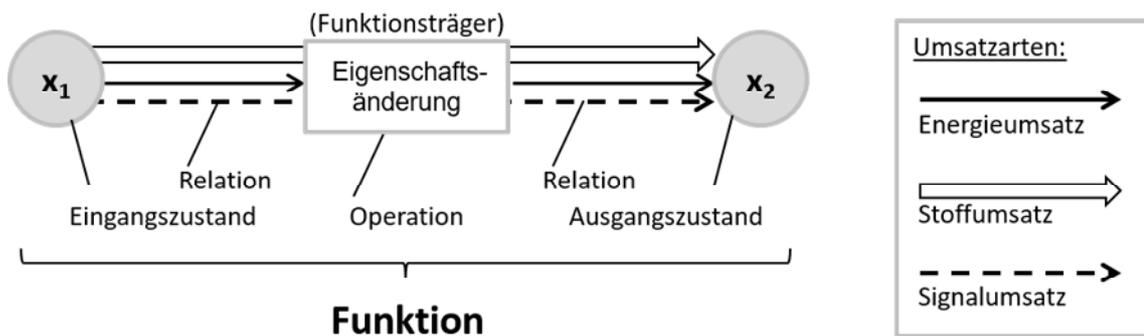


Abbildung 2-3: Formale Funktionsdarstellung im umsatzorientierten Funktionsmodell in Anlehnung an [Ehr09]

Eine Operation ändert Eigenschaften eines Stoffes, z.B. die Umsetzung von elektrischer Energie in mechanische Energie. Diese Eigenschaft wird im umsatzorientierten Funktionsmodell im Operationen-Rechteck beschrieben. Zusätzlich kann ein Funktionsträger in Klammern oberhalb des Operationen-Rechtecks angegeben werden. Dies ist eine Komponente, ein Element oder Bauteil, das die geforderte Wirkung umsetzt. Folglich schafft das Funktionsmodell neben der Funktionsstrukturierung auch eine Verbindung in die Wirkebene. Die Überprüfung einer physikalischen Wirkung erfolgt durch Prüfkriterien, die mit unterschiedlichen diagnostischen Methoden beurteilt werden können. Damit verbindet die Wirkebene das Funktionsmodell mit diagnostischen Methoden und das MKM kann in abgewandelter Form als Grundlage zur Zustandsbewertung von SF₆-

Hochspannungsschaltfeldern genutzt werden (Abbildung 2-4). Diese Variante schließt auf der Funktionsebene Variationen aus und ersetzt die Bau- durch die Diagnoseebene.

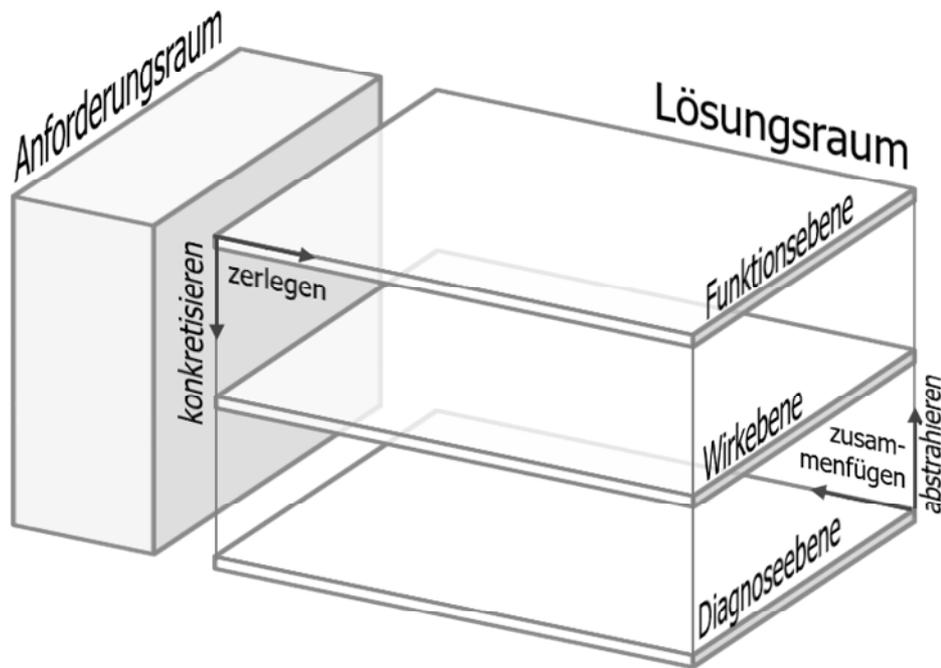


Abbildung 2-4: Variante des MKM's zur Verwendung in der funktionsorientierten Zustandsmodellierung

2.1.2 Funktionsstruktur von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern

Grundlage zur Bestimmung von Funktionen der SF₆-Hochspannungsschaltfelder sind die einschlägigen Normen, die in Abbildung 2-5 als Übersicht angegeben sind. Die Struktur der Normenlandschaft ordnet sich dabei stark anhand der eingesetzten Komponenten und Betriebsmittel und ist daher sehr komplex. Die für diese Arbeit bevorzugte funktionsorientierte Betrachtung erlaubt es, den normativen Strukturierungsansatz deutlich zu vereinfachen, da letztlich ein SF₆-Hochspannungsschaltfeld durch zehn verschiedenen Hauptfunktionen beschrieben werden kann, wie Abbildung 2-6 zusammenfasst.

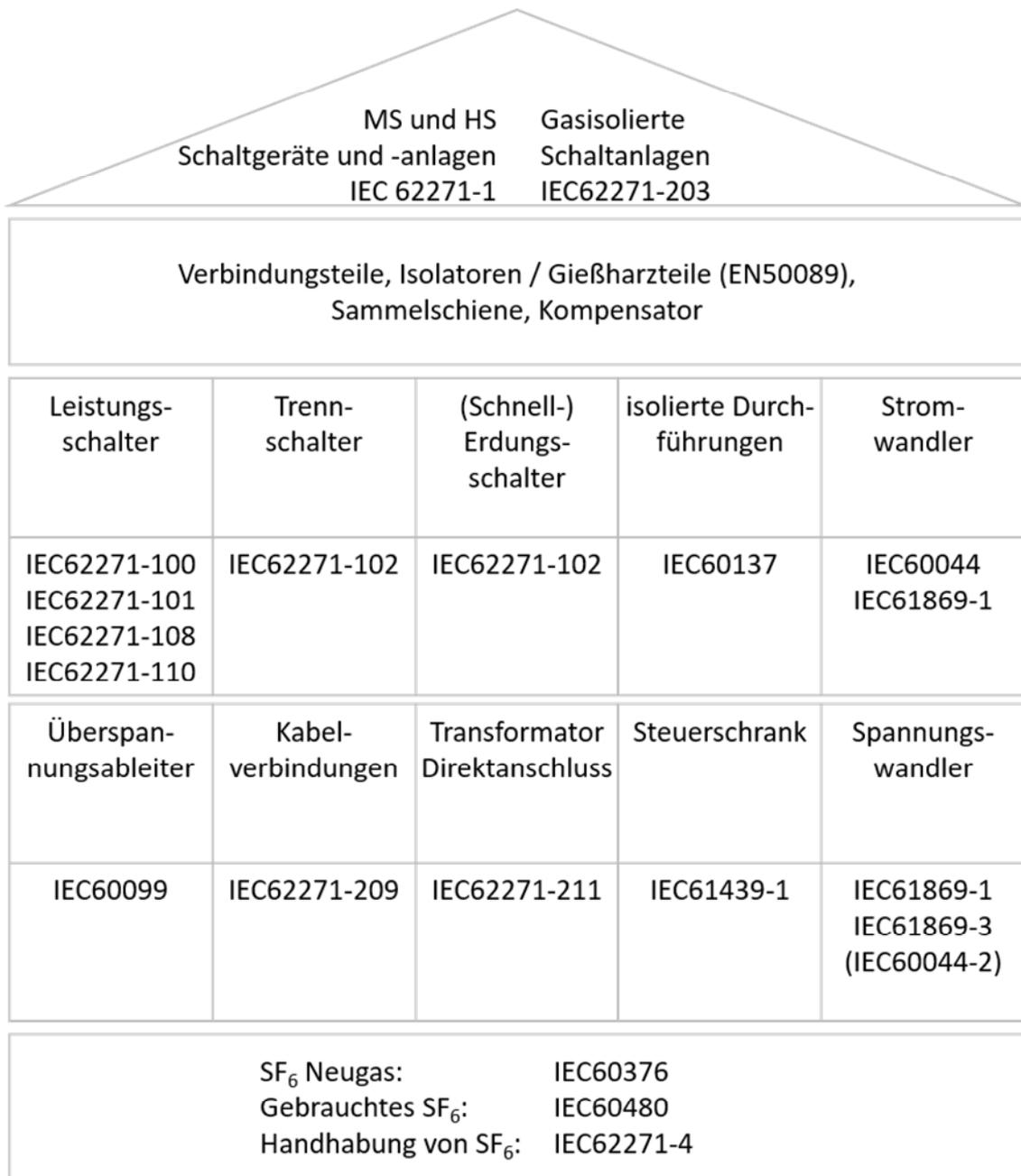


Abbildung 2-5: IEC-Normenlandschaft für SF₆-Schaltanlagen [in Anlehnung an Gl15]

Abbildung 2-6 auf der folgenden Seite zeigt die zehn Hauptfunktionen in einer jeweils grau gestrichelten Umrandung. Entsprechend der Ebenenbetrachtung, die mit Abbildung 2-2 von Seite 12 eingeführt worden ist, gehören diese Hauptfunktionen zur Ebene 0. Zusätzlich wird innerhalb der jeweiligen Klammern der Funktionsträger angegeben.

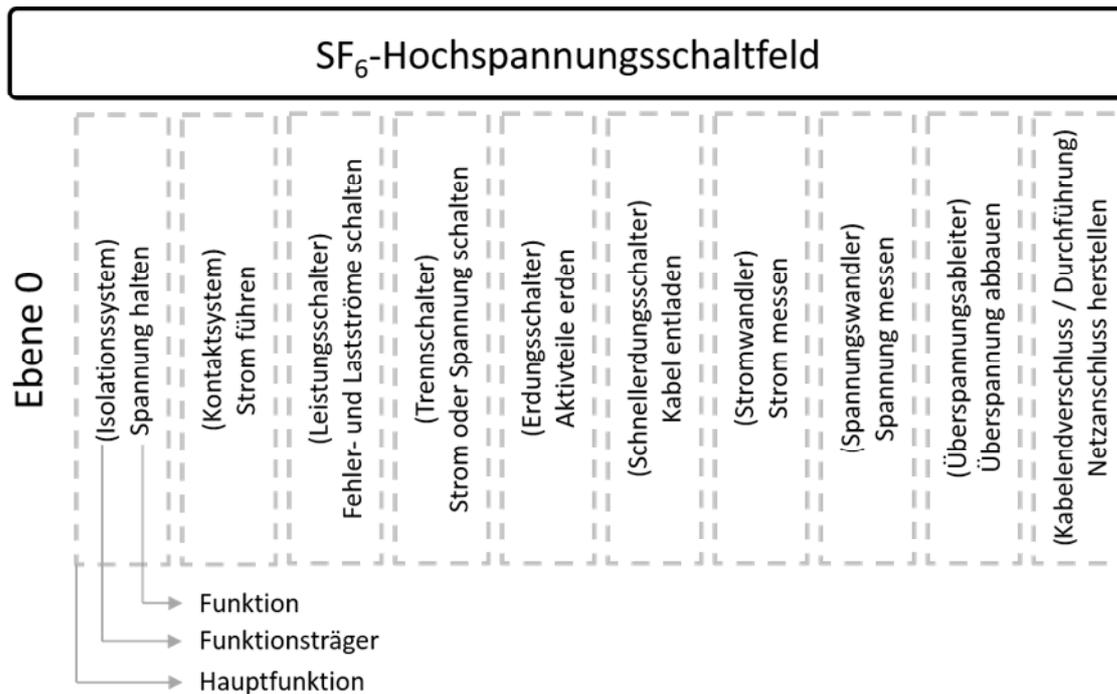


Abbildung 2-6: Identifizierte Hauptfunktionen von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern

Die Hauptfunktion „Spannung halten“ beinhaltet das Isolationssystem. Sie besteht aus den Isolationsmaterialien, die sich in Feststoffe und Isolationsgas unterteilen lassen, der metallischen Kapselung, die dafür sorgt, dass das Isolationsgas auch im Inneren der Schaltanlage verbleibt, sowie der Überwachung für das Isoliergas (Abbildung 2-7). An dieser Stelle sei auf einen wesentlichen Vorteil der Funktionsbetrachtung hingewiesen, der von erheblicher praktischer Relevanz ist, wenn das Funktionsmodell eine auf Dauer beständige Grundlage für die Zustandsbewertung sein soll:

Für das Funktionsmodell ist es nicht relevant, wie die inneren Freiräume dielektrisch verfestigt werden. Wichtig ist nur, dass sie dielektrisch fest sind. Das bedeutet beispielsweise, dass es für das Funktionsmodell unerheblich ist, ob innere Freiräume mit Öl, mit SF₆ oder einem Alternativgas⁷ gefüllt ist.

⁷ Insbesondere die Wahrscheinlichkeit des zukünftig breiten Einsatzes alternativer Gase ist durch die Inkraftsetzung der Verordnung (EG) 517/2014 (F-Gase Verordnung) wahrscheinlich [EG14]. [EG14] ist damit ein aktuelles Beispiel, die technischen Eigenschaften eines Schaltfeldes in einen Betrachtungsrahmen zu fassen, der alle möglichen technischen Lösungsvarianten einschließen kann.

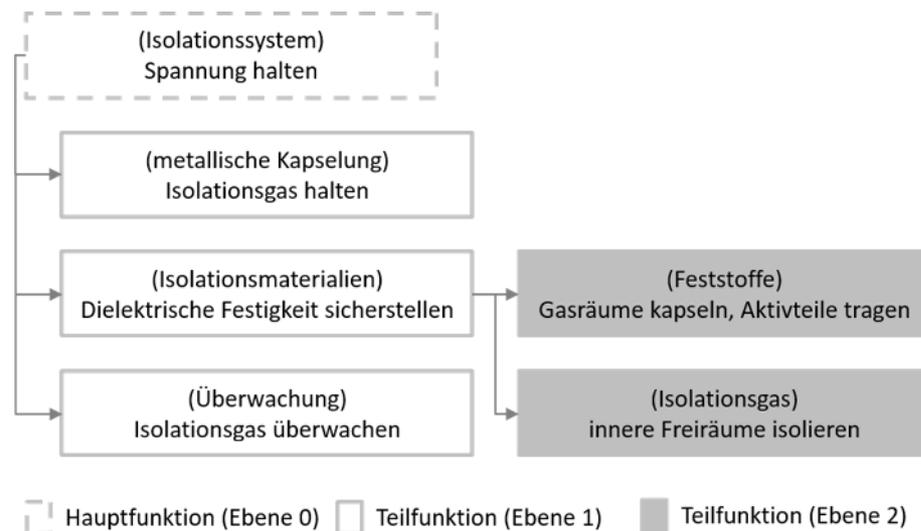


Abbildung 2-7: Hauptfunktion „Spannung halten“

Die Hauptfunktion „Strom führen“ wird durch das Kontaktsystem realisiert. Es kann zwischen statischen und dynamischen Kontakten unterschieden werden. Unter dynamischen Kontakten werden hier Kontakte verstanden, die unter Last ihren Schaltzustand ändern können (z.B. Leistungsschalterkontakte). Unter statischen Kontakten werden geschraubte oder gesteckte Verbindungen sowie schaltbare Kontakte, die keine Leistung schalten, gefasst. Folglich sind die Schaltkontakte der Trenn-, Erdungs- und Schnellerdungsschalter auch dieser Hauptfunktion zugeordnet. Diese gewählte Zuordnung hat praktische Gründe. Die hier definierte Gruppe von statischen Kontakten kann mit den gleichen diagnostischen Mitteln beurteilt werden. Weiterhin ist die dynamische Komponente bei der Schaltung von Trenn- und Erdungsschaltern nicht kritisch. Weder eine bestimmte Gleichzeitigkeit in der Kontaktbewegung der einzelnen Pole noch eine bestimmte Schaltgeschwindigkeit sind gefordert. Da sich auch diese Hauptfunktion zur Erläuterung einer Besonderheit für die Zustandsbewertung mithilfe der Funktionsbetrachtung anbietet, ist nachfolgende Überlegung angegeben:

Offensichtlich gehören schaltbare Kontakte nicht nur zur Hauptfunktion „Strom führen“, da der fließende Strom durch den Kontakt nicht nur getragen werden muss, sondern auch einen Schaltstellungswechsel realisiert. Dieser ist aber aufgrund seiner Zusammenwirkung mit einem Antrieb Teil einer anderen Hauptfunktion. Für die technische Bewertung einer Hauptfunktion muss folglich die Beurteilung der Funktionsfähigkeit eines Kontaktes in jeder betroffenen Hauptfunktion berücksichtigt werden. Zielt die Bewertung aber auf den Zustand eines gesamten

Schaltfeldes ab, muss entschieden werden, ob ein einzelnes Bewertungsurteil mehrfach im Zustandsergebnis des gesamten Schaltfeldes berücksichtigt werden soll.

Für das Beispiel in diesem Absatz muss also entschieden werden, ob ein schlecht beurteilter Trennschalterkontakt in der Gesamtbewertung doppelt, also über die Hauptfunktion „Strom führen“ und über die Hauptfunktion „Strom oder Spannung schalten“, oder nur einmalig für das Schaltfeld berücksichtigt werden soll. Für diese Arbeit wurde entschieden, dass Bauteile, die für mehrere Funktionen verwendet werden, grundsätzlich nur einmalig innerhalb des Gesamturteils zu verwenden sind. Damit wird sichergestellt, dass die Wichtigkeit eines einzelnen Bauteils bezogen auf das gesamte Schaltfeld mit nur einem Gewichtungsfaktor dargestellt werden kann. Diese gewählte Zuordnung ist entsprechend in der Funktionsdarstellung für die Hauptfunktion „Strom führen“ in Abbildung 2-8 dargestellt.

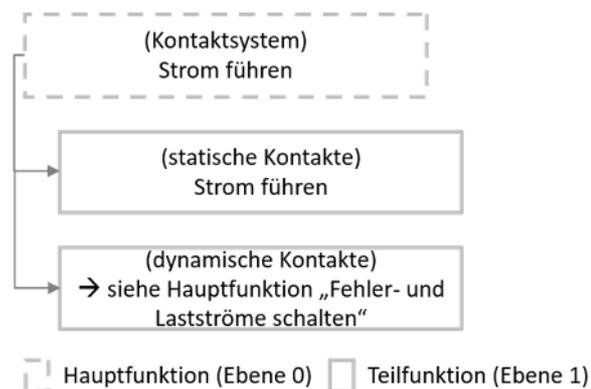


Abbildung 2-8: Hauptfunktion „Strom führen“

Die Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ besteht aus den Elementen Antrieb, Unterbrechereinheit und Überwachung. Antrieb und Unterbrechereinheit können weiter in die Funktionsträger (Antriebs-) Schrank, Energiesystem, Antriebsstrang und Auslöser sowie Kontakt, Löschmedium und Düsensystem unterteilt werden. Im Gegensatz zu anderen Schaltgeräten bestehen hohe Anforderungen an Gleichzeitigkeit und Schaltgeschwindigkeit. Da diese Hauptfunktion im Abschnitt 2.1.3 als Beispiel zur Ermittlung zustandsrelevanter Prüfkriterien sehr detailliert beschrieben wird, wird an dieser Stelle auf weitere Ausführungen zur Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ verzichtet.

Die Hauptfunktionen „Strom oder Spannung schalten“, „Aktivteile erden“ und „Kabel entladen“ beinhalten vergleichbare Teilfunktionen, unterscheiden sich aber in ihrem Anwendungszweck (Verbindung bzw. Trennung aktiver Teile untereinander oder die Verbindung aktiver Teile mit dem Erdpotenzial) und müssen daher jeweils als separate Hauptfunktion bewertet werden. Identifiziert wurde das Antriebssystem, das den Schaltkontakt mit Hilfe eines Motors und einer entsprechenden Steuerung bewegt, der Schaltkontakt selbst, der aber in der Hauptfunktion „Strom führen“ berücksichtigt wird und die Überwachung (Abbildung 2-9).

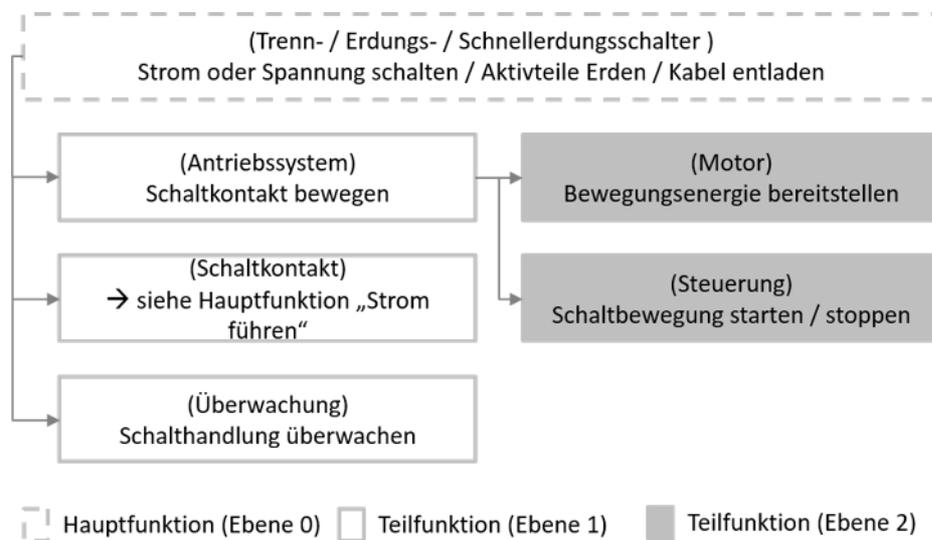


Abbildung 2-9: Hauptfunktionen „Strom oder Spannung schalten“, „Aktivteile Erden“ und „Kabel entladen“

Auch die Hauptfunktionen „Strom messen“ und „Spannung messen“ lassen sich häufig durch die gleichen Funktionsträger (sekundärer Anschluss, primäre Wicklung, sekundäre Wicklung und Kern) beschreiben, sofern die Wandler nach dem induktiven Prinzip arbeiten. Allerdings können Strommessung und Spannungsmessung neben dem induktiven Prinzip auch durch andere physikalische Wirkprinzipien realisiert werden. Beispielsweise kommen kapazitive Spannungsteiler als alternative Möglichkeit zur Spannungsmessung zum Einsatz. Daher kann in diesem Fall die Zuordnung physikalischer Wirkprinzipien bereits auf Ebene der Hauptfunktion erfolgen. Damit ist die im Zusammenhang mit Abbildung 2-2 diskutierte maximale funktionale Beschreibungstiefe der Hauptfunktionen für „Strom messen“ und „Spannung messen“ bereits auf Ebene 0 erreicht und auf die Darstellung tiefer gehender Ebenen kann verzichtet werden.

Die Hauptfunktion „Überspannung abbauen“ wird durch den Überspannungsableiter realisiert, der in der Regel neben einem Ableitsystem, das Überspannung in Wärmeenergie umsetzt, auch eine Überwachungseinrichtung besitzt. Die Überwachungseinrichtung erlaubt dem Anwender erfolgreich abgebaute Überspannungen des Ableitsystems festzustellen (Abbildung 2-10).

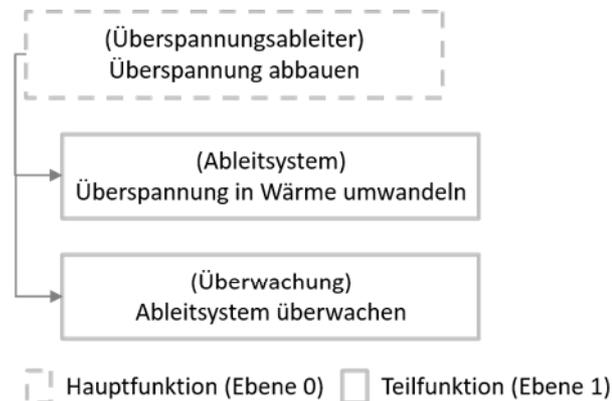


Abbildung 2-10: Hauptfunktion „Überspannung abbauen“

Die Hauptfunktion „Netzanschluss herstellen“ enthält die Bauteile Durchführungen und Kabelendverschlüsse. Diese dienen der Spannungsordination am Übergang zur Freileitung bzw. zum Kabel und müssen eine entsprechende Stromtragfähigkeit (Hauptfunktion „Strom führen“) aufweisen. Beide Bauteile müssen sowohl eine innere Isolierung analog der Hauptfunktion „Spannung halten“ und eine äußere Isolierung zur metallischen Kapselung des SF₆-Hochspannungsschaltfeld sicherstellen. Entsprechend lässt sich die Hauptfunktion „Netzanschluss herstellen“ nach Abbildung 2-11 visualisieren.

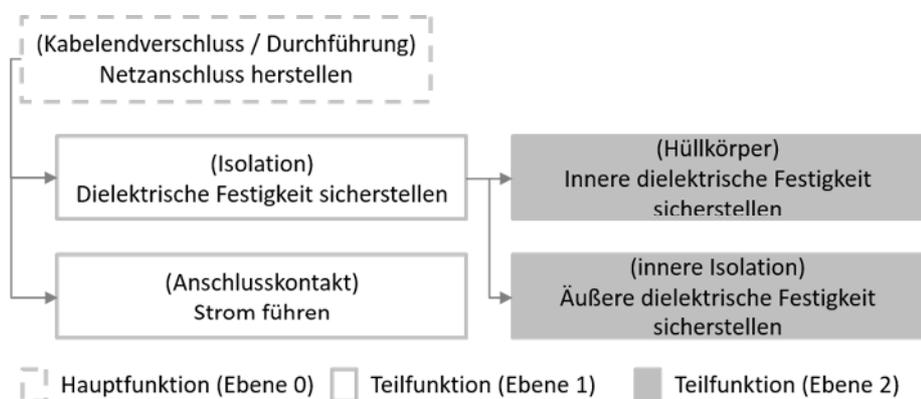


Abbildung 2-11: Hauptfunktion „Netzanschluss herstellen“

2.1.3 Prüfkriterien zur Funktionsbeurteilung

Wie in Abschnitt 2.1.1 erläutert, zeigt das Funktionsmodell die Abhängigkeiten der identifizierten Teilfunktionen zueinander. Zweck dieser Vorgehensweise ist die Identifizierung der wirkenden physikalischen Prinzipien und die Schaffung einer strukturierter Verbindung zwischen Funktions- und Wirkebene (vgl. Abbildung 2-4, Seite 14). Insbesondere, wenn unterschiedliche Wirkprinzipien zur Realisierung von Hauptfunktionen zum Einsatz kommen, hilft die konsequente Anwendung des Funktionsmodells zur Umsetzung der Forderung nach Typunabhängigkeit in der Zustandsbewertung, wie nachfolgendes Beispiel verdeutlicht:

Abbildung 2-12 zeigt die Funktionsdarstellung für die Ausschaltung eines Fehlerstroms im Rahmen der bereits definierten Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“. In der Ausgangssituation auf der linken Seite der Abbildung befindet sich der Leistungsschalter in Schaltstellung EIN, die durch den Meldeschalter im Signalweg angezeigt wird. Vor der eigentlichen Ausschaltung wird elektrische Energie mit Hilfe des Energiesystems in mechanische Energie gewandelt⁸ und einem Energiespeicher zugeführt. Es kommen verschiedene Energiesysteme, wie zum Beispiel Hydraulik- oder Federspeicherantriebe, zum Einsatz. Registriert ein Schutzgerät einen Fehler, der abgeschaltet werden soll, wird das elektrische Schutzaussignal zum Auslöser übertragen. Auslöser wandeln den elektrischen Befehl in eine mechanische Bewegung um. Die mechanische Auslösung gibt den Antriebsstrang zur Beschleunigung frei. Die gespeicherte mechanische Energie wird in Bewegungsenergie umgesetzt, sodass die Schaltbewegung beginnt. Durch die feste mechanische Kopplung zwischen Antriebsstrang und Unterbrechereinheit wird der Schaltkontakt geöffnet und damit der Fehler vom übrigen elektrischen Netz galvanisch getrennt. Zwischen den geöffneten Kontaktstellen der Unterbrechereinheit brennt der Schaltlichtbogen. Damit auch dieser dauerhaft unterbrochen werden kann, muss das Düsensystem den Lichtbogen mit Löschmittel beströmen. Das Löschmittel sorgt durch Kühlung für eine begrenzte Ausdehnung des Lichtbogens und stellt mit Erlöschen des Lichtbogens die dielektrische Festigkeit zwischen den Kontaktstellen wieder her. Im betrachteten Kollektiv kommen sowohl SF₆-Gas als auch spezielle Iso-

⁸ Leistungsschalter benötigen für ihre Schaltaufgaben hohe Energiedichten, sodass Energiespeicher im Einsatz sind, die diese hohen Energiedichten bereitstellen können.

lieröle (sogenannte Schalteröle [DIN12c]) als Löschmittel zum Einsatz. Nach der Trennung der Netzteile bremst der Antriebstrang (hier werden beispielsweise Rutschkupplungen oder Dämpfungspumpen verwendet) ab und die Schaltung ist beendet. Analog zur Bewegung des Antriebstrangs wird der Meldeschalter über eine Zwischenstellung umgeschaltet und signalisiert die Schaltstellung AUS.

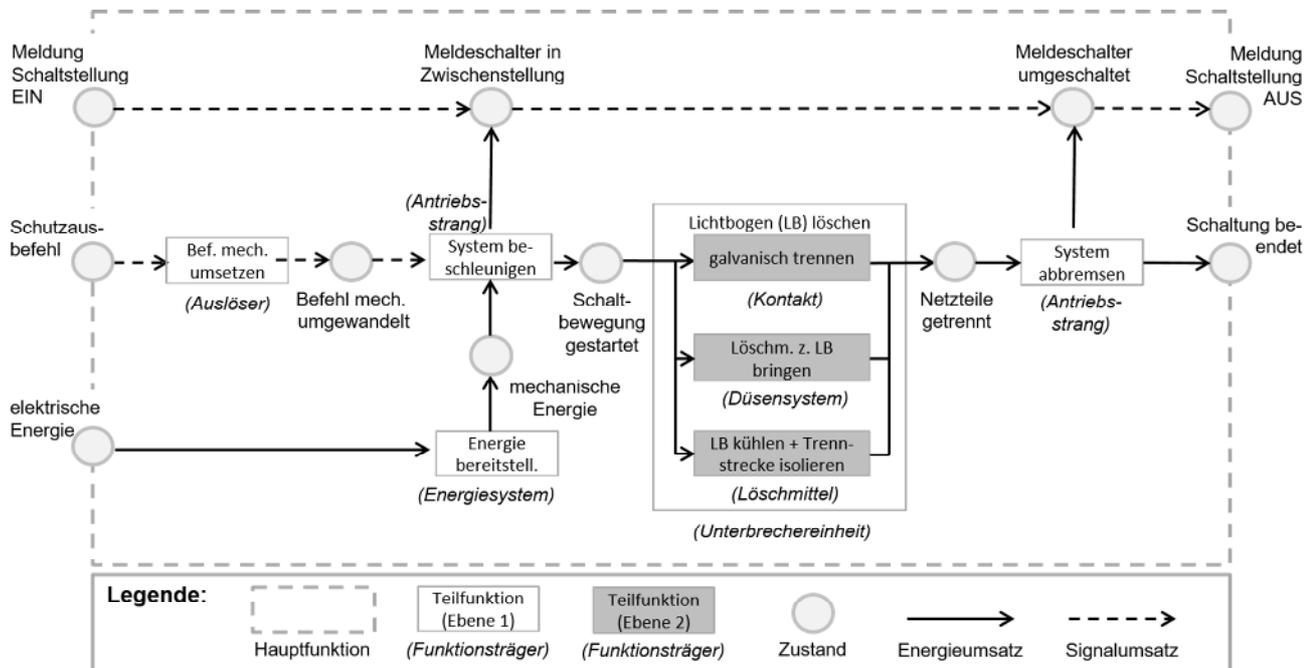


Abbildung 2-12: Funktionsmodell der Fehlerstromausschaltung [Darstellungsweise in Anlehnung an PL11]

Das Beispiel verdeutlicht, dass unabhängig von verwendeter Technologie - z.B. bei Löschmittel oder Antriebsart - die funktionale Beschreibung auch in tieferen Detailebenen erfolgen kann. Dies stellt einerseits eine systematische Identifikation von Wirkprinzipien sicher, andererseits können spätere Zustandsergebnisse für die unterschiedlichen SF₆-Hochspannungsschaltfelder auch innerhalb von Teilfunktionen verglichen werden.

Der Identifikation der physikalischen Wirkprinzipien folgt die Bestimmung von zustandsrelevanten Prüfkriterien, welche die Wirkprinzipien zur Erfüllung von Funktionen beurteilen können. Dieser Schritt wird nachfolgend am Beispiel des Auslösers erklärt:

Die Funktionalität des Auslösers beruht auf Elektromagnetismus, der sich durch den Stromfluss durch eine Spule mit dem elektrischen Schutzausbefehl einstellt. Innerhalb der Spule liegt der beweglich gelagerte Anker, der im Magnetfeld be-

schleunigt wird. Der an einem mechanischen Auslösemechanismus aufschlagende Anker setzt dann den Antriebstrang in Bewegung (siehe Abbildung 2-13).

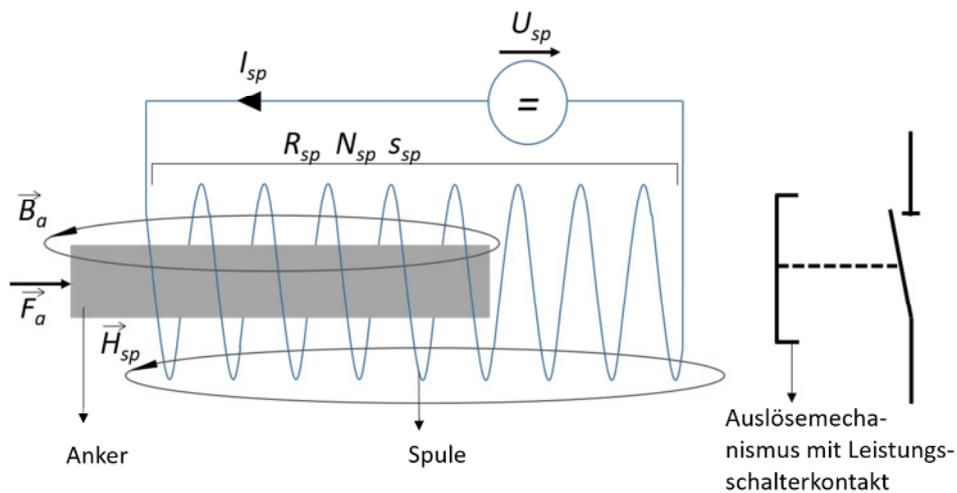


Abbildung 2-13: Prinzipdarstellung des Auslösers

Abbildung 2-13 zeigt den Anker a , der innerhalb der Spule sp liegt und auf den die Kraft F_a wirkt. Die Spule sp lässt sich über ihren elektrischen Widerstand R_{sp} , die Anzahl ihrer Windungen N_{sp} sowie ihrer gesamten Leiterlänge s_{sp} beschreiben. Die Kraftwirkung resultiert aus dem Strom I_{sp} , der bei Zuschaltung der Spannung U_{sp} fließt. Entsprechend des Durchflutungsgesetzes erzeugt der Strom I_{sp} ein magnetisches Feld H_{sp} bzw. - unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften des Ankers a - die magnetische Flussdichte B_a . Dadurch resultiert eine Kraftwirkung F_a auf den Anker (Lorentzkraft).

Eine normativ geforderte Prüfung für Auslöser ist die Messung der Mindestbetätigungsspannung [DIN13]. Diese Spannung wird in der Regel von einer Batterieanlage bereitgestellt. Durch hier nicht weiter beschriebene mögliche Defekte in der Batterieanlage oder aber durch den Spannungsfall entlang der Anschlussleitung zwischen Batterie und Auslöser kann die Steuerspannung am Auslöser bei Betätigung wesentlich kleiner sein. Daher fordert die Norm eine sichere Auslösung auch bei niedrigeren Spannungen. Für AUS-Spulen beträgt diese 80% der Nennspannung, die damit ein Prüfkriterium für Auslöser darstellt.

Die Spannung U_{sp} ist als feste Größe an den Anschlüssen der Spule sp vorgegeben. Daher ist die Aussagekraft über den Zustand des Auslösers auf funktionsfähig oder nicht funktionsfähig beschränkt, weil die Kraftwirkung F_a abhängig

vom Spulenstrom I_{sp} und nicht von der Spulenspannung U_{sp} ist. Abbildung 2-14 zeigt zur Verdeutlichung einen Auslöser mit Windungsschluss.

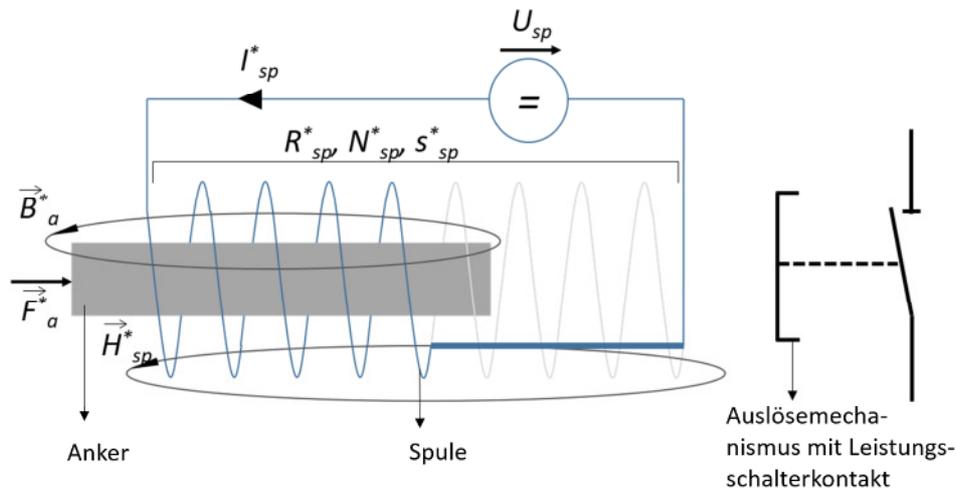


Abbildung 2-14: Auslöser mit Windungsschluss

Abbildung 2-14 stellt den bereits in Abbildung 2-13 gezeigten Auslöser mit einem Windungsschluss (rechte Spulenhälfte in grauer Farbe ist kurzgeschlossen) dar. Die sich neu einstellenden elektrischen und magnetischen Größen sind mit einem * gekennzeichnet. Es soll angenommen werden, dass der Windungsschluss genau die Hälfte aller Windungen N_{sp} kurzschließt, sodass die verbleibende Windungszahl N_{sp}^* genau der Hälfte von N_{sp} entspricht. Folglich halbiert sich auch der Spulenwiderstand R_{sp} zu R_{sp}^* und entsprechend des ohmschen Gesetzes ist der neue Spulenstrom I_{sp}^* doppelt so groß wie I_{sp} , da die Spulenspannung U_{sp} konstant bleibt und die induktive Rückwirkung des Ankers vernachlässigt wird. Der sich mit dem Windungsschluss einstellende höhere Strom führt zu einer höheren thermischen Belastung der Spule und damit steigt die Gefahr, dass noch mehr Windungen kurzgeschlossen werden und sich damit der Zustand hin zu einem Auslöserversagen entwickeln kann. Folglich stellt die Strommessung von I_{sp} eine Möglichkeit dar, auffällige Auslöser zu identifizieren, bevor es zu einem Funktionsversagen kommt.

Bisher ist der dynamische Aspekt des Auslösers nicht betrachtet worden, obwohl dieser einen starken Einfluss auf den Spulenstrom I_{sp} hat. Die Induktivität der Spule hat Rückwirkung auf das magnetische Feld und damit auch eine Rückwirkung auf den Spulenleiterstrom (Induktionsgesetz). Zusätzlich ist zu beachten,

dass sich der Anker im magnetischen Feld bewegt und sich damit die Induktivität der Spule während des Auslösevorgangs ändert. Aus dieser Überlegung lässt sich ableiten, dass es einen charakteristischen Stromverlauf eines Auslösers geben muss. Wird nun angenommen, dass auf den Anker eine Kraftwirkung entgegengesetzt zu F_a wirkt, beispielsweise durch Schwergängigkeiten im mechanischen Auslösemechanismus, muss dies auch Rückwirkung auf den Strom I_{sp} haben, da die langsamere Beschleunigung des Ankers Einfluss auf die Induktivitätsveränderung hat. Folglich stellt das Strom-Zeit-Verhalten des Auslösers ein Prüfkriterium mit einer hohen Aussagekraft dar, da sowohl elektrische als auch mechanische Elemente geprüft werden⁹.

Das Beispiel zeigt, wie sowohl aus Normen als auch aus Überlegungen zu dem physikalischen Wirkprinzip mehrere zustandsrelevante Prüfkriterien abgeleitet werden können. Eine Übersicht aller in dieser Arbeit verwendeten Prüfkriterien befindet sich im Anhang, Abschnitt 7.3.

