

# **Realitätsgerechte Zustandsbewertung gasisolierter Hochspannungsschaltanlagen**

von der Fakultät für

Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik

der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

**(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

**Erik Pawlowski**

aus Aschersleben

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

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2016

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20160523-114942-9

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20160523-114942-9>]

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts mit der Westnetz GmbH.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal, bedanken. Die konstruktive wissenschaftliche Betreuung sowie die wertvollen Anregungen trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Weiterhin danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz, Leiter des Instituts für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft und Inhaber des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft der Technischen Universität Dortmund, für die Übernahme des Korreferats und dem damit verbundenen Interesse an der vorliegenden Arbeit.

Ich möchte mich ebenso bei allen beteiligten Mitarbeitern der Westnetz GmbH bedanken, ohne deren Unterstützung besonders der anwendungsbezogene Teil dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Darüber hinaus leisteten die in den regelmäßigen Treffen entstandenen anregenden Diskussionen einen wichtigen Beitrag zur Bearbeitung der Thematik.

Allen beteiligten Mitarbeitern des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal danke ich für die engagierte Unterstützung während der gesamten Bearbeitungsphase, wodurch auch schwierige Situationen unkompliziert bewältigt werden konnten. Neben der praktischen Unterstützung während der Laboruntersuchungen möchte ich mich für die themenspezifischen Diskussionen bedanken, die stets zeitnah ermöglicht wurden.

Besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich trotz der räumlichen Distanz in allen Bereichen stets tatkräftig unterstützt hat, wodurch sie einen erheblichen Beitrag zur Erstellung dieser Arbeit leistete.

Wuppertal, im April 2016

Erik Pawlowski



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Motivation.....</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik .....	2
1.2 Einordnung und Ziele der Arbeit .....	5
<b>2 Messtechnische Bewertungsmethoden für gasisolierte Schaltanlagen .....</b>	<b>7</b>
2.1 Bewertungskategorien.....	7
2.1.1 Bewertungskategorie Isolation.....	7
2.1.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit.....	8
2.1.3 Bewertungskategorie mechanische Funktion.....	9
2.2 Bewertungsmethoden.....	10
2.2.1 Bewertungskategorie Isolation.....	11
2.2.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit.....	20
2.2.3 Bewertungskategorie mechanische Funktion.....	24
2.3 Laboruntersuchungen.....	25
2.3.1 Fehleridentifikation und Fehlstellenerzeugung .....	25
2.3.2 Versuchsdurchführung .....	31
2.3.3 Auswertung der Laboruntersuchungen .....	38
2.4 Anwendung in Felduntersuchungen.....	60
2.4.1 Bewertungskategorie Isolation.....	61
2.4.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit.....	63
2.4.3 Wesentliche Schlussfolgerungen aus den Felduntersuchungen .....	64
2.5 Weitere messtechnische Bewertungsmethoden .....	65

---

<b>3</b>	<b>Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung gasisolierter Schaltanlagen .....</b>	<b>67</b>
3.1	Aufbau.....	67
3.2	Aggregationssystematik .....	70
3.2.1	Verarbeitung unsicheren Wissens .....	70
3.2.2	Modellbildung .....	92
3.3	Ergebnisdarstellung.....	127
<b>4</b>	<b>Evaluierung der Gesamtsystematik.....</b>	<b>131</b>
4.1	Anwendungsmöglichkeiten.....	131
4.1.1	Asset-Service.....	131
4.1.2	Asset-Management.....	132
4.2	Anwendung an einem Anlagenkollektiv .....	134
4.2.1	Anlagenkollektiv .....	134
4.2.2	Bewertungsergebnisse .....	135
4.3	Grenzen der Gesamtsystematik .....	145
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>Summary .....</b>	<b>153</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>157</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>173</b>
8.1	Formelzeichen und Abkürzungen.....	173
8.2	Struktur und Massezahlen der Gesamtsystematik.....	178
8.3	Gewichtungsfaktoren der Gesamtsystematik .....	181
8.4	Aggregierte Detektierbarkeit der unkonventionellen TE-Messung.....	183
8.5	Beispielpattern der unkonventionellen TE-Messung .....	188

# 1 Motivation

Gasisolierte Hochspannungsschaltanlagen (GIS) werden seit den sechziger Jahren in der elektrischen Energieversorgung eingesetzt. Durch die gekapselte Bauweise in Verbindung mit der Verwendung von Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) als Isoliermedium können im Vergleich zu Freiluftausführungen wesentlich geringere Potentialabstände und somit kompaktere Schaltanlagen realisiert werden. Im Vergleich zur damaligen konventionellen Bauweise benötigten GIS nur ca. ein Zehntel des Platzbedarfs [Mol\_92].

GIS gelten bislang als zuverlässige Betriebsmittel. Statistische Erhebungen zeigen, dass innerhalb von 100 Betriebsjahren weniger als ein betriebsunterbrechender Fehler je Schaltfeld bezogen auf die Spannungsklasse von 100 kV bis 200 kV auftritt. Wird die Fehlerrate in Bezug auf das Jahr der Inbetriebnahme betrachtet, so weisen ältere Anlagen höhere Werte auf. Ein Großteil der Fehler entfällt auf die Schaltgeräte, wobei die Auslöser mechanische, elektrische und dielektrische Schwachstellen sind – vor allem Durchschläge und mangelndes Funktionsvermögen. Mehr als 40 % der Fehler sind auf Abnutzungs- und Alterungserscheinungen zurückzuführen [Run\_12, Che\_00].

Um den sicheren, umweltverträglichen und kosteneffizienten Betrieb der Anlagen zu gewährleisten, können verschiedene Instandhaltungsstrategien genutzt werden [Ryl\_10, Bal\_11, Stü\_02, HaR\_08]. Die Basis moderner Strategien ist die Zustandsbewertung. Sie unterstützt das Asset-Management sowohl bei Wartungs- als auch bei Erneuerungsentscheidungen, welche aufgrund der Annäherung vieler GIS an ihre buchhalterisch veranschlagte Lebensdauer einen immer höheren Stellenwert erlangen. Die Anlagenbetreiber von GIS verwenden zeit- und zustandsorientierte Instandhaltungsstrategien, wobei letztere bislang keine wesentliche Reduktion des Störungsaufkommens erzielen [Run\_12]. Die Gründe hierfür können in der Zugänglichkeit von GIS liegen. Durch die metallische Kapselung wird eine Begutachtung der innenliegenden Komponenten erheblich erschwert.

Visuelle Kontrollen können folglich den Zustand einer GIS nur rudimentär bewerten. Solche „Soft Facts“ müssen durch messtechnisch erfasste „Hard Facts“ unterstützt werden, die eine Beurteilung der innenliegenden, nicht sichtbaren Komponenten erlauben [Oer\_12]. Zugehörige messtechnische Bewertungsmethoden existieren bereits. Ihre Aussagekraft ist unter der Prämisse einer nicht-invasiven Anwendung begrenzt. Hinzu kommt, dass die Anwendbarkeit dieser Methoden je nach Anlagentyp variiert [EPaw\_14]. Hieraus ergibt sich eine bauartbedingte Aussagekraft der Zustandsbewertung [EPaw\_15, EPaw\_15a].