2.1.4 Beurteilungsstufen für Prüfkriterien

Abschnitt 2.1.3 zeigt am Beispiel der Hauptfunktion „Last- und Fehlerströme schalten“, dass durch strukturiertes Zerteilen von Funktionen ein kleiner, unabhängiger und somit überschaubarer Betrachtungsraum geschaffen werden kann, für den zustandsrelevante Prüfkriterien gesucht werden müssen. Diese Kriterien lassen sich dann mit diskreten Werten oder Kennlinienverläufen beurteilen. Bei der Kenntnis von Grenz- und Sollwerten kann die Beurteilung diskreter Werte direkt aus dem Messwert abgeleitet werden. Insbesondere bei Kennlinienverläufen ist die Urteilsfindung komplexer, sodass die Beurteilung häufig durch den ausführenden Diagnoseexperten erfolgen muss. Unabhängig von den Möglichkeiten zur Beurteilung werden zur einfacheren Handhabung von Diagnoseergebnissen standardisierte Beurteilungsstufen auf Basis einer Abbaukurve des Abnutzungsvorrates in Anlehnung an Bild 2 aus [DIN12a] eingeführt (siehe Abbildung 2-15).

⁹ Für weitere Ausführungen zu der Wirkungsweise von Auslösern sei auf [HL12] verwiesen. Eine Darstellung einer Strom-Zeit-Kurve eines Auslösers ist in Abschnitt 2.2.3, Abbildung 2-19 gezeigt.

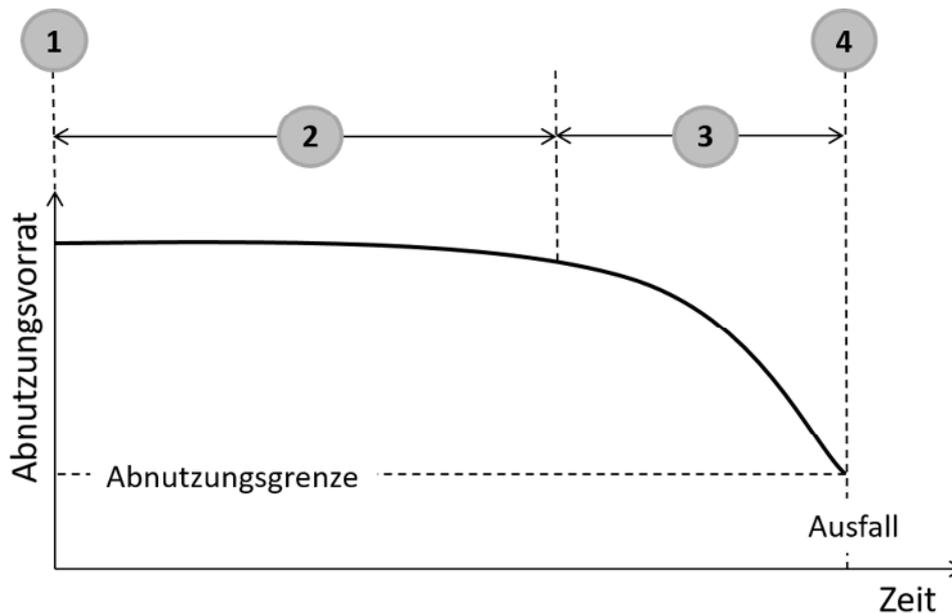


Abbildung 2-15: Beurteilungsstufen für Prüfkriterien - abgeleitet aus einer Prinzipdarstellung des Abnutzungsvorrats aus [DIN12a]

Ein Diagnoseurteil, das der Beurteilungsstufe „1“ entspricht, steht für ein unauffälliges Verhalten des zu beurteilenden Prüfkriteriums. Es liegt also kein Hinweis auf einen Fehler oder eine sich entwickelnde Funktionsstörung vor. Die Beurteilungsstufe „2“ deckt eine frühe Stufe einer sich entwickelnden Funktionsstörung ab. Folglich können Abweichungen festgestellt werden. Die Kritikalität (Schnelligkeit, in der sich eine Auffälligkeit zu einer Funktionsstörung entwickeln kann) ist aber gering bzw. ist noch nicht abzuschätzen. Das Ausfallrisiko kann prinzipiell als geringfügig angestiegen beurteilt werden. Als prinzipielle Handlungsanweisung aus Beurteilungsstufe „2“ folgt ein Beobachtungsbedarf, um festzustellen, ob sich die Auffälligkeit verändert oder konstant bleibt. Stufe „3“ beschreibt einen kritischen Zustand. Die Funktionsfähigkeit ist zwar noch gegeben, aber das Ausfallrisiko ist signifikant gestiegen, so dass ein Reparaturbedarf unterstellt wird. Bewertungsstufe „4“ beschreibt eine nicht mehr funktionsfähige Einheit. Dieser Funktionsverlust kann sich durch einen Defekt, aber auch durch die Verletzung eines normativen Grenzwerts ausdrücken. Zu den funktionsorientierten Urteilen kommen noch die Beurteilungsstufen „5“ und „6“ hinzu, die in Abbildung 2-15 nicht dargestellt sind. Stufe „5“ beschreibt, dass keine Beurteilung für eine vorhandene Funktion zur Verfügung steht, da sich beispielsweise wegen einer nicht durchführbaren Schalthandlung ein Prüfkriterium nicht beurteilen lässt. Stufe „6“ stellt dar, dass eine Beurteilung nicht vorliegt, da die zu bewertende Funktion nicht vorhanden ist. Die

Notwendigkeit dieser zusätzlichen Beurteilungsstufe ergibt sich aus der Forderung nach Vergleichbarkeit der SF₆-Hochspannungsschaltfelder untereinander. Abschnitt 2.3 erläutert die Hintergründe dieser Forderung genauer. Folglich unterscheidet die Bewertungsstufe „6“ eine nicht verwendete Funktion von einer fehlenden Beurteilung (Stufe „5“).

Da den Beurteilungen „2“ - Beobachtungsbedarf, „3“ - Reparaturbedarf und „4“ - Austauschbedarf direkt Handlungsanweisungen zugewiesen werden können, ist es für den Anwender von Vorteil, auch die Ergebnisse aus Grenz- und Schwellwerten in den entsprechenden Bewertungsstufen darzustellen. Diese einfache Festlegung führt dazu, dass jedes Diagnoseurteil durch die Ziffern 1 bis 6 abgebildet werden kann. Die Repräsentation von Diagnoseergebnissen durch Ziffern ist aber nicht ausreichend, um ein Urteil in einem gesamthaften Zustandsmodell vollständig abzubilden, da unterschiedliche Diagnosemethoden mit unterschiedlicher Aussagekraft zum Einsatz kommen können. Bevor also ein mathematisches Modell aus dem Funktionsmodell abgeleitet werden kann, bedürfen die tatsächlich verwendeten Diagnoseverfahren einer genaueren Betrachtung.

2.2 Diagnoseverfahren

2.2.1 Suche nach geeigneten Diagnoseverfahren

In Vorbereitung dieser Arbeit wurden 30 diagnostische Verfahren auf ihr Potenzial hinsichtlich der Bewertung physikalischer Wirkprinzipien in SF₆-Hochspannungsschaltfeldern analysiert. Im ersten Schritt wurden in der Branche bereits eingesetzte Verfahren untersucht. Im zweiten Schritt wurden Verfahren gesucht, die entweder vorhandene Verfahren hinsichtlich der minimalinvasiven Forderung ablösen können oder bisher nicht bewertete physikalische Wirkprinzipien beurteilen können. Zur Strukturierung der Suche wurden folgende Gruppen gebildet:

1. Verfahren zur Bewertung der dielektrischen Festigkeit

Diese Gruppe beinhaltet Verfahren, die eine Bewertung der dielektrischen Komponenten der gasisolierten Schaltanlage ermöglichen. Analog des Funktionsmodells für die Hauptfunktion „Spannung halten“ lassen sich weitere Unterscheidungen zwischen der Gasdichtheit im Sinne der Funktionsfähigkeit der metalli-

schen Kapselung, der Qualität des SF₆-Gases selbst und den festen Isolierkörpern machen.

2. Verfahren zur Bewertung statischer Kontaktverbindungen

Diese Gruppe umfasst Verfahren zur Beurteilung des stromführenden Systems (Hauptfunktion „Strom führen“). Wie bereits das Funktionsmodell Abschnitt 2.1.2, Seite 17ff. beschreibt, bewerten Verfahren dieser Suchgruppe die Verbindungsarten „geschraubt“ und „gesteckt“ sowie die Verbindungsart „lastlos schaltbar“.

3. Verfahren zur Bewertung von Schaltgeräten

Unter den Begriff der mechanischen Systemeigenschaften fallen die Schaltgeräte. Damit werden in dieser Gruppe Verfahren zur Beurteilung der Hauptfunktionen „Fehler- und Lastströme schalten“, „Strom oder Spannung schalten“, „Aktivteile erden“ und „Kabel entladen“ gesucht. Insbesondere Schaltzeiten und Schaltwege sind von hohem Interesse, da bereits bekannte Schwachstellen des Systems wie mechanisches Spiel, erhöhte Reibungswerte, gebrochene Federelemente usw. beurteilt werden müssen [Bua10]. Aufgrund der starken Wechselwirkung zwischen Antrieb und Unterbrechereinheit in Abhängigkeit des zu schaltenden Stromes [LRB04] wird die Verbindungsart „unter Last schaltbar“ dieser Suchgruppe zugeordnet.

4. Sonstige Verfahren

Zu den sonstigen Verfahren gehören die klassischen Sicht- und Funktionskontrollen. Des Weiteren werden hier bereits eingesetzte diagnostische Verfahren erfasst, deren Beurteilungen sich auf die Hauptfunktionen „Spannung messen“, „Strom messen“, „Überspannung abbauen“ und „Netzanschluss herstellen“ beziehen und denen entsprechend der Störungsstatistiken (siehe Abschnitt 3.2.1) kein hohes Ausfallrisiko zugeordnet werden kann. Diese sonstigen Verfahren werden daher nachfolgend nicht weiter beschrieben.

2.2.2 Auswahlkriterien für geeignete Diagnoseverfahren

Zur strukturierten Entscheidungsfindung wurden die identifizierten diagnostischen Verfahren nach fünf Kriterien bewertet:

1. Anwendbarkeit

Das Kriterium der Anwendbarkeit berücksichtigt die Besonderheiten des kompakten Aufbaus von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern und bestimmt, ob ein Verfahren auch praktisch in Anwendung kommen kann oder ob bauliche Eigenschaften gegen eine Anwendung sprechen.

2. Aussagefähigkeit

Mit der Aussagefähigkeit wird der Detektionsumfang möglicher fehlerbehafteter Zustände beschrieben. Diagnostische Verfahren, die beispielsweise nicht alle bekannten Fehlerarten identifizieren können, haben weniger Aussagefähigkeit als Verfahren, die alle Fehlerarten entdecken könnten. Genauso kann ein Verfahren, das alle bekannten Fehlerarten aufzeigen kann, eine geringere Aussagefähigkeit haben als ein anderes Verfahren, welches eine Fehlerdetektion in einem wesentlich früheren Fehlerentwicklungsstadium erlaubt. Folglich bildet sich die Aussagefähigkeit in diesem Kontext aus möglicher Aussagetiefe und Zuverlässigkeit des Verfahrens.

3. Bewertungsaufwand

Das Kriterium des Bewertungsaufwands berücksichtigt den zeitlichen und den technischen Aufwand in der Anwendung eines Verfahrens. Auch werden Anschaffungskosten berücksichtigt, sodass mit diesem Kriterium die Gesamtkosten zur Beschaffung der diagnostischen Information beurteilt werden können.

4. Komplexität

Die Komplexität eines diagnostischen Verfahrens steigt mit der Anzahl an Zwischenschritten, die von der Messung bis zur Auswertung benötigt werden. Je komplexer ein Messverfahren ist, desto höher muss der Ausbildungs- und Trainingsgrad des ausführenden Diagnostikers sein. Zudem steigt mit der Komplexität auch die Anfälligkeit für Mess- oder Beurteilungsfehler.

5. Negative betriebliche Auswirkungen

Unter der betrieblichen Auswirkung wird hier eine durch ein diagnostisches Verfahren geforderte Einschränkung des Betriebs verstanden. Im einfachsten Fall erfolgt eine visuelle Begutachtung während des Betriebs. Im aufwändigsten Fall muss freigeschaltet und Montagearbeiten müssen im Inneren der metallischen Kapselung durchgeführt werden. Anhand der betrieblichen Auswirkungen lässt sich die aus Abschnitt 1.1 geforderte Minimalinvasivität prüfen.

2.2.3 Verwendete Diagnoseverfahren

Die verwendeten Verfahren sind bereits veröffentlicht [PTZ+14] und umfassen neben den klassischen Sicht- und Funktionskontrollen diverse Messverfahren (Tabelle 2-1), deren Beurteilung nach den unter 2.2.2 genannten Kriterien in Labor- und Feldtests erfolgte. In diesem Abschnitt werden die ausgewählten Messmethoden kurz in ihrer Anwendung erläutert und Erfahrungen berichtet.

Tabelle 2-1 Verwendete Messverfahren

Suchgruppe	Methode/ Verfahren	Anwendbarkeit	Aussagefähigkeit	Bewertungsaufwand	Komplexität	negative betriebliche Auswirkungen
dielektrische Festigkeit	akustische Teilentladungsdagnostik	immer möglich	hoch	hoch	gering	kaum
	UHF-Teilentladungsdagnostik	bauliche Einschränkungen	sehr hoch	gering	hoch	kaum
	SF ₆ -Gasanalyse	immer möglich	hoch	gering	gering	kaum
Kontaktverbindungen	Thermografie	immer möglich	eher hoch	gering	gering	gering
	RFID-Thermoobservation	immer möglich	eher hoch	eher hoch	eher hoch	gering
	Spannungsfallmessung	bauliche Einschränkungen	hoch	hoch	gering	hoch

Suchgruppe	Methode/ Verfahren	Anwendbarkeit	Aussagefähigkeit	Bewertungsaufwand	Komplexität	negative betriebliche Auswirkungen
Schaltgeräte	Mindestbetätigungs- spannung	immer möglich	eher hoch	gering	gering	gering
	Auslöserstrom	immer möglich	hoch	gering	gering	gering
	Weg-Zeit-Messung	bauliche Ein- schränkungen	sehr hoch	hoch	eher hoch	eher hoch
	Strom-Zeit-Messung	immer möglich	hoch	gering	gering	gering
	Schaltzeiten des Lei- stungsschalterkontakts	bauliche Ein- schränkungen	hoch	hoch	eher hoch	eher hoch
	Widerstand- Zeitmessung	bauliche Ein- schränkungen	sehr hoch	hoch	eher hoch	eher hoch

Akustische und UHF¹⁰-Teilentladungsdiagnose

Die Verfahren akustische und UHF-Teilentladungsdiagnose sind sowohl in Laborversuchen als auch im Rahmen der Feldtests angewendet und als geeignet eingestuft worden [Paw16; PTZ+15a; PTZ+15b; PTZ+14]. Mit entsprechender Sensorik kann ein entsprechendes Messgerät beide Verfahren ausführen.

Die Teilentladungssignale werden von einem Sensor erfasst und verstärkt an die Auswerteeinheit übertragen, die die Daten visualisiert und zur weiteren Auswertung auf einen Computer übertragen kann. Bei der akustischen Teilentladungsmessung an der Oberfläche der metallischen Kapselung muss der Luftspalt zwischen Kontaktfläche des akustischen Sensors und Oberfläche mit einem Gel ausgefüllt werden. Dieses Gel hat im Gegensatz zur Umgebungsluft nur sehr geringen dämpfenden Einfluss auf das zu messende Signal (Körperschall). Während die akustische Teilentladungsdiagnose unabhängig vom Fabrikat eines SF₆-Hochspannungsschaltfeldes angewandt werden kann, ist die Anwendbarkeit der UHF-Teilentladungsdiagnose begrenzt. Nur wenige Fabrikate verfügen über geeignete Ankopplungspunkte für Sensoren. Hingegen kann der akustische Sensor an jedem beliebigen Punkt installiert werden. Generell ist der Aufwand der akustischen Teilentladungsdiagnose als hoch einzustufen, da wegen der akustischen Dämpfung an Flanschflächen für jedes Rohrstück eines Gasraums eine separate Messung erforderlich ist. Ein Beispiel für ein auffälliges Messergebnis wird in Abbildung

¹⁰ UHF = Ultrahochfrequenz („ultra high frequency“)

2-16 gegeben. Es wird das akustische Signal S , erfasst in Millivolt (mV), über den Phasenwinkel der Spannungsfrequenz angezeigt. Die Abbildung zeigt eine Aufnahme über eine Minute und hat unmittelbar nach dem Spannungsmaximum einem deutlichen Signalausschlag. Dieses Bild ist charakteristisch für einen metallisch verunreinigten Stützisolator. Ein fehlerfreies System weist im Gegensatz dazu keine Signalausschläge oberhalb des Grundrauschens aus, das sich erfahrungsgemäß bei etwa $S = 3...4\text{mV}$ einstellt.

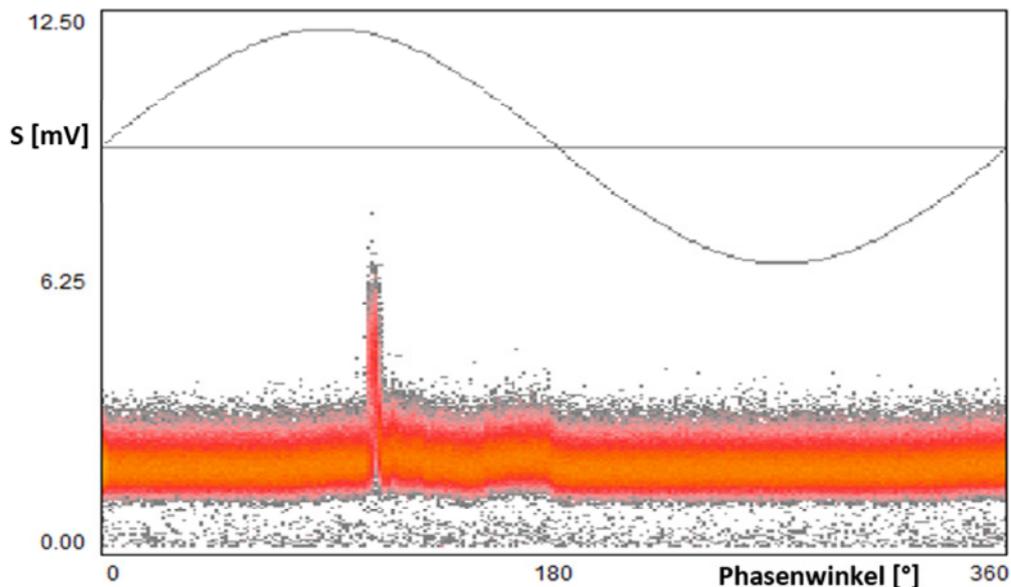


Abbildung 2-16: Muster einer akustischen Teilentladungsmessung von einem metallisch verunreinigten Stützisolator

Für weiterführende Informationen über die akustische und UHF-Teilentladungsdiagnose wie z.B. die Zuordnung von Mustern eines Teilentladungsmessergebnisses zu Fehlern und deren Fehlerkritikalität sei auf [Paw16] verwiesen.

SF₆-Gasanalyse

Zur SF₆-Gasanalyse wird ein Mehrfachmessgerät verwendet, welches das SF₆-Gas auf Volumenanteil, Feuchte-, SO₂- und HF-Konzentration¹¹ analysiert. Alle Messungen treffen Aussagen über die Reinheit des SF₆-Gases. Die Reinheit steht im Zusammenhang mit der dielektrischen Festigkeit und den Lichtbogenlöscheigenschaften. Diese Zusammenhänge werden in dieser Arbeit im Zuge der Ausgestaltung der Schnittstelle

¹¹ SO₂ = Schwefeldioxid; HF = Fluorwasserstoff

zwischen Diagnoseergebnis und mathematischer Berechnung des Zustandsindex erneut aufgegriffen und detaillierter beschrieben (siehe Abschnitt 2.4.4).

Der Anschluss des Messgerätes zur SF₆-Gasanalyse erfolgt mit einer Messleitung am SF₆-Füllanschluss des Gasraums. Die Messleitung ist ein gasfester, metallummantelter Schlauch, der säure- und ölbeständig ist. Außerdem ist er druck- und vakuumfest. Er ist mit Gasschnellkupplungen (federbelastete Rückschlagventile, die beim Kuppelvorgang geöffnet werden) ausgestattet. Die Messung selbst erfolgt unter strömendem Gas, das aus dem zu untersuchenden Gasraum in ein Zwischenvolumen abströmt. Um Verfälschungen durch Umgebungsluft oder Ähnlichem vorzubeugen, erfolgt vor der eigentlichen Messung ein Spülvorgang, der den Messaufbau von Restgasen aus vorangegangenen Messungen befreit. Nach dem Spül- und Messvorgang kann das Messgerät das Gas in den Gasraum oder in eine Gasflasche (zurück-)pumpen. Die Messergebnisse werden sequentiell mit verschiedenen Sensoren automatisch ermittelt. Die Funktion der einzelnen Sensoren ist nachfolgend erläutert.

SF₆-Volumenprozentsatz-Sensor:

Die SF₆-Volumenprozentsatzmessung wertet unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten von Gasen aus. Die Schallgeschwindigkeit in der Umgebungsluft beträgt ca. $c_L \approx 330\text{m/s}$, in reinem SF₆-Gas beträgt diese hingegen nur ca. $c_{SF_6} \approx 130\text{m/s}$. In der Messzelle wird während der Volumenprozentsatzanalyse die Schallgeschwindigkeit gemessen. Gleichzeitig findet eine Temperaturkompensation statt. Mit Hilfe der internen Recheneinheit wird aus der temperaturkompensierten Schallgeschwindigkeit der SF₆-Volumenprozentsatz, also der Volumenanteil des SF₆ im gesamten Gasvolumen, berechnet.

Feuchte-, SO₂- und HF-Sensor:

Die eingesetzten Sensoren sind Kondensatoren, die ihre Kapazität entsprechend der Menge des gesuchten Stoffes ändern und über Messbrücken ausgewertet werden. Die verwendeten Sensoren für SO₂ und HF haben laut Messgerätehersteller eine Lebensdauer von nur zwei Jahren. Die Lebensdauereinschränkung ergibt sich aus der sogenannten Drifteigenschaft des Sensors, mit welcher der eintretende Signalverlust über die

Zeit beschrieben wird und die anhand des nachfolgenden Beispiels verdeutlicht werden soll:

Ein zwei Jahre alter SO_2 -Sensor hat bis zu 48% Signalverlust (entsprechend des Datenblattes aus dem verwendeten Gerät). Bei einem Sensor mit dem Messbereichsendwert von 20ppm_V ¹² können somit bis zu $9,6\text{ppm}_V$ zu wenig angezeigt werden. Wird zusätzlich die Messungenauigkeit berücksichtigt ($\pm 2\%$ des Messbereichsendwerts), können sogar bis 10ppm_V zu wenig angezeigt werden. Dies würde bei einer eigentlichen Konzentration von 20ppm_V einen Fehler von 50% bedeuten.

Das Beispiel zeigt, dass das Messergebnis der HF- und SO_2 -Messungen zusätzlich in Abhängigkeit des Sensoralters betrachtet werden muss, um die Aussagekraft des Messergebnisses richtig zu interpretieren.

Thermografie

Entsprechend der Ergebnisse aus [PTZ+15a] verursachen auffällige elektrische Verbindungen innerhalb eines SF_6 -Gasraums in Abhängigkeit der Strombelastung eine Temperaturabweichung an der metallischen Kapselung des SF_6 -Hochspannungsschaltfelds. Bei einer Temperaturabweichung von $\Delta T > 1\text{K}$ ¹³ zur Referenztemperatur kann von einer fehlerbehafteten Kontaktverbindung ausgegangen werden. Die Referenztemperatur ist die Oberflächentemperatur eines nach Größe und Volumen ähnlichen Gasraums bzw. eines Nachbargasraums, welcher der gleichen Strombeanspruchung wie der zu untersuchende Gasraum unterliegt. Sehr umfangreiche Laborversuche zur Beurteilung des statischen Kontaktsystems durch die Oberflächentemperaturanalyse der metallischen Kapselung sind in [Paw16] zu finden.

Für die Praxis ist das Verfahren nur teilweise geeignet, da aufgrund der engen Bauweise viele SF_6 -Hochspannungsschaltfelder nicht immer einen ausreichenden visuellen Zugang für den Einsatz einer Thermografiekamera bieten.

¹² ppm_V = Teile pro Millionen Teile („parts per million“) bezogen auf Volumenteile

¹³ K = Kelvin, Einheit der Temperaturmessung, die in der Regel bei der Beschreibung von Temperaturdifferenzen Anwendung findet.

RFID¹⁴-Thermoobservation

Unter Thermoobservation wird die Aufnahme von Temperaturen über einen bestimmten Zeitraum verstanden. Die Messergebnisse werden in einstellbaren Abständen automatisch erfasst und gespeichert. Als Ergebnis steht folglich für jeden Messpunkt ein Temperaturverlauf zur Verfügung. Zur Thermoobservation wird ein Gerät eingesetzt, das sich durch die Verwendung der RFID-Kommunikation zwischen Tags und Empfänger auszeichnet. Dadurch ist eine drahtlose Kommunikation und Spannungsversorgung möglich. In Summe besteht das RFID-Thermoobservationsmessgerät aus den Einheiten Tag, Empfänger, Slave und Master. Auch die RFID-Thermoobservation erfasst die Oberflächentemperatur des SF₆-Hochspannungsschaltfelds und stellt damit eine alternative Diagnosemethode zur Thermografie dar.

Tags¹⁵:

Die sogenannten Tags bestehen aus einer Kommunikationseinheit und einem Temperatursensor. Einem Tag fällt damit die Aufgabe zu, die Oberflächentemperatur zu messen und das Messergebnis zu übertragen. Der Tag wird an der zu messende Oberfläche des zu beurteilenden Gasraums befestigt. Hier ist auf eine vollflächige metallische Berührung des Temperaturaufnehmers zu achten. Eine fehlerhafte Montage kann zu nicht unmittelbar identifizierbaren Messfehlern führen.

Empfänger:

Die Empfänger fragen das Messergebnis der einzelnen Tags ab (die Steuerung erfolgt über den sogenannten Slave) und werden mit Hilfe von Stativen positioniert. Diese sollten so aufgebaut werden, dass eine stabile Kommunikation zwischen Tags und Empfänger besteht. Die Herstellung einer stabilen Kommunikation zeigte sich in der Praxis oft aufwändig, da Empfänger und Tags häufig repositioniert werden mussten.

¹⁴ RFID = radio-frequency identification

¹⁵ Unter einem Tag versteht im Rahmen der RFID Technologie eine Daten- bzw. Informationsträger (hier: Datenträger mit der gemessenen Oberflächentemperatur) der neben den elektronischen Chips für Kommunikation und Messaufgabe auch eine Funkantenne enthält.

Slave:

Der sogenannte Slave ist die Sammeleinheit, an der bis zu vier Empfänger angeschlossen werden können. Er steuert die Abfrageroutinen und „sammelt“ die Messergebnisse aller verbundenen Tags ein.

Master:

Der sogenannte Master ist ein PC, der alle gesammelten Daten zusammenführt und zur Konfiguration des gesamten Systems dient.

Die Messgenauigkeit dieses Verfahrens bestimmt sich im Wesentlichen durch den Temperatursensor auf dem Tag. Bei dem verwendeten Messbereich $T = 0^{\circ}\text{C} \dots 65^{\circ}\text{C}$ liegt der Messfehler bei $\Delta T = \pm 0,5\text{K}$. Durch Kalibrierung der einzelnen Sensoren kann die Genauigkeit auf $\Delta T = \pm 0,15\text{K}$ verbessert werden. Dies ist für den Einsatz an SF₆-Hochspannungsschaltfeldern entscheidend, da erst ab einem Temperaturdelta zur Referenz $\Delta T > 1\text{K}$ ein gesicherter Rückschluss auf die Gasraumtemperatur vorgenommen werden kann [PTZ+15a].

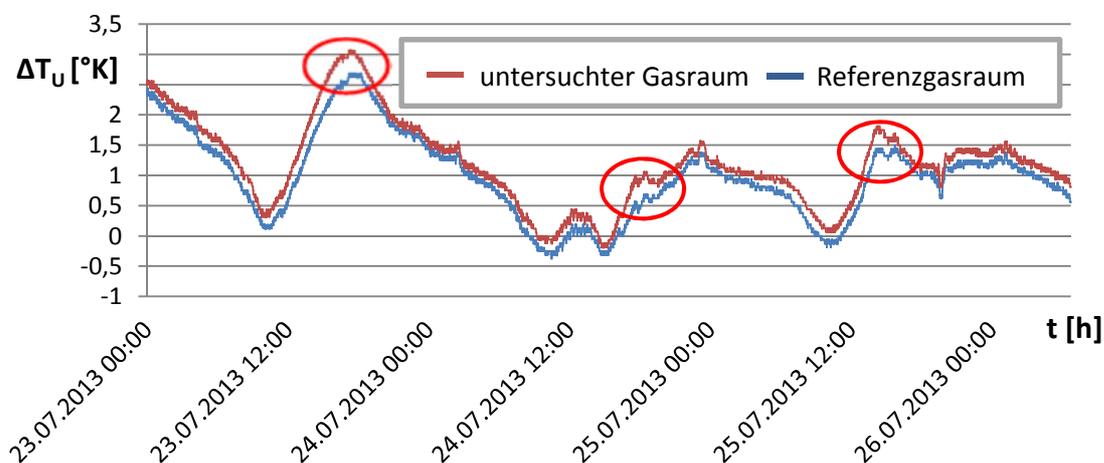


Abbildung 2-17: Thermoobservationsergebnis an zwei vergleichbaren Gasräumen

Beispielhaft zeigt Abbildung 2-17 das Ergebnis einer Thermoobservation über etwa drei Tage mit leichter Auffälligkeit an einem Gasraum (rote Kennlinie). Sowohl die Steigung als auch die Endtemperatur sind größer als bei den beiden anderen Trennschaltern (Referenzgasräume). Die erreichte Temperatur bezogen auf den geführten Strom von $I = 600\text{A}$ ist aber nicht kritisch, da die Temperaturerhöhungen, die durch die roten Ova-

le in der Abbildung gekennzeichnet sind, eine Differenz von $\Delta T < 1K$ aufweisen. Die Skalierung der Temperaturachse ΔT_U erfolgt im vorliegenden Fall auf Basis eines Vergleichsraum, der außer Betrieb ist und damit die Umgebungstemperatur nachbildet. Die Verwendung eines Vergleichsraum gegenüber der Lufttemperatur ist von Vorteil, da er gleiche thermischen Eigenschaften (z.B. gleiche Wärmekapazität) wie die untersuchten Gasräume besitzt.

Spannungsfallmessung

Mit der Spannungsfallmessung wird der Widerstand eines Kontaktes bzw. einer Kontaktstrecke bestimmt. Verwendet werden Konstantstromquellen, die bis zu $I = 600A$ Gleichstrom für Messungen bereitstellen. Es werden ein Stromkreis und ein Messkreis über das zu messende Element hergestellt. Der Messkreis sollte immer möglichst nah um die zu messende Stelle geschlossen werden.

Bedingt durch die metallische Kapselung besteht keine Möglichkeit des direkten Zugangs zum stromführenden Anlagenteil. Für die Anwendung der Spannungsfallmessung muss daher die Anlage geöffnet werden. Sofern die Anlage über isoliert aufgestellte Erdungsschalter verfügt, besteht die Möglichkeit, die Erdverbindung zu öffnen und so einen elektrischen Zugang zu dem stromführenden Leiter herzustellen. Vor Ausführung dieser Option ist wegen der Aufhebung der Erdung eine individuelle Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Im in dieser Arbeit betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv verfügen etwa 20% der Schaltfelder über isoliert aufgestellte Erdungsschalter.

Aufgrund der schweren Zugänglichkeit wird in der Regel über eine Reihe von mehreren Kontaktverbindungen gemessen. Daher ist immer zu prüfen, wie Referenzwerte und damit eine Beurteilungsgrundlage geschaffen werden kann. Folglich ist die Zuordnung der Widerstandserhöhung zu einer einzelnen Kontaktstelle schwierig.

Die praktischen Erfahrungen zeigen, dass die Messergebnisse besonders in sehr kleinen Widerstandsbereichen durch die Art und Weise des Messgeräteanschlusses variieren ($\pm 10\%$ bei Widerstandstrecken im höheren dreistelligen Mikroohm-Bereich). Es ist eine hohe Sorgfalt hinsichtlich der Aufbereitung des Anschlusskontaktes zum Leitersystem des Schaltfelds und dem Messgerät erforderlich.

Mindestbetätigungsspannung und Auslöserstrom

Verwendet wird ein Spulenauslösertestgerät, das die Mindestbetätigungsspannung und den dabei fließenden Wicklungsstrom der Ein- und Ausschaltpule eines Leistungsschalters misst. Die zur Schaltauslösung benötigte minimale Spannung wird dazu stufenweise erhöht. Diejenige Spannungsstufe, bei der die Auslösung stattfindet, ist die Mindestbetätigungsspannung. Der Messablauf und die Messwertausgabe werden automatisch vom Gerät ausgeführt. Auslöser stellen eine Steuerstelle des Leistungsschalters dar und sind immer zugänglich.

Weg-Zeit-Messung

Die Weg-Zeit-Messung dient zur Beurteilung des mechanischen Systems des Leistungsschalters. Leistungsschalterantriebe weisen beim Öffnen und Schließen des Schaltkontakts eine typische Kurve mit Beschleunigung, konstanter Bewegung und Bremsung auf. Mit Hilfe von Referenzkurven können Unregelmäßigkeiten erkannt werden [Nen15]. Aufgrund der verschiedenen Antriebstypen kommen verschiedene Weggeber (Drehgeber und Lineargeber) zum Einsatz, für die eine je nach Fabrikat des untersuchten SF₆-Hochspannungsschaltfelds individuelle mechanische Adaption geschaffen werden muss. Verwendet wird ein Multikanal-Messgerät, das mit verschiedenen Messkarten ausgerüstet werden kann und dementsprechend alle messtechnisch geforderten Größen zeitlich aufgelöst erfassen kann. Die Erprobungen haben aber gezeigt, dass eine messtechnische Adaption an ein SF₆-Hochspannungsschaltfeld aufgrund der baulichen Ausführungen nicht immer möglich ist. Insbesondere Hydraulikantriebe unterliegen starken Einschränkungen, da die Verbindung zwischen Antrieb und Schaltkontakt bei vielen Fabrikaten nicht zugänglich ist. Bezogen auf das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv (Abschnitt 3.2) können an etwa 70% aller Leistungsschalterantriebe Weg-Zeit-Kurven erfasst werden.

Als Beispiel für die Weg-Zeit-Messung ist in Abbildung 2-18 die Schaltbewegung eines Leistungsschalterantriebs von der Schaltstellung EIN nach AUS gezeigt. Der Weg $s(t)$ wird in *mm* gemessen und verläuft im vorliegenden Fall mit negativer Steigung. Wird die Wegposition $s = 0$ nach $t = 80ms$ erreicht, ist die AUS-Schaltung abgeschlossen. Der Zeitpunkt $t = 0$ markiert den Ausschaltbefehl für den Leistungsschalter. Eine erste Bewertung dieser Kurve erfolgt durch die Dauer der Bewegung und den Kurvenverlauf.

Beispielsweise lässt eine nicht stetige Kurve am Ende der Schaltbewegung vermuten, dass die Teilfunktion „System abbremsten“ (vgl. Abbildung 2-12, Seite 22) fehlerhaft ist. Eine genauere Auswertung muss mit einer Vergleichskurve erfolgen, da verschiedenen Antriebsfabrikate unterschiedliche Verlaufsformen für $s(t)$ vorweisen.

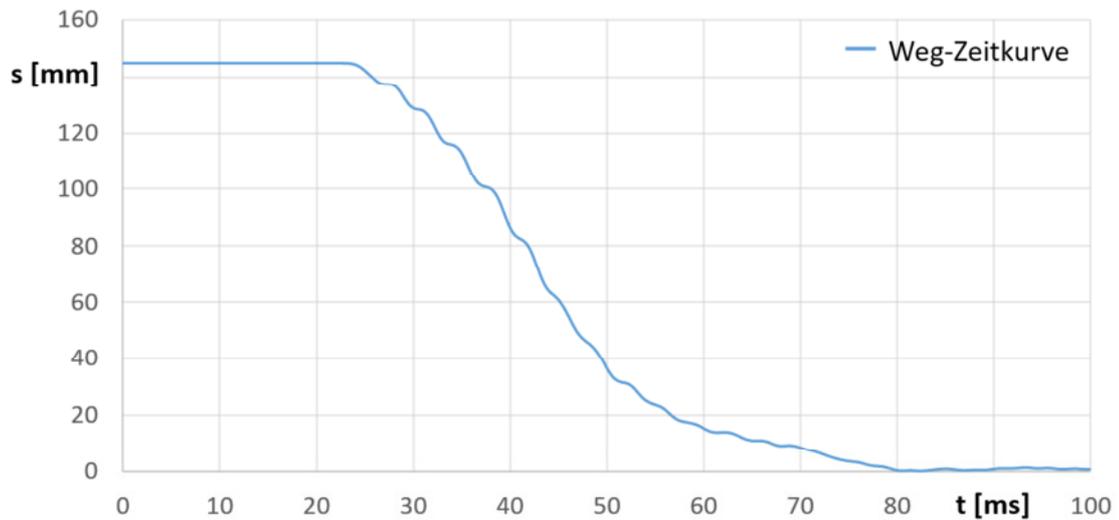


Abbildung 2-18: Weg-Zeitkurve eines Leistungsschalterkontakts bei AUS-Schaltung

Strom-Zeit-Messung

Für die Strom-Zeit-Messungen wird das unter dem Abschnitt zur Weg-Zeit-Messung bereits erwähnte Multikanal-Messgerät mit Analogmesskarte verwendet. Der Anschluss erfolgt durch Strommesszangen oder Messshunts. Die Messung von Motor- und Auslöserströmen erlaubt einen Rückschluss über das mechanische Verhalten dieser Komponenten. Der Zusammenhang zwischen der Kraftwirkung und den elektrischen Größen wurde für Auslöser bereits in Abschnitt 2.1.3, Seite 23ff. beschrieben.

Eine typische Form für eine Strom-Zeitkurve $I(t)$ für einen Auslöser zeigt Abbildung 2-19. Der Stromfluss beginnt mit Anlegen der Spannung über der Auslöserspule im Zeitpunkt $t = 0$. Der Anker innerhalb der Spule beschleunigt und trifft bei etwa $t = 20ms$ auf den Auslösemechanismus. Der Meldeschalter öffnet dann zu Beginn der Schaltbewegung bei ca. $t = 34ms$ den Stromkreis der Spule.

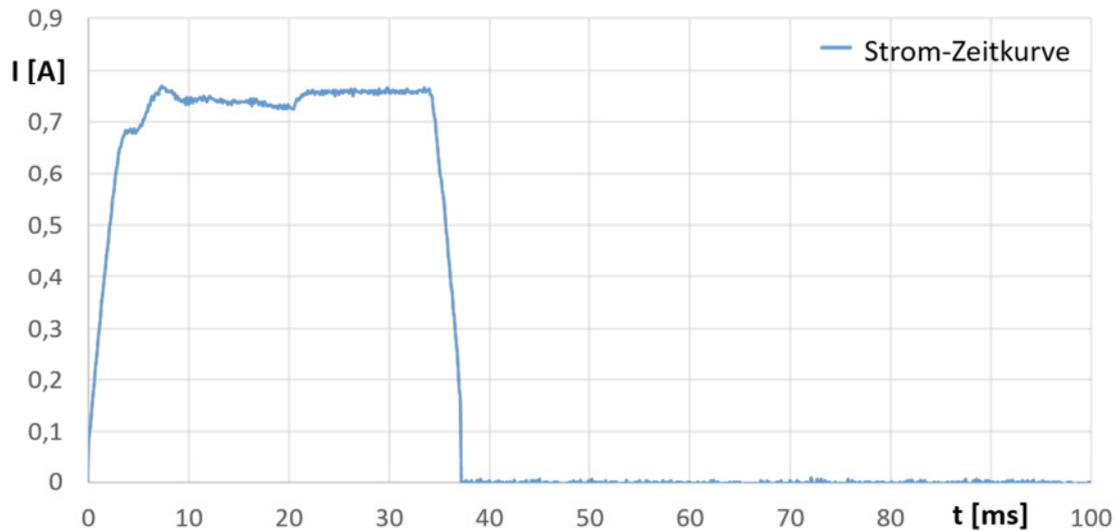


Abbildung 2-19: Strom-Zeit-Kurve eines Auslösers

Widerstand-Zeit-Messung

Die Widerstand-Zeit-Messung wird über den Hauptkontakt des Leistungsschalters während des Schaltvorgangs durchgeführt und erlaubt eine Beurteilung des Kontaktsystems ohne Öffnung des Gasraumes. Diese Messung benötigt aber auch den elektrischen Zugang zum inneren Kontaktsystem und unterliegt damit den gleichen Einschränkungen wie die Spannungsfallmessung.

Zur Widerstand-Zeit-Messung wird eine Konstantstromquelle an den zu messenden Schaltkontakt angeschlossen. Parallel wird ein Messkreis angeschlossen, über den die Spannung über der Unterbrechereinheit gemessen wird. Über die Veränderung des Widerstands kann der Betriebsstrom- und der Lichtbogenkontakt bewertet werden. Außerdem kann mit dieser Messung der Kontaktgleichlauf und die Schaltgeschwindigkeit (alternativ zur nachfolgend beschriebenen Schaltzeitenmessung) beurteilt werden, wenn die Kurven eines jeden Leistungsschaltepols zusammen dargestellt werden. Messfehler resultieren ggf. aus einer schlechten Verbindung zwischen Messsystem und Anschluss an das stromführende System (Übergangswiderstand).

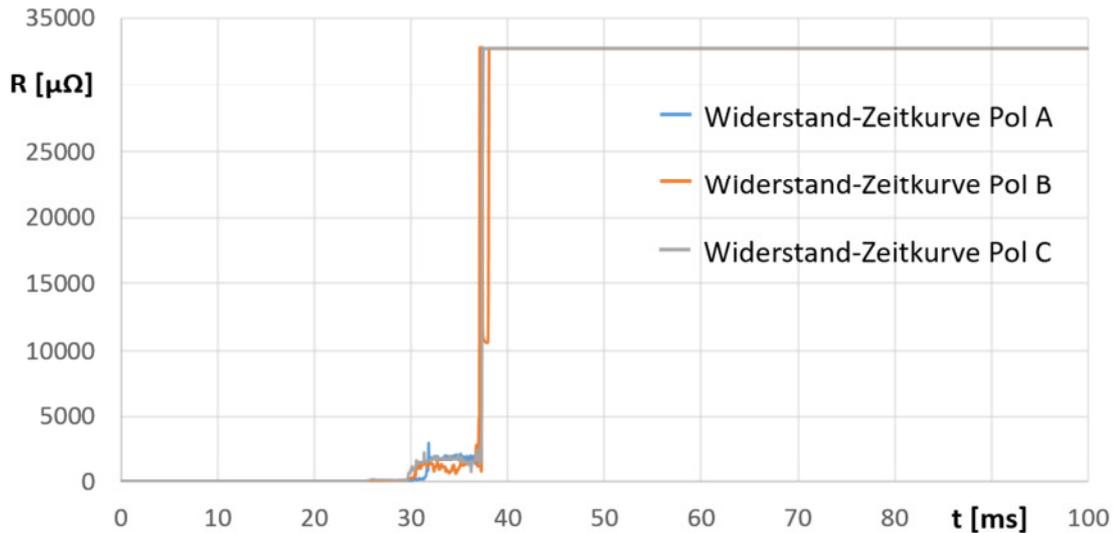


Abbildung 2-20: Widerstand-Zeitkurve der Leistungsschalterkontakte bei AUS-Schaltung

Abbildung 2-20 zeigt die jeweiligen Widerstand-Zeitkurven der drei Pole eines Leistungsschalters während der Ausschaltung. Im Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich der Leistungsschalter in Schaltstellung EIN und der Kontakt befindet sich in der Position, in der auch der Betriebsstrom getragen wird. Dieser Kontakt zeichnet sich durch einen sehr niedrigen Übergangswiderstand aus. Etwa zum Zeitpunkt $t = 30\text{ms}$ findet ein Übergang vom Betriebsstromkontakt zum Lichtbogenkontakt statt. Der Lichtbogenkontakt hat die Aufgabe kurzfristig einen Fußpunkt für einen Schaltlichtbogen darzustellen und muss daher thermisch hohen Anforderungen genügen. Er weist durch das verwendete, thermisch stabile Kontaktmaterial deutlich höhere Übergangswiderstände auf (bis Zeitpunkt $t \approx 38\text{ms}$). Der hohe Widerstandsanstieg signalisiert dann die galvanische Kontakttrennung ($R = 33000\Omega$ ist der maximale Messwert, den das Messsystem ausgeben kann). Anhand der Gleichzeitigkeit der Widerstand-Zeitkurven kann auch der Kontaktgleichlauf bewertet werden. Auch die Ausschaltdauer kann abgelesen werden, die in der gezeigten Abbildung $t \approx 38\text{ms}$ beträgt.

Schaltzeitenmessung

Bei der Schaltzeitenmessung werden der Gleichlauf und die Schaltgeschwindigkeit / -zeit eines Antriebs gemessen. Dafür wird das Öffnen und Schließen der Hauptkontakte aufgenommen und zeitlich ausgewertet.

Die Differenz der Phasen untereinander darf laut [DIN13] beim Öffnen maximal drei Millisekunden (1/6 Periode im 50 Hertz-Netz) und beim Schließen maximal fünf Millisekunden (1/4 Periode im 50 Hertz-Netz) betragen. Bei Leistungsschaltern mit mehreren Unterbrechereinheiten in Reihenschaltung müssen alle in Reihe geschalteten Kontakte innerhalb von zwei Millisekunden (1/8 Periode im 50 Hertz-Netz) schalten.

Wird ein Messwert unterhalb des Grenzwerts erreicht, ist dies nach [DIN13] als Hinweis für eine ordnungsgemäße Funktion zu werten. Erfahrungen zeigen aber, dass je nach Antriebstyp keine ordnungsgemäße Funktion trotz Einhaltung normativer Grenzwerte gegeben sein kann, also Grenzwerte in Abhängigkeit des Antriebstyps definiert werden müssen. Außerdem ist für die Schaltzeitenmessung ein Zugang zum Kontaktsystem analog der Spannungsfallmessung notwendig.

2.3 Mathematische Modellbildung

2.3.1 Begriffe und Definitionen

Entsprechend der Zielsetzung sollen Zustandsaussagen einzelner zustandsrelevanter Prüfkriterien den Gesamtzustand bzw. das Ausfallrisiko eines Schaltfeldes ausdrücken. Betrachtet sei dazu ein konkreter Zeitpunkt t^* in der in Abschnitt 2.1.4 eingeführten Abbaukurve des Abnutzungsvorrates.

Abbildung 2-21 zeigt dazu im Zeitpunkt t^* den verbleibenden, relativen Abnutzungsvorrat als dicke, schwarze, horizontale Linie. Der Abnutzungsvorrat beschreibt den Istzustand der betrachteten Einheit E und wird Zustandsindex $z(t^*)$ genannt. $z(t^*)$ teilt den gesamten Betrachtungsraum in den Bereich des Substanzverlusts und des Abnutzungsvorrats. Beide Bereiche bilden sich aus den diagnostischen Ergebnissen A (Information, die für Abnutzungsvorrat von E spricht) und den diagnostischen Ergebnissen \bar{A} (Information, die für Substanzverlust von E spricht). Entsprechend identifizierter Unsicherheiten hat der Zustandsindex $z(t^*)$ eine Unschärfe, d. h. der reale Zustandsindex liegt innerhalb der Grenzen des Unsicherheitsbereichs. Zwecks logischer Zuordnung und

grafischer Darstellung sind die Bereiche des Abnutzungsvorrats, der Unsicherheit und des Substanzverlusts übereinander angeordnet. Der folgende Abschnitt 2.3.2 zeigt, dass die mathematische Aufbereitung dieser Darstellung sehr gut mit der Evidenztheorie realisierbar ist (evidenztheoretische Interpretation) und prinzipiell nur die Beträge dieser Bereiche von Relevanz sind. Diese Beträge werden in der Evidenztheorie Massen genannt. Diese werden für die Zustandsbewertung als sogenannten Massezahlen $m(A)$ für den Abnutzungsvorrat, $m(U)$ für die Unsicherheit und $m(\bar{A})$ für den Substanzverlust interpretiert. $m(A)$ bzw. $m(\bar{A})$ ist folglich der direkte Ausdruck des normativ beschriebenen Abnutzungsvorrats bzw. Substanzverlusts, um den der Betrachter der Zustandsbewertung der Einheit E sicher weiß.

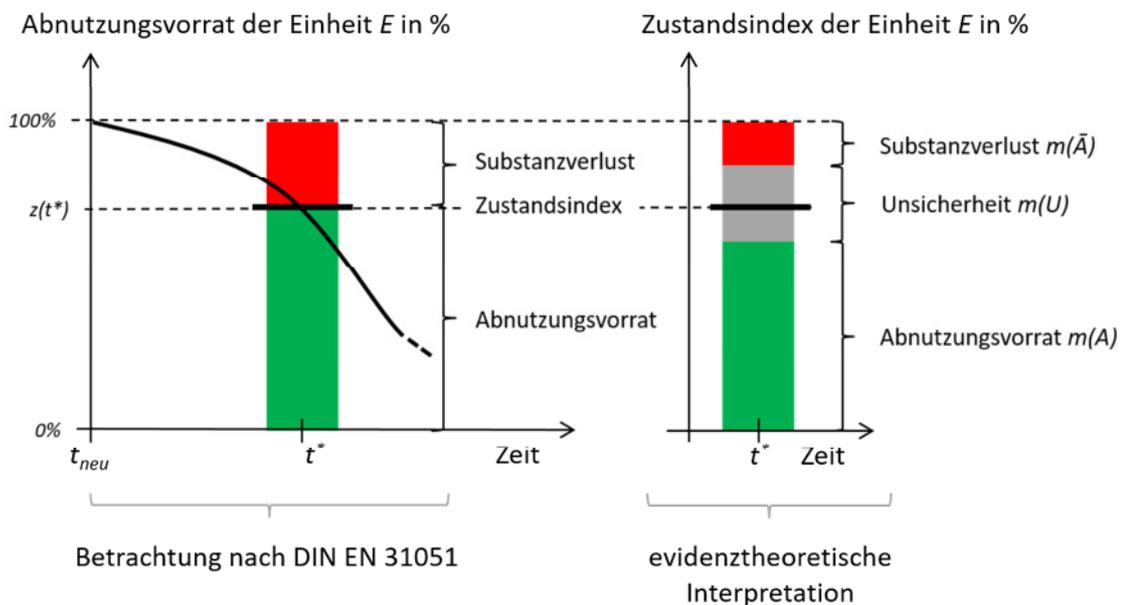


Abbildung 2-21: Abbaukurve des Abnutzungsvorrats im Zeitpunkt t^*

2.3.2 Einführung in die Evidenztheorie

In der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie nach Bayes kann ein Ereignis A entweder eintreten oder nicht eintreten (\bar{A}). Aus der Eintrittswahrscheinlichkeit P für A lässt sich mit $P(\bar{A})=1-P(A)$ direkt die Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses bestimmen. Diese Darstellung ist offensichtlich hier nicht sachgemäß, da eine schwache Wahrscheinlichkeit für einen guten Zustand nicht automatisch ein starker Hinweis für einen schlechten Zustand ist. Auch eine fehlende oder eine alte Information spricht weder eindeutig für A noch für \bar{A} . Die zusätzliche Berücksichtigung von unsicherem oder unvollständigem

Wissen kann aber durch die Evidenztheorie¹⁶ abgebildet werden. Die Evidenztheorie nach [Sha76; Dem67] betrachtet Mengen von Hypothesen. Der Spezialfall der einelementigen Menge bildet die Beschreibungsmöglichkeiten der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie ab. Damit stellt die Evidenztheorie eine Verallgemeinerung der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie dar [SF02; Sha76].

Die Evidenztheorie kann Unsicherheit durch die Verwendung von zwei Wahrscheinlichkeitsmaßen berücksichtigen [Dem67], nämlich:

- Glaubensgrad Bel (degree of belief)
- Plausibilitätsgrad Pl (degree of plausibility)

Der Glaubensgrad Bel beschreibt den Grad der Gewissheit über eine Hypothese. Der Plausibilitätsgrad Pl berücksichtigt eine Erweiterung des Grads der Gewissheit, der aus vorhandenen Hinweisen einer Gegenhypothese resultiert. Eine alternative Beschreibung von Glaubensgrad und Plausibilitätsgrad stellen die bereits am Ende des Abschnitts 2.3.1 genannten Massezahlen dar [Sha76].

Die Anwendung der Evidenztheorie für die Zustandsbewertung einer betrachteten Einheit E (Ereignisraum oder auch Beobachtungsrahmen genannt) führt zu einer endlichen Anzahl O von Hinweisen (diagnostische Ergebnisse), die eine Menge möglicher Elementarereignisse zu E (Zustandsaussagen zu E) liefern. Die formale Beschreibung erfolgt in der Beobachtungsfunktion Γ :

$$\Gamma : O \rightarrow 2^E \quad (2-1)$$

Wie in Abschnitt 2.3.1 bereits beschrieben, existieren für diese Arbeit die Elementarereignisse

- A : Hinweis auf Abnutzungsvorrat bezogen auf den Neuzustand
- \bar{A} : Hinweis auf Substanzverlust bezogen auf den Neuzustand.

$$E = \{A, \bar{A}\} \quad (2-2)$$

¹⁶ Als einführende Literatur in deutscher Sprache sei [BHS07] und [Spi93] empfohlen.

Zusätzlich sind die Sonderfälle „kein Hinweis vorliegend“ und „Funktionseinheit nicht vorhanden“, wie in Abschnitt 2.1.4 als Bewertungsstufe „5“ und „6“ eingeführt ist, zu berücksichtigen. Daher gilt:

$$2^E = \begin{cases} \emptyset & \text{für baulich nicht vorhandene Funktionseinheiten} \\ A, \bar{A}, U & \text{für baulich vorhandene Funktionseinheiten} \end{cases} \quad (2-3)$$

Wie in Abbildung 2-21 gezeigt, können die evidenztheoretischen Massezahlen direkt das Ergebnis für Substanzverlust, Unsicherheit und Abnutzungsvorrat darstellen. Daher sind Massezahlen von elementarer Bedeutung für das Zustandsmodell.

Die Einführung der Massezahlen geht auf [Sha76] zurück und basiert auf der Annahme, dass ein partielles Vertrauen in eine Aussage als Teilmenge Z vom Ereignisraum E durch eine reelle Zahl $Bel(A) \in [0, 1]$ abgebildet werden kann. Dazu wird definiert, dass eine Funktion $m: 2^E \rightarrow [0, 1]$ Basiswahrscheinlichkeit heißt, wenn sie die Bedingungen

$$m(\emptyset) = 0 \quad (2-4)$$

$$\sum_{Z: Z \subseteq E} m(Z) = 1 \quad (2-5)$$

erfüllt. Formel (2-4) zeigt, dass einer leeren Menge kein Basisvertrauen zugeordnet werden kann. Formel (2-5) beschreibt, dass sich das verfügbare Gesamtbasisvertrauen zu 1 addieren muss.

Die Aufgabe für die evidenztheoretische Zustandsmodellierung ist folglich, dass jedes Urteil über eine (Teil-) Funktion, resultierend aus dem verwendeten Diagnoseverfahren, durch geeignete Massezahlen repräsentiert werden muss. Die Betrachtungsfunktion Γ bestimmt dazu Elementarereignisse, die durch die Massezahlen ausgedrückt werden.

2.3.3 Berücksichtigung des Hinweisersalters

Die Anwendung diagnostischer Verfahren stellt einen Arbeitsprozess am SF₆-Hochspannungsschaltfeld dar und unterliegt organisatorischen Randbedingungen wie Personalkapazitäten und Schaltmöglichkeiten. Es ist daher möglich, dass einzelne Verfahren, also die Erhebung der zustandsrelevanten Informationen, zu verschiedenen Zeitpunkten ausgeführt werden. Es ist plausibel anzunehmen, dass eine jüngere Information aussage-

fähiger ist, als eine – dem gleichen Verfahren entstammende – ältere Information, da potenziell eine Zustandsveränderung nach der Erfassung stattgefunden haben könnte. Zusätzlich ist anzunehmen, dass Selbstheilungseffekte auszuschließen sind, also eine entstandene Auffälligkeit sich ohne Instandhaltungsmaßnahme nicht zurückbildet. Daher wird für das Alter der gewichteten Elementarereignisse m' der baulich vorhandenen Funktionseinheiten definiert zu:

$$m'(A) = f(d) \cdot m(A) \quad (2-6)$$

$$m'(\bar{A}) = m(\bar{A}) \quad (2-7)$$

$$m'(U) = 1 - m'(A) - m'(\bar{A}) \quad (2-8)$$

Formeln (2-6) bis (2-8) beschreiben, dass bei älteren Informationen die Massezahl für die Unsicherheit $m(U)$ steigt, also die Aussagekraft einer älteren Information im Gegensatz zu einer neueren Information kleiner ist. Da Selbstheilungseffekte ausgeschlossen werden, bleibt $m(\bar{A})$ konstant und der Glaubensgrad an einen guten Zustand $m(A)$ muss sinken. Daher wird die Funktion $f(d)$ (d aus dem Englischen für deterioration = Wertminderung) benötigt, um das unterschiedliche Vertrauen in unterschiedlich alte Informationen auszudrücken.

Wie die Ausführungen dieser Arbeit bisher zeigen, kann nach aktuellem Stand des Wissens kein Zusammenhang zwischen dem Zustand von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern und deren Alter quantifiziert werden. Da aber Störungen vorhanden sind, kann sich der Anlagenzustand über die Zeit verändern. Die Funktion $f(d)$ drückt die Annahme aus, dass ein Verlust von Abnutzungsvorrat über die Zeit möglich ist. Es ist derzeit nicht bekannt, ob bzw. wie sich verschiedene Einflussgrößen auf das Wertminderungsverhalten eines Hinweises auswirken. Daher wird folgend die Wertminderung allein durch die zeitliche Komponente ausgedrückt. Es gilt:

$$f(d) = f(t) \quad (2-9)$$

Da auch $f(t)$ mithilfe bisheriger Erkenntnisse sich nicht quantifizieren lässt, wird an dieser Stelle aus praktischen Gründen die Annahme getroffen, dass eine Information mit dem Alter $t_{max} = 6 \text{ Jahre} = 2190 \text{ Tage}$ (ohne Berücksichtigung von Schaltjahren) verwendet werden kann, bis diese keinen Wert mehr für die Zustandsbewertung hat. Hintergrund dieser Annahme ist die bisherige Instandhaltungsstrategie für das betrachtete

Schaltfeldkollektiv nach Abschnitt 1.1. Im Zuge der verschiedenen Instandhaltungstätigkeiten werden innerhalb von sechs Jahren die wichtigsten zustandsrelevanten Informationen über ein SF₆-Hochspannungsschaltfeld erhoben. Damit erfolgt die einfache Berücksichtigung des Hinweisersalters t in Tagen für diese Arbeit durch

$$f(t) = 1 - \frac{1}{2190 \text{ Tage}} \cdot t, \quad t \in [0; 2190 \text{ Tage}]. \quad (2-10)$$

2.3.4 Kombination von Bewertungsergebnissen

Die Notwendigkeit der Kombination von Bewertungsergebnissen sei an folgendem Beispiel erläutert:

Zur Bewertung des statischen Kontaktsystems (Hauptfunktion „Strom führen“) wird eine Spannungsfallmessung (siehe Abschnitt 2.2.3) durchgeführt. Aufgrund mangelnder Zugänglichkeit umfasst die Messstrecke 15 Kontaktverbindungen. Auf Phase L3 wird eine kritische Widerstandserhöhung festgestellt. Unbekannt ist, ob dieser Fehler sich über die Reihenschaltung mehrerer Verbindungen aufaddiert oder ob er punktuell an einer örtlich noch nicht bekannten Verbindung auftritt. Daher wird der betroffene Abschnitt wieder zugeschaltet und mittels einer Netzumschaltung besonders stark belastet. Die Temperaturentwicklung des Abschnitts wird mithilfe einer Thermografiekamera überwacht und die kritische Temperatur nach [Paw16] bestimmt. Zwei Ergebnisszenarien sind möglich:

1. Kein Gasraum zeigt eine kritische Temperaturerhöhung: Die Auffälligkeit hat keine signifikante betriebliche Bedeutung. Der gemessene Abschnitt ist zwar auffällig, die Auswirkung ist aber nicht kritisch.

Die Kombination der Ergebnisse aus der Spannungsfallmessung und der Thermografiemessung führt zu einem besseren Zustandsergebnis und zu einer kleineren Unsicherheit des Wissens über das statische Kontaktsystem.

2. Ein Gasraum erwärmt sich kritisch: Die Auffälligkeit kann einer einzelnen Kontaktverbindung zugeordnet werden. Entweder muss eine Reparatur durchgeführt oder eine betriebliche Einschränkung der Stromhöhe ausgesprochen werden.

Die Kombination der beiden Messergebnisse führt zu einem schlechteren Zustandsergebnis und auch hier zu einer kleineren Unsicherheit des Wissens über das statische Kontaktsystem.

Sofern die Informationsquellen voneinander unabhängig sind und sich auf den gleichen Betrachtungsrahmen E beziehen, bietet die Evidenztheorie in Form der Dempster'schen Regel (zurückgehend auf [Dem67]) eine Berechnungsvorschrift, welche die Logik des Beispiels umsetzt. Die Vorschrift – in Notation der Massezahlen – lautet

$$m_1(X) \oplus m_2(X) = \frac{1}{1-K} \cdot \sum_{Y_1 \cap Y_2 = X} m_1(Y_1) \cdot m_2(Y_2) \quad (2-11)$$

$$\text{mit} \quad K = \sum_{Y_1 \cap Y_2 = \emptyset} m_1(Y_1) \cdot m_2(Y_2) \quad (2-12)$$

für $X \subseteq E, X \neq \emptyset$.

Formel (2-12) beschreibt den Konfliktgrad K der Aussagen Y_1 und Y_2 aus den Informationsquellen 1 und 2, die sich aus der Summe aller Produkte der sich widersprechenden Elementarereigniskombinationen (nicht plausible Kombinationen) bildet. $0 < K < 1$ beschreibt einen partiellen Konflikt; $K = 1$ einen absoluten Konflikt, der als „echte Inkonsistenz“ bezeichnet werden kann und zu einer Fehlermeldung führen sollte [BHS07]. Entsprechend zeigt der Summenteil der Formel (2-11) die Summe aller Produkte aus sich nicht widersprechenden Elementarereigniskombinationen (plausible Kombinationen) und wie dieses Ergebnis zusammen mit K zu einer kombinierten Massezahl über zur Gesamtaussage X führt.

Zur Verdeutlichung wird die Regel für das Beispiel dieses Abschnittes angewendet:

Tabelle 2-2: Massezahlen des Beispiels

	A	U	\bar{A}
$m^{\text{Spannungsfall}}$	0	0,3	0,7
m_1^{Thermo}	0,6	0,4	0
m_2^{Thermo}	0	0,1	0,9

A = Aussage für den Abnutzungsvorrat, U = Aussage zur Unsicherheit, \bar{A} = Aussage zum Substanzverlust

Es wird angenommen, dass die diagnostischen Ergebnisse der Messungen entsprechend Tabelle 2-2 als Massezahlen ausgedrückt werden. Der Konfliktgrad K ermittelt sich nach (2-12) für beide Ergebnisszenarios zu

$$K_1 = m^{Spannungsfall}(A) \cdot m_1^{Thermo}(\bar{A}) + m^{Spannungsfall}(\bar{A}) \cdot m_1^{Thermo}(A) \\ = 0 \cdot 0 + 0,7 \cdot 0,6 = 0,42 \quad \text{und}$$

$$K_2 = m^{Spannungsfall}(A) \cdot m_2^{Thermo}(\bar{A}) + m^{Spannungsfall}(\bar{A}) \cdot m_2^{Thermo}(A) \\ = 0 \cdot 0,9 + 0,7 \cdot 0 = 0 .$$

Entsprechend resultiert als kombinierte Beschreibung für den Ereignisraum in den Ergebnisszenarios:

$$m_1(A) = \frac{0 \cdot 0,6 + 0 \cdot 0,4 + 0,6 \cdot 0,3}{1 - 0,42} \approx 0,31 \quad m_2(A) = 0 \\ m_1(U) = \frac{0,3 \cdot 0,4}{1 - 0,42} \approx 0,21 \quad m_2(U) = \frac{0,3 \cdot 0,1}{1 - 0} = 0,03 \\ m_1(\bar{A}) = \frac{0,7 \cdot 0 + 0,7 \cdot 0,4 + 0 \cdot 0,3}{1 - 0,42} \approx 0,48 \quad m_2(\bar{A}) = \frac{0,7 \cdot 0,1 + 0,7 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,3}{1 - 0} = 0,97$$

Abbildung 2-22 visualisiert das durch Kombination ermittelte Gesamtergebnis der beiden jeweiligen Ergebnisszenarios. Man erkennt, dass jede Information unabhängig von Ihrer Aussage für Substanzverlust oder Abnutzungsvorrat die Unsicherheit verringert und damit den Ergebnisbereich, in dem der Zustandsindex liegen muss, verkleinert.

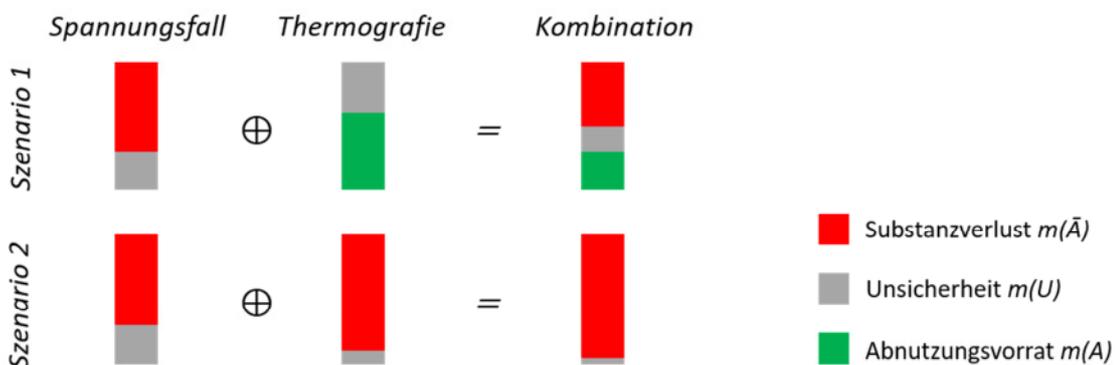


Abbildung 2-22: Ergebnis der beispielhaften Massezahlkombinationen

Da die Kombination von Massezahlen nach der Hinweiserterung den zweiten Transformationsschritt darstellt, werden Massezahlen, die aus anderen Massezahlen m' , deren Hinweiserter bereits berücksichtigt wurde, nachfolgend als m'' notiert.

2.3.5 Aggregation von Bewertungsergebnissen

Die nach Abschnitt 2.3.4 entwickelten Massezahlen m'' repräsentieren den Zustand einer Teilfunktion auf der tiefsten Ebene des funktionsorientierten Zustandsmodells. Da eine Teilfunktion Teil einer Hauptfunktion ist, hat m'' auch einen Anteil in der Zustandsbeschreibung einer Hauptfunktion bzw. sogar einen Anteil in der Zustandsbeschreibung eines gesamten SF₆-Hochspannungsschaltfelds. Sowohl [Neu97] als auch [Wel09] nutzen zur Quantifizierung des Anteils am Zustandsergebnis in einer übergeordneten Betrachtungseinheit Gewichtungsfaktoren. [Wel09] konzentriert sich dabei auf die Ermittlung möglichst repräsentativer und reproduzierbarer Gewichtungsfaktoren – ermittelt mit Hilfe des Analytisch Hierarchischen Prozesses (AHP) - um dann mit einem gemittelten Wert die übergeordnete Einheit zu beschreiben. [Neu97] setzt die Bekanntheit der Gewichtungsfaktoren voraus und verwendet diese für eine Anpassung des betrachteten Ereignisraums E und interpretiert die Massezahlen m'' entsprechend neu. Nach dieser Anpassung kann wieder die Kombinationsregel nach Dempster angewendet werden. Allerdings kann diese Vorgehensweise zu einer nachteiligen Auswirkung auf die Ergebnisinterpretation führen, wie folgendes Beispiel verdeutlicht:

Es liegen zwei absolut vertrauenswürdige Zustandsbewertungen vor, die sich durch $m_1''(A) = m_2''(A) = 1$ auszeichnen. Diese Zustandsbewertungen gehören zu jeweils zwei Teilfunktionen, die zusammen eine Hauptfunktion abbilden. Die Gewichtung des Anteils der beiden Teilfunktion in der Hauptfunktion beträgt jeweils $g_1 = g_2 = 0,5$. Das bedeutet, dass die Ergebnisse der Teilfunktionen mit einem Anteil zu 50% in das Endergebnis einfließen.

Wird nun das Teilergebnis m_1'' evidenztheoretisch auf Ebene der Hauptfunktion (nachfolgend indiziert mit *) betrachtet, so muss das bedeuten, dass die Aussage über den Abnutzungsvorrat nur zu 50% sicher ist, weil das Ergebnis der Teilfunktion 1 keine Aussage zur Teilfunktion 2 gibt. Das heißt, dass die Massezahlen m'' nun nicht mehr als ein evidenztheoretischer Hinweis über den Zustand der Teilfunktion, sondern als ein evidenztheoretischer Hinweis für den Zustand der Hauptfunktion interpretiert wird. Dies führt dazu, dass die Massezahlen an-

gepasst werden müssen, da nun eine zusätzliche Unsicherheit besteht, die aus der fehlenden Aussage der Teilfunktion 1 für die Teilfunktion 2 resultiert. Damit ergibt für die Massezahlen bezogen auf deren Aussage zur Hauptfunktion

$$m_1^*(A) = m_2^*(A) = m_1''(A) \cdot g_1 = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \quad \text{und}$$

$$m_1^*(U) = m_2^*(U) = 1 - m_1^*(A) - m_1^*(\bar{A}) = 1 - 0,5 - 0 = 0,5 \quad .$$

Eine Kombination der beiden Aussagen nach der Dempster'schen Regel (Formeln (2-11) und (2-12)) ergibt nun für die Hauptfunktion:

$$m_{HF}^*(A) = \frac{m_1^*(A) \cdot m_2^*(U) + m_1^*(U) \cdot m_2^*(A) + m_1^*(A) \cdot m_2^*(A)}{1 - K} = 0,75 \quad \text{und}$$

$$m_{HF}^*(U) = \frac{m_1^*(U) \cdot m_2^*(U)}{1 - K} = \frac{0,5 \cdot 0,5}{1 - 0} = 0,25 \quad .$$

Das Beispiel zeigt, dass die Erweiterung des Ereignisraums E zum Zweck einer erneuten Anwendung der Kombinationsregel zu einer Verzerrung der echten Unsicherheiten aus den physikalischen Quellen führt, da aufgrund der mathematischen Vorgehensweise zusätzliche Unsicherheiten in das Bewertungssystem gelangen.

Daher wird der von [Wel09] vorgeschlagene Ansatz mittels AHP für diese Arbeit genutzt und auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit angepasst. Der AHP geht auf Arbeiten von Thomas L. Saaty [Saa90] zurück und zerlegt komplexe Entscheidungen in Teilbereiche, deren Vergleiche anschließend hierarchisch strukturiert und zu einem gesamten Entscheidungsergebnis zusammengefasst werden. Die an dieser Stelle zu treffenden Entscheidungen sind die Höhen der Anteile verschiedener Prüfkriterien zur Beurteilung einer Teilfunktion, sowie die Anteile der Zustandsergebnisse einzelner Teilfunktion zu einer übergeordneten Hauptfunktion bzw. der zustandsrelevante Anteil einer Hauptfunktion für das gesamte SF₆-Hochspannungsschaltfeld. Analog können natürlich die Ergebnisse der einzelnen SF₆-Hochspannungsschaltfelder mit der AHP Systematik zu einem Zustandsergebnis für eine gesamte SF₆-Hochspannungsschaltanlage zusammengefasst werden.

Die mathematische Basis des AHP ist eine $n \times n$ Matrix, die durch die $1 \dots n$ Vergleichskriterien aufgespannt wird. Die Vergleichskriterien werden paarweise miteinander

der verglichen und bewertet. [Wel09] nutzt zum Vergleich eine Bewertungsskala nach Tabelle 2-3.

Tabelle 2-3: Mögliche Bewertungsskala für AHP

1	Gleich wichtig	-	-
3	etwas wichtiger	1/3	etwas unwichtiger
5	deutlich wichtiger	1/5	deutlich unwichtiger
7	wesentlich wichtiger	1/7	wesentlich unwichtiger
9	viel wichtiger	1/9	viel unwichtiger

Beispielhaft zeigt Abbildung 2-23 eine 3×3 Kriterienmatrix $\{A\}$, in der die Vergleichskriterien 1...3 paarweise miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse werden entsprechend Tabelle 2-3 als Zahl dargestellt.

Kriterienmatrix $\{A\}$:				Reihensumme	Eigenvektor	Gew.-Faktor	norm. Gew.-Faktor	
		a	b	c				
Kriterium 1	a	1,00	0,33	0,33	1,67	0,13	1,00	0,13
Kriterium 2	b	3,00	1,00	3,00	7,00	0,54	4,20	0,54
Kriterium 3	c	3,00	0,33	1,00	4,33	0,33	2,60	0,33

Quadierte Matrix $\{B\} = \{A\}^2$:				Reihensumme	Eigenvektor	Gew.-Faktor	norm. Gew.-Faktor	
		a	b	c				
Kriterium 1	a	3,00	0,78	1,67	5,44	0,13	1,00	0,13
Kriterium 2	b	15,00	3,00	7,00	25,00	0,59	4,59	0,59
Kriterium 3	c	7,00	1,67	3,00	11,67	0,28	2,14	0,28

Quadierte Matrix $\{C\} = \{B\}^2$:				Reihensumme	Eigenvektor	Gew.-Faktor	norm. Gew.-Faktor	
		a	b	c				
Kriterium 1	a	32,33	7,44	15,44	55,22	0,14	1,00	0,14
Kriterium 2	b	139,0	32,33	67,00	238,33	0,58	4,32	0,58
Kriterium 3	c	67,00	15,44	32,33	114,78	0,28	2,08	0,28

Abbildung 2-23: AHP am dreiwertigen Beispiel

Entsprechend Abbildung 2-23 lassen sich die Reihensumme und der Eigenvektor, der sich aus der jeweiligen Reihensumme geteilt durch die Summe aller Reihensummen bestimmen lässt, zeilenweise berechnen. Anhand des Eigenvektors lässt sich dann der absolute Gewichtungsfaktor ermitteln. Dieser ist der Quotient aus dem Eigenvektor der

betrachteten Zeile und dem kleinsten Eigenvektor der jeweiligen Vergleichskriterien. Diese Prozedur kann iterativ durch Quadrieren der Matrix wiederholt werden, bis sich die Gewichtungsfaktoren trotz Quadrieren nicht mehr ändern. Zwei Iterationsschritte (in Abbildung 2-23 sind dies die Matrizen {B} und {C}) haben sich dabei als praktisch ausreichend gezeigt, da weitere Iterationsschritte keinen Einfluss mehr auf ganzzahlige Prozentwerte haben [Wel09].

Da [Wel09] die einzelnen Komponenten i aller zugehöriger Komponenten m direkt mit dem Zustand z bewertet, folgt für den normierten Gesamtzustand Z_E einer betrachteten Einheit E auf Basis der ermittelten, normierten Gewichtungsfaktoren g :

$$Z_E = \sum_{i=1}^m g_i \cdot z_i \quad (2-13)$$

Für die Zustandsbeschreibung als aggregierte Massezahlen m^* aus den untergeordneten Funktionen unter Berücksichtigung von Datenalter und Kombination können daher folgende Formeln für diese Arbeit abgeleitet werden:

$$m^*_E(A) = \sum_{i=1}^m g_i \cdot m''_i(A) \quad (2-14)$$

$$m^*_E(\bar{A}) = \sum_{i=1}^m g_i \cdot m''_i(\bar{A}) \quad (2-15)$$

$$m^*_E(U) = \sum_{i=1}^m g_i \cdot m''_i(U) \quad (2-16)$$

Abschließend sei angemerkt, dass die Ermittlung von Gewichtungsfaktoren davon abhängt, wie der paarweise Vergleich der Kriterien ausfällt und somit offensichtlich subjektiven Einflüssen unterliegt. Sofern es möglich ist, immer mit einem konstanten Satz an Gewichtungsfaktoren zu arbeiten, wirkt sich ein potenzieller Fehler in der Gewichtungsfaktorbestimmung immer gleich auf alle Zustandsergebnisse aus. Damit haben die Gewichtungsfaktoren keinen Einfluss mehr auf eine nach dem Zustandsergebnis sortierte Rangfolge der SF₆-Hochspannungsschaltfelder.

2.3.6 Bestimmung des Zustandsindex

Entsprechend der vorherigen Abschnitte werden Zustandsinformationen aus diagnostischen Verfahren zu einem Satz an Massezahlen m^* zusammengefasst. $m^*(A)$ wird als eine sichere Information über den Abnutzungsvorrat interpretiert und $m^*(\bar{A})$ als sichere Information über den Substanzverlust. Entsprechend der evidenztheoretischen Idee kann der Unsicherheitsbereich $m^*(U)$ sowohl für Abnutzungsvorrat als auch für Substanzverlust stehen. Folglich muss sich der tatsächliche Zustandsindex innerhalb der Grenzen des Unsicherheitsbereichs befinden.

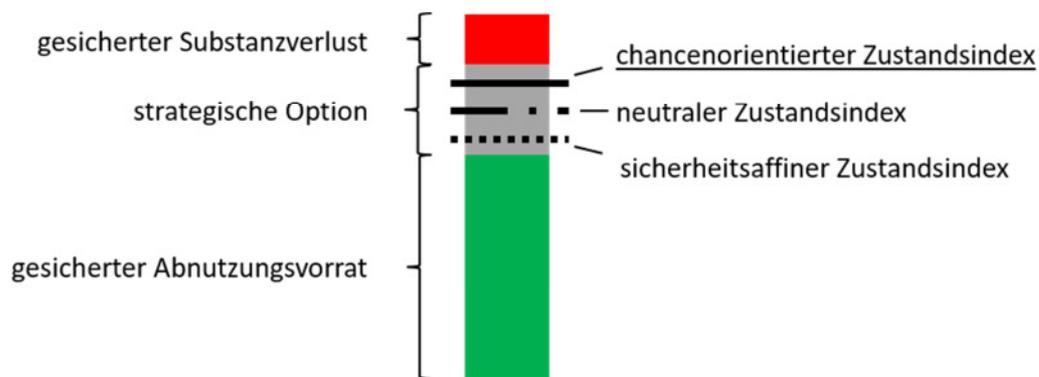


Abbildung 2-24: Auflösung des Unsicherheitsbereichs mit Hilfe eines Zustandsindexes

Abbildung 2-24 zeigt dazu beispielhaft drei verschiedene Zustandsindices, deren Positionen sich aus der Risikoeinstellung k eines Anwenders¹⁷ ableiten lässt. Beim chancenorientierten Zustandsindex geht der Anwender davon aus, dass Substanzverluste in der Regel durch sorgfältige Anwendung der diagnostischen Verfahren zuverlässig erfasst werden können. Der Anwender unterstellt damit, dass Auffälligkeiten besser erfasst werden als eine sichere Aussage zum noch vorhandenen Abnutzungsvorrat. Damit wird der Zustand tendenziell als besser eingeschätzt und das Einleiten von zustandsverbessernden bzw. zustandserhaltenden Maßnahmen verzögert. Da dies eine finanzielle Einsparung zur Folge hat, wird diese Indizierung chancenorientiert genannt. Eine weitere Möglichkeit ist die Aufteilung der Unsicherheit zu gleichen Teilen ($k = 0,5$). Dies drückt aus, dass der Anwender die Unsicherheit zu gleichen Teilen Substanzverlust und

¹⁷ Die Risikoeinstellung beinhalten eine pauschale Risikodefinition für SF₆-Hochspannungsschaltfelder, die beispielsweise Unterschiede der Fabrikate nicht berücksichtigt. Daher kann es entsprechend der Abschnitte 1.1 und 1.2 zu Fehleinschätzungen über den Zustand kommen. Aufgrund der bisher fehlenden Informationen für ein Differenzierungspotential nach Fabrikat oder ähnlichem, wird der an dieser Stelle trotzdem eine für alle Schaltfelder gleiche Risikoeinstellung gewählt.

Abnutzungsvorrat zuspricht. Folglich steht der sicherheitsaffine Zustandsindex für Anwender, die Substanzverlusten in möglichst frühen Stadien entgegenwirken wollen.

Da tendenziell die Aussagekraft diagnostischer Ergebnisse (entsprechend der Verfahren nach Abschnitt 2.2.3) mit steigendem Substanzverlust wächst, wird für die Anwendung am Beispielkollektiv ein chancenorientierter Zustandsindex mit $k = 0,33$ gewählt. Die Berechnung erfolgt nach Formel (2-17).

$$Z_E = 1 - m^*(\bar{A}) - k \cdot m^*(U) \quad (2-17)$$

mit $k \in [0 \dots 1]$

2.3.7 Berücksichtigung nicht vorhandener Hauptfunktionen

Ein unterschiedlicher Umfang von Hauptfunktionen kann aus der Verwendung eines SF₆-Hochspannungsschaltfelds für unterschiedliche Schaltaufgaben resultieren. Aus dem unterschiedlichen Umfang resultiert für die Bewertung auf Schaltfeldebene, dass Schaltfelder mit unterschiedlicher Vergleichsbasis gegenübergestellt werden. Die Auswirkung auf das Ergebnis bzw. ein Lösungsvorschlag wird anhand des folgenden Beispiels erläutert:

Zustandsergebnisse von zwei Schaltfeldern sollen miteinander verglichen werden. Schaltfeld 1 ist ein Kabel-Trafo Schaltfeld und umfasst alle Hauptfunktionen. Schaltfeld 2 ist ein Feld, das nur die Erdung und die Spannungsmessung der Sammelschiene (Sammelschienen-Erdung / -Messung) ausführt und benötigt daher nur vier Hauptfunktionen. Eine Zuordnung von Hauptfunktionen zu verschiedenen Schaltaufgaben zeigt Tabelle 2-4. Diese Tabelle wurde anhand des untersuchten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektivs abgeleitet, in dem das in dieser Arbeit entwickelte Zustandsbewertungsverfahren angewendet wird (Beschreibung des Kollektivs in Abschnitt 3.2). Aus Tabelle 2-4 ist zu entnehmen, dass neun verschiedene Schaltaufgaben namentlich ermittelt worden sind, die teilweise einen gleichen Funktionsumfang von Hauptfunktionen haben, sich aber auch signifikant unterscheiden können. Besonders hingewiesen sei auf die Aliasbeschreibung der Hauptfunktionen *HF* mittels der Buchstaben *A* bis *J*. Die Aliasbeschreibung wird zur Verbesserung der Übersichtlichkeit nachfolgend in verschiedenen Tabellen und Abbildungen verwendet.