## 1.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Die realitätsgerechte Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln ist ein essentieller Baustein des Asset-Managements. Auf Basis dessen können der wirtschaftliche, zuverlässige und sichere Einsatz der Betriebsmittel sichergestellt und Wartungs- bzw. Erneuerungsentscheidungen unterstützt werden. Zur Bestimmung dieses Zustands werden verschiedene Strategien genutzt. Bei ausreichend großer und detailliert dokumentierter Betriebserfahrung kann die Zustandsbewertung auf Basis einer statistischen Analyse des Abnutzungs- und Ausfallverhaltens erfolgen. In Bezug auf GIS ist dieses Wissen begrenzt. Zwar wurden verschiedene Datenerhebungen durchgeführt, jedoch sind die Datengrundgesamtheit nicht ausreichend groß und die öffentlich zugänglichen Auswertungen nicht detailliert genug, um diese Erhebungen als Entscheidungsgrundlage zu nutzen [Oer\_12, KKF\_08, Run\_12, Che\_00]. Ein einzelner Anlagenbetreiber von GIS verfügt i.d.R. ebenso nicht über die hierfür notwendige Detailtiefe, da die Anzahl der Schaltanlagen sowie die eigene Betriebserfahrung nicht ausreichend groß sind.

Darüber hinaus basiert diese Vorgehensweise auf der Übertragung von vergangenheitsbezogener Betriebserfahrung auf ein aktuell betriebenes Anlagenkollektiv, wobei die Ergebnisse nicht dem realen Anlagenzustand entsprechen müssen. Die Bestimmung des aktuellen und zugleich realitätsbasierten Zustands von gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen kann durch wiederkehrende visuelle und messtechnische Bewertungen erfolgen. Durch eine einheitliche Gesamtsystematik werden mit regelmäßigen Zustandsbewertungen Veränderungen des Zustands identifiziert.

Der Einsatz von Messtechnik unterstützt die realitätsgerechte Zustandsbewertung erheblich. Da die wirtschaftlichen Randbedingungen beachtet werden müssen, sollte deren Anwendung mit möglichst wenigen Eingriffen in den Anlagenbetrieb verbunden sein. Diverse Bewertungsmethoden zur praktischen Anwendung an GIS existieren, welche sich im Wesentlichen auf die Beurteilung von mechanischen Komponenten der Schaltgeräte sowie der Isolationsfähigkeit beziehen [Bal\_11, Bua\_10, KGL\_04, Küc\_09, NTY\_00, PNS\_96, Rie\_06, Sch\_04]. Zur Bestimmung des Detektionspotentials dieser Bewertungsmethoden wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Besonderes Interesse galt dabei in den vergangenen Jahren der Detektion von Teilentladungen (TE) [Neu\_00, Bre\_04, Kra\_02, Mei\_00, Kru\_89, Kus\_80, Boe\_92]. Das maximale Detektionspotential der zugehörigen Bewertungsmethoden, welches aus dem Zusammenfügen der separaten Untersuchungen gewonnen wurde, sowie das Gefährdungspotential von ermittelten Isolationsfehlern sind demnach bekannt [Sch\_13, Nai\_08]. Die Übertragbarkeit dieses Detektionspotentials auf einen spezifischen Anwendungsfall ist jedoch begrenzt, da individuelle Gegebenheiten beachtet werden müssen. Untersuchungen zu Beeinträchtigungen bzw. Bewertungsmethoden der Stromtragfähigkeit wurden nur vereinzelt durchgeführt [Tak\_86, Kar\_91, Blu\_10, Scl\_11]. Bislang existiert keine Systematik zur Zustandsbewertung, die Messtechnik für alle relevanten Bewertungskategorien kombiniert [Oer\_12].



Während die Zustandsaussage durch die Anwendung der messtechnischen Bewertungsmethoden präzisiert wird, können nicht alle relevanten Beeinträchtigungen detektiert werden [Sch\_13, Bal\_11]. Somit verbleibt eine restliche Unsicherheit bezüglich des Bewertungsergebnisses, welche als Unwissenheit bezeichnet wird. Darüber hinaus wirken sich die Ungenauigkeit und die Anwendbarkeit von Bewertungsmethoden sowie das Fehlen von Daten auf die Aussagekraft von Bewertungsergebnissen aus, welche zudem bauartbedingt variieren kann. Zur Aggregation solch unsicheren Wissens wurden verschiedene Methoden entwickelt [Dem\_67, Sha\_76, Paw\_82, Zad\_65, Spi\_93, Spr\_08], die u.a. im Rahmen der Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel genutzt werden.

Für die Bewertung des technischen Zustands von elektrischen Betriebsmitteln werden verschiedene Ansätze verwendet. Neben Ansätzen, deren Zustandsbewertung u.a. auf statistischen Erhebungen basiert [NeU\_98, FGH\_01, Dre\_04], wurden solche entwickelt, die Erfahrungswerte bzw. visuelle und einfache messtechnische Inspektionpunkte nutzen. Das Betriebsmittel wird durch mehrere Gliederungsebenen, z.B. Komponenten oder Funktionseinheiten, unterteilt, welche in der untersten Ebene durch Parameter beschrieben werden. Die Bewertungsergebnisse der Parameter werden mit Gewichtungsfaktoren zur Betriebsmittelbewertung unter Berücksichtigung des Aufbaus aggregiert [Bee\_12, Lag\_07, Bre\_04], wobei die Aussagekraft in Form der Unsicherheit einzelner Bewertungsergebnisse nicht berücksichtigt wird.

Zur Bewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln wurde auf diesem Ansatz aufbauend eine Systematik entwickelt, welche die Unsicherheit in Form von fehlenden Eingangsdaten berücksichtigt. Systematisch wird der Einfluss der fehlenden Bewertung untersucht, wodurch dem Bewertungsergebnis eine separate, spezifische Aussagekraft verliehen wird [Wel\_09].

Ein weiterer Ansatz nutzt die Fuzzy-Logik zur Bewertung von SF<sub>6</sub>-Hochspannungsleistungsschaltern [Kro\_12, Osz\_07, KrB\_09]. Durch ein regelbasiertes Expertensystem werden sowohl fehlende Eingangsdaten als auch die Ungenauigkeit von Bewertungsmethoden berücksichtigt. Diese Arten der Unsicherheit werden innerhalb der Aggregationssystematik verarbeitet, so dass neben dem resultierenden Gesamtergebnis keine separate Angabe der Aussagekraft erfolgt. Hierbei werden visuelle Inspektionpunkte sowohl mit einfachen [Osz\_07] als auch mit komplexen [Kro\_12] messtechnischen Bewertungsmethoden zur Bestimmung des Betriebsmittelzustands kombiniert.

Aufgrund der begrenzten Aussagekraft von nicht-invasiven Bewertungsmethoden für GIS muss die Unwissenheit als weitere Form der Unsicherheit besonders beachtet werden. Diese wird durch die Verwendung der Evidenz-Theorie in die Zustandsbewertung integriert. Neben der Genauigkeit von Bewertungsmethoden und fehlenden Eingangsdaten wird dabei die Fähigkeit einzelner Bewertungsmethoden zur Bewertung zugehöriger Parameter berücksichtigt.

Auf der Evidenz-Theorie basierende Ansätze für Betriebsmittel der Mittel- und Hochspannungsebene wurden entwickelt, die sowohl Bewertungsergebnisse von visuellen Inspektionen als auch solche von messtechnischen Bewertungsmethoden nutzen [Bee\_15, Fei\_05, Han\_07]. Das Bewertungsergebnis besteht aus einem Unsicherheitsbereich, dessen Lage im Bewertungsintervall den Zustand ausdrückt. Die Größe des Unsicherheitsbereichs, innerhalb dessen sich der zugehörige Zustandsindex befindet, stellt ein Maß für die Verlässlichkeit der Aussage dar.