Tabelle 2-4: Schaltaufgaben und zugeordnete Hauptfunktionen

Schaltaufgabe	Spannung halten (A)	Strom führen (B)	Fehler- und Lastströme schalten (C)	Strom oder Spannung schalten (D)	Aktivteile erden (E)	Kabel entladen (F)	Strom messen (G)	Spannung messen (H)	Überspannung abbauen (I)	Netzanschluss herstellen (J)
Freileitung	x	x	x	x	x		x	x		x
Kabel	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Transformator	x	x	x	x	x		x	x		x
Längstrennung	x	x		x	x			x		
Querkupplung	x	x	x	x	x		x	x		
Sammelschienen-Erdung/-Messung	x	x			x			x		
Kabel-Trafo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Freileitung-Trafo	x	x	x	x	x		x	x		x
Maschine/Generator	x	x	x	x	x		x	x		x

In Fortführung des Beispiels sei angenommen, dass Schaltfeld 1 und Schaltfeld 2 einer Zustandsbewertung unterzogen worden sind, die jeweils gleiche Zustandsergebnisse bei denjenigen Hauptfunktionen vorweisen, die in beiden Schaltfeldern vorhanden sind. Weiterhin sei angenommen, dass die Hauptfunktion „Strom führen“ aufgrund mangelnder Zugänglichkeit (keine Spannungsfallmessung möglich) sowie zu geringem Betriebsstrom (keine Thermografie und keine Thermoobservation möglich) nicht bewertet worden ist und dass beide Felder einen deutlichen Substanzverlust in der Hauptfunktion „Spannung halten“ aufweisen. Folglich lässt sich entsprechend der hier hypothetischen Gewichtungsfaktoren g und den entwickelten Formeln (2-14), (2-15) und (2-16) auf Ebene des Schaltfeldes das Zustandsergebnis in den Massezahlen m^* ausdrücken. Mit Hilfe der Risikoeinstellung $k = 0,33$ und Formel (2-17) lässt sich dann der Zustandsindex für das Schaltfeld 1 entsprechend Tabelle 2-5 ermitteln. Schaltfeld 2 hat weniger Hauptfunktionen. Analog der Gesetzmäßigkeiten der Evidenztheorie müssen sich aber alle Massezahlen zu 1 addieren (Formel (2-5)).

Tabelle 2-5: Zustandsergebnisse der Hauptfunktionen und Zustandsindex für Schaltfeld 1

	<i>HF A</i>	<i>HF B</i>	<i>HF C</i>	<i>HF D</i>	<i>HF E</i>	<i>HF F</i>	<i>HF G</i>	<i>HF H</i>	<i>HF I</i>	<i>HF J</i>	gew. Σ
<i>g</i>	0,20	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	
<i>m*(A)</i>			0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	0,57
<i>m*(U)</i>	0,20	1,00	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0	0,27
<i>m*(\bar{A})</i>	0,80										0,16
								Zustandsindex			0,75

Eine Möglichkeit, das Zustandsergebnis auf das Bewertungsintervall zu skalieren, ist die Verwendung von modifizierten Gewichtungsfaktoren g_i' . Das heißt, dass die vorhandenen Gewichtungsfaktoren $g_i(HF_e)$ der eingesetzten Hauptfunktionen HF_e , die als neue Gesamtbewertungsbasis aufgefasst werden, und sich modifizierte Gewichtungsfaktoren $g_i'(HF_e)$ nach Formel (2-18) ergeben.

$$g_i'(HF_e) = \frac{g_i(HF_e)}{\sum_{i=1}^m g_i(HF_e)} \quad (2-18)$$

Das Ergebnis für Schaltfeld 2 lässt sich nach den gleichen Vorgaben wie Schaltfeld 1 bestimmen. Allerdings müssen die modifizierten Gewichtungsfaktoren g_i' verwendet werden. Den Ergebnissen für Schaltfeld 2 in Tabelle 2-6 ist zu entnehmen, dass sich alle Massezahlen m^* (in der Tabelle 2-6, Spalte „gew. Σ “) von Schaltfeld 1 unterscheiden, obwohl aus diagnostischer Sicht für beide Schaltfelder der gleiche Substanzverlust in der Hauptfunktion „Spannung halten“ identifiziert worden ist.

Tabelle 2-6: Zustandsergebnisse der Hauptfunktionen und Zustandsindex für Schaltfeld 2 mit modifizierten Gewichtungsfaktoren

	<i>HF A</i>	<i>HF B</i>	<i>HF C</i>	<i>HF D</i>	<i>HF E</i>	<i>HF F</i>	<i>HF G</i>	<i>HF H</i>	<i>HF I</i>	<i>HF J</i>	gew. Σ
<i>g</i>	0,20	0,10			0,10			0,05			
<i>g'</i>	0,45	0,22			0,22			0,11			
<i>m*(A)</i>					0,80			0,80			0,26
<i>m*(U)</i>	0,20	1,00			0,20			0,20			0,38
<i>m*(\bar{A})</i>	0,80										0,36
								Zustandsindex			0,51

Eine alternative Möglichkeit, das Bewertungsintervall in den konstanten Grenzen $[0...1]$ zu halten, ist, die Gewichtungsfaktoren g_i nicht zu modifizieren und nicht vorhandene Hauptfunktionen explizit im Zustandsergebnis zu berücksich-

tigen. Dazu wird eine weitere Massezahl $m^*(nv)$ eingeführt, die praktisch eine Platzhalterfunktion für nicht vorhandene Hauptfunktionen nv im Bewertungsintervall darstellt und nach Formel (2-19) in Abhängigkeit der Gewichtungsfaktoren der nicht vorhandenen Hauptfunktionen $g_i(nv)$ ermittelt wird.

$$m^*(nv) = \sum_{i=1}^m g_i(nv) \quad (2-19)$$

Aus der alternativen Möglichkeit zum Umgang mit nicht vorhandenen Hauptfunktionen folgt als Zustandsergebnis (siehe Tabelle 2-7) für das Schaltfeld 2, dass der Substanzverlust in gleicher Höhe wie bei Schaltfeld 1 ausgegeben wird. Tabelle 2-7 zeigt weiterhin, dass die Unsicherheit kleiner geworden ist. Dies liegt darin begründet, dass die Bewertung als nicht vorhandene Hauptfunktion nicht mit Unsicherheit behaftet sein kann – entweder ist sie vorhanden oder nicht vorhanden. Aus dem damit resultierenden kleineren Unsicherheitsbereich folgt nach Formel (2-17) ein höherer Zustandsindex.

Tabelle 2-7: Zustandsergebnisse und Zustandsindex für Schaltfeld 2 mit expliziter Berücksichtigung von nicht vorhandenen Hauptfunktionen

	<i>HFA</i>	<i>HFB</i>	<i>HFC</i>	<i>HFD</i>	<i>HFE</i>	<i>HFF</i>	<i>HFG</i>	<i>HFH</i>	<i>HFI</i>	<i>HFJ</i>	gew. Σ
<i>g</i>	0,20	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	
$m^*(A)$					0,80			0,80			0,12
$m^*(U)$	0,20	1,00			0,20			0,20			0,17
$m^*(\bar{A})$	0,80										0,16
$m^*(nv)$			1,00	1,00		1,00	1,00		1,00	1,00	0,55
								Zustandsindex			0,78

Das Beispiel zeigt, dass durch die explizite Berücksichtigung nicht vorhandener Hauptfunktionen zumindest der Ergebnisbeitrag des Substanzverlusts im Zustandsindex konstant gehalten werden kann. Da der Zustandsindex z praktisch eine Zuordnung der Unsicherheit in Abhängigkeit der Risikoeinstellung k zum Substanzverlust und Abnutzungsvorrat bedeutet, wird damit das Skalierungsproblem durch die Berücksichtigung eines zusätzlichen, aber fiktiven Abnutzungsvorrats $m^*(nv)$ gelöst. Für die Darstellung des Zustands nach evidenztheoretischer Interpretation, wie sie mit Abbildung 2-21 eingeführt worden ist, lassen sich die Ergebnisse für Schaltfeld 1 und Schaltfeld 2 des vorangegangenen Beispiels mit Abbildung 2-25 visualisieren.

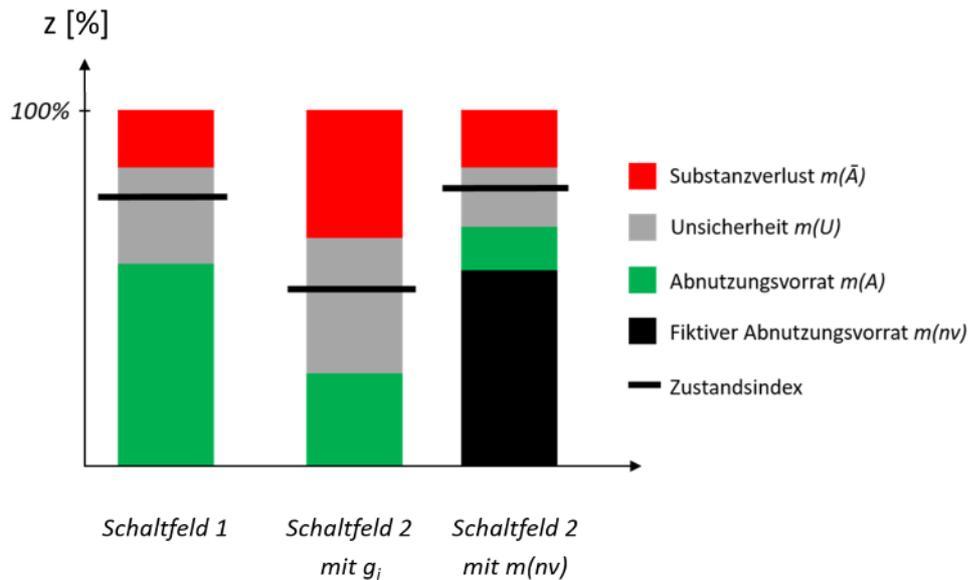


Abbildung 2-25: Visualisierte Zustandsergebnisse für Schaltfeld 1 und Schaltfeld 2

Der Ansatz der expliziten Berücksichtigung der nicht vorhandenen Hauptfunktionen hat den Vorteil, dass eine einzelne diagnostische Aussage immer gleichbedeutend auf das Gesamtergebnis wirkt. Außerdem kann ein nicht vollumfänglicher Hauptfunktionsumfang leicht durch die Einführung der weiteren Massezahl $m^*(nv)$ grafisch ausgedrückt werden, wie Abbildung 2-25 am Beispiel zeigt. Der Lösungsansatz über modifizierte Gewichtungsfaktoren erlaubt dies nicht. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit nicht vorhandene Hauptfunktionen explizit mit $m^*(nv)$ bzw. die Prüfkriterien nicht vorhandener Hauptfunktionen mit $m(nv)$ berücksichtigt.

2.4 Entwicklung von Massezahlen

2.4.1 Umfang der Massezahlbestimmung

Bis zu diesem Punkt der Arbeit wurde gezeigt, wie zustandsrelevante Prüfkriterien funktionsorientiert ermittelt werden und die Abbildung des Beurteilungsergebnisses in standardisierten Beurteilungsstufen „1“ bis „6“ erfolgt (Abschnitt 2.1). Die Bestimmung eines jeweiligen Beurteilungsergebnisses werden mit den in Abschnitt 2.2 genannten Diagnoseverfahren durchgeführt und mit den in Abschnitt 2.3 vorgestellten mathematischen Regeln zu einer Zustandsaussage über eine SF₆-Hochspannungsschaltfeld verarbeitet. Die Beschreibung einer zustandsrelevanten Information erfolgt mit den sogenannten Massezahlen, die damit die Schnittstelle zwischen Diagnoseverfahren und ma-

thematischem Zustandsmodell darstellen. Der richtigen Repräsentation einer diagnostischen Beurteilung durch Massezahlen kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Die Ergebnisse und Vorgaben aus den genannten Abschnitten 2.1 bis 2.3 lassen sich als Weiterentwicklung der Abbildung 2-21 zu Abbildung 2-26 zusammenfassen. Abbildung 2-26 beschreibt die Zustandsaussage $z(B)$ durch Massezahlen anhand der standardisierten Beurteilungsstufen B (dimensionslos, daher erfolgt die Angabe in per unit - pu) und berücksichtigt auch eine fehlende Aussage ($B = 5$ – „fehlende Beurteilung“) bzw. die Aussage über eine nicht vorhandene Funktion ($B = 6$ – „nicht vorhandene Funktion“). Anhand der Beurteilungsstufen $B = 1 \dots 4$ lässt sich prinzipiell erkennen, dass die einzelnen Massezahlen entlang der Bewertungsstufen Verläufen unterliegen und für die beiden Bewertungsstufen $B = 1$ und $B = 4$ nur zwei statt drei Massezahlen bestimmt werden müssen. Daher wird deutlich, dass die Unsicherheitsbestimmung und die Verlaufsbestimmung zwei wichtige Merkmale zur Entwicklung von Massezahlen sind.

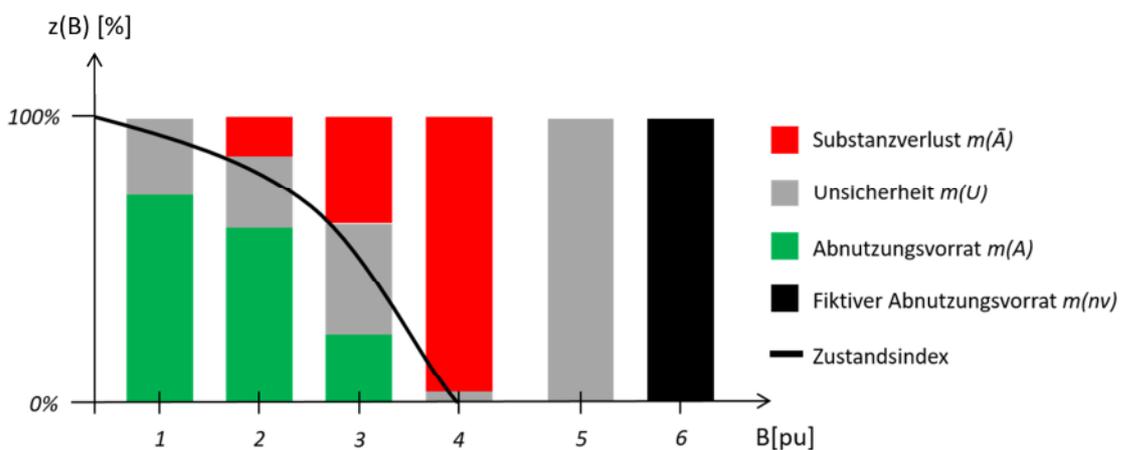


Abbildung 2-26: Abbaukurve des Abnutzungsvorrats als Funktion der Beurteilungsstufe

Bei Kenntnis über die Unsicherheit $m(U)$ lässt sich jeweils für die Beurteilungsstufen „1“ und „4“ direkt der Abnutzungsvorrat bzw. der Substanzverlust aus der evidenztheoretischen Forderung, dass die Summe aller Massezahlen stets 1 ergeben muss, bestimmen. Diesem mathematischen Zusammenhang geht die logische Schlussfolgerung voraus, dass einem unauffälligen Verhalten einer Funktion kein Substanzverlust attestiert werden kann. Ebenso kann kein Abnutzungsvorrat mehr existieren, wenn die Funktion ausgefallen ist. Die verschiedenen Quellen der Unsicherheit behandelt Abschnitt 2.4.2. Nachdem die Bewertungsstufen „1“ und „4“ evidenztheoretisch vollständig beschrieben

sind, müssen Massezahlen für die Stufen „2“ und „3“ abgeleitet werden. Dies kann anhand verschiedener Verlaufsformen geschehen, die in Abschnitt 2.4.3 vorgestellt werden. Sowohl für die Bestimmung der Unsicherheit, als auch für die Bestimmung von Verlaufsformen sind detaillierte Kenntnisse über die Fähigkeiten eines diagnostischen Verfahrens und die Interpretation eines Diagnoseergebnisses als ein Beurteilungsergebnis, wie anhand des Beispiels der SO₂-Messung in Abschnitt 2.4.4 gezeigt wird, nötig. Den Umfang der Massezahlbestimmung je Diagnosepunkt fasst Tabelle 2-8 zusammen. Die verwendeten „?“ bezeichnen die zu ermittelnde Massezahl. Folglich müssen für jedes verwendete diagnostische Verfahren acht Massezahlen bestimmt werden.

Tabelle 2-8: Umfang der Massezahlbestimmung je Diagnosepunkt

Urteil	Bedeutung	Handlungsempfehlung	Massezahlen {m(A) m(U) m(\bar{A}) m(nv)}
1	unauffällig	-	{ 1-m(U) ? 0 0 }
2	leicht auffällig	beobachten	{ ? ? ? 0 }
3	stark auffällig	reparieren	{ ? ? ? 0 }
4	defekt / Verletzung normativer Grenzwerte	austauschen	{ 0 ? 1-m(U) 0 }
5	fehlende Beurteilung	Information einholen	{ 0 1 0 0 }
6	nicht vorhandene Funktion	-	{ 0 0 0 1 }

2.4.2 Quellen für Unsicherheiten

Wie bereits einleitend in den Abschnitten 1.1 und 1.2 erläutert, können drei wesentliche Quellen für Unsicherheiten in einer Zustandsaussage beschrieben werden:

- (1) Vollständige Unsicherheit durch ein fehlendes Diagnoseergebnis.
- (2) Partielle Unsicherheit durch fehlende Aktualität des zu berücksichtigten Diagnoseergebnisses (z.B. Verwendung von Messergebnissen aus dem Vorjahr).

- (3) Partielle Unsicherheit durch das Diagnoseverfahren selbst, differenzierbar nach
- a. Messfehlern, also Fehler durch Messgerät bzw. Messaufbau,
 - b. Auswertefehlern, z.B. durch Fehlinterpretation des Diagnostikers, und
 - c. mögliches Unvermögen eines Verfahrens bestimmte Auffälligkeiten nicht oder nur bedingt erfassen zu können.

Die Quellen (1) und (2) sind Unsicherheiten, die sich aus dem Arbeitsprozess der Zustandsbewertung ergeben, also als äußere Unsicherheiten betrachtet werden können. Unsicherheiten der Quelle (3) entstammen dem diagnostischen Verfahren und können als innere Unsicherheiten bezeichnet werden. Die äußeren Unsicherheiten sind unabhängig vom diagnostischen Verfahren und werden daher direkt im mathematischen Zustandsmodell mit Hilfe der Beurteilungsstufe $B = 5$ – „fehlende Beurteilung“ verarbeitet. Innere Unsicherheiten müssen jedoch aus der Beurteilung der Fähigkeiten eines diagnostischen Verfahrens bestimmt werden und können wie folgt weiter differenziert werden:

Unsicherheiten aus Quelle (3) a. und b. [Cas13; Ler15]:

- Zufällige Fehler
 - nicht unmittelbar erfassbare Abweichungen
 - streuen um einen Mittelwert
- Systematische Fehler
 - unter gleichen Bedingungen in Betrag und Vorzeichen reproduzierbar
 - entstammen beispielsweise aus Messaufbau, Umgebung, Messgerätealterung oder -abnutzung
- Grobe Fehler
 - im besten Fall als Ausreißer erkennbar
 - entstehen bei ordnungsgemäßer Gerätefunktion durch den Anwender:
 - Ablesefehler
 - Fehler im Messaufbau
 - Übertragungsfehler
 - sollten durch umsichtige Vorgehensweise vermeidbar sein

Unsicherheiten aus Quelle (3) c.:

- Aussagetiefe
 - durch eine technische Detektionsgrenze charakterisierbar
 - kann bei gleichem Verfahren in unterschiedlichen Beurteilungsergebnissen B variieren¹⁸

Die Ergebnisse der strukturierten Suche nach Unsicherheitsquellen für ein diagnostisches Verfahren lassen sich leicht in eine qualitativ orientierte Beschreibung überführen. [DIN07] schlägt dazu beispielsweise die Verwendung von Abstufungen vor, die im ersten Schritt von einem Experten vorgenommen und im zweiten Schritt einheitlich durch numerische Werte repräsentiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Durchführung von Laboruntersuchungen, anhand derer sich sehr objektive Unsicherheitsbeurteilungen über ein diagnostisches Verfahren durchführen lassen. Insbesondere für Teilentladungsmessungen und Erwärmungen sind umfangreiche Ergebnisse veröffentlicht worden [Paw16].

2.4.3 Standardisierte Massezahlverläufe

Die Ermittlung standardisierter Massezahlverläufe soll eine einfache und schnelle Möglichkeit bieten, Massezahlen für ein diagnostisches Verfahren zu ermitteln. Aufgrund der geringen Anzahl verwendeter Bewertungsstufen $B = 1..4$ basieren die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Massezahlverläufe auf einfachen Polynomen erster Ordnung.

Abbildung 2-27 zeigt die vier verwendeten Grundformen der standardisierten Massezahlverläufe, wie sie bereits teilweise in [PTZ+15a] gezeigt wurden. Verlauf Nr. 1 entspricht einer konstanten Massezahl über alle Bewertungsstufen. Verlauf Nr. 2 zeigt eine wachsende Unterstützung der Aussage einer Massezahl bei steigenden Bewertungsstufen. Ebenso wurden auch lineare Verläufe mit negativer Steigung verwendet. Verlauf Nr. 3 stellt eine Kombination aus Verlauf Nr. 1 und Verlauf Nr. 2 dar. Für die Bewertungsergebnisse $B = 1$ und $B = 2$ ist der Verlauf konstant. Danach fällt er linear ab. Verlauf Nr. 4 besteht aus zwei konstanten Bereichen und wird daher als Sprung beschrieben.

¹⁸ Zum Beispiel kann man bei einer festgestellten Abweichung in einer Sichtkontrolle sehr sicher sein, dass eine Abweichung vom Sollzustand vorliegt. Stellt man keine Abweichung fest, kann man sich eben nicht sicher sein, da man in der Regel nicht in ein Bauteil hineinsehen kann.

Da die Forderung, dass sich alle Massezahlen zu 1 addieren müssen, stets eingehalten werden muss, bedarf es einer Abstimmung der verschiedenen Verlaufsformen der einzelnen Massezahlen $m(A)$, $m(U)$ und $m(\bar{A})$. Abbildung 2-28 zeigt vier Beispiele (A bis D) für die vollständige Beschreibung der Beurteilungsstufen B mit Beträgen b der Massezahlen.

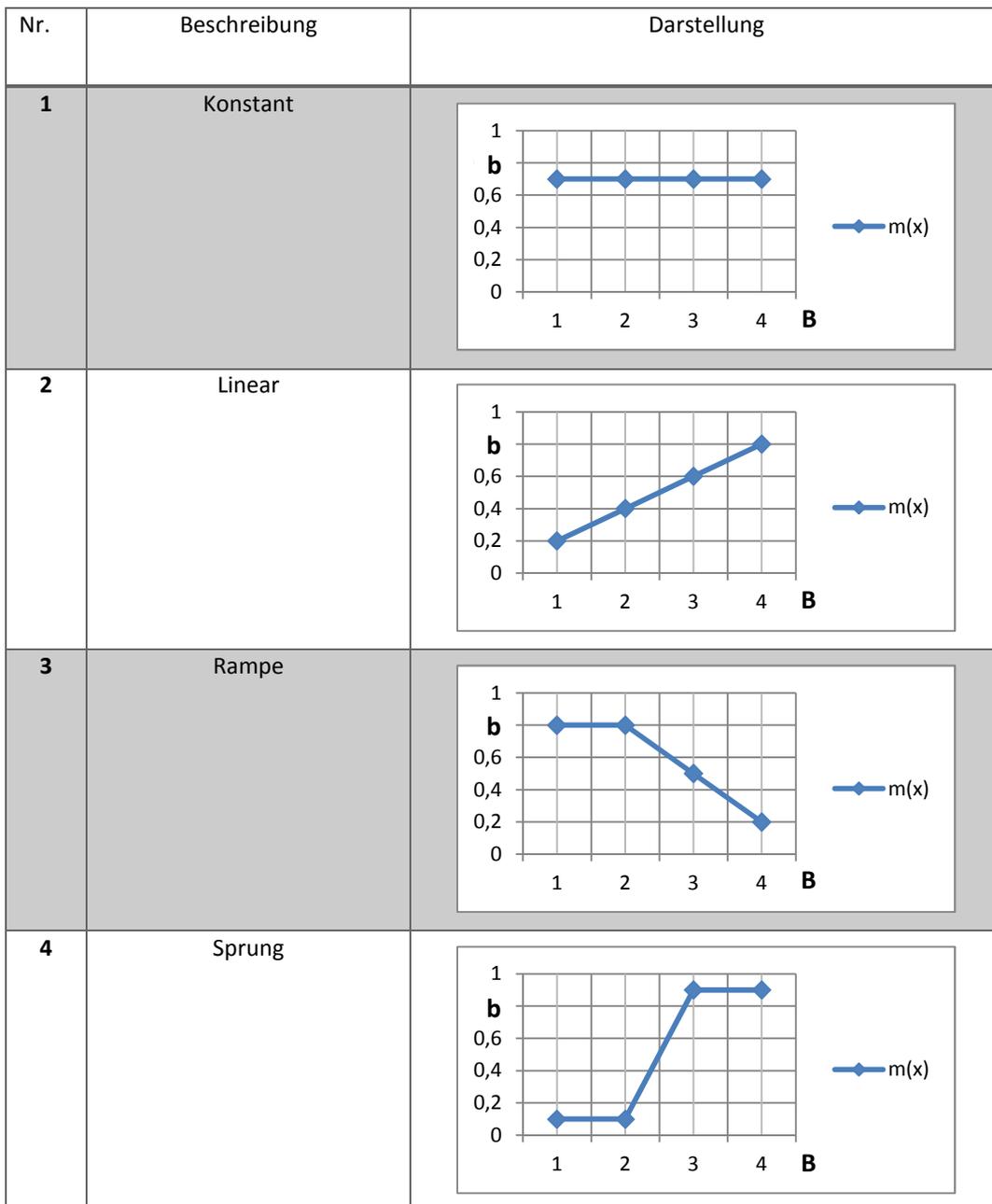


Abbildung 2-27: Grundformen standardisierter Massezahlverläufe

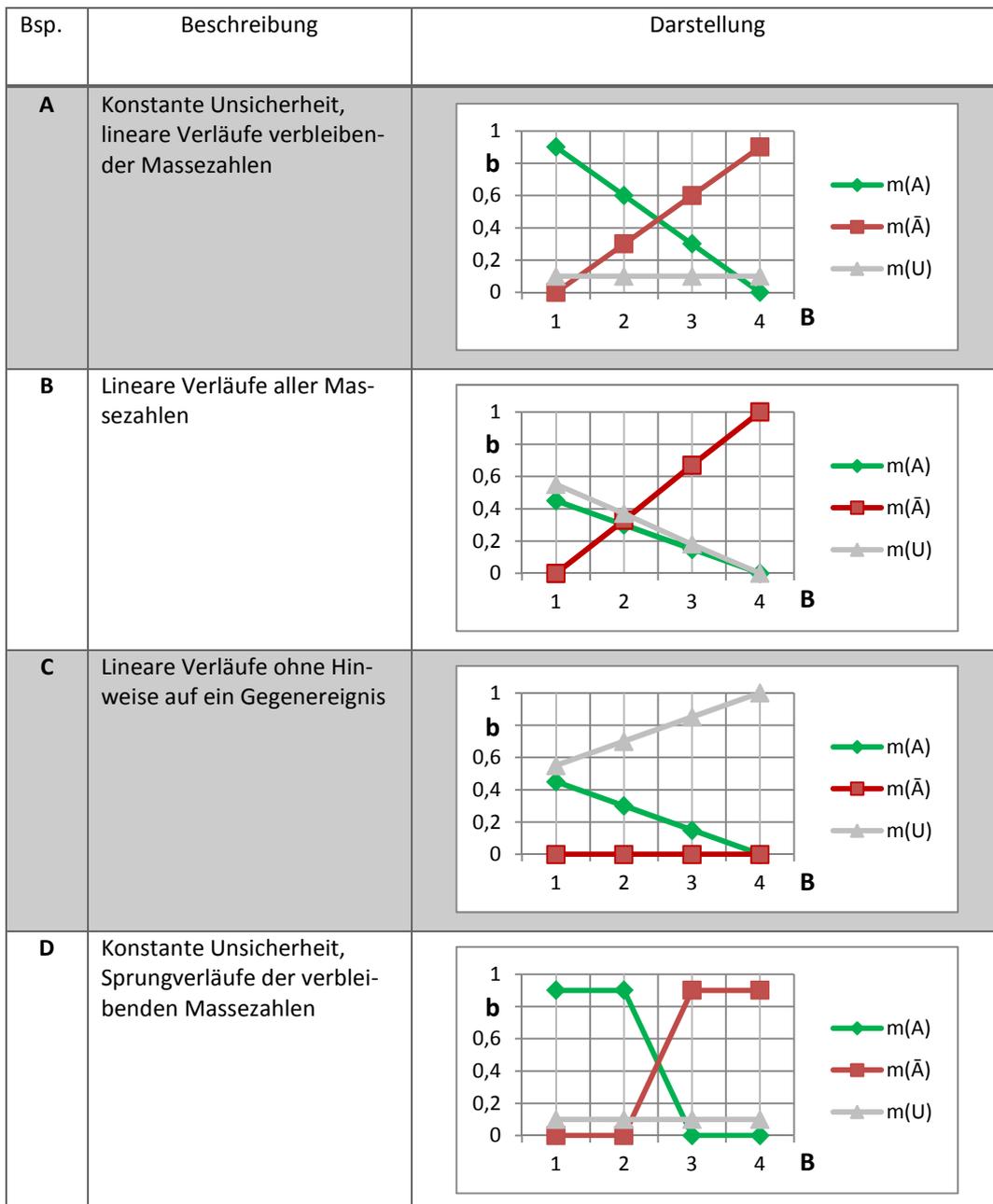


Abbildung 2-28: Beispiele für die vollständige Beschreibung von Beurteilungsstufen mit Massezahlen

Beispiel A aus Abbildung 2-28 zeigt einen konstanten Verlauf für die Unsicherheit $m(U)$, der häufig dann resultiert, wenn der Einfluss der Unsicherheit nur aus systematischen oder zufälligen Messfehlern entspringt, also unabhängig von der Beurteilungsstufe ist. Die anderen Massezahlen $m(A)$ und $m(\bar{A})$ verlaufen linear und sind symmetrisch bezogen auf die Horizontalachse ihres Schnittpunkts zueinander. Eine Anwendung dieser Verlaufsform ermöglicht beispielsweise die Druckmessung des SF_6 -Gases. Beispiel B zeigt eine sinkende Unsicherheit. Offensichtlich ist das diagnostische Verfahren in

der Lage, fehlerbehaftete Zustände besser zu erkennen als fehlerfreie Zustände. Im folgenden Abschnitt 2.4.4 findet diese Verlaufskombination für die SO_2 -Messung detaillierte Anwendung. Das Beispiel C ist gewählt, um deutlich zu machen, dass ein Ergebnis über alle Bewertungsstufen hinweg nur durch zwei von drei Massezahlen ausdrückbar ist. Allerdings wurde im Rahmen dieser Arbeit kein diagnostisches Verfahren in dieser Art beschrieben. Anders verhält es sich aber für Beispiel D, das offensichtlich für den praktischen Einsatz kein Differenzierungspotenzial zwischen den Bewertungsstufen $B = 1$ und $B = 2$ bzw. $B = 3$ und $B = 4$ zulässt. Ein solcher Verlauf bedeutet also, dass für das betroffene Verfahren nur zwei von vier Bewertungen erfassbar sind. Eine solche Beschreibung diagnostischer Ergebnisse hat beispielsweise [Paw16] für die akustische Teilentladungsmessung bei Betriebsspannung eingesetzt.

2.4.4 Bestimmung von Massezahlen am Beispiel der SO_2 -Messung

Das Festlegen der erreichten Beurteilungsstufe anhand der Diagnoseergebnisse wird durch den Diagnoseexperten ausgeführt. Die Beurteilung kann entweder mittels Grenzwert oder durch eine Einschätzung (z.B. die Interpretation der Weg-Zeitkurve aus Abbildung 2-18) des Experten erfolgen. Je mehr Referenzwerte zur Verfügung stehen, desto objektiver ist das Diagnoseergebnis zur Festlegung der Beurteilungsstufe.

Als Beispiel für die Bestimmung von Massezahlen wird an dieser Stelle die SO_2 -Messung genutzt, die bereits im Abschnitt 2.2.3 bei den verwendeten Diagnoseverfahren im Zuge der SF_6 -Gasanalyse auf Seite 34 kurz vorgestellt wird.

Der SO_2 -Wert ist eine zustandsrelevante Information, die zur Beurteilung der Teilfunktion „innere Freiräume isolieren“ im Rahmen der Hauptfunktion „Spannung halten“ beim Funktionsträger SF_6 -Gas verwendet wird (Abbildung 2-7, Seite 17). Um seine Funktion zu erfüllen, muss SF_6 in ausreichender Menge und in ausreichender Reinheit vorliegen [DIN06]. Unter Einfluss von Energie dissoziiert das SF_6 -Molekül und kann zusammen mit Reaktionspartnern zu SO_2 reagieren, wie Abbildung 2-29 veranschaulicht.

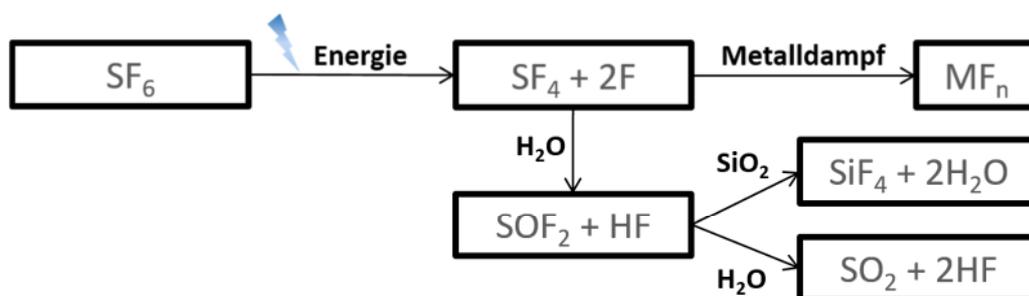


Abbildung 2-29: Zersetzung des SF₆-Moleküls [Kur02]

Abbildung 2-29 zeigt, dass SF₆ unter Einfluss von Energie (hohe Temperaturen, die durch Teilentladung, Trenn- und Erdungsschaltheandlungen und beim Schalten von Last- und Kurzschlüssen entstehen können) dissoziiert und sich beispielsweise zu SF₄ (Schwefeltetrafluorid) und zwei F-Atomen (Fluor-Atome) aufspaltet. Verdampft unter dem Einfluss der Energie auch Metall (Metalldampf), so entstehen verschiedene Metallfluoride (pauschal dargestellt durch MF_n), die sich staubförmig im SF₆-Gasraum ablagern (z.B. als sogenannter Schaltstaub) und daher im SF₆-Gasgemisch nicht mehr vorhanden sind. Auch Wassermoleküle (H₂O - ist als Wasserdampf im Gasraum vorhanden) dissoziieren unter Energieeinfluss, so dass als weitere Reaktionsprodukte SOF₂ (Thionylfluorid) und HF (Fluorwasserstoff) entstehen. Bei Raumtemperatur reagiert SOF₂ mit H₂O weiter zu SO₂ und HF. Der Siliciumdioxid-Zweig (SiO₂) der Abbildung wird nicht weiter betrachtet, da SiF₄ mit Wasser wieder zu SiO₂ oder Fluorkieselsäure (H₂SiF₆) reagiert und beides nicht gasförmig ist. [Kur02].

Die Ausführungen zur Abbildung 2-29 zeigen, dass die charakterisierenden Größen zur Reinheit des SF₆-Gases Wasser (H₂O), Fluorwasserstoff (HF) und Schwefeldioxid (SO₂) sind. Anhand verschiedener Normen lassen sich für SO₂ charakteristische Konzentrationsgrenzwerte ermitteln:

- [DIN06]: reines (neues) SF₆-Gas enthält kein SO₂
- [DIN14b]: STEL-Wert¹⁹ für SO₂: <5 ppm_v
- [DIN08]: SF₆ kann nicht wiederverwendet werden, wenn SO₂ > 12 ppm_v

Mit Hilfe der Auflistung und einer festgelegten Schrittweite des Messergebnisses *ME* von $\Delta ME = 1 \text{ ppm}_v$ lassen sich die Beurteilungsstufen für die SO₂-Messung ableiten.

¹⁹ STEL = Short Time Exposure Limit – Grenzwert der Kurzeitexposition (bez. auf 15 min)

Zudem können die in Tabelle 2-8 gezeigten Handlungsempfehlungen sprachlich spezifiziert werden (für die Beurteilungsstufe $B = 3$ wurde anstatt „reparieren“ die Handlungsempfehlung „aufbereiten“ verwendet, da dies deutlicher den Umgang mit Gasen beschreibt).

- Beurteilungsstufe $B = 1$ (in Ordnung): $ME < 1 \text{ ppm}_V$
- Beurteilungsstufe $B = 2$ (beobachten): $ME \in [1...5] \text{ ppm}_V$
- Beurteilungsstufe $B = 3$ (aufbereiten): $ME \in [6...12] \text{ ppm}_V$
- Beurteilungsstufe $B = 4$ (austauschen): $ME > 12 \text{ ppm}_V$

Entsprechend dem Diagnoseverfahren zur SO_2 -Messung (Abschnitt 2.2.3, Seite 34) hat der elektrochemische Sensor zur Konzentrationsmessung von SO_2

- einen Messbereich: 0-20 ppm_V ,
- einen Messfehler: $\pm 2 \%$ bezogen auf den Messbereichsendwert und
- einen Signalverlust: 2 % pro Monat.

Aufgrund der Signalverlusteigenschaft – die im praktischen Einsatz zu einem regelmäßigen Austausch des Sensors führt – reduziert sich die Unsicherheit für $B = 4$ zu $m(U, B(4)) = 0$, da der Sensor bei Vernachlässigung des Messfehlers nie eine zu hohe Konzentration anzeigen kann. Im Gegensatz dazu steigt die Unsicherheit mit sinkender Konzentration, so dass $m(U)$ einen fallenden Verlauf haben muss. Die Steigung ergibt sich aus dem festgelegten Unsicherheitswert für $B = 1$ zu $m(U, B(1)) = 0,3$. Da bei Erreichung des STEL-Wertes noch ein Weiterbetrieb möglich ist, müssen auch die Massezahlen für Abnutzungsvorrat $m(A)$ und Substanzverlust $m(\bar{A})$ einen linearen Verlauf haben, so dass das Gesamtergebnis für die Bestimmung der Massezahl mit Abbildung 2-30 dargestellt werden kann.

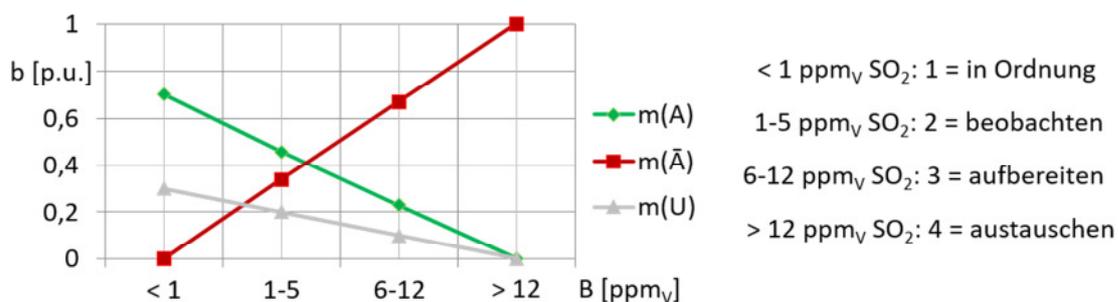


Abbildung 2-30: Massezahlverlauf der SO_2 -Messung mit elektrochemischem Sensor

Es lässt sich festhalten, dass die Bestimmung einer Massezahl von dem eingesetzten Diagnoseverfahren abhängig ist. Außerdem müssen Grenzwerte oder charakteristische Eigenschaften einer Kurvenform der jeweiligen Beurteilungsstufe zugeordnet werden. Diese Zuordnung kann sich anhand der Objektivität und anhand des Aufwands zur Sammlung der notwendigen Erfahrung im Umgang mit einer diagnostischen Methode stark unterscheiden. Zur wesentlichen Differenzierung verschiedener Erfahrungswerte als Grundlage der Massezahlbestimmung können nachfolgende Kriterien angegeben werden:

- Einfach, aber subjektiv: Experte schätzt ein
- Einfach und objektiv: Normen, technische Richtlinien, Herstellervorgaben
- Aufwändig, aber objektiv: Referenzwerte sowohl für fehlerfreien Fall, als auch für fehlerbehafteten Fall liegen vor (Laborversuche) [z.B. Paw16]

Von erheblichem Vorteil ist, wenn die Bestimmung der Grenzwerte unabhängig vom eingesetzten diagnostischen Verfahren ist, da dann alternative (gegebenenfalls zukünftige) diagnostische Methoden in das Zustandsbewertungsverfahren integrierbar sind, ohne die Vergleichbarkeit mit bestehenden Zustandsergebnissen zu gefährden, wie das nachfolgende Beispiel zeigt.

Angenommen sei, dass die SO₂-Messung nun durch einen neuartigen Sensor erfolgt. Dieser hat

- einen Messfehler: $\pm 0,1 \%$ bezogen auf den Messbereichsendwert und
- keinen Signalverlust.

Aufgrund der benötigten Schrittweite $\Delta ME = 1 \text{ ppm}_V$ wirkt sich der Messfehler nicht mehr auf die Unsicherheit $m(U)$ aus. Daher kann $m(U) = 0$ definiert werden. Entsprechend können Abnutzungsvorrat $m(A)$ und Substanzverlust $m(\bar{A})$ neu definiert werden (siehe Abbildung 2-31). Folglich wird die Zustandsbeurteilung für das gesamte SF₆-Hochspannungsschaltfeld sicherer, ohne die Beurteilungsstufen und damit das Zustandsbewertungsverfahren zu ändern.

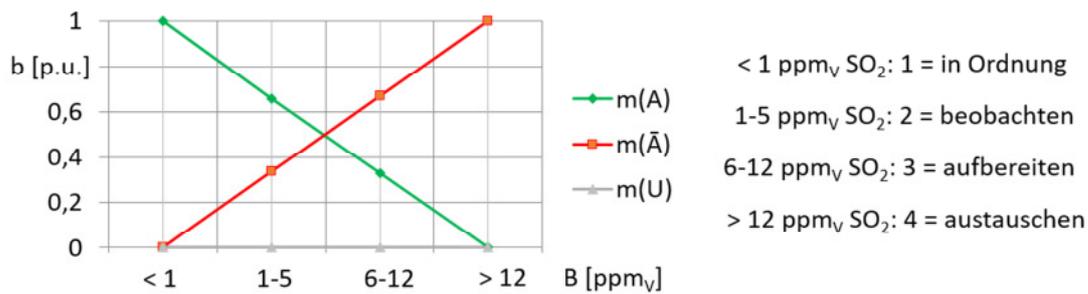


Abbildung 2-31: hypothetischer Massezahlverlauf der SO₂-Messung mit neuem Sensor

Das Beispiel verdeutlicht, dass Zustandsaussagen auch miteinander vergleichbar bleiben, wenn sie mit Hilfe unterschiedlicher diagnostischer Verfahren ermittelt werden. Folglich ist das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Zustandsbewertungsverfahren nicht nur unabhängig von Funktionsumfang bzw. von den eingesetzten Funktionsträgern, sondern auch unabhängig von der Art und Weise der Erhebung zustandsrelevanter Informationen.

Weiterhin kann mit Hilfe der Unsicherheit direkt die Aussagefähigkeit als Auswahlkriterium für ein Diagnoseverfahren nach Abschnitt 2.2.2 quantifiziert werden. Dies objektiviert die Entscheidungsfindung, welches diagnostische Verfahren im Zuge der Zustandsbewertung als besser einzustufen ist und daher beispielsweise höhere Anschaffungs- oder Ausbildungskosten rechtfertigt.

2.5 Abschließende Betrachtungen zum Zustandsbewertungsmodell

Ausgehend von der Idee, dass der Zweck eines Hochspannungsschaltfelds unabhängig vom Fabrikat sein muss und mit Hilfe sogenannter Hauptfunktionen dargestellt werden kann, wurden Hauptfunktionen in Teilfunktionen zerlegt und für deren physikalische Wirkprinzipien Prüfkriterien ermittelt. Die jeweilige Beurteilung erfolgt mit diagnostischen Verfahren, deren Ergebnisse unter Berücksichtigung ihres Alters – ausgedrückt als Massezahlen – evidenztheoretisch interpretiert und kombiniert werden. Die Aggregation dieser Teilergebnisse erfolgt mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren auf Ebene der Hauptfunktionen und des gesamten Schaltfelds.

Abbildung 2-32 veranschaulicht zusammenfassend die Vorgehensweise des entwickelten Zustandsbewertungsverfahrens. Von oben nach unten betrachtet beinhaltet die Spalte „Bewertungsstufe“ in den Punkten 1 bis 4 die funktionale Aufgliederung eines SF₆-

Hochspannungsschaltfelds. Punkt 5 enthält die Prüfkriterien, mit denen eine betrachtete Teilfunktion beurteilt wird. Die Beurteilung kann aus einem (Punkt 7) oder mehreren Diagnoseverfahren (Punkt 6) stammen. Die Spalte „Informationsverarbeitungsmethode“ zeigt – nun von unten nach oben betrachtet, dass das einzelne diagnostische Ergebnis als Massezahl aufbereitet, mit anderen Ergebnissen kombiniert und dann mit Gewichtungsfaktoren anteilig auf den verschiedenen Funktionsebenen im Zustandsergebnis berücksichtigt wird. Dieser geordnete und festen Regeln folgende Informationsfluss lässt sich anhand der in Abbildung 2-32 skizzierten Baumstruktur visualisieren.

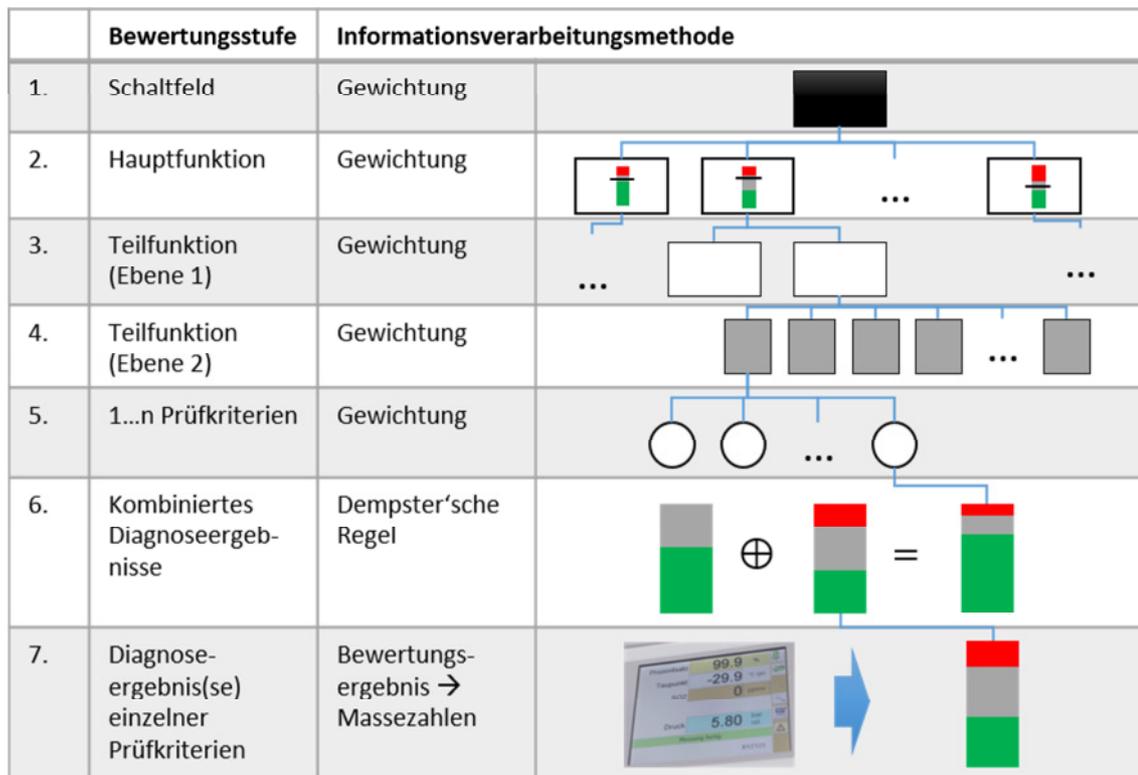


Abbildung 2-32: Visuelle Darstellung des Zustandsbewertungsverfahrens

Eine vollständige Übersicht über alle verwendeten Prüfkriterien inklusive deren Gewichtungsfaktoren und nach Diagnoseverfahren differenzierten Massezahlen befindet sich im Anhang 7.3.

3 Anwendung im realen Schaltfeldkollektiv

3.1 Softwaregestützte Umsetzung des Zustandsbewertungsverfahrens

3.1.1 Grundsätzlicher Aufbau

Zur operativen Umsetzung des in Kapitel 1 entwickelten Zustandsbewertungsverfahrens ist eine Softwareanwendung innerhalb eines Tabellenkalkulationsprogramms entwickelt worden, das zum einen alle diagnostischen Ergebnisse protokolliert und zum anderen die Ergebnisse der Einzelbewertungen automatisch zu einem Gesamtergebnis in Form eines Gutachtens abbildet. Die Datenablage erfolgt direkt in Tabellen, welche die über sogenannte Formulare gesteuerten Benutzereingaben des Anwenders aufnehmen. Die in den Tabellen abgelegten Ergebnisse der einzelnen Prüfkriterien werden automatisch zur Zustandsindexberechnung verwendet und als Gutachten zur Zustandsbewertung ausgegeben.

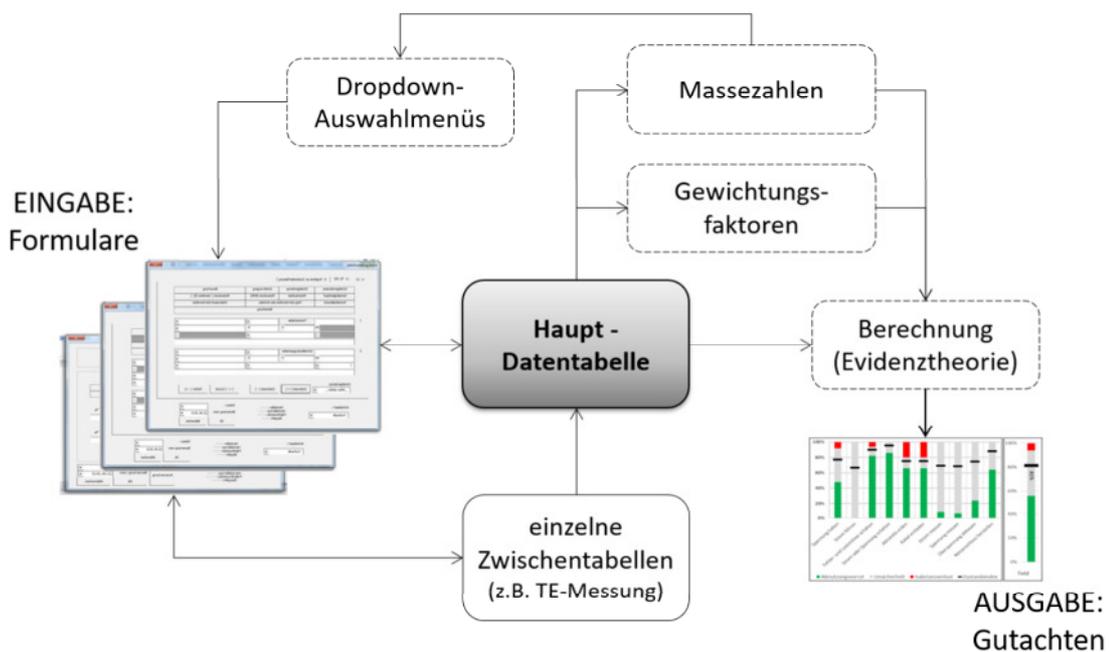


Abbildung 3-1: Datenfluss in der softwaregestützten Umsetzung des Zustandsbewertungsverfahrens

Die Kernelemente der Datenverarbeitung zeigt Abbildung 3-1. Hiernach werden Mess- und Diagnoseergebnisse vom Anwender mit Hilfe von Formularen protokolliert. Einzelne Messergebnisse werden in Zwischentabellen und erzielte Diagnoseergebnisse in

der Haupt-Datentabelle gespeichert. Die Tabelle der Massezahlen gibt sowohl die festgelegten Massezahlenwerte als auch eine sprachliche Beschreibung des Bewertungsergebnisses entsprechend der in Abschnitt 2.1.4 entwickelten Bewertungsstufen an. Sie wird daher auch zur Erstellung von Dropdown-Auswahlmenüs, die standardisierte Nutzereingaben zur Sicherung der Datenkonsistenz enthalten, verwendet. Die Berechnung des Zustandsergebnisses folgt den nach Abschnitt 2.3 entwickelten Regeln unter Berücksichtigung der festgelegten Massezahlen und Gewichtungsfaktoren. In dem automatisch erstellten Gutachten erfolgt eine Auflistung der wichtigsten technischen Sachdaten zum untersuchten Schaltfeld, die Zustandsergebnisse der jeweiligen Hauptfunktionen, das gesamte Zustandsergebnis des Feldes sowie die Einzelbeurteilungen aller Funktionsträger.

3.1.2 Eingabe zustandsrelevanter Informationen

Die Datenerfassung zur Zustandsbewertung und deren Protokollierung in Verbindung mit anzuwendenden Auswertelgorithmen werden dem Anwender durch die Nutzung von Software wesentlich erleichtert. Die Startansicht der softwaregestützten Umsetzung des Zustandsbewertungsverfahrens, nachfolgend Zustandsbewertungstool genannt, ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

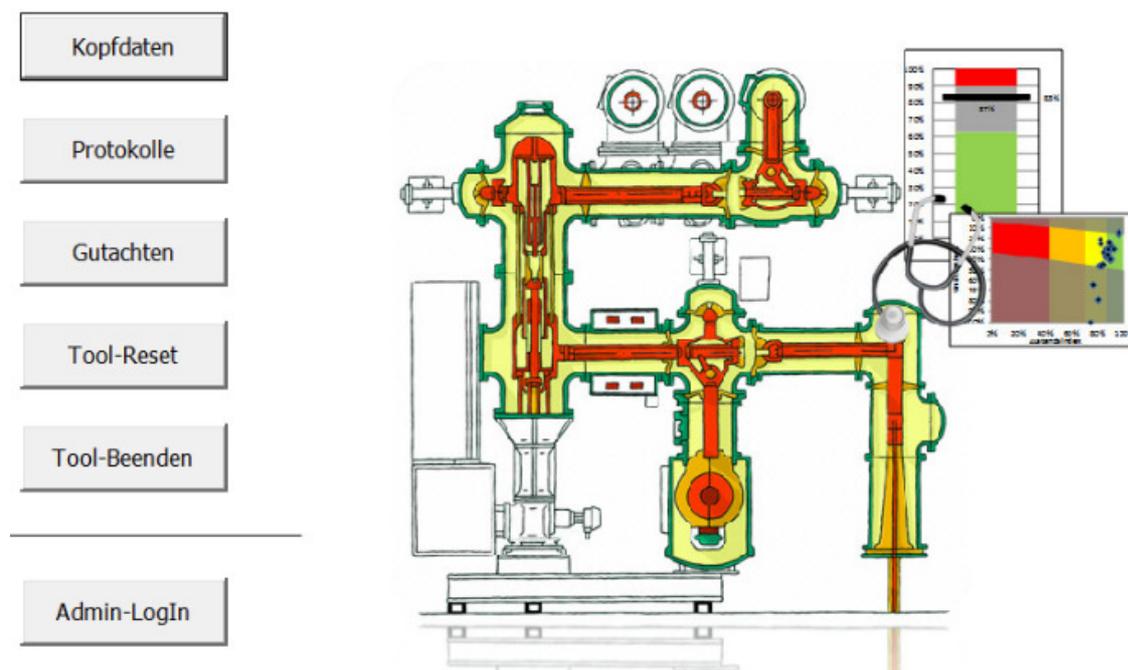


Abbildung 3-2: Startseite des Zustandsbewertungstools

Zu Beginn der Zustandserfassung sind mit dem Button „Tool-Reset“ alle vorhandenen Eingaben zurückzusetzen, da durch eine automatische Datenspeicherung beim Beenden des Tools (Button „Tool-Beenden“) gegebenenfalls Daten aus vorangegangenen Zustandsbewertungen vorhanden sind. Der Button „Kopf-Daten“ ruft ein Formular auf, in dem die Eingaben allgemeiner Informationen über das zu bewertende Schaltfeld erfolgen, da für die weiteren Arbeitsschritte einige grundlegende Informationen, beispielsweise Hersteller und Fabrikat sowie Antriebsart und Löschmittel des Leistungsschalters, erforderlich sind.

vorhandene Hauptfunktionen		verwendete Messmethoden [abgeschlossen]	
1. Sichtkontrolle [0%]	2. Funktionskontrolle (Überwachungseinrichtungen) [-]	3. SF6-Untersuchung [-]	
4. Gasraumüberwachung [-]	5a. Teilentladungsmessung (konventionell) [-]	5b. Teilentladungsmessung (akustisch) [-]	
5c. Teilentladungsmessung (UHF) [-]	6. Thermoobservation- Messung [-]	7. Thermografie-Messung [-]	
8. Spannungsfall-Messung [-]	9. Schaltgeräte [-]	10. Messwandler [-]	

Abbildung 3-3: Übersicht der Formulare für die Eingabe zustandsrelevanter Daten

Über den Button „Protokolle“ gelangt der Anwender zu einem weiteren Auswahlformular (Abbildung 3-3), das sowohl die Eingabe der vorhandenen Hauptfunktionen des un-

tersuchten Felds als auch die Auswahl der verwendeten Messmethoden ermöglicht, damit die Massezahlen zu den einzelnen Bewertungsergebnissen für die Berechnung der Zustandsergebnisse richtig zugeordnet werden können.

In Abhängigkeit der gewählten Hauptfunktionen und der verwendeten Messmethoden werden die benötigten Protokolle zur Datenerfassung freigegeben (in Abbildung 3-3: hellgraue Buttons mit schwarzer Schrift entsprechen freigeschalteten Protokollen, dunkelgraue Buttons mit heller Schrift entsprechen nicht benötigten Protokollen). Der Bearbeitungsstand jedes einzelnen Protokolls wird unterhalb des jeweiligen Buttons in eckigen Klammern angezeigt. Ein Protokollbeispiel zeigt Abbildung 3-4.

SF6-Untersuchung

SF6-Gasanalyse

Gasraum-Name			
Gas-Funktion	vorgef. Druck		Füllmasse
Anteil H2O	Anteil HF	Anteil SO2	Bemerkung
1	GR LS	Lösch / Isolati	entspricht dem Nenndruck
		350	kg 99,7 %
	-37 °C-DTp	0 ppmV	0 ppmV
2	GR 1	Isolation	entspricht dem Nenndruck
		50	kg 98,3 %
	-32 °C-DTp	0 ppmV	3 ppmV
3	GR 2	Isolation	Nachfüllen erforderlich
		50	kg 98,9 %
	-33 °C-DTp	0 ppmV	0 ppmV
4	GR 3	Isolation	entspricht dem Nenndruck
		50	kg 99,5 %

Druck(Urteil)	3	Isolation	Lösch/Isolation	1	Auswertung	Bewertungsstatus :	bewertet
Vol-%	98,3 %		99,7 %			Bewertung vom:	07.12.2015
H2O-Anteil	-31 °C-DTp		-37 °C-DTp			Ok	Abbrechen
HF-Anteil	0 ppmV		0 ppmV				
SO2-Anteil	3 ppmV		0 ppmV				

Abbildung 3-4: Protokollbeispiel zur SF₆-Gasanalyse

Das beispielhaft gezeigte Protokoll „SF₆-Untersuchung“ zeigt die verschiedenen Gasräume eines SF₆-Hochspannungsschaltfelds und deren Ergebnisse hinsichtlich der SF₆-Menge („vorgef. Druck“, „Füllmasse“ und „Vol.-%“) sowie der Verunreinigungen („Anteil H₂O“, „Anteil HF“ und „Anteil SO₂“).²⁰ Weiterhin ist zu erkennen, dass eine Differenzierung der Gasräume nach den Funktionen „Lösch/Isolation“ und „Isolation“ verwendet wird. Dies erlaubt die Zuordnung der Gasanalyseergebnisse zu den entsprechenden Hauptfunktionen „Fehler- und Lastströme schalten“ und „Spannung halten“. Der Button „Auswertung“ startet den Abschnitt 2.3 entwickelten Bewertungsalgorithmus. Mit dem Bewertungsstatus kann der Fortschritt der Datenerfassung bezüglich der SF₆-Untersuchung durch den Anwender gekennzeichnet werden. Das Bewertungsdatum wird explizit benötigt, um das Alter nach Abschnitt 2.3.3 berücksichtigen zu können. Mit Klick auf den Button „OK“ werden alle einzelnen Ergebnisse in der entsprechenden Zwischentabelle bzw. Haupt-Datentabelle (siehe Abbildung 3-1) gespeichert.

Nach Eingabe aller vorhandenen Informationen kann der Anwender das Gutachten über den Button „Gutachten“ (Abbildung 3-2) vom Zustandsbewertungstool erzeugen lassen.

3.1.3 Ausgabe der Zustandsergebnisse

Die berechneten Zustandsergebnisse werden auf Ebene des Schaltfeldes und auf der Ebene der Hauptfunktionen ausgegeben. Zusätzlich wird eine tabellarische Übersicht erstellt, welche die nach dem Funktionsmodell (Abschnitt 2.1) ermittelten Prüfkriterien nach Hauptfunktionen gruppiert und auflistet, sowie die ermittelten Bewertungsergebnisse anzeigt. Zusätzlich beinhaltet die Auflistung die verwendeten Gewichtungsfaktoren und das Datum der Bewertung. Das Gutachten beinhaltet somit das berechnete Zustandsergebnis und die gesamte Bewertungsgrundlage in aggregierter Form. Damit kann der Leser des Gutachtens beispielsweise direkt feststellen, welche Ursachen für ein schlechtes Bewertungsergebnis verantwortlich sind und mit der Einleitung entsprechender Handlungsmaßnahmen beginnen.

Abbildung 3-5 zeigt die zehn ermittelten Hauptfunktionen von „Spannung halten“ bis „Netzanschluss herstellen“. Für die jeweiligen Hauptfunktionen werden die Zustandsergebnisse nach Abnutzungsvorrat (grün), Unsicherheit (grau) und Substanzverlust (rot) „gestapelt“ und ein Zustandsindex, der sich nach Abschnitt 2.3.6 aus Betrag und Position des Unsicherheitsbereichs bestimmt, dargestellt. Diese Darstellungsweise entstammt

²⁰ Erläuterungen zu diesen Messgrößen finden sich in Abschnitt 2.4.4.

direkt aus den für diese Arbeit eingeführten Begrifflichkeiten und Definitionen nach Abbildung 2-21. Zusätzlich zeigt Abbildung 3-5 auf der rechten Seite das Gesamtergebnis für das bewertete SF₆-Hochspannungsschaltfeld, das die höchste Aggregationsstufe des Zustandsbewertungsverfahrens ist.

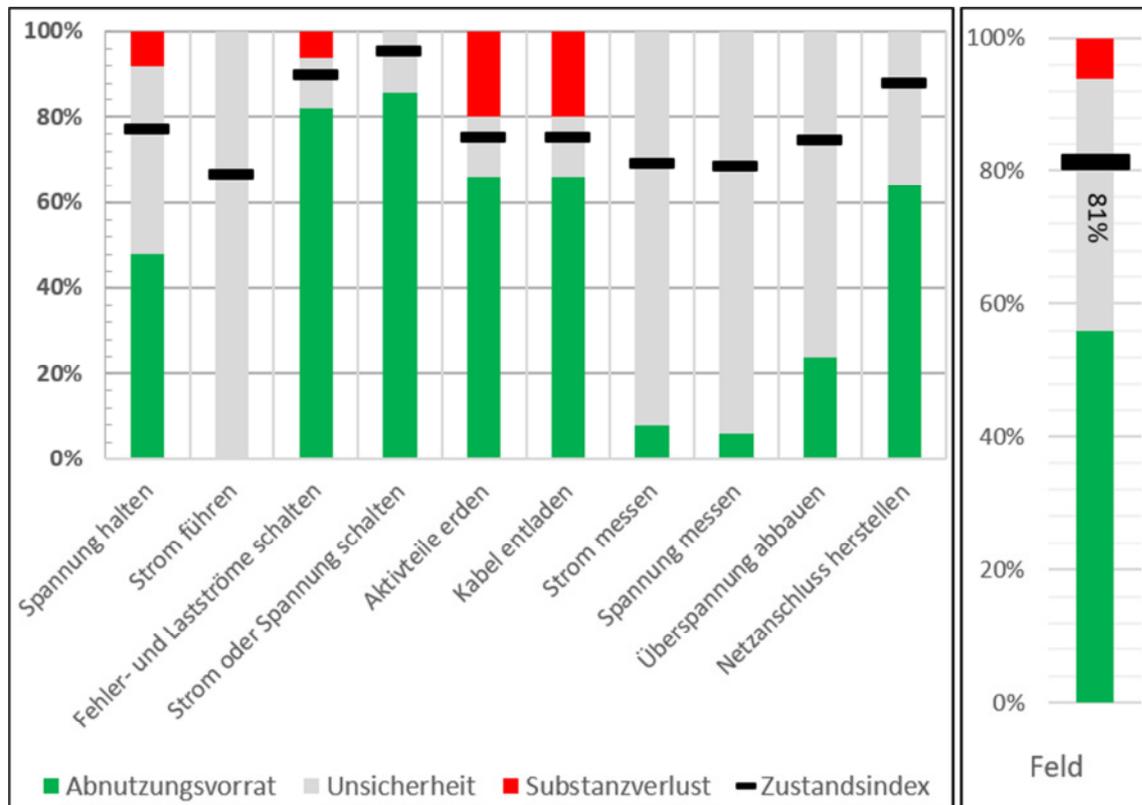


Abbildung 3-5: Zustandsergebnisse nach Hauptfunktionen und gesamtes SF₆-Hochspannungsschaltfeld

Als Beispiel für Einzelergebnisse der Prüfkriterien zeigt Abbildung 3-6 einen Ausschnitt zur Hauptfunktion „Spannung halten“. Den einzelnen Prüfkriterien wird die erreichte Bewertungsstufe 1...6 zugeordnet und zusätzlich farblich mit grün (Bewertungsstufe 1), gelb (Bewertungsstufe 2), orange (Bewertungsstufe 3), rot (Bewertungsstufe 4), grau (Bewertungsstufe 5) und schwarz (Bewertungsstufe 6) gekennzeichnet, um dem Anwender das Auffinden kritischer Prüfkriterien in der Liste zu erleichtern.

Prüfkriterium	1. unauffällig	2. beobachten	3. reparieren	4. austauschen	5. nicht ermittelt	6. nicht vorhanden
Hauptfunktion: Spannung halten						
...						
Volumenprozensatz						
Anteil H ₂ O						
Anteil SO ₂						
Teilentladungsaktivität						
Schaltpunkte Druckschalter						
...						

Abbildung 3-6: Beispielhaft bewertete Auswahl von Prüfkriterien

3.2 Betrachtung des realen Schaltfeldkollektivs

3.2.1 Gesamtstruktur

Die Struktur des in Abschnitt 1.1 vorgestellten Kollektivs von 198 SF₆-Hochspannungsschaltfeldern kann hinsichtlich Baujahr²¹, Fabrikaten²², Schaltaufgaben und technischen Hauptmerkmalen unterschieden werden.

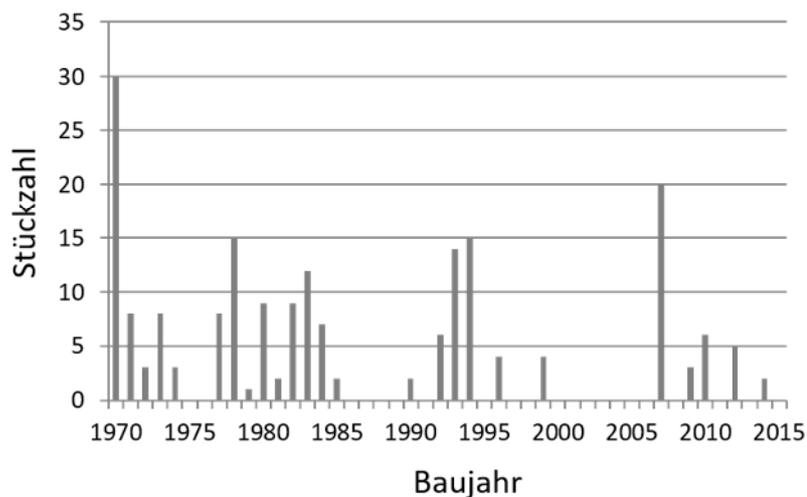


Abbildung 3-7: Altersstruktur

²¹ Die Begrifflichkeit des Baujahrs bezeichnet das Jahr, in dem das SF₆-Hochspannungsschaltfeld beim Hersteller erbaut worden ist und ist damit nicht mit dem Inbetriebnahmejahr zu verwechseln.

²² Die Fabrikate werden verschlüsselt angegeben, um die Anonymität der Hersteller zu wahren.

Abbildung 3-7 zeigt dazu die Stückzahl der Schaltfelder gruppiert in Baujahren, aus der sich vier Neubauzeiträume (1970-1974; 1977-1985; 1989-1999; 2007-2014) identifizieren lassen. Fortführend beschreibt Abbildung 3-8, welche Fabrikate in welchen Stückzahlen in den jeweiligen Baujahreszeiträumen hergestellt wurden.

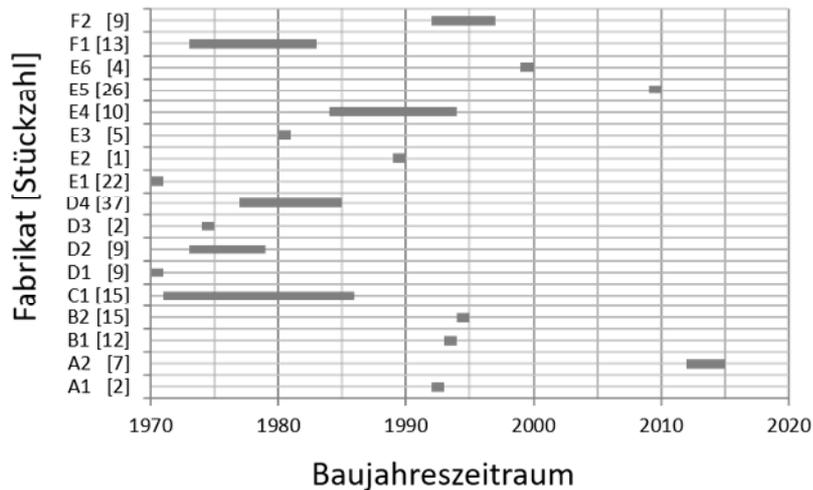


Abbildung 3-8: Baujahreszeiträume und Stückzahl nach Fabrikaten

Aus Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 lässt sich ableiten, dass in den ersten beiden Neubauzeiträumen, also zu Beginn der Einführung der SF₆-metallgekapselten Bauweise für Schaltanlagen im 110-kV-Verteilnetz, viele verschiedene Fabrikate zum Einsatz gekommen sind. Zum einen lässt sich hier zur Reduzierung von Auswirkungen möglicher konstruktiver Fehler eine Diversitätsstrategie des Netzbetreibers unterstellen. Zum anderen deutet dies auf ein hohes Entwicklungsengagement der Hersteller hin, da die Kennzeichnung von Neuentwicklung in der Regel anhand neuer Fabrikate angezeigt wird.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern ist die Schaltaufgabe. Die Realisierung von Schaltaufgaben erfordert den Einsatz verschiedener Hauptfunktionen. Daraus folgt, dass der Funktionsumfang bei Schaltfeldern mit unterschiedlichen Schaltaufgaben auch unterschiedlich groß sein kann. Das Unterscheidungsmerkmal der Schaltaufgaben ist bereits im Abschnitt 2.3.7 (Seite 55) zur Berücksichtigung nicht vorhandener Hauptfunktionen in der Entwicklung des Zustandsbewertungsverfahrens aufgegriffen worden und wird daher an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Tabelle 3-1 zeigt die Verteilung der Schaltfelder auf die Schaltaufgabe.

Tabelle 3-1: Stückzahlen nach Schaltaufgabe

Schaltaufgabe	Freileitung	Kabel	Transformator	Längstrennung	Querkupplung	Sammelschienen- Erdung / -Messung	Kabel-Trafo	Freileitung-Trafo	Maschine / Generator
Anzahl	58	26	54	4	18	25	9	1	3

Wichtige, technische Unterscheidungsmerkmale der Fabrikate sind in Tabelle 3-2 gelistet. Leicht zu erkennendes Differenzierungspotenzial zeigen insbesondere die eingesetzten Leistungsschalter nach Antriebs- und Löschmittelart sowie die Art der Kapselung zur Herstellung der Isolationsfähigkeit.

Tabelle 3-2: Allgemeine technische Differenzierungsmerkmale der einzelnen Fabrikate

Fabrikat	Antriebsart Leistungsschalter	Löschmittelart Leistungsschalter	Kapselungsart des Felds	Kapselungsart der Sammelschiene
A1	hydromech. (Hybrid)	SF ₆	3-polig	3-polig
A2	hydromech. (Hybrid)	SF ₆	3-polig	3-polig
B1	Druckluft	SF ₆	1-polig	1-polig
B2	Feder	SF ₆	1-polig	1-polig
C1	Hydraulik	SF ₆	1-polig	3-polig
D1	Feder	Öl	1-polig	1-polig
D2	Hydraulik	Öl	1-polig	1-polig
D3	Feder	SF ₆	1-polig	1-polig
D4	Feder	SF ₆	1-polig	1-polig
E1	Hydr.-EIN, Feder-AUS (Hybrid)	SF ₆	1-polig	3-polig
E2	Hydraulik	SF ₆	1-polig	3-polig
E3	Hydraulik	SF ₆	3-polig	3-polig
E4	Hydraulik	SF ₆	3-polig	3-polig
E5	Feder	SF ₆	3-polig	3-polig
E6	Hydraulik	SF ₆	1-polig	3-polig
F1	Feder	SF ₆	1-polig	1-polig
F2	Feder	SF ₆	1-polig	1-polig

Die hier aufgezeigte Struktur des SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektivs unterstreicht noch mal die Wichtigkeit der Typunabhängigkeit des Zustandsbewertungsverfahrens. Diese Unabhängigkeit bezieht sich folglich nicht nur auf die Verwendbarkeit verschiedener zustandsrelevanter Informationsquellen, sondern auch auf die verschiedenen technischen Merkmale der verschiedenen Fabrikate ohne die Vergleichbarkeit der Zustandsergebnisse zu gefährden.

Weiterhin ist dieses SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv offensichtlich geeignet, um das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte typunabhängige Zustandsbewertungsverfahren zu validieren und wird daher im nächsten Abschnitt mit Hilfe des Störungsaufkommens von betrieblicher Seite betrachtet.

3.2.2 Störungsaufkommen

Zur Bestimmung des Störungsaufkommens²³ wurde das zur Dokumentation des beschriebenen Schaltfeldkollektivs verwendete Sachdatensystem ausgewertet, in dem Störungen von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern durch Instandhaltungs- und Betriebspersonal gepflegt werden. Die Auswertung umfasst alle Schaltfelder des betrachteten Kollektivs im Betrachtungszeitraum von 2004 bis 2014. Die Einschränkung des Zeitraums ist durch zwei Besonderheiten begründet:

1. Vor 2004 wurden Verbesserungen an bestimmten Fabrikaten durchgeführt, da konstruktive Schwächen nach Anstieg der Störungshäufigkeit festgestellt worden sind. Diese Störungen werden durch oben genannte Einschränkung nicht mehr berücksichtigt.
2. Die Qualität der Daten vor 2000 kann nicht eingeschätzt werden, da unterschiedliche Dokumentationssysteme genutzt worden sind.

Prinzipiell lassen sich einzelne Störungen nicht nur nach Fabrikaten (Abbildung 3-9) und betroffenen Hauptfunktionen (Abbildung 3-10) unterscheiden, sondern auch nach deren Auswirkung. Da im betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv im Betrachtungszeitraum nur zwei Störungen aufgetreten sind, die zu Versorgungsunterbrechungen geführt haben, wird auf eine Differenzierung hinsichtlich der Störungsauswirkung verzichtet. Abbildung 3-9 liegen über die elfjährige Betrachtungszeit 129 Störungen zu Grunde. Die Betrachtung von Abbildung 3-9 zusammen mit Abbildung 3-8 zeigt, dass eine grundsätzliche Korrelation zwischen Alter und Störungshäufigkeit im hier betrachteten Kollektiv nicht bestätigt werden kann.

²³ Unter einer Störung wird eine betriebliche Einschränkung verstanden, die aus einer nicht funktionierenden oder nur eingeschränkt funktionierenden Hauptfunktion resultiert.

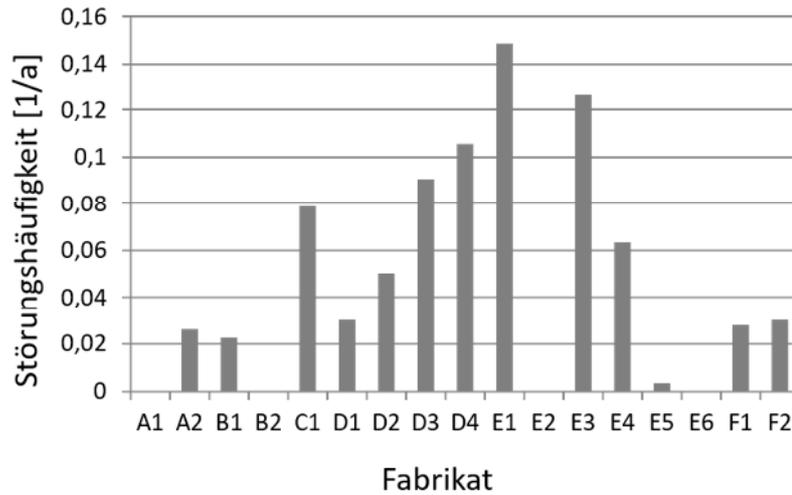


Abbildung 3-9: Störungshäufigkeit nach Fabrikaten

Abbildung 3-10 zeigt, dass die Fehlerschwerpunkte in den Bereichen der Hauptfunktionen „Spannung halten“ und „Fehler- und Lastströme schalten“ liegen. Etwa 83% der Störungen in Hauptfunktion „Spannung halten“ sind SF₆-Gasverluste. Bis auf einen Kurzschluss in Folge eines dielektrischen Versagens, der auch Versorgungsunterbrechungen zur Folge hatte, sind die übrigen Störungen Defekte an SF₆-Überwachungseinrichtungen. Hinter den Störungen der Hauptfunktionen „Fehler- und Lastströme schalten“, „Strom oder Spannung schalten“ und „Aktivteile erden“ stehen mit einer Ausnahme ausschließlich Fehler in den Antrieben der Schaltgeräte. Die Ausnahme beinhaltet ein defektes Kontaktsystem, das den Lichtbogen während der Ausschaltung nicht mehr beherrschen konnte. Auch diese Störung führte zu einer Versorgungsunterbrechung.

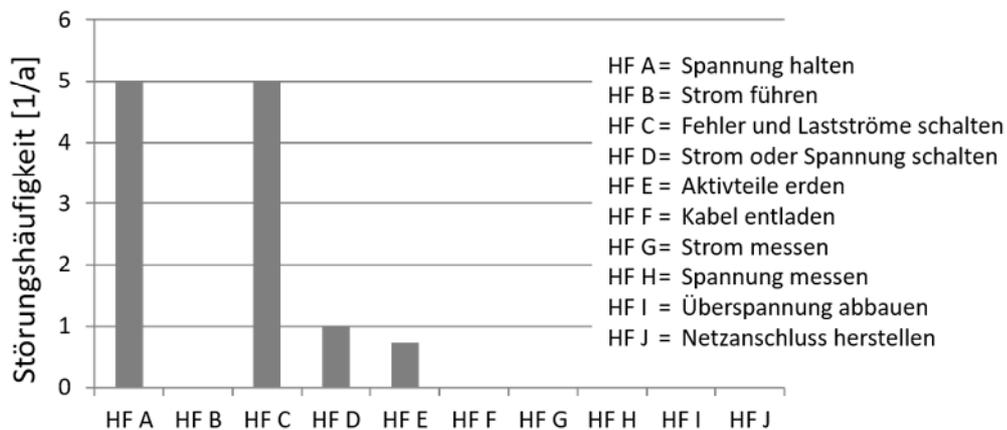


Abbildung 3-10: Störungshäufigkeit nach Hauptfunktionen

Zusammen zeigen die Abbildung 3-9 und die Abbildung 3-10, dass die statistische Basis im Schaltfeldkollektiv gering ist. Außerdem ist kritisch zu bemerken, dass große Teile der eingehenden Daten entweder aus Überwachungseinrichtungen (SF₆-Gasverlustmeldungen durch Dichtewächter oder Druckschalter) stammen oder wegen der äußeren Zugänglichkeit (Antriebe der Schaltgeräte) leicht zu erfassen sind. Zur realitätsgerechten und vollständigen Bewertung aller Hauptfunktionen sind somit zusätzliche Informationen erforderlich, die zum Beispiel mit Hilfe der diagnostischen Verfahren nach Abschnitt 2.2 erhoben werden können. Trotzdem nützt die Störungsstatistik dahingehend, die Antriebe der Schaltgeräte und die Gasräume als besonders beobachtungswürdige Elemente eines SF₆-Hochspannungsschaltfelds zu identifizieren. In der logischen Konsequenz wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf deren Bewertung gelegt.

3.2.3 Ermittelte Zustandsergebnisse

Für 66 der 198 SF₆-Hochspannungsschaltfelder des Schaltfeldkollektivs wurde das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Zustandsbewertungsverfahren angewendet.