Für Hochspannungsleistungsschalter der Freilufttechnik existiert ein auf der Evidenz-Theorie aufbauender Ansatz, der vornehmlich aus statistischen Erhebungen sowie visuellen und einfachen messtechnischen Inspektionen den Instandhaltungsbedarf ableitet [FGH\_01]. Ein anderer Ansatz erweitert diese Bewertungsparameter um messtechnische Bewertungsmethoden zur Beurteilung von Antriebskomponenten. Diese werden in einem theoretischen Modell zur Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln, u.a. auch Hochspannungsleistungsschaltern, genutzt [NeU\_98]. Das Modell unterteilt den Leistungsschalter in Funktionseinheiten und reflektiert neben den erhobenen Bewertungsergebnissen vergangenheitsorientierte, statistische Erhebungen zur Ermittlung des technischen Zustands. Für die Bestimmung der notwendigen Massezahlen – zur Anwendung der Evidenz-Theorie, welche die Aussagekraft in das Bewertungsergebnis integriert – werden in Abhängigkeit der Informationsquelle verschiedene theoretische Ansätze vorgestellt. Im Rahmen von messtechnischen Bewertungsmethoden wird die Messwertabweichung in Bezug auf einen Maximalwert vorgeschlagen. Zur Integration der Detektionsfähigkeit werden die hieraus ermittelten Massezahlen mit einem Faktor multipliziert, der den relativen Anteil der detektierbaren Fehler ausdrückt. Die Bestimmung sowie die Höhe dieses Faktors werden nicht beschrieben.

In den bisherigen Forschungsprojekten wird die vollständige Bestimmung der notwendigen Aussagekraft – d.h. des Unsicherheitsbereichs – der genutzten Bewertungsmethoden und -ergebnisse überwiegend qualitativ beschrieben, so dass die praktische Bestimmung dieses wesentlichen Unsicherheitsbereichs nicht detailliert betrachtet wird. Die absolute Höhe der Unsicherheit bestimmt jedoch maßgeblich das Bewertungsergebnis und sollte entsprechend möglichst realitätsgerecht bestimmt werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist die Variation der Höhe der Unsicherheit in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses besonders zu beachten.

Demnach existiert bislang noch kein angewandeter Ansatz, der ein praxisbezogenes Modell zur Bestimmung der Aussagekraft von messtechnischen Bewertungsmethoden bzw. den zugehörigen Massezahlen aufzeigt und die hieraus gewonnene Aussagekraft im Bewertungsergebnis integriert.

## 1.2 Einordnung und Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit thematisiert die technische Zustandsbewertung gasisolerter 123-kV-Hochspannungsschaltanlagen zur Analyse eines vorhandenen, inhomogenen Anlagenkollektivs. Das Ziel ist die Entwicklung einer Systematik zur einheitlichen, umfassenden und realitätsgerechten Zustandsbewertung der Bestandsanlagen ohne wesentliche Eingriffe in deren Betrieb. Mit diesem „Werkzeug“ soll das Asset-Management im Hinblick auf anstehende Wartungs- und Erneuerungsentscheidungen geeignet unterstützt werden.

Ein Anlagenkollektiv unterscheidet sich hinsichtlich der Alters- und Herstellerstruktur, so dass die Anwendbarkeit und die Aussagekraft von Bewertungsmethoden variieren. Um eine vergleichbare Analyse von Schaltfeldern und -anlagen eines solchen, inhomogenen Kollektivs zu ermöglichen, wird in der vorliegenden Arbeit eine geeignete Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung entwickelt. Die Zustandsbewertung auf der Betrachtungsebene der Schaltfelder unterstützt besonders Instandhaltungs- und punktuelle Erneuerungsentscheidungen. Die Zustandsbewertung der gesamten Schaltanlage unterstützt die Erneuerungsplanung innerhalb des Anlagenkollektivs.

Die identifizierten Fehler bzw. die sogenannten Substanzverluste werden durch die Gesamtsystematik realitätsgerecht im Verhältnis zum Gesamtzustand des Schaltfelds bzw. der -anlage abgebildet. Zusätzlich wird die Aussagekraft der angewendeten Bewertungsmethoden realitätsgerecht im Bewertungsergebnis integriert, um eine valide Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Durch die Nutzung der Aussagekraft des Bewertungsergebnisses wird die vergleichende Analyse von Schaltfeldern und -anlagen des betrachteten, inhomogenen Kollektivs deutlich verlässlicher. Fehlinterpretationen, die aus einer schwachen, nicht validen Daten- bzw. Bewertungsgrundlage resultieren können, werden hierdurch vermieden. Die identifizierten, kritischen Fehler werden zur Unterstützung des Asset-Services in Form eines separaten Berichts ausgegeben.

Die entwickelte Gesamtsystematik ist eine Erweiterung der vorhandenen Ansätze zur Zustandsbewertung, die moderne messtechnische und visuelle Bewertungsmethoden zur Schaltfeld- und Schaltanlagenbewertung nutzt. Um den Zustand vollumfänglich und realitätsgerecht bewerten zu können, werden erstmals alle relevanten Bewertungskategorien in einer gemeinsamen Systematik betrachtet. Nicht- bzw. minimal-invasive Messtechnik, welche die GIS hinsichtlich ihrer Isolations-, Funktions- und Stromtragfähigkeit bewerten kann, wird zur Beachtung der wirtschaftlichen Restriktionen – d.h. zur Minimierung der Freischaltzeiten – genutzt. Die verwendete Messtechnik ist universell und einfach an einem vorhandenen inhomogenen Anlagenkollektiv anwendbar.

Die spezifische Aussagekraft der Bewertungsmethoden wird besonders berücksichtigt, da diese in Abhängigkeit des Anlagentyps und der anwendbaren bzw. angewendeten Bewertungsmethoden variiert. Um sie realitätsgerecht bestimmen zu können, werden umfangreiche Labor- und Felduntersuchungen zum Detektionspotential der anzuwendenden Messtechnik durchgeführt, wodurch eine detaillierte Datengrundlage für den konkreten Anwendungsbereich der Gesamtsystematik geschaffen wird. In der vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungen zur unkonventionellen Teilentladungsmessung und zur Thermografie vorgestellt.

Die resultierende Unsicherheit der Bewertungsmethoden wird durch die Anwendung der Evidenz-Theorie in die Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung integriert. Hierdurch werden neben der Aussagekraft auch die Genauigkeit von Bewertungsmethoden und fehlende Daten berücksichtigt. Es wird ein Modell vorgestellt, dass, aufbauend auf den umfangreichen Erkenntnissen aus den Laboruntersuchungen, die gesamte Unsicherheit, deren Höhe in Abhängigkeit der Bewertungsmethode, des Bewertungsergebnisses und der angewendeten Messtechnik variiert, bestimmt und aggregiert. Dieses Modell ist universell zur Bestimmung der absoluten Höhe der Unsicherheit von Bewertungsmethoden anwendbar, wobei eine konkrete Vorgehensweise zur Bestimmung der realitätsgerechten Unsicherheit vorgestellt und an den im Labor untersuchten Bewertungsmethoden demonstriert wird. Es wird in die Gesamtsystematik integriert, um hiermit die – zur Aggregation mit der Evidenz-Theorie notwendigen – Massezahlen zu ermitteln, wodurch erstmals ein praxisbezogenes Modell zur realitätsgerechten Bestimmung der Aussagekraft von (messtechnikbasierten) Zustandsbewertungen von GIS vorgestellt wird.

Das Bewertungsergebnis des gesamten Schaltfelds bzw. der Schaltanlage besteht aus einem Zustandsindex sowie einem Unsicherheitsbereich, dessen Lage im Bewertungsintervall den Zustand abbildet. Das Maß der Aussagekraft des Bewertungsergebnisses stellt die Spannweite des Unsicherheitsbereichs dar. Innerhalb des Unsicherheitsbereichs befindet sich der ermittelte Zustandsindex. Da eine objektive Aufteilung der Unsicherheit zu den Bereichen des identifizierten Substanzverlusts und des vorhandenen Nutzungsvorrats auf Basis des erhobenen Bewertungsergebnisses nicht möglich ist, wird die Risikoneigung des Anwenders zur Bestimmung eines konkreten Zustandsindexes berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit wird die Ermittlung dieses Indexes thematisiert, da er in erster Instanz zum Vergleich eines Anlagenkollektivs genutzt wird und sich hieraus anwendungsbezogene Optionen ergeben.

Im weiteren Verlauf werden eingangs die notwendigen Labor- und Felduntersuchungen zur Bestimmung der spezifischen Aussagekraft von Bewertungsmethoden am Beispiel der unkonventionellen Teilentladungsmessung sowie der Thermografie vorgestellt. Der darauf folgende Teil befasst sich mit der entwickelten Aggregationssystematik. Die theoretischen Grundlagen, das zugehörige Modell sowie dessen konkrete Umsetzung werden dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse der Felderprobungen, welche an 67 Schaltfeldern eines realen Anlagenkollektivs ermittelt wurden, zur Evaluation der Gesamtsystematik thematisiert.

## **2 Messtechnische Bewertungsmethoden für gasisolierte Schaltanlagen**

Dieses Kapitel bezieht sich auf die ausgewählten, messtechnischen Bewertungsmethoden zur nicht- bzw. minimal-invasiven Zustandsbewertung von GIS, welche in Kombination mit visuellen Inspektionen aussagekräftige, realitätsgerechte Bewertungen des Betriebsmittelzustands ermöglichen. Hiermit werden die relevanten Bewertungskategorien Isolation, Stromtragfähigkeit und mechanische Funktion analysiert [Oer\_12]. Minimal-invasiv bedeutet hierbei, dass eine Freischaltung des zu untersuchenden Betriebsmittels sowie primärtechnische Arbeiten zur Installation des Messsystems nicht erforderlich sind. Ein Verlassen des ursprünglichen Netz- bzw. Betriebszustands kann jedoch z.B. für (Prüf-)Schalthandlungen oder Lasterhöhungen erforderlich sein. Als nicht-invasiv werden Bewertungsmethoden bezeichnet, deren Messergebnisse ohne die genannten Eingriffe während des Anlagenbetriebs erzeugt werden können.

Innerhalb dieser Arbeit beziehen sich die Betrachtungen im Schwerpunkt auf die Bewertungskategorien Isolation und Stromtragfähigkeit, da das zugehörige Know-how für die ausgewählte Messtechnik durch Labor- und Feldversuche aufgebaut wird. Die Bewertungsmethoden der unkonventionellen Messung von Teilentladungsvorgängen und die Thermografie werden detailliert vorgestellt. Die Bewertungskategorie mechanische Funktion wird in der vorliegenden Arbeit untergeordnet betrachtet. Das zugehörige Wissen über den Beitrag zur Zustandsbewertung wurde durch den Projektpartner ermittelt und wird in die Gesamtsystematik integriert [Küp\_14, Zur\_15, Nen\_15, Spt\_14]. Die zugehörigen Bewertungsmethoden werden in einer parallelen Abhandlung detailliert betrachtet.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die zu beurteilenden Bewertungskategorien, die Grundlagen der Bewertungsmethoden sowie die Labor- und Felduntersuchungen thematisiert.

### **2.1 Bewertungskategorien**

Die Bewertungskategorien werden durch die Analyse der wesentlichen Einflüsse auf den Zustand einer GIS sowie des zugehörigen Störungsaufkommens ermittelt [Oer\_12, KKF\_08, Run\_12, Che\_00]. Deren spezifische Auswirkungen werden kategorisiert und mit Parametern beschrieben, welche mit den ausgewählten Bewertungsmethoden bewertet werden können. Die Bewertungskategorien bilden die Grundlage der weiteren Betrachtungen.

#### **2.1.1 Bewertungskategorie Isolation**

Die Parameter dieser Kategorie bewerten den Zustand der Isolation der GIS in Bezug auf Einschränkungen, welche durch eine reduzierte Isolationsfähigkeit oder verminderte Qualität bzw. Verlust des SF<sub>6</sub>-Gases verursacht werden. Zugehörige Bewertungsmethoden sind z.B. Teilentladungsmessungen, Gasanalysen oder Dichtheitsprüfungen.

Die Isolationsfähigkeit einer GIS wird von der Fähigkeit, die geforderte Spannungsbelastung halten zu können, bestimmt. Sogenannte Durchschläge müssen vermieden werden. Diese erfolgen in GIS nach dem Streamer-Leader-Mechanismus. Die Höhe der Durchschlagspannung ist von der Art der Spannungsbeanspruchung abhängig. Bei einer fehlerfreien Isolation ist das Durchschlagrisiko, auch bei Beanspruchung mit unterschiedlichen Spannungsarten, d.h. Wechselüberspannungen und Blitzstoßspannungen im Bereich der Bemessungsspannungen [DIN\_11], gering. Eine Fehlstelle innerhalb der Isolation kann hingegen die Durchschlagspannung maßgeblich reduzieren. Kritisch wirkt sich hierbei insbesondere die Beanspruchung der Anlage mit Überspannungen aus [Boe\_91, Hin\_02].

Entladungen innerhalb einer GIS führen nicht zwingend und direkt zu einem Durchschlag. Wird z.B. die kritische Feldstärke nicht erreicht, so wird das Voranwachsen einer entstandenen Entladung gestoppt. Eine Raumladungsstabilisierung kann auftreten, wodurch der Abstand zwischen den Potentialen nicht vollständig überbrückt wird. Da die Entladung den Isolationweg nicht vollständig überbrückt, wird diese Entladungsform Teilentladung (TE) genannt. Sie führt nicht unmittelbar zu einem Durchschlag und einer damit einhergehenden Betriebsunterbrechung, kann ihn jedoch nach längerer Einwirkzeit oder Änderung der Spannungsbeanspruchung verursachen [Küc\_09, Swa\_11]. Es wird unterschieden zwischen inneren und äußeren Teilentladungen in Abhängigkeit des Entstehungsorts. Verschiedene Wirkungen wie dielektrische Verluste, Druckwellen, Schall, Wärmeentwicklungen, Lichtwellen, chemische Reaktionen oder Hochfrequenzwellen [Scw\_07] werden von Teilentladungen verursacht, welche zur Detektion der Teilentladungsvorgänge und somit als Indikator für eine Schwächung der Isolationsfähigkeit verwendet werden.

Darüber hinaus verursachen die Entladungstätigkeiten einen Energieeintrag, wodurch das Isoliergas SF<sub>6</sub> zersetzt werden kann und somit die Bildung giftiger Nebenprodukte in Form gasförmiger, flüssiger und auch fester Stoffe vorangetrieben wird [Zen\_14, Wei\_13, Tan\_12]. Zur Indikation der Zersetzung wird die Konzentration repräsentativer Nebenprodukte bestimmt. Weiterhin erfolgen die Messung des SF<sub>6</sub>-Gehalts sowie des Feuchteanteils. Die Dichtigkeit der GIS muss ebenso überprüft werden, um ein Entweichen des Isoliermediums zu verhindern. Sowohl Veränderungen des SF<sub>6</sub>-Gases als auch der Gasverlust können die Isolationsfähigkeit erheblich herabsetzen [Gre\_01, Kur\_02, DIN\_12, Boe\_92].