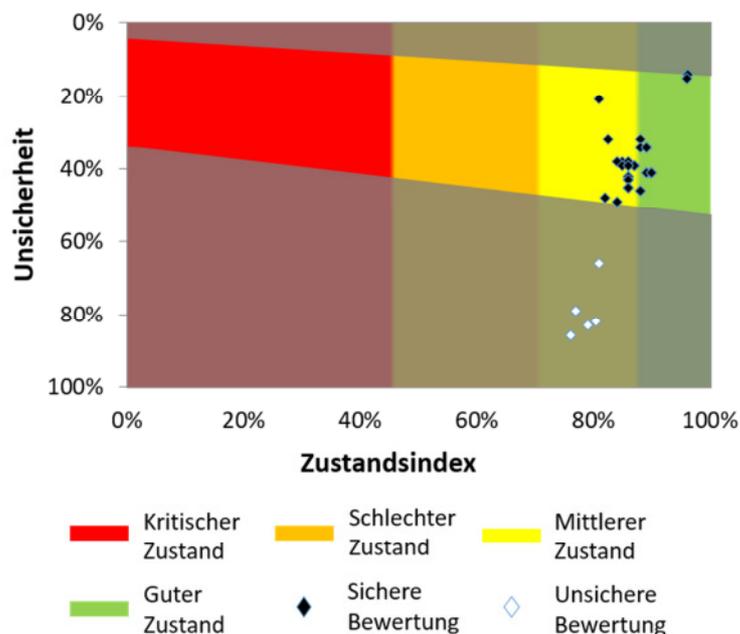


Abbildung 3-11: Aggregierte Zustandsergebnisse der bewerteten Schaltfelder

Abbildung 3-11 zeigt eine stark aggregierte Form der ermittelten Zustandsergebnisse, wie sie bereits in [PTZ+15b, Paw16]²⁴ vorgestellt wurde. Sie visualisiert die einzelnen Zustandsergebnisse²⁵ als ermittelter Zustandsindex nach Abschnitt 2.3.6 in Abhängigkeit der Unsicherheit. Um die Aussagekraft dieser Darstellung zu erhöhen, ist in horizontaler Richtung eine farbliche Zuordnung einzelner Zustandsbereiche und in vertikaler Richtung eine Übergrauung vom jeweils unteren und oberen Unsicherheitsbereich aufgetragen. Die so ermittelten Grenzbereiche sowie deren Aussagekraft werden nachfolgend erläutert.

In Anwendung des Zustandsbewertungsverfahrens mit den in Abschnitt 2.2.3 vorgeschlagenen Diagnoseverfahren (Zustandsbewertung auf Basis minimalinvasiver Messtechnik) gewonnenen zustandsrelevanten Daten und einer Anwendung der Risikoeinstellung des Anwenders von $k = 0$ (maximales Risiko) und $k = 0,33$ (chancenorientiert, siehe Abschnitt 2.3.6) können in Abhängigkeit der eingetragenen Beurteilungsstufen die Grenzen der Farbgebung ermittelt werden. Wird für alle vorgeschlagenen Diagnoseverfahren die Beurteilungsstufe „1“ vergeben, so wird für $k = 0,33$ ein maximaler Zustandsindex $Z_{k=0,33} = 88\%$ erreicht. Für $k = 0$ ergibt sich entsprechend $Z_{k=0} = 100\%$. Analog lassen sich mit Hilfe der anderen Bewertungsstufen die weiteren Grenzen ermitteln. Um den Zustandsbewertungsbereich vollständig abzudecken, wurde im Rahmen der Bewertungsstufe „4“ zur Ermittlung kritischer Gesamtzustände die Risikoeinstellung von $k = 0$ und $k = 1$ betrachtet. Wird in der Anwendung der Zustandsbewertung anstatt der Risikoeinstellung k die Basis der zustandsrelevanten Informationen variiert, können verschiedene Unsicherheitsbereiche erreicht werden (detailliertere Betrachtungen befinden sich in Abschnitt 4.1.2). Wird die Zustandsbewertung an den entsprechenden Zustandsgrenzen $Z = 0\%$ und $Z = 100\%$ allein mit Sicht- und Funktionskontrollen ausgeführt, so stellt sich die untere Grenze zwischen übergrautem und nicht-übergrautem Bereich ein. Die obere Grenze stellt die maximale Aussagefähigkeit der nach Abschnitt 2.2.3 vorgeschlagenen minimalinvasiven Diagnoseverfahren dar. Diese kann zum Beispiel durch den Einsatz invasiver Diagnoseverfahren überschritten

²⁴ [PTZ+15b] und [Paw16] beschreiben 67 Schaltfelder, da zu Vergleichszwecken ein Schaltfeld dargestellt wurde, für das keine Zustandsergebnisse (vollständige Unsicherheit) vorliegt. Auf die Berücksichtigung dieses Schaltfelds wird in dieser Arbeit verzichtet.

²⁵ Aufgrund von Überlagerung einzelner Datenpunkte sind in Abbildung 3-11 nicht alle einzelnen Schaltfelderergebnisse zu erkennen.

werden, wie sie beispielsweise während der Inbetriebnahme eines SF₆-Hochspannungsschaltfelds zum Einsatz kommen [Kyn08].

Anhand der in den vorherigen Abschnitten erläuterten Abgrenzung einzelner Zustandsbereiche kann mit Hilfe von Abbildung 3-11 durch die Konzentration der Zustandsergebnisse im rechten Bereich abgeleitet werden, dass im SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv ein hohes Maß an Abnutzungsvorrat vorliegt. Diese Aussage ist für diejenigen Schaltfelder, die oberhalb des unteren Graubereichs liegen, als sichere Bewertung anzunehmen (schwarze Rauten), wohingegen Zustandsaussagen, die im unteren Graubereich liegen (weiße Rauten) durch die Erhebung zusätzlicher Zustandsinformationen präzisiert werden sollten. Da der Zustandsindex stark durch den erreichten Betrag der Unsicherheit beeinflusst wird, muss zur Detaillierung der Aussagen über das SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv der Aggregationsgrad verringert werden.

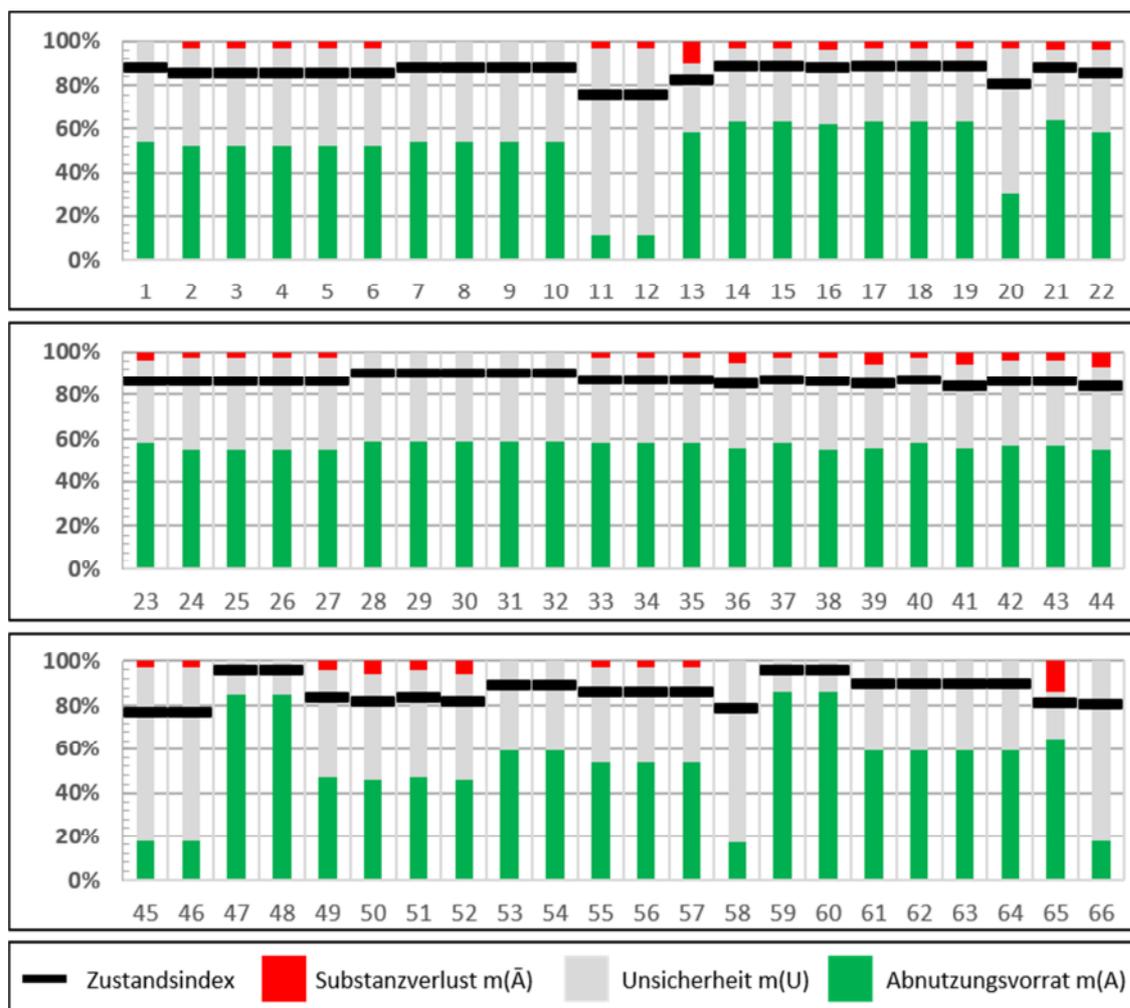


Abbildung 3-12: Einzelne Zustandsergebnisse der 66 bewerteten Schaltfelder

Abbildung 3-12 zeigt die einzelnen Zustandsergebnisse der 66 betrachteten Schaltfelder. Die Abbildung identifiziert die Ergebnisse der Felder 11, 12, 20, 45, 46, 58 und 66 als sehr unsicher und verdeutlicht damit nochmal den Zusammenhang zwischen den einzelnen Zustandsergebnissen und der aggregierten Darstellung nach Abbildung 3-11²⁶. Insbesondere ist zu erkennen, dass 66% der untersuchten Schaltfelder Substanzverluste aufweisen. Diese werden im Folgenden näher analysiert, um die Handlungsbedarfe im SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv besser beurteilen zu können.

Tabelle 3-3: Übersicht der ermittelten Substanzverluste im bewerteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv

	Schaltfeldebene	Spannung halten	Strom führen	Fehler- und Lastströme schalten	Strom oder Spannung schalten	Aktivteile erden	Kabel entladen	Strom messen	Spannung messen	Überspannung abbauen	Netzanschluss herstellen
Anzahl Schaltfelder mit Substanzverlust	57	53	1	33	1	2	0	0	0	0	0
Substanzverlust bezogen auf das Gesamtkollektiv	3,0%	8,4%	0,2%	1,6%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabelle 3-3 zeigt eine Übersicht der Substanzverluste, die an den untersuchten SF₆-Hochspannungsschaltfeldern ermittelt wurden. Diese Ergebnisse sind in das Gesamtergebnis auf Ebene des Schaltfeldes sowie nach den einzelnen Hauptfunktionen unterteilt. Die Zeile „Anzahl Schaltfelder mit Substanzverlust“ beschreibt dabei diejenige Anzahl der Schaltfelder, bei denen ein Substanzverlust $m(\bar{A}) \geq 0$ ermittelt worden ist. Zusätzlich wird der durchschnittliche „Substanzverlust bezogen auf das Gesamtkollektiv“ angegeben. Aus Tabelle 3-3 lässt sich weiter ableiten, dass zwar an 86% der SF₆-Hochspannungsschaltfelder Substanzverluste feststellbar sind, aber der gesamte Substanzverlust im untersuchten Kollektiv mit $m(\bar{A})_{\text{Gesamtkollektiv}} = 3\%$ nur sehr gering ausgeprägt ist.

²⁶ Für die Ableitung von Aussagen auf der Ebene von Unsicherheiten und Zustandsindices sei auf [Paw16] verwiesen.

Wird dieses Ergebnis weiter in Hauptfunktionen unterschieden, so wird deutlich, dass im Wesentlichen die Hauptfunktionen „Spannung halten“ und „Fehler- und Lastströme schalten“ Substanzverluste aufweisen. Dabei sind 80% der SF₆-Hochspannungsschaltfelder in der Hauptfunktion „Spannung halten“ und 50% der SF₆-Hochspannungsschaltfelder in der Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ betroffen. Folglich sind diese Hauptfunktionen von hoher Relevanz für die Zustandsbewertung, da die anderen Hauptfunktionen nur wenig Auswirkung auf das Ergebnis des gesamten Substanzverlustes $m(\bar{A})_{\text{Gesamtkollektiv}}$ haben.

Tabelle 3-4: Häufigkeiten ermittelter Substanzverluste

HF	Prüfkriterium	Bewertungsstufe 2 „beobachten“	Bewertungsstufe 3 „reparieren“	Bewertungsstufe 4 „austauschen“	Summe
A	SF ₆ -Dichtheit	0	1	2	3
A	SF ₆ Volumenprozentsatz	0	3	1	4
A	Anteil H ₂ O in SF ₆	4	5	21	30
A	Anteil SO ₂ in SF ₆	2	0	0	2
A	Teilentladungsaktivität	0	1	1	2
A	Schaltpunkte der Dichtewächter	9	0	5	14
A	Anzeige der Manometer	11	3	0	14
B	Temperatur der Kapselung	0	0	1	1
C	Beschädigungen	7	0	0	7
C	Dynamische Weganalyse	0	1	1	2
C	Kontaktabbrand	3	0	0	3
C	SF ₆ Volumenprozentsatz	11	0	2	13
C	Anteil H ₂ O in SF ₆	14	0	10	24
C	Anteil SO ₂ in SF ₆	0	0	5	5
D	Beschädigungen	1	0	1	2
E	Beschädigungen	2	0	0	2
	Summe	64	18	46	128

Legende: HF = Hauptfunktion, A = Spannung halten, B = Strom führen
C = Fehler- und Lastströme schalten, D = Strom oder Spannung schalten, E = Aktivteile erden

Tabelle 3-4 listet diejenigen Prüfkriterien auf, die im untersuchten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv Substanzverluste aufzeigen. Da Substanzverluste nur aus den Beurteilungsstufen 2 bis 4 resultieren (vgl. Abschnitte 2.1.4 und 2.4.1), gibt Tabelle 3-4 neben der aufsummierten Anzahl der Substanzverluste auch eine Unterteilung in Bewertungsstufen an. Es ist deutlich, dass insbesondere die Qualität des SF₆-Gases mit den

Prüfkriterien Volumenprozentanteil und Wasseranteil (Anteil H₂O) für Substanzverluste in den Hauptfunktionen „Spannung halten“ und „Fehler- und Lastströme schalten“ sorgen. In Summe wurden für diesen Bereich 78 Substanzverluste festgestellt, wobei knapp 70% auf zu hohe Wasseranteile im SF₆-Gas fallen. Mehr als die Hälfte der Substanzverluste durch zu hohe Wasseranteile sind kritisch (Bewertungsstufe 4). Diese Einstufung ergibt sich aus normativen Grenzwerten [DIN08]. Substanzverluste, die nicht aus dem SF₆-Gas resultieren und die Reparatur- oder Austauschbedarf anzeigen, treten nur vereinzelt auf.

Tabelle 3-5 zeigt in Abhängigkeit der zugeordneten Hauptfunktion sowie des zugeordneten Prüfkriteriums die ermittelten Ursachen der Substanzverluste und ordnet diesen Ursachengruppen zu. Zur weiteren Interpretation der ermittelten Ursachen müssen diese in Verbindung mit der tatsächlichen Konstruktion des betroffenen Bauteils bzw. im Kontext des Fertigungs- oder Montageprozesses eines betroffenen SF₆-Hochspannungsschaltfelds betrachtet werden. Davon wird in dieser Arbeit abgesehen, da die Ergebnisse dieser detaillierten Ursachenbeschreibungen aufgrund der Inhomogenität nach Fabriken im untersuchten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv keine Allgemeingültigkeit haben. Folglich ist die Betrachtung der Ursachengruppen, die nach Diffusion, Fehler in der Datenerhebung, Kunststoffalterung, Montagefehler, Verschleiß und Witterung klassifiziert werden, von höherer Bedeutung.

Der Einfluss der Witterung auf einzelne Bauteile ist für das betrachtete Kollektiv gering, da die meisten SF₆-Hochspannungsschaltfelder innerhalb von Gebäuden aufgestellt sind. Vereinzelt werden SF₆-Rohrleitungen benutzt, um Transformatoren, die sich außerhalb des Gebäudes befinden, mit dem zugehörigen Schaltfeld zu verbinden. An einer Flanschfläche konnte Spaltkorrosion detektiert werden, die zu SF₆-Gasverlusten führte. Mit der Aufbereitung der Flanschfläche (Reinigung und erneute Passivierung mit Fett sowie der Austausch des O-Rings) konnte die SF₆-Dichtheit des betroffenen Gasraumes wiederhergestellt werden. Aufgrund der Einmaligkeit dieser Einflussgruppe lässt sich kein grundsätzlicher Handlungsbedarf ableiten.

Tabelle 3-5: Ursachen der ermittelten Substanzverluste

HF	Prüfkriterium	Ermittelte Ursachen der Substanzverluste	Ursachengruppe
A	SF ₆ -Dichtheit	Defekte dynamische Dichtungen, Spaltkorrosion an Flanschflächen (Ausleitung im Außenbereich), Verbindungsmuffen an SF ₆ -Rohrleitungen.	Verschleiß, Witterung, Kunststoffalterung
A	SF ₆ Volumenprozentsatz	Fehlerhafte Ausführungen im Zuge Gasraumevakuierung oder Gasraumfüllung durch Personal oder durch Evakuier-/Fülleinrichtung	Montagefehler durch Personal, Montagefehler durch Werkzeug
A	Anteil H ₂ O in SF ₆	Eindringen von Wasser durch Oberflächen des Rohrsystems und entlang der Dichtungsflächen	Diffusion
A	Anteil SO ₂ in SF ₆	<i>Defektes Messgerät</i>	<i>Fehler in der Datenerhebung</i>
A	Teilentladungsaktivität	Verunreinigungen durch Kontaktmaterialabrieb, beschädigte Isolationskörper	Verschleiß, Montagefehler durch Personal
A	Schaltpunkte der Dichtewächter	Materialermüdung im mechanischen Teil der Einrichtung zur Druckmessung, Defekter Mikroschalter	Verschleiß
A	Anzeige der Manometer	Materialermüdung im mechanischen Teil der Einrichtung zur Druckmessung	Verschleiß
B	Temperatur der Kapselung	Hoher Übergangswiderstand am Verbindungselement zweier Leiterrohren	Montagefehler durch Personal
C	Beschädigungen	Gebrochene Isolierungen von Steuerleitungen durch Material, gebrochene Porzellankörper von Heizwiderständen als Folge mechanischer Spannungen durch Temperaturwechsel, gebrochene Halterung der mechanischen Schaltstellungsanzeige infolge hoher dynamischer Beanspruchung im Schaltvorgang	Kunststoffalterung, Verschleiß
C	Dynamische Weganalyse	Defekte Dämpfungseinrichtung, Mittenversatz am Leistungsschalterkontakt	Verschleiß, Montagefehler durch Personal
C	Kontaktabbrand	Schalhäufigkeit und Höhe der geschalteten Ströme	Verschleiß
C	SF ₆ Volumenprozentsatz	Fehlerhafte Ausführung im Zuge Gasraumevakuierung oder Gasraumfüllung durch Personal oder Evakuier-/Fülleinrichtung	Montagefehler durch Personal, Montagefehler durch Werkzeug
C	Anteil H ₂ O in SF ₆	Eindringen von Wasser durch Oberflächen des Rohrsystems und entlang der Dichtungsflächen	Diffusion
C	Anteil SO ₂ in SF ₆	Gesättigtes Filtermaterial	Verschleiß
D	Beschädigungen	Gebrochene Isolierungen von Steuerleitungen durch Material	Kunststoffalterung
E	Beschädigungen	Gebrochene Isolierungen von Steuerleitungen durch Material	Kunststoffalterung

Legende: HF = Hauptfunktion, A = Spannung halten, B = Strom führen
 C = Fehler- und Lastströme schalten, D = Strom oder Spannung schalten, E = Aktivteile erden

In der Ursachengruppe Verschleiß finden sich einzelne Bauteile, die im Zuge ihrer Verwendung kaum noch Abnutzungsvorrat aufweisen. Dies trifft im Einzelfall für dynamische Dichtungen, Verunreinigungen durch Kontaktmaterialabrieb, Porzellankörper

von Heizungen, mechanischer Schaltstellungsanzeige und Filtermaterial²⁷ zu. Mit entsprechenden Ersatzteilen konnte der Abnutzungsvorrat wiederhergestellt werden. Die Häufigkeit des Verschleißes bei den Schaltpunkten der Dichtewächter und den Druckschaltern ist im Vergleich zu den anderen Prüfkriterien (außer Anteil H₂O in SF₆) hoch. Die Druckschalter im betrachteten Kollektiv können justiert werden. Dies ist bei den Dichtewächtern nicht möglich und folglich muss ein Dichtewächter, dessen Schaltpunkte außerhalb der Toleranz liegen, ausgetauscht werden. Die betroffenen Dichtewächter haben unterschiedliche Schaltpunkte und unterschiedliche Adaptionen an den SF₆-Gasraum. Daher kann es hinsichtlich der Menge an Ersatzdichtewächtern wirtschaftlicher sein, anstatt baugleicher Dichtewächter elektronische Dichtewächter einzusetzen, deren Schaltpunkte parametrierbar sind.

Montagefehler und Fehler in der Datenerhebung stehen in der Regel im Zusammenhang mit dem ausführenden Personal. Entweder werden Fehler direkt verursacht, beispielsweise durch Einbringung von Luft in den SF₆-Gasraum im Zuge der Befüllung (dies führt zu schlechten Beurteilungen für den SF₆-Volumenprozentsatz), oder es werden Fehler indirekt verursacht, da eine mögliche eingeschränkte Einsatzfähigkeit eines Werkzeugs oder Messmittels nicht erkannt wird. Grundsätzlich lassen sich diese Fehler durch die richtige Qualifizierung des Instandhaltungspersonals verringern [Sch10]. Allerdings gibt es aufgrund der Häufigkeit für das betrachtete SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv keinen unmittelbaren Handlungsbedarf.

Die Kunststoffalterung zeigt sich vereinzelt für die Isolation von Steuerleitungen und an dynamischen Dichtungen. Wegen Versprödung des Materials wurden entsprechend Substanzverluste identifiziert, die sich aber mit der Verfügbarkeit von Ersatzteilen leicht beheben lassen.

Bis zu diesem Punkt wird deutlich, dass die meisten Ursachen für Substanzverlust spezifischen Bauteilen zuzuordnen sind und daher beseitigt werden können, sofern Ersatzteile vorhanden sind. Diese Aussage gilt nicht für die hohen Wasseranteile im SF₆-Gas, da der Diffusionsvorgang²⁸ nicht vollständig unterbunden werden kann [Tie03] bzw.

²⁷ Filtermaterial wird im betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv insbesondere im SF₆-Gasraum des Leistungsschalters verwendet, um Wasserdampf und gasförmige Zersetzungsprodukte (siehe Abschnitt 2.4.4) zu binden. Dem Filtermaterial kommt eine besondere Bedeutung für die Ursachen-Gruppe Diffusion zu, die im weiteren Verlauf dieses Abschnitts aufgegriffen wird.

²⁸ Unter Diffusion wird hier der Konzentrationsausgleich von Wasser zwischen SF₆-Gas und umgebender Luft entlang einer Abdichtung verstanden.

mögliche Verbesserungen sehr umfängliche und damit wahrscheinlich unwirtschaftliche Maßnahmen erfordern. Daher muss für diesen Punkt – zumal aufgrund der Häufigkeit der zu hohen Wasseranteile im untersuchten Kollektiv deutlicher Handlungsbedarf besteht – eine andere Strategie als die Konzeptionierung einer Ersatzteilhaltung und die Verfügbarkeit von Spezialwissen, wie diese Ersatzteile einzubauen sind, verfolgt werden.

Zur Bestimmung einer wirksamen Instandhaltungsmaßnahme, die den Abnutzungsvorrat wiederherstellt, wurden versuchsweise zwei baugleiche Gasräume eines SF₆-Hochspannungsschaltfeldes mit hohen Wasseranteilen untersucht. Dazu wurde das feuchte SF₆-Gas aus Gasraum 1 als auch aus Gasraum 2 gegen sehr trockenes SF₆-Gas getauscht. Zusätzlich wurde an Gasraum 2 ein passiver Gas-Filter installiert. Das Filtermaterial besteht aus Aluminiumoxid (Al₂O₃) und wird im betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv nur bei neuen Anlagen in jedem SF₆-Gasraum verwendet. Zur Vermeidung dielektrischer Rückwirkungen muss der Filter in einem elektrostatisch feldfreiem Raum eingesetzt werden. Daher mussten zusätzliche Anbauten an den SF₆-Gasraum vorgenommen werden.

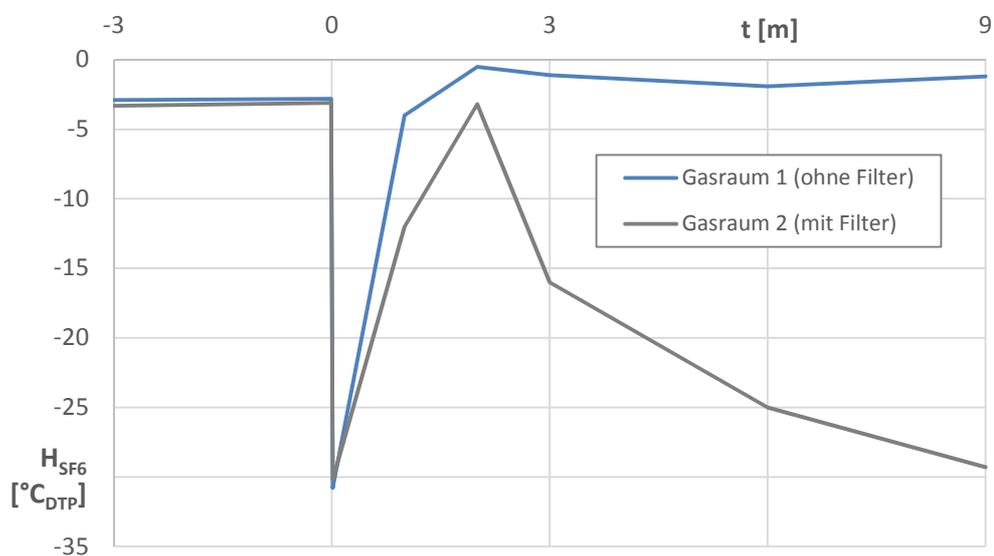


Abbildung 3-13: Verlauf des Wasseranteils im Versuchsaufbau

Abbildung 3-13 zeigt den Verlauf des Wasseranteils²⁹ H_{SF_6} im SF₆-Gas von Gasraum 1 und von Gasraum 2 über der Zeit (angegeben in Monaten). Zum Zeitpunkt $t = -3m$ wurde der Feuchtegehalt in etwa gleicher Höhe für beide Gasräume zu $H_{SF_6-1} \approx H_{SF_6-2} \approx -3^\circ C_{DTP}$ bestimmt. Dieser Wert ist als kritisch (Beurteilungsstufe 4) einzustufen, da der Grenzwert [DIN08] bereits bei $H_{SF_6} = -5^\circ C_{DTP}$ liegt. Im Monat $t = 0$ wurde der Wasseranteil H_{SF_6} sowohl vor als auch nach der Durchführung der beiden versuchsweise durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen erneut bestimmt. Beide Gasräume zeigen eine deutliche Reduzierung des Wasseranteils. Dieses Ergebnis ist erwartungsgemäß, da neues SF₆-Gas spezifikationsgemäß nur sehr geringen Feuchtegehalt hat. Die erste Kontrollmessung zum Zeitpunkt $t = 1m$ zeigt einen deutlichen Anstieg des Wasseranteils in beiden Gasräumen. Dabei fällt der Anstieg für Gasraum 1 höher aus. Dieser Trend setzt sich bis $t = 2m$ fort. Ab $t = 3m$ kann für Gasraum 2 ein fallender Trend beobachtet werden. Gasraum 1 pendelt sich aber auf einem Niveau ein, das etwa dem Niveau vor der Durchführung der Instandhaltungsmaßnahme entspricht.

Anhand des Versuchs lässt sich festhalten, dass ein einfacher Austausch des SF₆-Gases nicht zu einer nachhaltigen Senkung des Wasseranteils führt. Der Verlauf des Wasseranteils in Gasraum 1 zeigt, dass sich verhältnismäßig hohe Mengen von Wasser nicht im SF₆-Gas befinden, sondern in bzw. an Feststoffen des SF₆-Gasraums. Dies begründet sich darin, dass auch Feststoffe Wasser aufnehmen bzw. an ihrer Oberfläche anlagern können [HR73]. Des Weiteren bildet sich ein temperaturabhängiger Gleichgewichtszustand zwischen den Anteilen im SF₆-Gas und den Feststoffen aus [Wex76], so dass nur der langfristige Einsatz des Filters zu einer gesamthaften Verbesserung bezüglich des Wasseranteils sinnvoll ist.

Nachteilig am Filter-Nachrüstverfahren sind die damit verbundenen hohen Kosten. Nicht nur der Materialaufwand für Filter und Anbauten ist dabei zu berücksichtigen, sondern auch der Arbeitsaufwand hinsichtlich der Evakuier- und Füllarbeiten des SF₆-Gases sowie der damit verbundenen Freischaltungsbedarf der betroffenen SF₆-Hochspannungsschaltfelder. Daher wurde ein alternatives Verfahren entwickelt, das die Trocknung des SF₆-Gases während des Betriebes erlaubt. Der benötigte Filter wird am Füllanschluss des SF₆-Gasraumes über einen Kompressor angeschlossen. Automatisiert entnimmt ein Kompressor druckgesteuert nur so viel SF₆-Gas, dass die Überwachungs-

²⁹ Der Wasseranteil wird als Drucktaupunkt [$^\circ C_{DTP}$] angegeben und definiert diejenige Temperatur, bei der der Wasserdampf im Druckgas kondensiert und folglich flüssiges Wasser im Gasraum bildet. Je kleiner (negativer) der Drucktaupunkt ist, desto geringer ist der Wasseranteil im Druckgas.

einrichtung (Druckschalter oder Dichtewächter) nicht anspricht. Dieses Gas wird getrocknet, zwischengespeichert (z.B. in einer SF₆-Gasflasche) und anschließend zurückgeführt. Da der Kompressor nur in einer Gasflussrichtung betrieben werden kann, wird die Gasflussrichtung mit Hilfe einer Ventilschaltung umgekehrt. Abbildung 3-14 skizziert die technische Umsetzung des beschriebenen Verfahrens schematisch.

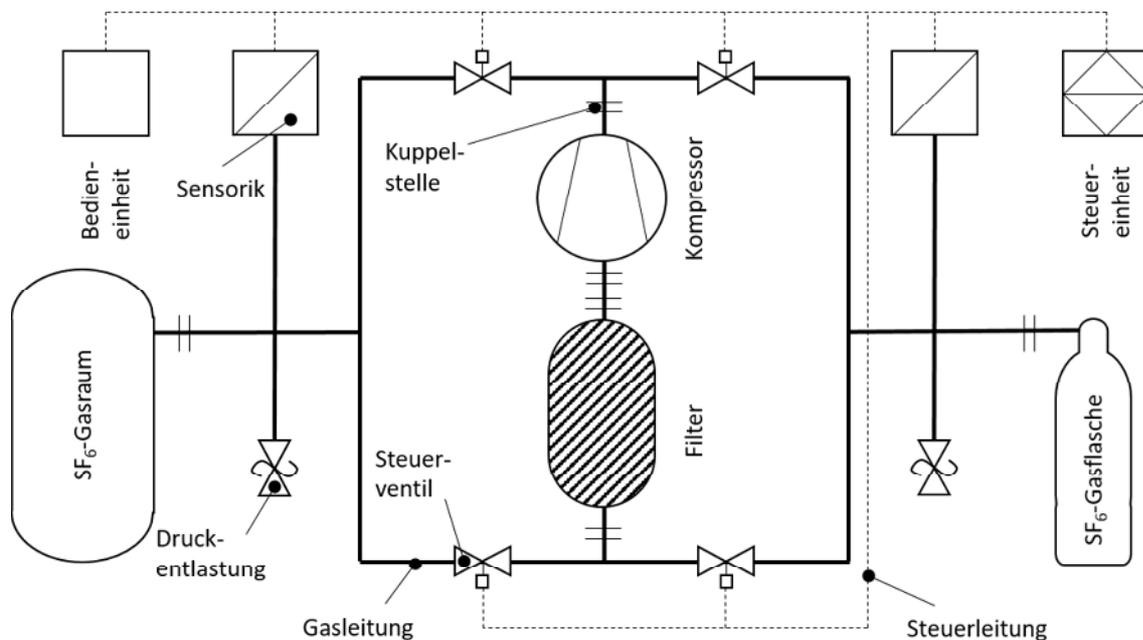


Abbildung 3-14: Schemadarstellung des aktiven Trocknungsverfahrens für SF₆-Gasräume

Der Vorgang der Gasentnahme und Gasrückführung wird nach einer Wartezeit wiederholt. Diese Wiederholung setzt sich so lange fort, bis der Wasseranteil nachhaltig gesenkt ist und damit dem SF₆-Hochspannungsschaltfeld wieder ausreichende Reserven zur Aufnahme von hineindiffundiertem Wasser zur Verfügung stehen. Dieses Verfahren stellt damit eine neue Alternative zur individuellen Nachrüstung von Filtern dar und ist patentrechtlich angemeldet [PA15].

3.3 Möglichkeiten und Grenzen des Zustandsbewertungsverfahrens

Das Zustandsbewertungsverfahren erlaubt eine realitätsgerechte Zustandsbewertung von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern auf Basis verschiedenster zustandsrelevanter Informationen und ist anwendbar auf alle Fabrikate und Schaltaufgaben. Aufgrund der funktionsorientierten Betrachtung wird das Verfahren nicht durch die eingesetzten Technologien bzw. die eingesetzten physikalischen Wirkprinzipien eingeschränkt. Folg-

lich ist das Verfahren in der Lage, auch zukünftige SF₆-Hochspannungsschaltfelder mit neuen Technologien vergleichbar zu bewerten. Dazu bedarf es keiner grundsätzlichen Anpassung des Zustandsbewertungsverfahrens, so dass die Vergleichbarkeit aller Zustandsergebnisse untereinander erhalten bleibt.

Auch neue Technologien bei den diagnostischen Methoden stellen keine Grenze für das Zustandsbewertungsverfahren dar, da alle Ergebnisse durch die universelle „Übersetzung“ in Massezahlen verarbeitet werden können. Aufgrund dieser universellen Betrachtung zustandsrelevanter Informationen können auch verschiedene diagnostische Methoden im gleichen Schaltfeldkollektiv Einsatz finden, da die konkrete Ausgestaltung der Aussagekraft die Unterschiede der Methoden differenzieren kann. Das bedeutet, dass es letztlich für das Zustandsbewertungsverfahren unerheblich ist, ob es beispielsweise Informationen einer visuellen Kontrolle oder einer Online-Messung verarbeitet. Die Einschränkungen in der Aussagekraft des Zustandsergebnisses eines Schaltfeldes oder einer Hauptfunktion entstammen daher den zugrundeliegenden diagnostischen Methoden und nicht dem Zustandsbewertungsverfahren.

Die Grenzen der diagnostischen Verfahren lassen sich im Wesentlichen über die Unsicherheit bezüglich ihrer Zustandsaussage beschreiben. Entweder resultiert eine vollständige Unsicherheit, da keine diagnostische Methode angewendet wird oder es bestehen partielle Unsicherheiten, da nicht alle Fehler detektierbar sind (Aussagetiefe) bzw. der Diagnoseaufbau fehlerbehaftet ist (systematische oder zufällige Fehler) [Paw16].

Die „Übersetzung“ eines Diagnoseergebnisses in eine Massezahl stellt eine besondere Herausforderung dar. Hierzu ist sowohl die Kenntnis über die Zustandsaussage des Diagnoseergebnisses und seiner spezifischen Aussagekraft als auch ein grundlegendes Verständnis für die Funktionsweise der Evidenztheorie erforderlich. Zur „Übersetzung“ ist zumindest einmalig Expertenwissen notwendig, das subjektiven Einflüssen unterliegen kann. Der Subjektivitätsaspekt findet sich auch in der Bestimmung der zur Aggregation der Einzelergebnisse erforderlichen Gewichtungsfaktoren wieder. Praktisch gesehen ist der Einfluss der Subjektivität für das Verfahren aber von geringer Bedeutung. Aufgrund der konstanten Eigenschaft von Massezahlen und Gewichtungsfaktoren werden die subjektiven Einflüsse im Endergebnis mit konstantem Anteil verarbeitet und wirken sich daher immer gleichartig auf das Zustandsergebnis aus. Folglich bleiben die Zustandsergebnisse vergleichbar. Um, wenn nötig, subjektive Einflüsse weiter zu minimieren, können beispielsweise Gewichtungsfaktoren über die Befragung von mehre-

ren Experten im Mittelwert bestimmt werden. Auch können alternative Messverfahren eingesetzt werden, für die umfassende Referenzgrößen zur Verfügung stehen.

Das Zustandsbewertungsverfahren ermöglicht eine individuelle Ausgestaltung für einen einzelnen Betreiber und kann beispielsweise betriebliche Restriktionen und Möglichkeiten, wie die Verfügbarkeit von Diagnoseexperten oder die Integration vorhandener Sensorik, berücksichtigen. Sofern jedes SF₆-Hochspannungsschaltfeld in einem Kollektiv durch die funktionsorientierte Betrachtung realitätsgerecht beschrieben werden kann, gibt es keine Grenzen in der Nutzbarkeit von Diagnoseverfahren sowie einen Ausschluss von Fabrikaten oder Schaltaufgaben. Eine geeignete Berücksichtigung einer betrieblichen Restriktion ist beispielsweise die Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten minimalinvasiven Diagnoseverfahren (Abschnitt 2.2), die die Rückwirkung auf den Betrieb eines SF₆-Hochspannungsschaltfelds bei der Erhebung zustandsrelevanter Informationen minimieren.

Definitionsgemäß ist der im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Zustandsindex die Aufteilung des Abnutzungsvorrats und des Substanzverlustes nach DIN EN 31051 [DIN12a] unter der Berücksichtigung von Unsicherheit und Risikoneigung. Damit stellt der Zustandsindex eine Grundlage für mittelfristige Planungen dar und ist kein unmittelbares Maß für die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Feldes. Zwar kann bei schlechtem Zustandsindex davon ausgegangen werden, dass tendenziell bereits mehrere Teilfunktionen geschwächt sind, aber ein gutes Zustandsergebnis muss nicht zwingend bedeuten, dass das Schaltfeld kurzfristig nicht ausfallen kann. Folglich besteht kein direkter Zusammenhang zwischen Zustand und Ausfallwahrscheinlichkeit.

Beispielsweise kann ein Kurzschluss in der Auslöserspule, wie er in Abschnitt 2.1.3 beschrieben ist, kurzfristig zu einem Versagen der Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ führen. Sofern keine anderen geschwächten Funktionen ermittelt worden sind, wird sich der Zustandsindex in einem relativ hohen Bereich befinden, da der ermittelte Substanzverlust des Auslösers nur zu etwa 1%³⁰ im Zustandsergebnis der Hauptfunktion berücksichtigt wird. Das Ausfallrisiko ist also hoch, obwohl der Zustandsindex sich gegenüber einem vollständig intakten Feld kaum verändert. Daher orientiert sich der gegebenenfalls entstehende Instandhaltungsbe-

³⁰ Angenommen ist hier die Detektion eines Teilkurzschlusses in einer Auslöserspule mit Hilfe des Prüfkriteriums „dynamischer Spulenstrom“, dessen Bewertung entsprechend Anhang 7.3 mit einem Gewichtungsfaktor von 0,0993 in das Ergebnis der Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ eingeht.

darf bzw. deren Dringlichkeit nicht am Zustandsindex, sondern anhand der Detailergebnisse (siehe dazu nochmal Abbildung 3-6, Seite 79).

Aufgrund der Zuordnung der Handlungsempfehlungen „beobachten“, „reparieren“ und „austauschen“ in den Detailergebnissen der Zustandsbewertung lassen sich grundsätzliche Richtungen für den Instandhaltungsbedarf formulieren. Da die Detailausprägung dieser Maßnahmen aber stark von vorhanden Ersatzteilen, der Verfügbarkeit qualifizierten Instandhaltungspersonals und der Handlungsdringlichkeit abhängt, kann das Zustandsbewertungsverfahren den Betriebsmittelexperten in der Detailplanung einer Instandsetzung unterstützen, aber nicht ersetzen.

Der funktionsorientierte Aufbau des Zustandsbewertungsverfahrens macht eine Anwendung des Verfahrens auf Schaltfelder aller Spannungsebenen, aber auch aller Bauformen im Sinne von freiluftisolierten oder hybriden³¹ Schaltfeldern möglich, da die funktionalen Anforderungen denen der im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen SF₆-Hochspannungsschaltfelder entsprechen. Gegebenenfalls werden Anpassungen bei den Gewichtungsfaktoren bzw. bei den eingesetzten Messverfahren nötig, da beispielsweise die geringeren Neubaukosten einer Mittelspannungsschaltanlage im Vergleich zu einer Hochspannungsschaltanlage einen nicht so hohen Aufwand zur Beschaffung zustandsrelevanter Informationen erlauben [BJZ12; BJZ15].