### **2.1.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit**

Diese Bewertungskategorie bewertet den Zustand des Kontaktsystems einer GIS in Bezug auf die Stromtragfähigkeit. Zugehörige Bewertungsmethoden sind z.B. thermische Analysen der Oberflächentemperaturverteilung oder Spannungsfallmessungen. Der Zustand der Kontaktflächen, sowohl von dynamischen als auch von statischen Kontakten, wird durch die elektrischen Eigenschaften, genauer den elektrischen (Kontakt-)Widerstand, bestimmt.

Kontaktstellen in GIS befinden sich innerhalb der Schaltgeräte und an den Verbindungsstellen der Leitersegmente. Der Widerstand einer neuwertigen Anordnung ähnelt dem eines homogenen Materials. Im Laufe der Zeit kann sich dieser Widerstand durch physikalische, chemische und betriebsbedingte Einwirkungen verändern. So wirken chemische Prozesse, Kraftabbau, Gleitverschleiß, Fretting, Reibkorrosion, Interdiffusion und Elektromigration auf die Kontakte [Blu\_10, Scl\_11, PKJ\_04]. Darüber hinaus können Montage- und Instandhaltungstätigkeiten den Widerstand erhöhen.

Wird der Übergangswiderstand von Kontaktstellen unzulässig hoch, so treten Beeinträchtigungen der Stromtragfähigkeit auf. Die Widerstandserhöhungen resultieren in einer zusätzlichen Verlustleistung, welche in Wärme umgewandelt wird und nicht unmittelbar abgeführt werden kann. Die Temperatur des Innenleiters kann hierdurch den zulässigen Bereich übersteigen, wodurch die volle Stromtragfähigkeit nicht mehr gegeben ist. Zur Detektion solcher Beeinträchtigungen können direkte oder indirekte Messungen vorgenommen werden. Die direkte Ermittlung bezieht sich auf die Messung des erhöhten Kontakt- bzw. Übergangswiderstands. Indirekt kann die resultierende Wärmeentwicklung und somit die Temperaturverteilung mit thermischen Bewertungsmethoden untersucht werden.

### **2.1.3 Bewertungskategorie mechanische Funktion**

Die zugehörigen Bewertungsmethoden beurteilen die mechanische Funktionsfähigkeit in Abhängigkeit der Art der Funktionserbringung des untersuchten Betriebsmittels. Da Schaltvorgänge in dieser Bewertungskategorie von besonderer Wichtigkeit sind, stehen die Antriebskomponenten sowie das dynamische Kontaktsystem im Fokus der Bewertung. Die Bewertungsmethoden umfassen z.B. Weg-Zeit-, Strom- oder Spannungsanalysen sowie dynamische Messungen am Kontaktsystem der Leistungsschalter.

Die Bewertungsmethoden detektieren Abnutzungen, welche aus den dynamischen Belastungen resultieren. Einerseits wird das bewegte Kontaktsystem innerhalb der GIS beurteilt, andererseits die externen Antriebskomponenten, welche die dynamischen Vorgänge bewirken. Innerhalb der GIS können hierbei verschiedene Auswirkungen wie Zersetzungsprodukte des Isoliermediums infolge hoher Temperaturen sowie Veränderungen der Kontaktflächen, des Spiels mechanischer Komponenten, der Schaltzeiten oder der Kontaktwiderstände auftreten [Suw\_04, Bua\_10, LRB\_04]. Ursächlich sind die infolge von Schaltvorgängen kurzzeitig wirkenden, hohen Kräfte sowie auftretende Lichtbögen. Einzelne Komponenten, wie z.B. der Energiespeicher von Antrieben, sind zusätzlich permanenten Belastungen ausgesetzt, da sie die (Schalt-)Energie vorhalten müssen. Hinzu kommen atmosphärische Einwirkungen auf die nicht-gekapselten Antriebskomponenten, wodurch mechanische Einschränkungen auftreten können. Eine Vielzahl von Bewertungsmethoden zur Beurteilung der Abnutzungen existiert. I.d.R. wird die Bewegung bzw. die zurückgelegte Wegstrecke der Komponenten indirekt beurteilt [Bal\_11].

## 2.2 Bewertungsmethoden

Den Bewertungskategorien werden die zugehörigen Bewertungsmethoden zugeordnet, deren Funktionsweise im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Hierbei findet eine Konzentration auf die wesentlichen Bewertungsmethoden statt, wobei solche, die auf einfachen Messungen basieren, wie z.B. die Bestimmung des Sättigungsgrads des Filters, nicht näher detailliert werden. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der in der Gesamtsystematik genutzten, messtechnischen Bewertungsmethoden.

Tabelle 1: Übersicht der integrierten, messtechnischen Bewertungsmethoden

Bewertungskategorie	Zu berurteilende Komponente	Bewertungsmethode	Invasivität
<b>Isolation</b>	Isolationsfähigkeit Gasräume und Feststoffe	Konventionelle Teilentladungsmessung	Invasiv
		UHF-Teilentladungsmessung	Nicht-invasiv
		Akustische Teilentladungsmessung	Nicht-invasiv
		Eingrenzung des Isolationsfehlerorts	Nicht-invasiv
	SF <sub>6</sub> -Gas	SF <sub>6</sub> -Gasanalyse	Nicht-invasiv
		Sättigungsgrad Filter	Nicht-invasiv
		Bestimmung der Leckrate	Nicht-invasiv
<b>Stromtragfähigkeit</b>	Statisches Kontaktsystem	Thermografie	Nicht-invasiv
		RFID-Thermoobservation	Nicht-invasiv
		Spannungsfallmessung	Invasiv
<b>Mechanische Funktion</b>	Auslöser	Analyse der Mindestbetätigungsspannung	Minimal-invasiv
		Widerstandsanalyse der Auslösespule	Minimal-invasiv
		Strom-Zeit-Analyse	Minimal-invasiv
	Druckschalter	Analyse der Druckschaltpunkte	Minimal-invasiv
	Energieübertragungssystem	Weg-Zeit-Analyse	Minimal-invasiv
	Energiespeicher	Motorstromanalyse	Minimal-invasiv
		Druckanalyse	Nicht-invasiv
	Energiebereitstellungssystem	Analyse der Aufzugszeit	Minimal-invasiv
		Strom-Zeit-Analyse	Minimal-invasiv
	Hydraulik-Öl	Analyse von Menge/Qualität	Nicht-invasiv
	(Dynamische) Schaltkontakte	Digitale Schaltzeitmessung	Minimal-invasiv
		Dynamische Schaltzeitmessung	Minimal-invasiv
	Abbrandkontakt	Schaltzeitmessung	Minimal-invasiv



## 2.2.1 Bewertungskategorie Isolation

### 2.2.1.1 Konventionelle Teilentladungsmessung

Die konventionelle Teilentladungsmessung ist in der Diagnostik elektrischer Betriebsmittel weit verbreitet ist. Ihre Anwendbarkeit ist jedoch stark begrenzt, da hierzu primärtechnische Arbeiten mit Eingriffen in den Anlagenbetrieb notwendig sind. Eine Vielzahl verfügbarer Messtechnik existiert, deren Anwendung genormt ist [DIN\_01]. Zur Veranschaulichung der Funktionsweise wird in Abbildung 1 das Ersatzschaltbild einer inneren Teilentladung dargestellt, wobei die Fehlstelle durch einen Hohlraum mit der Kapazität  $C_h$  repräsentiert wird.

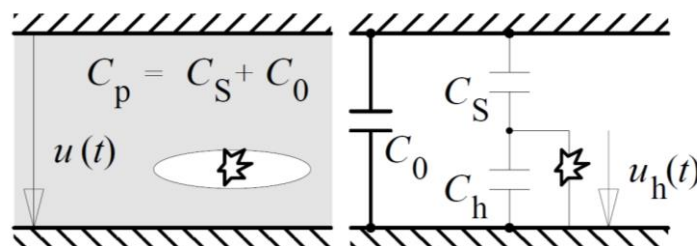


Abbildung 1: Ersatzschaltbild einer inneren Teilentladung [Küc\_09]

Bei Überschreiten der kritischen Durchschlagsspannung  $U_d$  an dieser Stelle wird die unbekannte Kapazität  $C_h$  entladen, wobei der tatsächliche Ladungsumsatz durch  $\Delta Q = C_h \cdot \Delta u_h = C_h \cdot U_d$  beschrieben werden kann. Die Entladung geht mit einem Spannungseinbruch  $\Delta u_h$  einher, der an den Klemmen des Prüflings nach Gleichung (2.1) bestimmt werden kann [Küc\_09]:

$$\Delta u = \Delta u_h \cdot \frac{C_s}{(C_s + C_0)} = U_d \cdot \frac{C_s}{C_p} \quad (2.1)$$

Da dieser Spannungseinbruch aufgrund der Spannungsteilung an den Kapazitäten  $C_s$  und  $C_0$  – wobei  $C_0 > C_h \gg C_s$  gilt und der Prüfling während des Spannungseinbruchs als vom übrigen Messkreis entkoppelt angenommen wird – kaum messbar ist, wird dem Prüfling eine Koppelkapazität parallel geschaltet. Die hieraus nachfließende Ladung wird über einen Strommesswiderstand, dem sogenannten Auskopplungsvierpol, gemessen und in spannungsäquivalente Signale zur Visualisierung umgewandelt. Hierbei wird unterstellt, dass eine starre Quelle den Spannungseinbruch  $\Delta u$  an den Prüflingsklemmen vollkommen ausgleicht. Die messbare scheinbare Ladung kann mit Gleichung (2.2) bestimmt werden [Küc\_09, Hüc\_95]:

$$Q_s = C_p \cdot \Delta u = \Delta u_h \cdot C_s = \Delta Q \cdot \frac{C_s}{C_h} \quad (2.2)$$

Für die Messung stehen diverse Prüfkreise zur Verfügung, bei denen dem Prüfling – im vorliegenden Anwendungsfall der GIS – ein Koppelkondensator parallel geschaltet wird, wofür eine physische Verbindung zum Innenleiter erforderlich ist. Über den Auskopplungsvierpol erfolgt eine Umwandlung in ladungsäquivalente Spannungswerte, welche durch das Messgerät phasenbezogen visualisiert werden. Es kann eine Unterscheidung der Impulse hinsichtlich Phasenlage, Intensität, Polarität und Häufigkeit erfolgen [Küc\_09, DIN\_01].

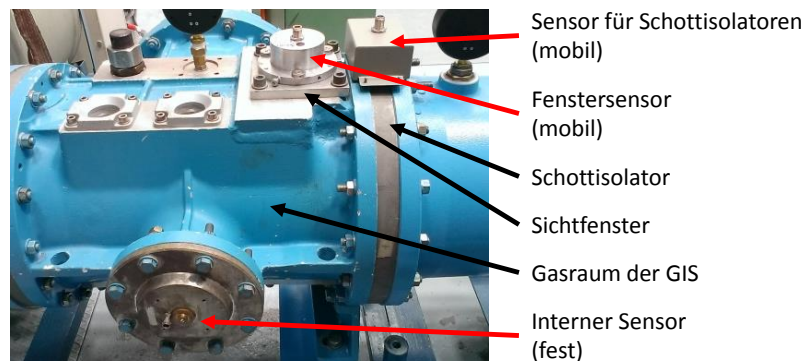
Durch die Aufzeichnung der Impulse innerhalb definierter Zeiträume entstehen typische Fehlerbilder je Fehlernart. Gängige Visualisierungsformen basieren auf der *PRPDA*-Darstellung (Phase Resolved Partial Discharge Analysis). Hierbei werden die Teilentladungen in Abhängigkeit ihrer Signalstärke über dem Spannungsverlauf aufgetragen. Eine Erweiterung sind sogenannte  $\varphi, Q, n$ -Darstellungen, welche die Häufigkeit der Impulse innerhalb des definierten Zeitraums zusätzlich abbilden. Weiterhin sind Betrachtungen im Frequenzbereich möglich [Küc\_09].

Vor der Durchführung einer Messung muss der zu analysierende Prüfling kalibriert werden. Dies geschieht durch das Einbringen einer definierten Ladung mit anschließender Abstimmung der Auswerteeinheit [Bre\_04, Küc\_09]. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Bestimmung der scheinbaren Ladung bei einer Messung, wodurch die Messergebnisse mit denen anderer Prüflinge vergleichbar analysiert werden können. Die konventionelle TE-Messung gilt als eine universelle und empfindliche Methode zur Teilentladungsdetektion [Sch\_13]. Jedoch ist die Anwendbarkeit begrenzt, da zur Signalentkopplung ein direkter Kontakt zum Innenleiter und somit die Freischaltung des Betriebsmittels notwendig sind, wodurch ein erheblicher Eingriff in den Betrieb der GIS erfolgt. Sie wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

#### **2.2.1.2 UHF-Teilentladungsmessung**

Teilentladungsvorgänge verursachen Hochfrequenzwellen im UHF-Bereich (Ultra High Frequency) innerhalb einer GIS, welche bei der UHF-TE-Messung analysiert werden [Bre\_04, Scw\_07, HKH\_10]. Kapazitive Sensoren, die keine direkte physische Verbindung zum Innenleiter erfordern, werden zur Erfassung der Hochfrequenzwellen genutzt. Die Bewertungsmethode kann nicht-invasiv während des Betriebs der GIS angewendet werden. In Abhängigkeit der Fehlerart können spektrale Anteile der durch die TE verursachten Hochfrequenzwellen bis in den Gigahertzbereich hinein auftreten. Typische Störungen durch Mobilfunk, Fernsehen oder Radar befinden sich vorwiegend im niederfrequenten Bereich bis zu einer Frequenz von ca. 200 MHz, wobei die Anteile mit steigender Frequenz sinken. Demzufolge kann bei einer Messung oberhalb dieses Frequenzbereichs ein geringer Grundstörspegel realisiert werden [Küc\_09]. Wird die GIS als Hohlleiter betrachtet, so verursacht jede Teilentladung einen Wanderwellenvorgang. Unter Nutzung des Innenleiters bilden sich transversal-elektromagnetische Wellen (TEM-Wellen) aus. Die Wellen unterliegen einer schwachen Dämpfung und können sich entlang der GIS ausbreiten. Oberhalb einer Frequenz von etwa 500 MHz entstehen zusätzlich transversal-elektrische und transversal-magnetische Wellen. Im Gegensatz zu TEM-Wellen sind sie nicht auf den Innenleiter angewiesen und können somit auch offene Schalterstellungen überwinden. Sie unterliegen besonders an Stoßstellen einer starken Dämpfung, so dass die Anlagengeometrie die Ausbreitung der verschiedenen Wellen beeinflusst [Bre\_04, HKH\_10, Wan\_00, LiQ\_12].