Teile des Verfahrens können auf andere Betriebsmittel direkt angewendet werden, sofern gleiche Hauptfunktionen definiert werden können. Beispielsweise ist eine gasisolierte Leitung mit vorliegendem Verfahren ebenso bewertbar wie ein SF₆-Hochspannungsschaltfeld, da die gasisolierte Leitung mit den Hauptfunktionen „Spannung halten“ und „Strom führen“ bewertet werden kann.

Eine einfache Übertragbarkeit auf andere Assetsegmente, wie beispielsweise Transformatoren oder Geräte der Schutz- und Leittechnik ist mit dem hier vorgestellten Verfahren nicht möglich, da diese andere Hauptfunktionen für den Netzbetrieb erfüllen müssen. Unabhängig davon können die in dieser Arbeit entwickelten Mechanismen und Betrachtungsperspektiven als Leitfaden für die Entwicklung weiterer Zustandsbewertungsverfahren genutzt werden. Entsprechend können dann auch andere Assetsegmente mit dem Assetsegment der SF₆-Hochspannungsschaltfelder verglichen werden.

³¹ In hybriden Hochspannungsschaltfeldern kommen Komponenten zum Einsatz, die sowohl SF₆-gasisoliert als auch luftisoliert sind. Beispielsweise kann ein Hochspannungsschaltfeld als SF₆-Hochspannungsschaltfeld ausgeführt sein, die Sammelschiene aber in luftisolierter Technik betrieben werden.

4 Verwendung der Zustandsergebnisse

4.1 Assetmanagement

4.1.1 Zustandsorientierte Erneuerungsstrategie

Das Assetmanagement eines Verteilnetzbetreibers nimmt verschiedene planerische Aufgaben im Zusammenhang mit den Komponenten des Versorgungsnetzes wahr. Dazu zählen insbesondere strategische Tätigkeiten, wie die Erneuerungsplanung von Schaltanlagen bzw. Schaltfeldern und die Entwicklung der Instandhaltungsstrategie. Der Instandhaltungsnorm DIN 31051 [DIN12a] folgend ist die Erneuerung Teil der Instandhaltung. Da aber mit der Erneuerung von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern hohe Kosten verbunden sind, wird die Erneuerungsstrategie im Rahmen dieser Arbeit getrennt von der verbleibenden Instandhaltung betrachtet.

Wie in der Einleitung dieser Arbeit bereits gezeigt wurde, muss das Assetmanagement zwischen den konkurrierenden Zielen der Versorgungssicherheit und der minimalen Kosten agieren. Beeinflussende Faktoren sind dabei nicht nur der technische Zustand, der das zentrale Element der vorliegenden Arbeit ist, sondern auch weitere, nicht-technische Bedingungen, wie beispielsweise gesetzliche Vorgaben und strukturelle Veränderungen innerhalb von betrachteten Versorgungsgebieten [PwC07], sowie Restriktionen für Freischaltungen oder technische Einschränkungen bei der Erneuerung einzelner Schaltfelder. Um den Nutzen der Zustandsbewertung trotz der Menge an verschiedenen Einflussfaktoren zu untersuchen, wird nachfolgend davon ausgegangen, dass sich das Netz, in dem sich das betrachtete SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv aus Abschnitt 3.2.1 befindet, topologisch nicht verändert und dass der gesetzliche Rahmen, wie er einleitend in Abschnitt 1.1 beschrieben ist, konstant bleibt. Folglich wird angenommen, dass allein der Zustand das bestimmende Kriterium für eine Erneuerungsentscheidung ist.

Im Allgemeinen zeigen die Zustandsergebnisse nach Abschnitt 3.2.3 im betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv dem Assetmanagement die Möglichkeit auf, eine zeitbasierte durch eine zustandsorientierte Erneuerungsplanung zu ersetzen. Dies kann zum einen für einen längeren Betrieb der Schaltfelder und zum anderen für einen konstanten Investitionsfluss zur konsequenten Verjüngung des SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektivs verwendet werden. Um dieses Potenzial greifbar zu machen, wird

zunächst davon ausgegangen, dass die maximale Betriebsdauer von SF₆-Hochspannungsfeldern 50 Jahre beträgt. Entsprechend der Zustandsergebnisse sind längere Betriebszeiten für die gut bewerteten Schaltfelder zu erwarten, so dass sich der Erneuerungsaufwand entsprechend Abbildung 4-1 von fünf auf elf Jahre strecken und somit die jährlichen Belastungen auf ein etwa gleichmäßiges Niveau verteilen lässt.

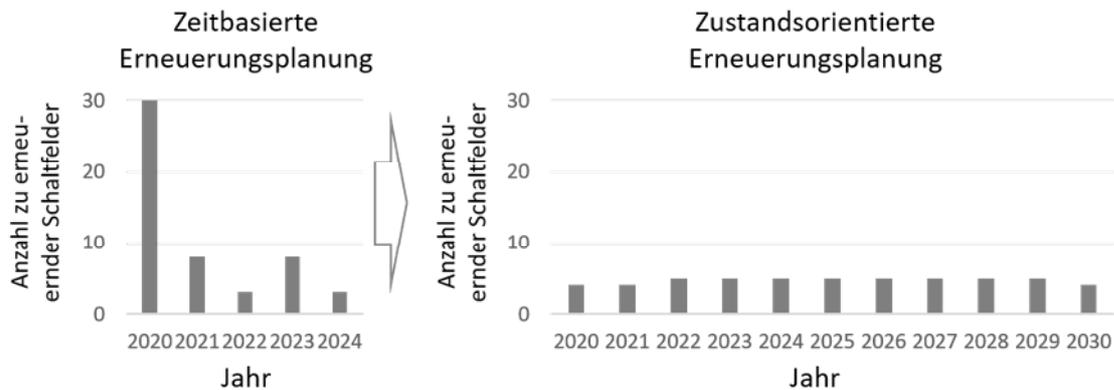


Abbildung 4-1: Beispielhaftes Szenario einer zustandsorientierten Erneuerungsplanung

Die beiden Erneuerungsplanungen aus Abbildung 4-1 lassen sich mit Hilfe des Diskontierungsansatzes (auch bekannt als Barwertmethode) vergleichen [Hee16]. Der Diskontierungsansatz ermöglicht den Anfangswert K_0 einer Investition nach Formel (4-1) zu ermitteln, sofern der Endwert K_n zum Zeitpunkt n der Investition und der Zinssatz i , zu dem das eingesetzte Kapital verzinst wird, bekannt sind.

$$K_0 = K_n \cdot \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (4-1)$$

Für die an dieser Stelle betrachteten Erneuerungsszenarien sei angenommen, dass K_n konstant ist und 500.000€³² pro SF₆-Hochspannungsschaltfeld beträgt. Weiterhin sei ein Zinssatz³³ i von 7,39% angenommen. Der Einfluss der Inflation wird nicht berücksichtigt. Der Startpunkt der Diskontierung $n = 0$ wird auf das Jahr 2020 gesetzt. Folglich

³² Angenommen sind Kosten für ein neues SF₆-Hochspannungsschaltfeld von rund 300.000€ sowie die Erneuerung der Schutztechnik, der Rückbau des alten Schaltfeldes inklusive der Entsorgung, Anpassungsarbeiten im Gebäude der Schaltanlage und Personalkosten, die im Zusammenhang mit der Planung, Montage und Inbetriebnahme entstehen, zu rund 200.000€.

³³ Verwendet wurde hier der sogenannte Eigenkapitalzinssatz, den die Bundesnetzagentur nach §29 Abs. 1 Energiewirtschaftsgesetz [EnWG05] festlegt und der im Beschluss BK4-11-304 [BK11] veröffentlicht wurde.

wird beispielsweise eine Investition im Jahr 2024 mit $n = 4$ im Diskontierungsansatz berücksichtigt. Tabelle 4-1 beinhaltet die diskontierten Zahlungsströme der beiden betrachteten Erneuerungsplanungen nach Abbildung 4-1 und Formel (4-1).

Tabelle 4-1: Investitionsvergleich der beiden betrachteten Erneuerungsplanungen

Bekannte Größen:		$K_n = 500.000 \text{ €}$		$i = 7,39\%$		
Jahr	Diskontierungszeitpunkt n	Diskontierungsfaktor $1/(1+i)^n$	Zeitbasierte Erneuerung		Zustandsorientierte Erneuerung	
			Anzahl der Felder	Anfangswert K_0	Anzahl der Felder	Anfangswert K_0
2020	0	1,00	30	15.000.000 €	4	2.000.000 €
2021	1	0,93	8	3.724.742 €	4	1.862.371 €
2022	2	0,87	3	1.300.659 €	5	2.167.766 €
2023	3	0,81	8	3.229.747 €	5	2.018.592 €
2024	4	0,75	3	1.127.810 €	5	1.879.683 €
2025	5	0,70	0	- €	5	1.750.333 €
2026	6	0,65	0	- €	5	1.629.885 €
2027	7	0,61	0	- €	5	1.517.725 €
2028	8	0,57	0	- €	5	1.413.283 €
2029	9	0,53	0	- €	5	1.316.029 €
2030	10	0,49	0	- €	4	980.374 €
SUMMEN			52	24.382.958 €	52	18.536.041 €

Tabelle 4-1 zeigt eindrucksvoll, dass die Zustandsbewertung einen finanziellen Vorteil von etwa 25% bezogen auf das Jahr 2020 ergibt. Trotz der umfänglichen Annahmen im voran gegangenen Beispiel kann festgehalten werden, dass die Zustandsbewertung erhebliche Einsparpotenziale für die Erneuerung ermöglichen kann. Damit stellt die Investition in Informationen über ein zu erneuerndes SF₆-Hochspannungsschaltfeld eine aussagekräftige Grundlage zur Optimierung der Erneuerungsplanung dar und ist daher dringend dem Assetmanagement zu empfehlen. Weiterhin ist zu bemerken, dass durch die Verstetigung der jährlichen Investitionsausgaben innerbetriebliche Prozesse optimiert werden, da auch der Planungsaufwand vergleichmäßigt wird und daher die einzelnen Erneuerungsmaßnahmen vom vorhandenen Personal sequentiell unter konstanter Auslastung abgearbeitet werden können.

4.1.2 Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie

Entsprechend der Instandhaltungsnorm DIN 31051 [DIN12a] ist die Beurteilung des Istzustandes unter der Begrifflichkeit der Inspektion bekannt. Damit ist der in dieser

Arbeit beschriebene Ansatz einer Zustandsbewertung mit minimalinvasiver Messtechnik diesem Begriff zuzuordnen. Daher sind auch andere Tätigkeiten, die im Zusammenhang mit der Beurteilung des Istzustandes stehen, wie zum Beispiel die Sicht- und Funktionskontrolle oder die Inbetriebnahmeprüfung, auch als Inspektion zu verstehen. Wie bisher an verschiedenen Stellen dieser Arbeit ausgeführt (vgl. u.a. Abschnitte 1.1, 2.2.2, 2.4), ist die Aussagekraft der Zustandsbewertung abhängig von der Aussagekraft (Unsicherheit) der verwendeten diagnostischen Verfahren, mit denen die einzelnen zustandsrelevanten Prüfkriterien beurteilt werden. Folglich muss die Instandhaltungsstrategie festlegen, zu welchem Zeitpunkt welche Tätigkeiten im Zuge der Inspektion ausgeführt werden sollen.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Gesamtsystematik ist es einfach möglich, die Aussagekraft einer Schaltfeldbewertung auf Basis unterschiedlicher Informationen zu bestimmen. Abbildung 4-2 zeigt dazu einen Vergleich zwischen einer kombinierten Sicht- und Funktionskontrolle, dem aus Abschnitt 2.2.3 resultierenden minimalinvasiven Ansatz sowie der sogenannten Inbetriebnahmeprüfung [Kyn08]. Die Differenzierungskriterien umfassen dabei die visuelle Darstellung des Zustandsergebnisses (analog der Darstellung nach Abbildung 2-21), den aus der Art der Inspektion resultierenden verfügbaren Datenumfang, den Aufwand für den Einsatz von Messmitteln, die Ausführungsdauer und die Auswirkung auf den Betrieb der SF₆-Hochspannungsschaltfelder. Als Basis dieses Vergleichs dient ein fiktives, neuwertiges Schaltfeld, bei dem alle Prüfkriterien mit der Beurteilungsstufe „1“ bewertet worden sind.

In Abbildung 4-2 ist zu erkennen, dass die Bewertungsdaten, die aus der Sicht- und Funktionskontrolle resultieren, nur eine geringe Aussagekraft, d.h. eine hohe Unsicherheit, aufweisen. Die größte Aussagekraft wird während der Inbetriebnahme erreicht. Nachteilig wirkt sich hier allerdings der enorme Messmittelaufwand zur Datenerhebung sowie die Ausführungsdauer aus, da für eine (Wiederholung der) Inbetriebnahmeprüfung sehr umfangreiche Messungen durchgeführt werden. Folglich stellt die Nutzung minimalinvasiver Messtechnik einen geeigneten Kompromiss dar, da diese mit verhältnismäßig geringem Aufwand (Messmittelaufwand und Ausführungsdauer) und mit nur geringer betrieblicher Rückwirkung eine hohe Aussagekraft aufweist.

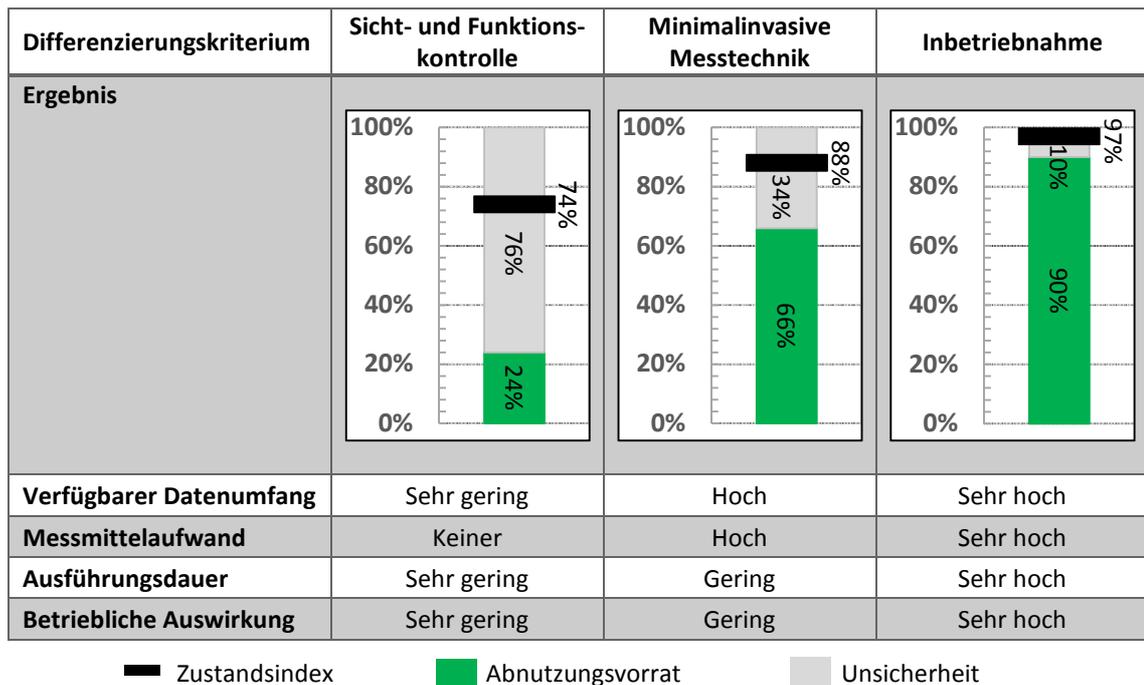


Abbildung 4-2: Vergleich von Zustandsaussagen aus verschiedenen Datengrundlagen

Neben der Festlegung der Inhalte muss auch die Häufigkeit der unterschiedlichen Maßnahmen in der Instandhaltungsstrategie berücksichtigt werden. Im betrachteten SF₆-Hochspannungsschaltfeldkollektiv ist eine zyklische Durchführung der Inspektion bisher üblich. Allerdings kann mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Zustandsbewertungsverfahrens auch der zeitliche Aspekt, also der Zeitpunkt, an dem eine Inspektion ausgeführt werden sollte, zustandsorientiert geplant werden. Dazu kann der Mechanismus zur Berücksichtigung des Hinweisalters (siehe Abschnitt 2.3.3) genutzt werden. Dieser Mechanismus sorgt dafür, dass das Zustandsergebnis umso unsicherer wird, desto älter der Hinweis ist. Zusätzlich wird festgelegt, dass die Erhöhung der Unsicherheit nur zur Verkleinerung des angezeigten Abnutzungsvorrates führt und der Substanzverlust als konstant angenommen wird (siehe Abschnitt 2.3.3). Folglich wird der Ausführungsbeginn der Inspektionstätigkeit von der Höhe der Unsicherheit und nicht zyklisch bestimmt. Somit wird der Zustand Grundlage aller Instandhaltungstätigkeiten.

Abbildung 4-3 visualisiert beispielhaft den im vorherigem Absatz erläuterten Änderungsverlauf eines Zustandsergebnisses über der Zeit durch die Anwendung des Mechanismus der Hinweiserterung. Im Detail zeigt die Darstellung ein mögliches Zustandsergebnis, das vor $t = -8$ Jahren ermittelt wurde. Mit der Zeit vergrößert sich die Unsicherheit zu Ungunsten des Abnutzungsvorrats. Der Substanzverlust bleibt konstant, da Selbstheilungseffekte ausgeschlossen werden. Zum Zeitpunkt $t = heute$ erreicht die

Unsicherheit einen Schwellwert, der zu einer erneuten Ausführung der Zustandsbewertung in $t = 2$ Jahren führt. Das Beispiel verdeutlicht, dass selbst die Zustandsbewertung zustandsorientiert geplant werden kann.

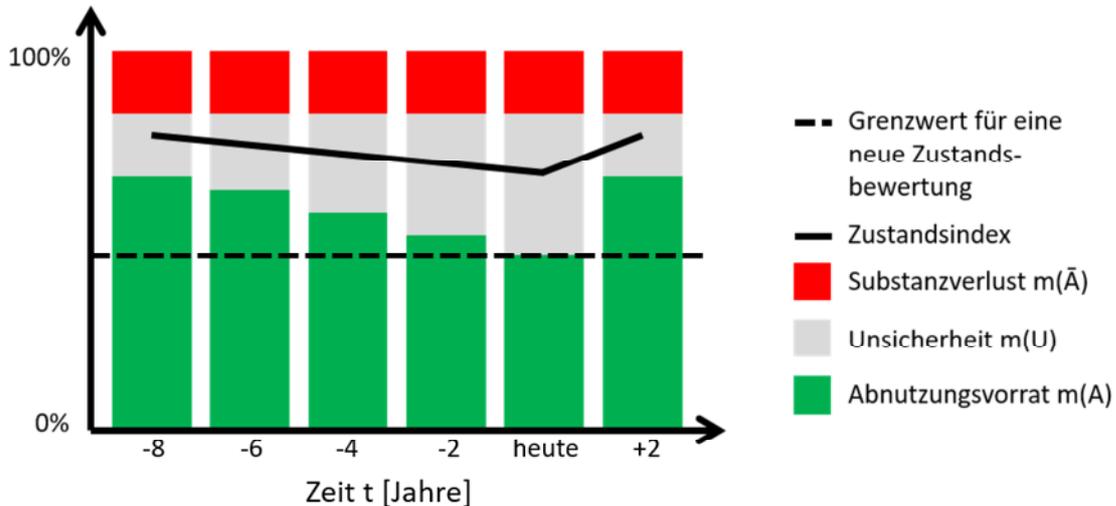


Abbildung 4-3: Beispielhafter Änderungsverlauf eines Zustandsbewertungsergebnisses durch Datenalterung

4.1.3 Operationalisierung von Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategie

Neben strategischen Aufgaben verantwortet das Assetmanagement auch die operative Umsetzung der einzelnen Assetstrategien. Diese Umsetzung erfolgt in der Regel unter Berücksichtigung von Budgetrestriktionen [BS11]. Folglich ist es nötig, Priorisierungen für Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen treffen zu können. Eine einfache Möglichkeit der Priorisierung kann beispielsweise durch eine Auswertung der Zustandsergebnisse erfolgen, die nach identifizierten Zustandsindex oder Substanzverlust sortiert wird. Die höchste Priorität für eine auszuführende Maßnahme bekommt dann dasjenige SF₆-Hochspannungsschaltfeld, das den schlechtesten Zustand bzw. den höchsten Substanzverlust aufweist. Dieser Vorgang wird so lange ausgeführt, bis die verfügbaren finanziellen Mittel aufgebraucht sind. Als Beispiel dazu dient Abbildung 4-4 als Auszug aus den Ergebnissen nach Abschnitt 3.2.3 (Felder mit unsicherer Bewertung sind nicht berücksichtigt). Zu sehen ist, dass die Reihenfolge je nach Sortierkriterium (Zustand bzw. Substanzverlust) unterschiedlich ist und dem Assetmanagement damit unterschiedliche Priorisierungsansätze für Erneuerungen und Instandsetzungen zur Verfügung stehen. Alternativ kann die Liste anhand der erreichten Unsicherheiten der Zustandsergeb-

nisse sortiert werden. Damit kann ein priorisierter Arbeitsvorrat für die Zustandsbewertung abgeleitet werden.

Priorität	Feld	Zustandsindex	Priorität	Feld	Substanzverlust
1	50	82%	1	13	10%
1	52	82%	2	44	7%
1	13	82%	3	50	6%
2	49	84%	3	52	6%
2	51	84%	3	41	6%
2	44	84%	3	39	6%
2	41	84%	4	36	5%
3	36	85%	5	49	4%
3	39	85%	5	51	4%
4	2	86%	5	42	4%
...

Abbildung 4-4: Sortierte Listen nach Zustandsindex (links) und Substanzverlust (rechts)

Komplexere Verfahren zur Ermittlung von Prioritäten berücksichtigen neben dem Zustand auch netztopologische Kriterien, wie zum Beispiel die Einwohnerzahl, die potenzielle Dauer einer Versorgungsunterbrechung und mögliche Folgekosten. Ein häufig gewählter Ansatz ist RCM³⁴ [BS11; Sch10; Mou97]. RCM ist ein zuverlässigkeitsorientierter Instandhaltungsansatz und verbindet technische mit nicht-technischen (z.B. Sicherheit, Umwelt und Folgekosten) Entscheidungskriterien und hilft damit zusätzliche Differenzierungsmöglichkeiten zwischen einzelnen SF₆-Hochspannungsschaltfeldern herauszuarbeiten. Da aber der technische Zustand ein grundlegendes Entscheidungskriterium darstellt, ist es notwendig, ein aussagekräftiges und realitätsgerechtes Zustandsbewertungsverfahren einzusetzen – unabhängig davon, wie die Zustandsinformation weiterverarbeitet wird.

4.2 Assetservice

Der Assetservice verantwortet den sicheren und zuverlässigen Betrieb des elektrischen Versorgungsnetzes und sorgt damit für die Funktionsfähigkeit der einzelnen Betriebsmittel. Bei eingeschränkter Funktionsfähigkeit muss der Assetservice in Abstimmung mit dem Assetmanagement Maßnahmen ergreifen, die schnell und kostengünstig die sichere Funktionsfähigkeit wiederherstellen.

³⁴ RCM - Reliability Centered Maintenance (zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung)

Aufgrund der Vielfältigkeit der Maßnahmen, die aus den verschiedenen Fabrikaten der SF₆-Hochspannungsschaltfelder und den äußeren Rahmenbedingungen resultieren (z.B. Freischaltmöglichkeiten und Ersatzteilverfügbarkeit), soll der Mehrwert eines strukturierten, typunabhängigen Zustandsbewertungsverfahrens an einem Beispiel erläutert werden.

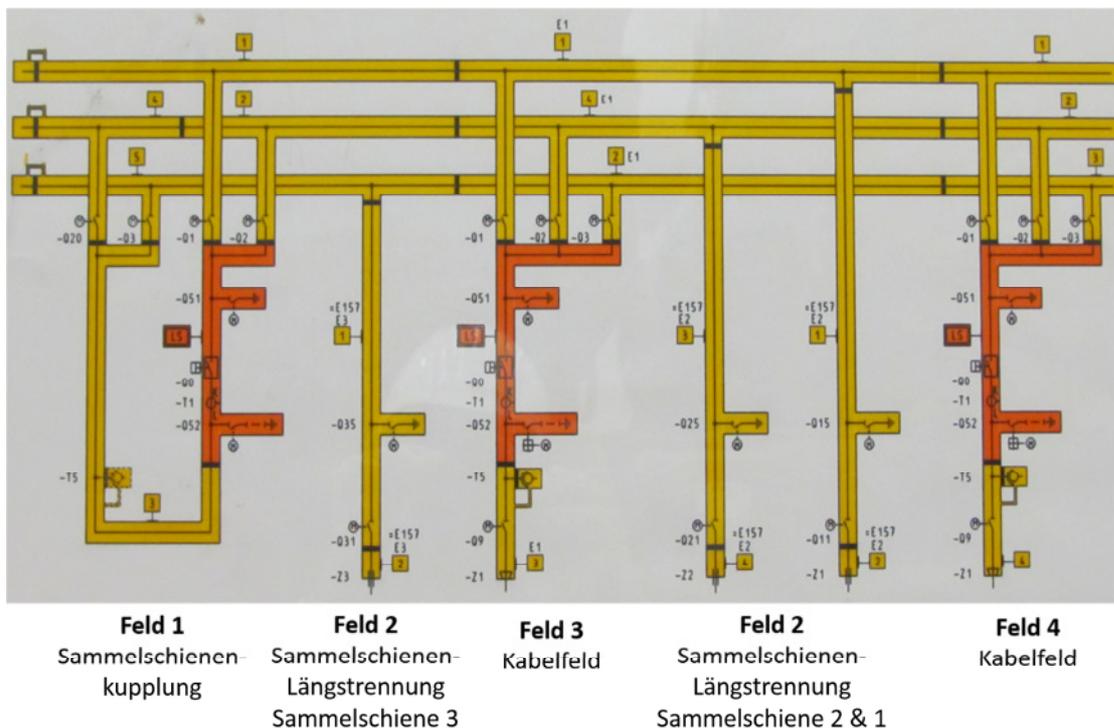


Abbildung 4-5: Schaltanlage mit vier SF₆-Hochspannungsschaltfeldern

Die SF₆-Gasräume einer SF₆-Hochspannungsschaltanlage mit vier Schaltfeldern sollen entsprechend des Instandhaltungsplans einer Sicht und Funktionskontrolle unterzogen und gereinigt werden. Von der Reinigung sind 25 Gasräume betroffen. Die Reinigungsarbeiten umfassen je Gasraum das Abpumpen des SF₆-Gases, die Herstellung des Druckausgleichs durch Belüften, das Öffnen, Reinigen und Wiederverschließen sowie die Evakuierung der Luft und das Wiederbefüllen mit SF₆-Gas auf Nenndruck. Für diese Reinigungsarbeiten werden in Summe zwölf Arbeitstage mit zwei Mitarbeitern kalkuliert.

Abbildung 4-5 zeigt den Aufbau der SF₆-Hochspannungsschaltanlage, deren Gasräume gereinigt werden sollen. Die Darstellung kombiniert die klassische einpolige Darstellung (Singleline) mit der Darstellung der einzelnen Gasräume. Gasräume

mit ausschließlich isolierender Funktion werden gelb, Gasräume mit Isolier- und Löschfunktion (Leistungsschaltergasraum) orange dargestellt. Für die Trennung der einzelnen Gasräume voneinander werden sogenannte Schotts verwendet, die in der Darstellung als dicke schwarze Linien zwischen den einzelnen Gasraumabschnitten eingezeichnet sind. Da die Anlage dreipolig gekapselt ist, kann die Anzahl der zu reinigenden Gasräume direkt aus der Abbildung abgelesen werden. Die Betriebsmittel, die sich innerhalb der Gasräume befinden, werden hier nicht weiter erläutert, da sie für die hier beispielhafte Mehrwertbetrachtung nicht notwendig sind. Die Schaltanlage ist mit drei Sammelschienen ausgestattet und besteht neben zwei Kabelfeldern (Feld 3 und Feld 4) aus einer Sammelschienenkupplung (Feld 1) und einer Sammelschienenlängstrennung (Feld 2), die den gasisolierten Teil der gesamten Schaltanlage mit einem luftisolierten Schaltanlagenteil verbindet.

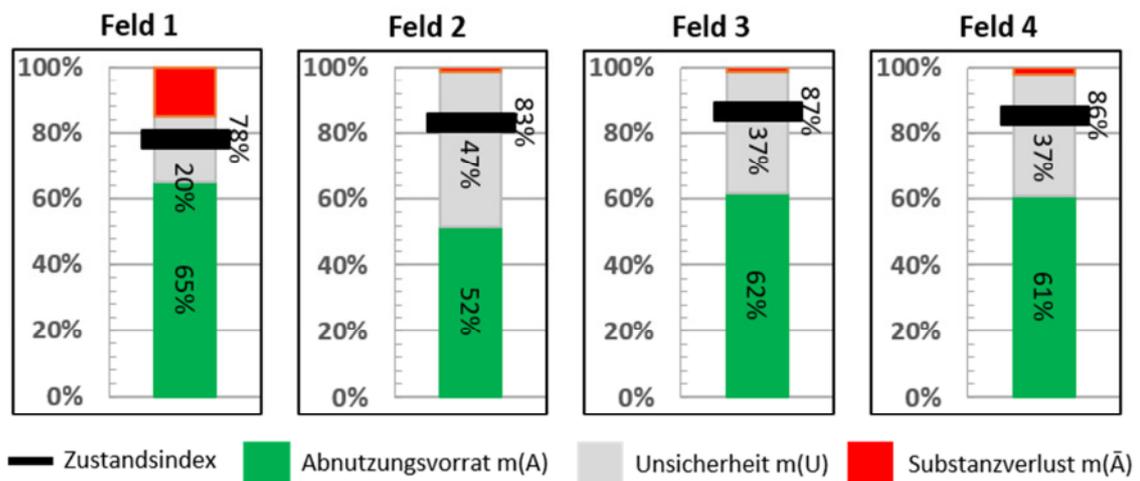


Abbildung 4-6: Zustandsergebnisse der vier betrachteten Schaltfelder

Vor der Ausführung der Reinigungsarbeiten wurde eine Zustandsbewertung der SF₆-Hochspannungsschaltfelder durchgeführt, deren Ergebnisse auf Schaltfeldebene in Abbildung 4-6 dargestellt sind. Hier wird deutlich, dass alle Schaltfelder einen hohen Zustandsindex im Bereich von $z = 78\%$ bis $z = 87\%$ aufweisen. Auffällig ist, dass Feld 1 einen vergleichsweise hohen Substanzverlust von $m(\bar{A}) = 15\%$ aufweist. Daher ist eine detaillierte Betrachtung der Zustandsergebnisse von Feld 1 notwendig.

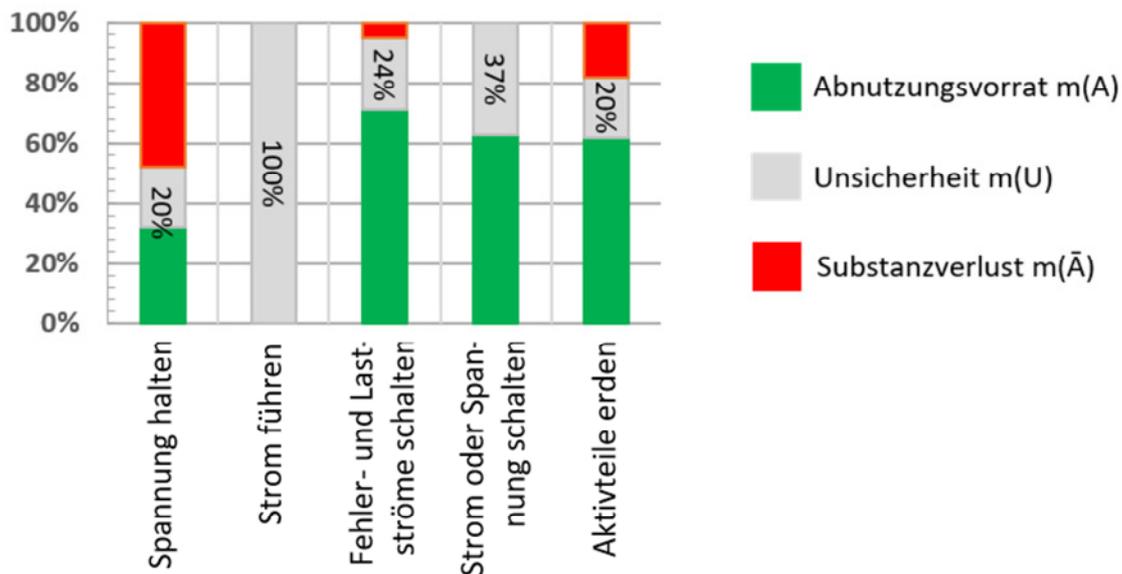


Abbildung 4-7: Zustandsergebnisse der Hauptfunktionen von Feld 1

Die detaillierten Zustandsergebnisse für Feld 1 zeigt Abbildung 4-7. Es ist direkt zu erkennen, dass die Hauptfunktion „Spannung halten“ einen erheblichen Beitrag zum gesamten Substanzverlust liefert. Die Auswertung der einzelnen Prüfkriterien (Abbildung 4-8) ergibt, dass eine kritische Teilentladungsaktivität vorliegt.

Prüfkriterium	1. unauffällig	2. beobachten	3. reparieren	4. austauschen	5. nicht ermittelt	6. nicht vorhanden
Hauptfunktion: Spannung halten						
...						
Volumenprozentsatz	■					
Anteil H ₂ O		■				
Anteil SO ₂	■					
Teilentladungsaktivität				■		
Schaltpunkte Dichtewächter	■					
...						

Abbildung 4-8: Auszug von Prüfkriterien der Hauptfunktion „Spannung halten“ (Feld 1)

Abbildung 4-9 zeigt auf der linken Seite das akustische Teilentladungsmuster, das zur kritischen Bewertung der Teilentladungsaktivität geführt hat. Das Teilentla-

dungsmuster auf der rechten Seite in Abbildung 4-9 zeigt zum direkten Vergleich ein als unauffällig eingestuftes Teilentladungsverhalten. Anhand der Arbeiten von [Paw16] können dem kritischen Teilentladungsmuster staubförmige Verunreinigungen auf Erdpotenzial zugeordnet werden. Folglich kann der Assetservice entscheiden, dass nur der verunreinigte Gasraum gereinigt werden muss und alle weiteren Gasräume keinen Reinigungsbedarf haben. Da diese Teilentladungsauffälligkeit nur bei einem der 25 Gasräume besteht, können die Reinigungsarbeiten von 24 auf zwei Arbeitstage reduziert werden.

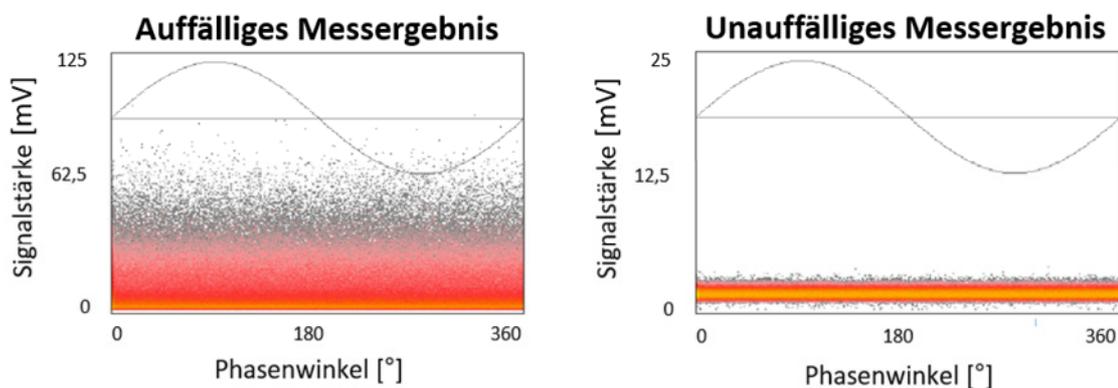


Abbildung 4-9: Teilentladungsauffälligkeit in Feld 1 (links) und unauffälliges Messergebnis (rechts) als Referenz für einen teilentladungsfreien Gasraum

Das Beispiel zeigt, dass die strukturierte Zustandsbewertung auch nutzbringend für eine bedarfsgerechte inhaltliche Planung von Instandhaltungsarbeiten verwendet werden kann. Folglich entsteht durch die Zustandsbewertung eine zusätzliche Planungssicherheit und erlaubt eine dem Zweck der Sicherstellung der Funktionssicherheit bedarfsgerechte Aufwendung von Instandhaltungsressourcen.

4.3 Aufwandsbetrachtung

Den durch das Zustandsbewertungsverfahren gewonnenen Vorteilen für Assetmanagement und Assetservice steht der Mehraufwand, der durch den Einsatz minimalerinvasiver Messtechnik im Vergleich zu Sicht- und Funktionskontrollen entsteht, gegenüber (vgl. Abschnitt 4.1.2, Abbildung 4-2). Neben den hier nicht weiter betrachteten Beschaffungskosten für die minimalinvasive Messtechnik müssen die zusätzlichen Aufwendungen für die Ausführung der Zustandsbewertung und auch der Aufwand zur Qualifizierung des Personals berücksichtigt werden.

4.3.1 Leistungsinhalt und Dauer der minimalinvasiven Zustandsbewertung

Die Ausführungsdauer ist abhängig vom zu erbringenden Leistungsinhalt. Auf Basis der Erfahrungen mit den durchgeführten Zustandsbewertungen, deren Ergebnisse in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt sind, wird nachfolgend aufgelisteter Leistungsinhalt als Standard für die minimalinvasive Zustandsbewertung empfohlen:

- Hauptfunktion „Spannung halten“
 - Sichtkontrolle
 - Funktionskontrolle (Dichtewächter / Druckschalter)
 - SF₆-Gasanalyse
 - Akustische Teilentladungsdiagnose bei Betriebsspannung

- Hauptfunktion „Strom führen“
 - Wird standardmäßig nicht durchgeführt, da die meisten Felder eine geringe Strombelastung haben und daher die thermischen Messungen wenig Aussagekraft haben [Paw16].

- Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“
 - Sichtkontrolle
 - Funktionskontrolle (Leistungsschalter, Warn- und Störmeldungen, Ein- und Ausschaltverriegelungen)
 - Mindestbetätigungsspannung
 - Motorstrom-Zeitmessung des Spannmotors / des Hydraulikmotors
 - Auslöserstrom-Zeit-Messung
 - Antriebsweg-Zeit-Messung
 - Widerstand-Zeit-Messung der Hauptstrombahn
 - Schaltzeitenmessung

- Hauptfunktionen „Strom oder Spannung schalten“, „Aktivteile erden“ und „Kabel entladen“
 - Sichtkontrolle
 - Funktionskontrolle
 - Motorstrom-Zeitmessung des elektrischen Antriebmotors

- Hauptfunktion „Überspannung abbauen“, „Netzanschluss herstellen“, „Spannung messen“ und „Strom messen“
 - Sichtkontrolle

Die Liste beinhaltet neben den klassischen Sicht- und Funktionskontrollen diejenigen Diagnoseverfahren nach Abschnitt 2.2.3, die unabhängig vom Fabrikat an jedem SF₆-Hochspannungsschaltfeld im betrachteten Kollektiv nach Abschnitt 3.2.1 anwendbar sind. Die Hauptfunktion „Strom führen“ ist als optional gekennzeichnet, da die Spannungsfallmessung einen nicht immer gegebenen Zugang zum inneren Kontaktsystem des SF₆-Hochspannungsschaltfeldes benötigt und eine aussagekräftige Anwendung thermischer Verfahren (Thermografie und RFID-Thermoobservation) vom Betriebsstrom abhängig ist (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Insbesondere Tätigkeiten zur Bewertung der Hauptfunktion „Spannung halten“ haben in Abhängigkeit der Anzahl der Gasräume stark unterschiedliche Ausführungsdauern. Daher muss je nach Anzahl der Gasräume der Arbeitsablauf angepasst werden. Abbildung 4-10 stellt die Ablaufplanung für ein einzelnes Schaltfeld dar, die für die Zustandsbewertung der Schaltanlage mit insgesamt vier Feldern nach dem Beispiel in Abschnitt 4.1.2, Abbildung 4-5 erstellt wurde.

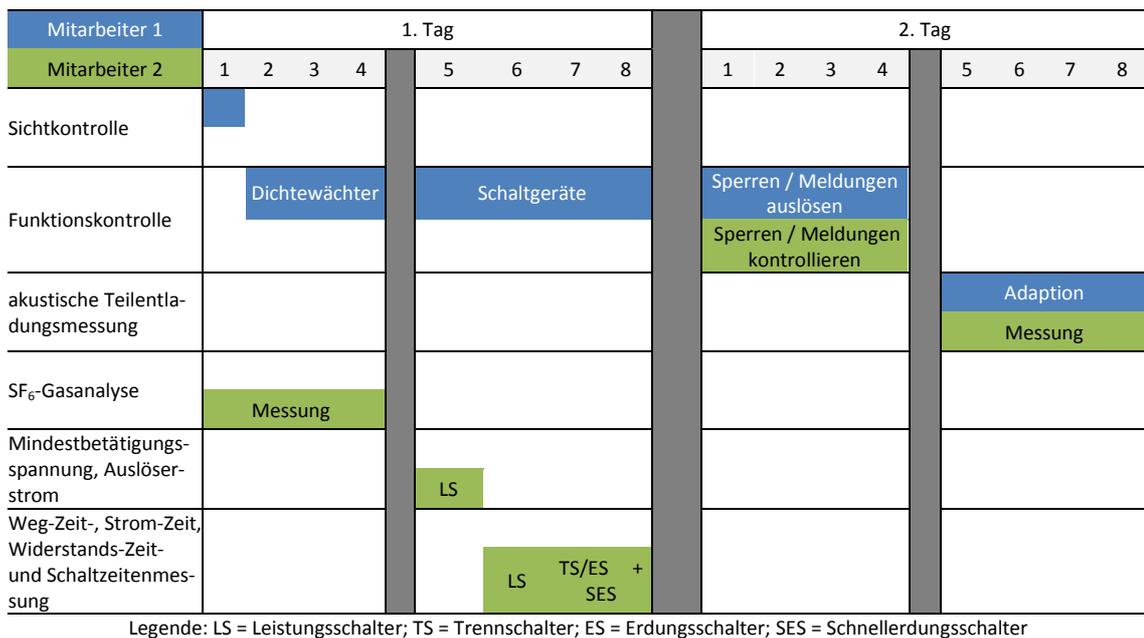


Abbildung 4-10: Beispiel eines Arbeitsablaufes der minimalinvasiven Zustandsbewertung an einem einzelnen Schaltfeld in Stunden

Abbildung 4-10 visualisiert den Arbeitsablauf einer minimalen Zustandsbewertung mit zwei Mitarbeitern über zwei Arbeitstage mit jeweils acht Stunden. Die linksseitig gelisteten Tätigkeiten werden entweder durch einen Mitarbeiter alleine oder durch beide Mitarbeiter gemeinsam ausgeführt. Bis auf die Adaption im Rahmen der „akustischen

Teilentladungsmessung“, umfassen die Tätigkeiten von „Mitarbeiter 1“ (blaue Farbkennzeichnung) die klassischen Sicht- und Funktionskontrollen. Sofern keine minimalinvasiven Messungen der Schaltgeräte (LS, TS/ES und SES) durchgeführt werden, können die Funktionskontrollen der „Sperrungen / Meldungen“ durch einen Mitarbeiter im Zuge der Funktionskontrolle der Schaltgeräte erfolgen. Daher können die klassischen Sicht- und Funktionskontrollen durch einen Mitarbeiter an einem Tag durchgeführt werden.

Mit der Berücksichtigung des Aufwands muss das Einsparergebnis für das Beispiel nach Abschnitt 4.2 neu berechnet werden. Dazu müssen die jeweiligen Aufwendungen der beiden Inspektionsarten (Sicht- und Funktionskontrolle sowie minimalinvasive Messtechnik) den Aufwendungen für die Reinigungsarbeiten hinzugerechnet werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die klassische Sicht- und Funktionskontrolle die Verunreinigung eines Gasraumes nicht feststellen kann.

Tabelle 4-2: Aufwandsvergleich zwischen klassischer Sicht- und Funktionskontrolle mit dem Ansatz der minimalinvasiven Messtechnik und der Folgeaufwendungen für Reinigungsarbeiten der Gasräume am Beispiel der SF₆-Gasraumreinigung nach Abschnitt 4.2

Tätigkeit		Arbeitstage		
		Mitarbeiter 1	Mitarbeiter 2	Summe
klas- sisch	Ausführung der Sicht und Funktionskontrolle	4	0	4
	Ausführung der Reinigungsarbeiten	12	12	24
	Summe			28
modern	Ausführung der minimalinvasiven Zustandsbewertung (zwei Tage pro Schaltfeld)	8	8	16
	Ausführung der Reinigungsarbeiten	1	1	2
	Summe			18

Tabelle 4-2 macht für das aufgezeigte Beispiel deutlich, dass trotz des Mehraufwands durch den Einsatz der minimalinvasiven Messtechnik gesamthaft ein erhebliches Einsparpotenzial von 10 Arbeitstagen ermittelt werden kann.

4.3.2 Ausbildung von Zustandsbewertungspersonal

Im ersten Schritt muss sichergestellt werden, dass das Instandhaltungspersonal sich sicher in SF₆-Hochspannungsschaltanlagen bewegen kann und in der Lage ist, Sicht- und Funktionskontrollen als Ausgangsbasis der Zustandsbewertung durchzuführen. Neben

dieser technischen Qualifikation muss hinsichtlich der Arbeitssicherheit Wissen über den Umgang mit SF₆-Gas und den besonderen Gefährdungen, die durch den Einsatz von SF₆-Gas in elektrischen Anlagen entstehen können, vorliegen. Daher lassen sich folgende Basisqualifikationen bestimmen:

1. Ausbildung im elektrotechnischen Bereich oder Qualifikation als Elektrofachkraft
2. Besitz von vertiefenden Kenntnissen über Aufbau und Funktion von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern und den eingesetzten physikalischen Wirkprinzipien
3. Zertifizierung nach Verordnung (EG) 305 / 2008 für den Umgang mit SF₆-Gas
4. Unterweisung zum Umgang mit SF₆-gefüllten Betriebsmitteln auf Basis vom Betreiber vorgegebener Handlungs- und Betriebsanweisungen

Ziel der Basisqualifikationen ist die Befähigung der Mitarbeiter mit einfachen Hilfsmitteln eine Erstbeurteilung eines SF₆-Hochspannungsschaltfeldes durchführen sowie selbstständig Gefahren erkennen, beurteilen und ggf. Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Diese Qualifikation wird für den in Abschnitt 4.3.1, Abbildung 4-10 genannten „Mitarbeiter 1“ benötigt. Entsprechend benötigt „Mitarbeiter 2“ zusätzliche Qualifikationen für die zuverlässige Anwendung und Auswertung der minimalinvasiven Messtechnik, wie beispielsweise zur Bedienung des akustischen Teilentladungsmessgeräts.

Neben der Schulung im Umgang mit den eingesetzten Messgeräten, die zum Beispiel durch die Hersteller der Messgeräte angeboten werden, ist es erforderlich, das Messergebnis zu einer der Beurteilungsstufen nach Abschnitt 2.1.4 zuzuordnen. Dazu können unterschiedliche Referenzquellen verwendet werden, um anhand des Vergleichs zwischen Messergebnis und Referenzergebnis zur richtigen Auswahl der Bewertungsstufe zu kommen. Dies bedeutet für den „Mitarbeiter 2“, dass zusätzliche Qualifikationen in der Bewertung von Messergebnissen erforderlich sind. Diese bilden sich durch Erfahrungswerte im Vergleich von Messergebnissen typgleicher Schaltfelder untereinander und durch den Zugang zu Hilfestellungen, wie sie beispielsweise durch Fehlerkataloge oder Fehlerdatenbanken³⁵ ermöglicht werden. Die Erfahrung in der Anwendung des Zustandsbewertungsverfahrens hat gezeigt, dass die richtige Bewertung von Messergebnissen stark abhängig von der Kenntnis über Aufbau und Funktion der einzelnen Komponenten ist.

³⁵ Eine Datenbank für Teilentladungsmuster wird in [Paw16] entwickelt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zustandsbewertung ist eine wesentliche Informationsquelle zur priorisierbaren Bedarfsermittlung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen im elektrischen Verteilnetz. Die vorliegende Arbeit zeigt, wie durch Kombination aus einer funktionsorientierten Strukturierung des zu bewertenden Objekts und der Anwendung der Evidenztheorie ein Zustandsbewertungsverfahren entwickelt werden kann, welches es ermöglicht, vergleichbare und insbesondere realitätsgerechte Zustandsaussagen über SF₆-Hochspannungsschaltfelder zu generieren. Dieses Verfahren ist hersteller- und fabrikatunabhängig und kann zudem selbst stark inhomogene Datengrundlagen verarbeiten.

Hinsichtlich betrieblicher Forderungen nach minimalen Freischnittzeiten, Einsatz von bisherigem Instandhaltungspersonal und einer schaltfeldfabrikatunabhängigen Messtechnik ist mit der Auswahl von minimalinvasiven Diagnoseverfahren ein konkreter Ansatz zur Anwendung des Zustandsbewertungsverfahrens geschaffen worden, der einen vernünftigen Kompromiss aus Aufwand zur Informationsbeschaffung und hoher Verlässlichkeit der Zustandsaussage bietet.

Sowohl die Anwendbarkeit des Zustandsbewertungsverfahrens als auch die Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten minimalinvasiven Diagnosemittel wurden umfangreich an 66 verschiedenen SF₆-Hochspannungsschaltfeldern erprobt und haben ihre Praxistauglichkeit eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Allein durch die bisherige Verwendung dieser Zustandsergebnisse konnte bereits im betrachteten Kollektiv von 198 SF₆-Hochspannungsschaltfeldern ein erheblicher Mehrwert für Assetmanagement und Assetservice geschaffen werden, da Instandhaltungsinhalte und Erneuerungszeitpunkte optimiert werden konnten.

Eine planungstechnisch interessante Möglichkeit besteht zudem in der Verwendung eines zeitbasierten Unsicherheitsverlaufs, der die Unsicherheit der Zustandsaussage in Abhängigkeit des Alters der eingegangenen Zustandsinformationen vergrößert. Überschreitet die Unsicherheit einen festzulegenden Schwellwert, sollte eine erneute Zustandsbewertung ausgelöst werden. Diese zusätzliche Verwendung des entwickelten Zustandsbewertungsverfahrens erlaubt eine sehr weitreichende Anwendung der zustandsorientierten Instandhaltung.

Generell weisen die Zustandsergebnisse im betrachteten Kollektiv auf einen nach wie vor hohen Abnutzungsvorrat und nur wenig Substanzverlust hin. Die detaillierte Be-

trachtung der einzelnen Substanzverluste zeigt hohes Potenzial für die Verlängerung von Betriebslaufzeiten auf, sofern notwendige Ersatzteile zur Beseitigung einzelner Schwachstellen zur Verfügung stehen und das prinzipielle Problem von Feuchtigkeit in SF₆-Gasräumen älterer SF₆-Hochspannungsschaltfelder behoben werden kann. Daher ist der Aufbau eines strategischen Ersatzteilmanagements und die Anwendung feuchtigkeitsreduzierender Maßnahmen bei geplanten Betriebsverlängerungen zu empfehlen.

Durch den funktionsorientierten Bewertungsansatz ist die Basis der Zustandsbewertung unabhängig von eingesetzten Technologien und Bauweisen. Daher ist es möglich, das Bewertungsverfahren über verschiedene, auch zukünftige Generationen von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern hinweg kontinuierlich anzuwenden. Potenzielle Änderungen durch neue Technologien oder andere Bauweisen können leicht mit einem neuen Satz an Prüfkriterien für die zu erfüllende (Teil-) Funktion im vorhandenen Zustandsbewertungsverfahren abgebildet werden. Auch neue diagnostische Verfahren lassen sich nach der Entwicklung entsprechender Massezahlen in das Zustandsbewertungsverfahren einbinden. Folglich bietet das Zustandsbewertungsverfahren die Möglichkeit eine große Grundgesamtheit an Zustandsaussagen in einem stabilen Rahmen zu sammeln und darauf aufbauend statistische Methoden zur weiteren Optimierung für Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien in Anwendung zu bringen. Beispielsweise könnte mit diesen Daten eine prinzipielle Ableitung von Alterungsaussagen anhand der sogenannten Badewannenkurve überprüft und gegebenenfalls sogar quantifiziert werden.

Grundsätzlich kann das entwickelte Zustandsbewertungsverfahren bereits heute auch freiluftisolierte Schaltfelder bzw. auch Mittel- und Höchstspannungsschaltfelder beurteilen, da der beschriebene Funktionsumfang unabhängig von Isoliermedium und Spannungsebene ist. Weiterhin können auch einzelne Betriebsmittel eines Schaltfeldes direkt beurteilt werden. Beispielsweise lässt sich ein Freiluftleistungsschalter mit den Prüfkriterien der Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ und eine gasisolierte Leitung mit den Prüfkriterien der Hauptfunktion „Spannung halten“ sofort bewerten.

Da andere Betriebsmittel, wie unter anderem Kabel oder Transformatoren, andere Funktionen im elektrischen Netz erfüllen, muss ein entsprechend angepasstes Zustandsbewertungsverfahren verwendet werden. Der in dieser Arbeit entwickelte funktionsorientierte Ansatz und die aufgestellten evidenztheoretischen Regeln zur Datenverarbeitung sind dazu eine bereits nutzbare Grundlage.

<!--

Abschließend soll darauf hingewiesen sein, dass das vorliegende Zustandsbewertungsverfahren die Experten von SF₆-Hochspannungsschaltfeldern erheblich unterstützen kann – ersetzen kann es sie nicht.

-->

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [ARegV07] *Anreizregulierungsverordnung vom 29. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2529), die durch Artikel 313 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.*
- [BHS07] I. Boersch, J. Heinsohn, R. Socher: *Wissensverarbeitung : Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure.* München: Elsevier, 2007
- [BJZ12] D. Beerboom, C. Johae, M. Zdrallek et al.: *Realitätsgerechte Zustandsbewertung von Verteilungsnetzen als Basis optimierter Assetstrategie.* Berlin: ETG Fachbericht 134, 2012
- [BJZ15] D. Beerboom, C. Johae, M. Zdrallek et al.: Condition assessment of distribution grids using uncertainty theory. Lyon: CIRED Paper 472, 2015
- [BK11] Beschlusskammer 4 der Bundesnetzagentur: *BK4-11-304.* Bonn: 31.10.2011
- [BL04] B. Bertsche, G. Lechner: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau : Ermittlung von Bauteil und Systemzuverlässigkeiten.* Berlin: Springer Verlag, 2004
- [BMW+86] W. Boeck, L. Menten, K. H. Weck et al.: *Metallgekapselte Hochspannungsschaltanlagen.* (Textfassung zum Lehrgang 8200/72.033 am 20.-21.01.1986 an der Technischen Akademie Esslingen)
- [Boe92] W. Boeck et al.: *Diagnostic Methods for GIS Insulating Systems.* Paris: CIGRÉ Working Group 15.03, Paper 15/13-01_1992, 1992
- [Bre04] A. Breuer: *UHF-Teilentladungsmessung als Beitrag zur zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung von gasisolierten Schaltanlagen.* Darmstadt: Dissertation der Technischen Universität Darmstadt, 2004
- [Bua10] S. Buakaew: *Reliability Centered Maintenance for Gas Insulated Switchgear Maintenance.* Bangkok: Conference of the Electric Power Supply Industry (CEPSI), 2010

- [BS11] G. Balzer, C. Schorn: *Asset Management für Infrastrukturanlagen : Energie und Wasser*. Heidelberg: Springer Verlag, 2011
- [Cas13] W. Caspary: *Fehlertolerante Auswertung von Messdaten : Daten- und Modellanalyse, robuste Schätzungen*. München: Oldenbourg Verlag, 2013
- [CD13] C. Cottin, S. Döhler: *Risikoanalyse : Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen*. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2013
- [Che00] C. N. Cheung et al.: *Report on the Second International Survey on high Voltage Gas Insulated Substations (GIS) Service Experience*. Paris: CI-GRÉ Working Group 23.02, 2000
- [Dem67] A. P. Dempster: Upper and Lower Propabilities Induced by a Multi-valued Mapping. In: *Annals of Mathematical Statistics* 38, Seiten 325-339, 1967
- [DIN01] *DIN EN 60270 VDE 0434:2001-08, Hochspannungsprüftechnik : Teilentladungsmesstechnik (IEC60270:2000)*
- [DIN04] *DIN EN 62271-100 VDE 0671-102:2012-06, Hochspannungsschaltgeräte und –Schaltanlagen : Teil 100: Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter (IEC 62271-100:2001 + A1:2002 + Corrigendum 1:2002 + Corrigendum 2:2003)*
- [DIN06] *DIN EN 60376:2006-05, Bestimmung für Schwefelhexafluorid (SF₆) von technischem Reinheitsgrad zur Verwendung in elektrischen Betriebsmitteln (IEC 60376:2005)*
- [DIN07] *DIN EN 61025:2007-08, Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006)*
- [DIN08] *DIN EN 60480:2005-08, Richtlinien für die Prüfung und Aufbereitung von Schwefelhexafluorid (SF₆) nach Entnahme aus elektrischen Betriebsmitteln und Spezifikation für dessen Wiederverwendung (IEC 60480:2004)*
- [DIN09] *DIN EN 62271-1 VDE 0671-1:2009-08, Hochspannungs-Schaltgeräte und –Schaltanlagen : Gemeinsame Bestimmungen (IEC 62271-1:2007)*

- [DIN10] *DIN EN 13306:2010-12: Instandhaltung : Begriffe der Instandhaltung*
- [DIN12a] *DIN 31051:2012-09, Grundlagen der Instandhaltung (DIN 31051:2003-06)*
- [DIN12b] *DIN EN 62271-101 VDE 0671-102:2012-06, Hochspannungsschaltgeräte und –Schaltanlagen : Teil 102: Wechselstrom-Trennschalter und -Erdungsschalter (IEC 62271-102:2001 + Corrigenda 2002 & 2003 + A1:2011)*
- [DIN12c] *DIN EN 60269 VDE 0370-1:2012-12, Flüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen : Neue Isolieröle auf Mineralölbasis für Transformatoren und Schaltgeräte (IEC 60269:2012)*
- [DIN13] *DIN EN 62271-100:2013-08; VDE 0671-100:2013-08: Hochspannungsschaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 100: Wechselstrom-Leistungsschalter (IEC 62271-100:2008 + A1:2012)*
- [DIN14a] *DIN VDE V 0109-1:2014-09, Instandhaltung von Anlagen und Betriebsmitteln in elektrischen Versorgungsnetzen : Teil 1: Systemaspekte und Verfahren*
- [DIN14b] *DIN EN 62271-4:2014-06; VDE 0671-4:2014-06, Hochspannungsschaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 4: Handhabungsmethoden im Umgang mit Schwefelhexafluorid (SF₆) und seinen Mischgasen (IEC 62271-4:2013)*
- [EnWG05] *Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das durch Artikel 311 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.*
- [EG14] *VERORDNUNG (EU) Nr. 517/2014 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006*
- [Ehr09] *K. Ehrlenspiel: Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe Methodeneinsatz Zusammenarbeit. München: Hanser Verlag, 2009*
- [Fei05] *W. Feilhauer: Ein Verfahren zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel. Dortmund: Dissertation der Universität Dortmund 2005*

- [FGH01] FGH: *Zustandsmodell für die Instandhaltungsplanung für einen 123-kV-Leistungsschalter*. Mannheim-Rheinau: FGH, Technischer Bericht 2001
- [Gla15] P. Glaubitz: *Dichtheit von SF₆-isolierten Schaltanlagen / Systemen : Trends in der Hochspannung (>52kV)*. Frankfurt: SF₆-Infotag des ZVEI, 24.11.2015
- [Hee16] B. Heesen: *Investitionsrechnung für Praktiker : Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen*. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag, 2016
- [HL12] S. Hans, N. Lambrecht: *Die Analyse des Auslöserstromes als Komponente einer computergestützten Instandhaltung von Hochspannungsleistungsschaltern*. Berlin: ETG Fachbericht 134, 2012
- [HR73] U. Hofmann, W. Rüdorff: *Anorganische Chemie*. Wiesbaden: Springer Fachmedienverlag, 17. Auflage, 1973
- [KFH+15] H. Kojima, K. Fukaya, N. Hayakawa et al.: *Asset Management for Power Apparatus with Intelligent Grid Management System*. Pilsen: ISH Paper 153, 2015
- [KKF08] D. Kopejtkova, M. Kudoke, H. Furuta: *Preliminary Results from Present Cigre Survey on High Voltage Equipment Reliability*. Seoul: CIGRÉ Working Group A3-06 Tutorial 10/2008
- [Küc09] A. Küchler: *Hochspannungstechnik : Grundlagen – Technologien – Anwendungen*. Heidelberg: Springer Verlag, 2009
- [Kur02] R. Kurte: *Infrarot-spektrometrische Spurengasbestimmung in für elektrische Schaltanlagen verwendetem Schwefelhexafluorid*. Dortmund: Dissertation der Universität Dortmund, 2002
- [Kyn08] E. Kynast: *Prüfungen von der Herstellung bis zur Inbetriebnahme*. (Referat zum Seminar: Gasisolierte Hochspannungs-Schaltanlagen, Technische Akademie Esslingen, 11. März 2008)
- [LRB04] C. Leu, F. Reichert, F. Berger: *Wechselwirkungen zwischen Antrieb und Löschesystem eines SF₆-Blaskolbenschalters beim Schalten großer Ströme*. Köln: ETG Fachbericht 97, 2004

- [Mou97] J. Moubray: *RCM II : Reliability-centred Maintenance*. Amsterdam: Elsevier Verlag, 1999, 2. Auflage
- [Nen15] A. Nenning: *Prüfung von Leistungsschaltern und Analyse der Messergebnisse*. Essen: EW Spezial 1/2015 (Zeitschrift)
- [Neu97] U. Neumann: *Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieübertragungssysteme*. Dortmund: Dissertation der Universität Dortmund, 1997
- [Neu00] C. Neumann et al.: *PD measurements on GIS of different designs by non-conventional UHF sensors*. Paris: CIGRÉ Paper 15-303, 2000
- [NRB12a] C. Neumann, B. Rusek, G. Balzer: *Bewertung des Lebensdauerverhaltens von GIS auf Basis von Betriebserfahrungen und Diagnosemessungen*. (Fachtagung des GIS-Anwenderforums; Darmstadt; 25. September 2012)
- [NRB12b] C. Neumann, B. Rusek, G. Balzer et al.: *End of life estimation and optimisation of maintenance of HV switchgear and GIS substations : A study based on probabilistic data analysis, diagnostic measurements and service experience*. Paris: CIGRÉ Paper A3_202, 2012
- [OTZ+12] C. Oerter, T. Tabke, M. Zdrallek et al.: *Zustandsbewertung von gasisolierten Hochspannungsanlagen im Kontext einer Gesamtsystematik für das Assetmanagement*. Berlin: ETG Fachbericht 134, 2012
- [PA15] Patentanmeldung DE 10 2015 206 744: *Verfahren zum Trocknen eines Gasraums sowie Anordnung umfassend einen schutzgasbefüllten Gasraum*. Angemeldet am 15. April 2015, veröffentlicht am 3. November 2016, Anmelder: Westnetz GmbH, Erfinder: Thorsten Tabke, Thomas Saewe
- [Paw16] E. Pawlowski: *Realitätsgerechte Zustandsbewertung gasisolierter Hochspannungsschaltanlagen*. Wuppertal: Dissertation der Bergischen Universität Wuppertal, 2016
- [PL11] J. Ponn, U. Lindemann: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte : Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Heidelberg: Springer Verlag, 2011

- [Por96] R. Porzel: *Diagnostik der elektrischen Energietechnik : Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln*. Renningen-Malmsheim: expert verlag, 1996
- [PTZ+14] E. Pawlowski, T. Tabke, M. Zdrallek et al.: *Messtechnische Unterstützung der nicht-invasiven Zustandsbewertung gasisolierter Hochspannungsschaltanlagen*. Berlin: ETG Fachbericht 144, 2014
- [PTZ+15a] E. Pawlowski, T. Tabke, M. Zdrallek et al.: *System-approach for realistic condition assessment of high-voltage gasinsulated substations*. Lyon: CIRE Paper 217, 2015
- [PTZ+15b] E. Pawlowski, T. Tabke, M. Zdrallek et al.: *Validation of a new condition assessment approach for gasinsulated substations (GIS)*. Pilsen: ISH Paper 297, 2015
- [PwC07] PricewaterhouseCoopers (Hrsg.): *Entflechtung und Regulierung in der deutschen Energiewirtschaft : Praxishandbuch zum Energiewirtschaftsgesetz*. München: Rudolf Haufe Verlag, 2007
- [Run12] M. Runde et al.: *Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment – Part 5 – Gas Insulated Switchgear*. Paris: CIGRÉ Working Group A3.06, 2012
- [Saa90] Thomas L. Saaty: *Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process : Planning, priority setting, resource allocation*. Pittsburgh: RWS Publishing, 1990
- [Sch10] M. Schenk (Hrsg.): *Instandhaltung technischer Systeme : Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Heidelberg: Springer Verlag, 2010
- [Sch13] U. Schichler et al.: *Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics*. Paris: CIGRÉ Brochure 525, 2013
- [SF02] K. Sentz, S. Ferson: *Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory*. Albuquerque: Sandia Report SAND2002-0835, 2002
- [Sha76] G. Shafer: *A mathematical theory of evidence*. Princeton: Princeton University Press, 1976

- [Spi93] M. Spies: *Unsicheres Wissen : Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken*. Heidelberg: Spektrum Verlag, 1993
- [Tie03] W. Tietze (Hrsg.): *Handbuch Dichtungspraxis*. Essen: Vulkanverlag, 3. Auflage, 2003
- [VDI99] VDI 2888:1999-12 (Technische Regel): *Zustandsorientierte Instandhaltung*
- [Wel09] J. Weller: *Verfahren zur systematischen Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln*. Dortmund: Dissertation der Universität Dortmund, 2009
- [Wex76] A. Wexler: *Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0 to 100°C : A Revision*. Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry, September – December 1976, Vol. 80A, Nos. 5 and 6, 775-785
- [Zad65] L.A. Zadeh: *Fuzzy Sets*. In: Information and control Vol. 8, Seiten 338-353, 1965

7 Anhang

7.1 Verwendete Abkürzungen

AHP	Analytic Hierarchy Process (dt.: Analytisch Hierarchischer Prozess)
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CIREN	Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
ETG	Energietechnische Gesellschaft
FGH	Forschungsgemeinschaft für elektr. Anlagen und Stromwirtschaft e.V.
GIS	Gas Insulated Substation (dt: Gasisolierte Schaltanlage)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISH	International Symposium on High Voltage Engineering
ISO	International Organization for Standardization
kV	Kilovolt
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell
MZ	Massezahl
ppm _v	Volumenteile pro Millionen Volumenteile („parts per million“)
pu	per unit – als Angabe für eine dimensionslose Zahl
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SO ₂	Schwefeldioxid
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker e.V.

7.2 Verwendete Formelzeichen

Γ	Beobachtungsfunktion der Hinweise zu einer Aussage über eine betrachtete Einheit
O	Anzahl von Hinweisen
$^{\circ}C$	Grad Celsius, Einheit der Temperatur
a	Jahr
A	Hinweis auf Abnutzungsvorrat
A	Ampere, Einheit des elektrischen Stroms
\bar{A}	Hinweis auf Substanzverlust
B	Beurteilungsergebnis / gewählte Beurteilungsstufe
b	Betrag einer Massezahl
B_a^*	Magnetische Flussdichte im Anker des Auslösers mit Windungsschluss
B_a	Magnetische Flussdichte im Anker des Auslösers
c_L	Schallgeschwindigkeit in Luft
c_{SF6}	Schallgeschwindigkeit in SF ₆
d	Hinweissalter
ΔME	Schrittweite, in der Messergebnisse ME berücksichtigt werden
ΔT	Temperaturdifferenz
ΔT_U	Temperaturdifferenz zur Umgebung
E	Einheit, deren Zustand bewertet werden soll (betrachtete Einheit)
F_a^*	Kraft auf den Anker des Auslösers mit Windungsschluss
F_a	Kraft auf den Anker des Auslösers
g_i	Gewichtungsfaktor der Komponente i
g_i'	modifizierter Gewichtungsfaktor
H_{sp}^*	Magnetisches Feld der Auslöserspule mit Windungsschluss
HF	Hauptfunktion
HF_e	Hauptfunktion, die baulich vorhanden ist
H_{SF6}	Wasseranteil in SF ₆
H_{sp}	Magnetisches Feld der Auslöserspule
i	Zählwert

i	Zinssatz
I	Stromfluss
I_{sp}^*	Spulenstrom des Auslösers mit Windungsschluss
I_{sp}	Spulenstrom des Auslösers
k	Risikoeinstellung des Anwenders: Der k -Faktor dient zur Aufteilung des potenziellen Abnutzungsvorrats und Substanzverlusts im Unsicherheitsbereich
K	Kelvin, Einheit der Temperatur; häufig verwendet zur Angabe von Temperaturdifferenzen
K	Konfliktgrad
K_0	Anfangswert einer Investition
K_n	Endwert einer Investition zum Zeitpunkt n
m	Zählendwert
$m'(\)$	Massezahl um Hinweialter berücksichtigt
$m''(\)$	aus Kombination entstandene Massezahl (Hinweialter berücksichtigt)
$m(A)$	Massezahl des Abnutzungsvorrats
$m(\bar{A})$	Massezahl des Substanzverlusts
$m(\bar{A})_{\text{Gesamtkollektiv}}$	Massezahl des Substanzverlusts bezogen auf das untersuchte Gesamtkollektiv an SF ₆ -Hochspannungsschaltfeldern
$m(nv)$	Massezahl der nicht vorhandenen Hauptfunktionen
$m(\emptyset)$	Massezahl der leeren Menge
$m(U)$	Massezahl der Unsicherheit
$m(X)$	Massezahl aus Kombination von $m(Y_1)$ und $m(Y_2)$
$m(Y_1)$	Massezahl des gesamten Basisvertrauens
$m(Y_2)$	Massezahl des gesamten Basisvertrauens aus einer alternativen Quelle
$m^*(\)$	aggregierte Massezahl (Kombination und Hinweialter berücksichtigt)
ME	Messergebnis
N_{sp}^*	Windungszahl der Auslöserspule mit Windungsschluss
N_{sp}	Windungszahl der Auslöserspule
n	Zeitpunkt
P	Eintrittswahrscheinlichkeit
$P(A)$	Eintrittswahrscheinlichkeit für den Abnutzungsvorrat A
$P(\bar{A})$	Eintrittswahrscheinlichkeit den Substanzverlust \bar{A}

R_{sp}^*	Widerstand der Auslöserspule mit Windungsschluss
R_{sp}	Widerstand der Auslöserspule
S	Akustisches Signal
s_{sp}^*	Leitungslänge der Auslöserspule mit Windungsschluss
s_{sp}	Leitungslänge der Auslöserspule
t	Zeit
T	Temperatur
t^*	Zeitpunkt *
t_{neu}	Zeitpunkt des Neuzustands der Einheit E
U_{sp}	Spulenspannung des Auslösers
X	Gesamtaussage
x_1	Eingangszustand
x_2	Ausgangszustand
Y_1	Aussage 1
Y_2	Aussage 2
$Z(t^*)$	Zustand zum Zeitpunkt t^*
z_E	Zustandsindex der betrachteten Einheit
z_i	Zustandsindex der Komponente i

7.3 Prüfkriterien, Gewichtungsfaktoren und Massezahlen

Nachfolgende Tabelle 7-1 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Prüfkriterien sowie die in diesem Zusammenhang verwendeten Diagnosemethoden und Gewichtungsfaktoren. Zusätzlich sind die verwendeten Massezahlen in Abhängigkeit der Bewertungsstufen 1 bis 4 (hier in der Kurzform Bewertung 1 bis 4) angegeben. Die Gruppierung erfolgt anhand der Hauptfunktionen (HF). Zu beachten ist, dass mit ‚-‘ gekennzeichnete Bewertungsstufen nicht genutzt werden, da kein sachgerechtes Differenzierungspotenzial ermittelbar ist. Weiterhin ist zu beachten, dass es möglich ist, dass es im Fall der Hauptfunktion „Fehler- und Lastströme schalten“ unterschiedliche Gruppen von Prüfkriterien zum Einsatz kommen, damit die technologische Vielfalt abgedeckt werden kann. Diese Gruppen werden durch die zusätzliche hellgraue Hintergrundfarbe gekennzeichnet. Der Tabelle 7-1 folgt Tabelle 7-2 (Seite 138), die die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Hauptfunktionen enthält.

Tabelle 7-1: Übersicht der verwendeten Prüfkriterien inklusive Gewichtungsfaktoren und Massezahlen

HF	Prüfkriterien	Diagnose- methode	Gewich- tungs- faktoren	Bewer- tung 1			Bewer- tung 2			Bewer- tung 3			Bewer- tung 4		
				m(U)	m(A)	m(Ä)									
Spannung halten	Anstrich	visuell	0,0036	0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	1,00	0,00	0,00
	Verunreinigungen	visuell	0,0018	0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	0,35	0,00	0,65
	Kompensatoren	visuell	0,0054	0,01	0,99	0,00	-	-	-	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99
	Druckentlastungs- einrichtung	visuell	0,0174	0,32	0,68	0,00	-	-	-	0,01	0,33	0,66	1,00	0,00	0,00

SF ₆ -Dichtheit	Leak-Detektor	0,0318	0,56	0,44	0,00	-	-	-	0,54	0,15	0,31	1,00	0,00	0,00
	Druck-Zeit-Methode digitales Manometer		0,32	0,68	0,00	-	-	-	0,32	0,23	0,45	1,00	0,00	0,00
Druck bei 20°C (Isolation)	digitales Manometer	0,0900	0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,00	0,68
Volumenprozentsatz (Isolation)	Multigas-analyzer	0,0900	0,01	0,99	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99
	Volumen- prozent- satzmess- gerät		0,01	0,99	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99
Anteil H ₂ O (Isolation)	Multigas-analyzer	0,0293	0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,00	0,68
	Prüfröhr- chen		0,38	0,62	0,00	0,38	0,41	0,21	0,38	0,21	0,41	0,38	0,00	0,62
	elektroni- sches Feuchte- messgerät		0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,00	0,68
Anteil SO ₂ (Isolation)	Multigas-analyzer	0,0090	0,35	0,65	0,00	0,2	0,45	0,35	0,1	0,25	0,65	0,00	0,00	1,00
	Prüfröhr- chen		0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94
Anteil HF (Isolation)	Multigas-analyzer	0,0090	0,35	0,65	0,00	0,2	0,45	0,35	0,1	0,25	0,65	0,00	0,00	1,00
	Prüfröhr- chen		0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94

Fehler und Lastströme schalten																				
		Öl	Feder	Hybrid																
Verunreinigungen	visuell		0,0034					0,35	0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	0,35	0,00	0,65
Beschädigungen	visuell		0,0138					0,35	0,65	0,00	-	-	-	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94	0,65
RMS Motorstrom-analyse	Multimeter	0,0000	0,0258	0,0116				0,10	0,32	0,00	0,01	0,01	0,01	0,10	0,10	0,01	0,01	0,00	0,99	0,65
	Multikanal-Messgerät							0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,33	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90	0,65
dynamische Motor-stromanalyse	Multikanal-Messgerät	0,0000	0,0903	0,0194				0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90	0,65
äußere Hydrauliköl-leckage	visuell	0,0039	0,0000	0,0039				0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94	0,65
innere Hydrauliköl-leckage	berechnet	0,0090	0,0000	0,0090				0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,00	0,68	0,65
Farbe des Hydraulik-öls	visuell	0,0052	0,0000	0,0052				0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	-	-	-	0,65
Motorlaufzeit	Uhr	0,0000	0,0129	0,0090				0,10	0,90	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94	0,65
Hydraulikölmenge	visuell	0,0168	0,0000	0,0116				0,01	0,99	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,33	0,66	-	-	-	0,65
Druckschaltpunkte	digitales Manometer	0,0168	0,0000	0,0129				0,01	0,99	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99	0,65
Stickstoff-vorspanndruck	digitales Manometer	0,0477	0,0000	0,0271				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65
Pumpenlaufzeit	Uhr	0,0297	0,0000	0,0194				0,10	0,90	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94	0,65
dynamische Wegana-lyse (Antrieb)	Multikanal-Messgerät		0,0743					0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90	0,65
Kontaktgleichlauf EIN (Antrieb)	Multikanal-Messgerät		0,0144					0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90	0,65
Kontaktgleichlauf AUS (Antrieb)	Multikanal-Messgerät		0,0144					0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90	0,65
Mindestbetätigungs-spannung	Spulenaus-lösertest-gerät	0,0452						0,32	0,68	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99	0,65
Widerstand der Spule	Spulenaus-lösertest-gerät	0,0181						0,32	0,68	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99	0,65

RMS Spulenstrom	Spulenauslösertestgerät		0,0181		0,32	0,32	0,68	0,00	0,01	0,01	0,66	0,33	0,01	0,01	0,66	0,01	0,01	0,00	0,99
	Multikanal-Messgerät				0,32	0,68	0,00	0,01	0,01	0,66	0,33	0,33	0,66	0,01	0,01	0,66	0,01	0,01	0,99
dynamischer Spulenstrom	Multikanal-Messgerät		0,0993		0,10	0,90	0,00	0,10	0,10	0,60	0,30	0,30	0,60	0,10	0,60	0,10	0,10	0,00	0,90
Kontaktgleichlauf EIN (Kontakt)	Multikanal-Messgerät		0,0259		0,10	0,90	0,00	0,10	0,10	0,60	0,30	0,30	0,60	0,10	0,60	0,10	0,10	0,00	0,90
Kontaktgleichlauf AUS (Kontakt)	Multikanal-Messgerät		0,0259		0,10	0,90	0,00	0,10	0,10	0,60	0,30	0,30	0,60	0,10	0,60	0,10	0,10	0,00	0,90
Kontaktabbbrand	Multikanal-Messgerät		0,1331		0,14	0,86	0,00	0,14	0,58	0,29	0,30	0,30	0,60	0,10	0,60	0,10	0,10	0,00	0,90
	visuell				0,01	0,99	0,00	1,00	0,00	0,00	0,30	0,66	0,66	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
Druck bei 20°C (Löschmedium)	digitales Manometer	0,0000	0,0241	SF6	0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,45	0,32	0,00	0,68	
Volumenprozentatz (Löschmedium)	Multigas-analyzer	0,0000	0,0241		0,01	0,99	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,66	0,01	0,00	0,99	
	Volumenprozentatz-messgerät	0,0000			0,01	0,99	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,66	0,01	0,00	0,99	
Anteil H2O (Löschmedium)	Multigas-analyzer	0,0000	0,0072		0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,45	0,32	0,00	0,68	
	Prüfröhrchen	0,0000			0,38	0,62	0,00	0,38	0,41	0,21	0,38	0,21	0,41	0,38	0,41	0,38	0,00	0,62	
	elektronisches Feuchtemessgerät				0,32	0,68	0,00	0,32	0,45	0,23	0,32	0,23	0,45	0,32	0,45	0,32	0,00	0,68	
Anteil SO2 (Löschmedium)	Multigas-analyzer	0,0000	0,0024		0,35	0,65	0,00	0,2	0,45	0,35	0,1	0,25	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	
	Prüfröhrchen	0,0000			0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,63	0,06	0,00	0,94	
Anteil HF (Löschmedium)	Multigas-analyzer	0,0000	0,0024		0,35	0,65	0,00	0,2	0,45	0,35	0,1	0,25	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	
	Prüfröhrchen	0,0000			0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,63	0,06	0,00	0,94	
Durchschlagsfestigkeit	Ölprüfgerät	0,0542	0,0000		0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,63	0,06	0,00	0,94	

	Ölmenge	visuell	0,0060	0,0000		0,01	0,99	0,00	-	-	-	0,01	0,33	0,66	-	-	-
	dynamische Wegana-lyse (Düsensystem)	Multikanal-Messgerät		0,1849		0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90
	mechanische Schalt-stellungsanzeige	visuell		0,0560		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
	elektrische Schaltstel-lungsanzeige	visuell		0,0196		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
	Schalterfallmeldung / LS-Auslösung	funktional		0,0168		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
	KT-NE-Meldung	funktional		0,0168		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
	Vorwarnung (z.B. Heizung)	funktional		0,0028		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
	Warnmeldung	funktional		0,0070		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
	Störmeldung	funktional		0,0210		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
Strom oder Spannung schalten	Verunreinigungen	visuell		0,0140		0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	0,35	0,00	0,65
	Beschädigungen	visuell		0,0560		0,35	0,65	0,00	-	-	-	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94
	RMS Motorstrom-analyse	Multimeter		0,1890		0,32	0,68	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99
		Multikanal-Messgerät				0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90
	dynamische Motor-stromanalyse	Multikanal-Messgerät)		0,4410		0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90
	mechanische Schalt-stellungsanzeige	visuell		0,2100		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99
elektrische Schaltstel-lungsanzeige	visuell		0,0900		0,01	0,99	0,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00	0,99	
Aktivteile erden	Verunreinigungen	visuell		0,0140		0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	0,35	0,00	0,65
	Beschädigungen	visuell		0,0560		0,35	0,65	0,00	-	-	-	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94
	RMS Motorstrom-analyse	Multimeter		0,1890		0,32	0,68	0,00	0,01	0,66	0,33	0,01	0,33	0,66	0,01	0,00	0,99
Multikanal-Messgerät					0,10	0,90	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90	

	Isolationsmessung (sek.)	Prüfgerät für Wandler	0,1850	0,06	0,94	0,00	0,06	0,63	0,31	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94
Überspannung abbauen	Verunreinigungen	visuell	0,0700	0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	0,35	0,00	0,65
	Beschädigungen	visuell	0,2800	0,35	0,65	0,00	-	-	-	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94
	Bewertung nach Ansprechinstrument	visuell	0,6500	0,06	0,94	0,00	0,10	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,10	0,00	0,90
Netzanschluss herstellen	Verunreinigungen	visuell	0,0500	0,35	0,65	0,00	0,35	0,43	0,22	0,35	0,22	0,43	0,35	0,00	0,65
	Beschädigungen	visuell	0,9500	0,35	0,65	0,00	-	-	-	0,06	0,31	0,63	0,06	0,00	0,94

Tabelle 7-2: Gewichtungsfaktoren der Hauptfunktionen

Spannung halten (A)	Strom führen (B)	Fehler- und Lastströme schalten (C)	Strom oder Spannung schalten (D)	Aktivteile erden (E)
0,160	0,085	0,202	0,128	0,117
Kabel entladen (F)	Strom messen (G)	Spannung messen (H)	Überspannung abbauen (I)	Netzanschluss herstellen (J)
0,106	0,053	0,043	0,053	0,053