Während die Dämpfung der Signale in der reinen Gasstrecke einen untergeordneten Einfluss ausübt, tritt durch Isolatoren – falls z.B. die Schottisolatoren als Messpunkt genutzt werden – eine größere Dämpfung auf. Die Messung von TE-Signalen ist folglich vom Entladungs- bzw. Fehlerort, dem Ort der Signalerfassung, dem untersuchten Frequenzbereich, dem Aufbau und dem Schaltzustand des untersuchten Schaltfelds abhängig. Zur Erreichung einer konstanten Messempfindlichkeit ist demnach eine ausreichende Bestückung des untersuchten Schaltfelds mit UHF-Sensoren notwendig [Bre\_04, Neu\_00, Mei\_00, Kra\_02]. Abbildung 2 zeigt verschiedene Arten von anwendbaren UHF-Sensoren.



**Abbildung 2: UHF-Sensorarten**

Die Signalerfassung erfolgt durch kapazitive Sonden, welche bei festen Installationen als scheibenförmige Elektroden ausgeführt sind und als interne Sensoren bezeichnet werden. Sie befinden sich innerhalb der GIS, wobei z.B. Montageflansche als Einbauorte genutzt werden. Eine koaxiale Durchführung ermöglicht die Messwertaufnahme außerhalb der metallischen Kapselung. Bei Altanlagen können solche Sensoren nachgerüstet werden. Zudem gibt es mobile Sensoren, die z.B. an Berstscheiben bzw. Sichtfenstern (Fenstersensoren) oder den Schottisolatoren (Sensor für Schottisolatoren) angebracht werden [Bre\_04, Neu\_00, Kra\_02, Val\_12]. Die Sensoren sind außerhalb einer Laborumgebung anfällig für Störsignale, die z.B. durch Funkwellen verursacht werden können. Zur Minimierung dieser Störgrößen existieren verschiedene Vorgehensweisen. So kann eine Mustererkennung diese in der phasenaufgelösten Darstellung erkennen und selektieren. Weiterhin kann eine Messung in einem Frequenzbereich mit geringer Störanfälligkeit durchgeführt oder das Spektrum eines Referenzprüflings mit einem zweiten Kanal erfasst und die Differenz beider Spektren beurteilt werden. Im Praxiseinsatz ist das sogenannte Gating-Verfahren verbreitet, bei dem analog zum Messkanal ein zweiter Kanal zur Aufnahme von Störsignalen verwendet wird [Bre\_04].

Grundsätzlich existieren zwei Messvarianten: Schmal- und Breitbandmessungen. Beiden ist gemein, dass sie nur Signale ab einer gewissen Frequenz erfassen, um den Grundstörpegel zu verringern. Folglich wird ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von z.B. 300 MHz verwendet. Die Auswertung des verstärkten Messsignals erfolgt analog zur konventionellen Teilentladungsmessung. Eine Unterscheidung findet durch die Signalverarbeitung nach der Verstärkung statt [Bre\_04].

So nutzt die Schmalbandmessung eine kleine Frequenzbandbreite von z.B. 3 MHz. Hierbei wird ein Frequenzband gewählt, das frei von Störungen ist und – falls vorhanden – das Teilentladungssignal enthält. Dieses unterscheidet sich von dem einer fehlerfreien Anordnung. Das Ausgangssignal wird i.d.R. zur Auswertung in die  $\varphi, Q, n$ -Darstellung überführt. Die schmalbandige Variante wird genutzt, um ausschließlich interessierende Bereiche des Spektrums phasenbezogen zu beurteilen. Ein Abbild des fehlerfreien Spektrums am spezifischen Messpunkt der GIS kann die Messung unterstützen. Der vom Referenzspektrum abweichende Teil kann so separat analysiert werden. Aufgrund des von der Schmalbandmessung zusätzlich zum Hochpass verwendeten Bandpasses wird nur ein Teil der Signalenergie genutzt [Bre\_04].

Die Breitbandmessung hingegen nutzt einen größeren Energiegehalt des Signals. Das gesamte Frequenzspektrum oberhalb der Grenzfrequenz wird in die phasenbezogene Darstellung überführt. Die Größe des Frequenzspektrums variiert in Abhängigkeit der genutzten Sensorart, wodurch die Empfindlichkeit der Messung variiert. Praktische Messungen erfolgen in einem Frequenzbereich von z.B. 0,3 GHz bis 2 GHz. Die Auswertung der Signale erfolgt phasenbezogen im Zeitbereich [Bre\_04, Neu\_00, Kra\_02]. Neben der Schmal- und Breitbandmessung existieren weitere Variationen. So können mehrere schmal- oder mittelbandige Bereiche analysiert und in der phasenbezogenen Darstellung überlagert werden. Diese stammen dabei mitunter von unterschiedlichen, an derselben GIS angebrachten Sensoren. Im Vergleich zur „konventionellen“ Schmalbandmessung werden größere Bandbreiten verwendet. Diese liegen bei der mittelbandigen Messung z.B. im Bereich von 50 MHz bis 150 MHz [Hoe\_11]. Die Möglichkeiten dieser Frequenzanalyse sind vom verwendeten Messsystem abhängig.

Die Auswertung der erfassten Signale gleicht jener der konventionellen TE-Messung. So verursacht jede Fehlstelle ein spezifisches Muster, wodurch die Art der Fehlstelle identifiziert werden kann. Es treten Ähnlichkeiten zu den Mustern der konventionellen Auswertung auf. Die Analyse kann sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich erfolgen. Genutzt werden dabei phasenbezogene Auswertungen und Frequenzspektren, welche beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt sind [Bre\_04, Neu\_00, Küc\_09].

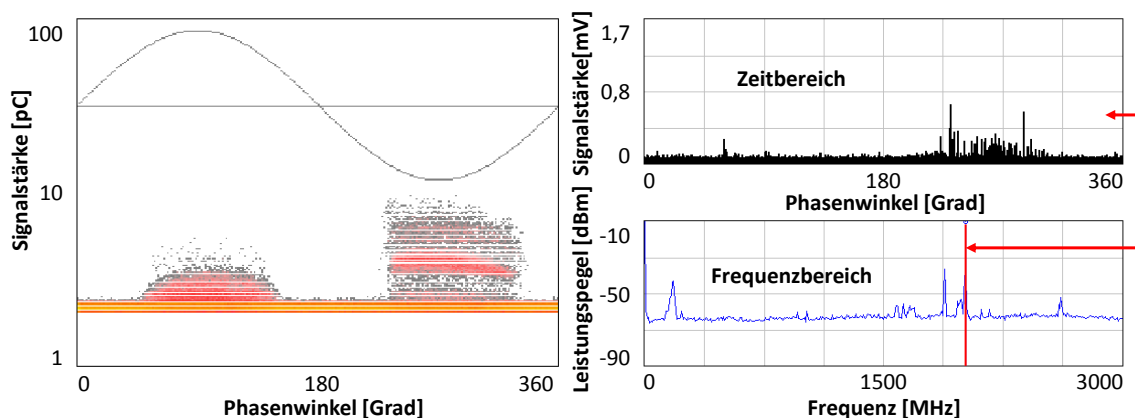


Abbildung 3: UHF-TE-Messung: Breitband- (links) und Schmalbandmessung (rechts)

Aufgrund von Signal- und Dämpfungseigenschaften ist die normgerechte Kalibrierung [DIN\_01] der UHF-TE-Diagnostik nicht möglich, da die scheinbare Ladung, welche durch die konventionelle TE-Messung ermittelt wird, nicht gemessen werden kann. Hingegen werden relative Signalstärken erfasst, die statisch in einen Anzeigewert in der Einheit  $pC$  umgerechnet werden können. Zur Ermittlung der unteren Nachweisgrenze kann ein Empfindlichkeitsnachweis durchgeführt werden. Hierbei wird ein im Labor definierter TE-Impuls in das zu untersuchende Schaltfeld eingebracht und mit den installierten UHF-Sensoren erfasst [Boe\_99, Kra\_02]. Darüber hinaus können solche Impulse zur Abstimmung des TE-Messsystems genutzt werden. Die fehlende Möglichkeit der Kalibrierung ist unabhängig von der Fähigkeit Isolationsfehler zu erkennen. Ist ein Teilentladungssignal energieintensiver als das vom Sensor aufgenommene Grundrauschen, so wird ein phasenbezogenes Fehlermuster in Abhängigkeit der Fehlerart erzeugt.

Die UHF-TE-Messung ist nicht-invasiv an GIS anwendbar, wobei die Detektierbarkeit von Fehlern vom Messsystem abhängt und folglich spezifisch bestimmt werden muss. Theoretisch können alle TE-Fehlerarten detektiert werden. Ein Vergleich der aufgenommenen Muster mit einer umfangreichen Fehlermusterdatenbank, die Fehlermuster von vergleichbaren Untersuchungsobjekten enthält, ermöglicht detailliertere Rückschlüsse zur vorhandenen Fehlerart (vgl. Anhang 8.5). Durch die verschiedenen Sensorarten wird die Anwendbarkeit erweitert, so dass unterschiedliche Anlagentypen untersucht werden können. Allgemein wird das Anwendungspotential dieser Bewertungsmethode für ein bestehendes Anlagenkollektiv maßgeblich durch das Vorhandensein geeigneter Anbringungspunkte für Sensoren bestimmt.

### 2.2.1.3 Akustische Teilentladungsmessung

Das Grundprinzip dieser Bewertungsmethode basiert auf der Erfassung akustischer Signale, welche durch Teilentladungen verursacht werden. Zur Detektion werden Sensoren verwendet, die an jedem Punkt der äußeren Kapselung der GIS angebracht werden können, so dass die Bewertungsmethode nicht-invasiv während des Betriebs angewendet werden kann.

Die akustischen Signale werden durch verschiedene physikalische Vorgänge erzeugt. So verursachen z.B. freie Partikel mechanische Wellen beim Auftreffen auf die Kapselung. Darüber hinaus entstehen z.B. bei Teilentladungen durch feste Spitzen auf dem Hochspannungspotential des Innenleiters Druckwellen im  $SF_6$ -Gas infolge der schnellen Erwärmung durch den Entladungsprozess, welche über die Gasstrecke auf die Kapselung übertragen werden. Das  $SF_6$ -Gas wirkt als Tiefpassfilter, so dass besonders die Signale mit hohen Frequenzen einer starken Dämpfung unterliegen. Während im Gas Druck- bzw. Longitudinalwellen ausbreitungsfähig sind, können sich im reinen Material der metallischen Kapselung zusätzlich Transversalwellen ausbreiten. In beiden reinen Medien können die Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten der akustischen Wellen im relevanten Frequenzbereich für Teilentladungen als konstant angesehen werden, so dass die Dispersion vernachlässigt wird [Lun\_00, Lun\_92].

Im Gas können Ausbreitungsgeschwindigkeiten von ca.  $150\text{ m/s}$  erreicht werden. Die Transversal- und Longitudinalwellen in der metallischen Kapselung besitzen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, welche materialabhängig sind. Sie unterscheiden sich um den Faktor zwei im Bereich von ca.  $3000\text{ m/s}$  (Transversalwelle) bis  $6000\text{ m/s}$  (Longitudinalwelle). Da das Material der metallischen Kapselung nicht einheitlich und endlich ist, treten weitere Wellenmoden, wie z.B. sogenannte Biegewellen, auf, bei denen sich die Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten material- und frequenzabhängig unterscheiden.

An jeder Stoßstelle, d.h. bei jeder Änderung der akustischen Impedanz, welche durch das Material und die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt wird, werden die akustischen Signale teilweise reflektiert, wobei nur ein Teil der ursprünglichen Signalenergie weitergeleitet wird [Lun\_00, Lun\_92]. Für den Übergang akustischer Signale vom  $\text{SF}_6$ -Gas in die metallische Kapselung ist die Übereinstimmung der Wellenlängen von Longitudinalwelle des Gases und ausbreitungsfähigen Wellen in der Kapselung, die sogenannte Koinzidenz, erforderlich. Der Übergang ist demnach abhängig von der Frequenz des auf die Kapselung auftreffenden Signals sowie dem zugehörigen Auftreffwinkel. Hochfrequente Signale werden bei steilen, niederfrequente Signale bei flachen Auftreffwinkeln übertragen. Ist eine Übereinstimmung der Winkel, d.h. die Koinzidenz, nicht gegeben oder sind die zugehörigen akustischen Impedanzen der Materialien sehr unterschiedlich, so kann nur ein Bruchteil der ursprünglichen Signalenergie übertragen werden [Lun\_90, Lun\_92, Lun\_00].

Die Detektionsfähigkeit der akustischen TE-Messung variiert folglich in Abhängigkeit der Fehlerart bzw. des Fehlerorts. Prinzipiell ist hierfür der Weg der akustischen Signale vom Ort der Erzeugung zum Sensor ursächlich, welcher in Abbildung 4 dargestellt ist.

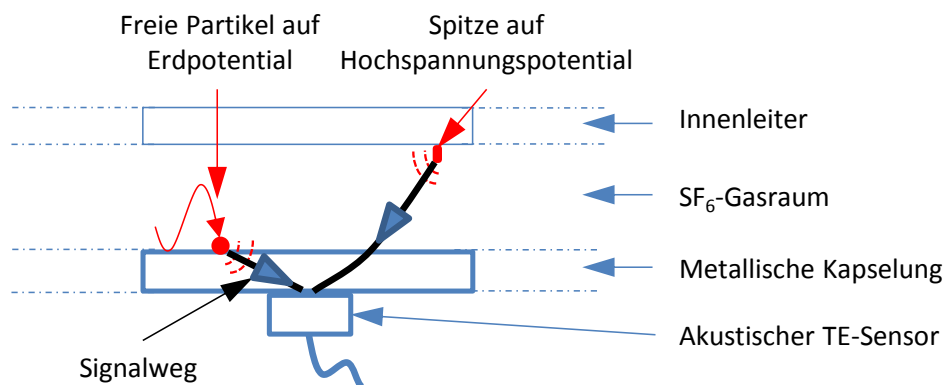


Abbildung 4: Akustische Signalwege von Fehlstellen in Anlehnung an [Sch\_06]

Während die Signalwege von freien Partikeln, die sich direkt auf dem Erdpotential befinden, kurz sind, sind jene von Spitzen auf dem Hochspannungspotential verhältnismäßig lang. Da die Signale einer Dämpfung unterliegen, wirken sich die Länge der Signalwege sowie die durchdrungenen Medien und Stoßstellen direkt auf die Detektionsfähigkeit aus. Während die Dämpfung im  $\text{SF}_6$ -Gas, welche besonders bei Spitzen auf Hochspannungspotential relevant ist, verhältnismäßig groß ist, leitet die metallische Kapselung das Signal gut zum Sensor.

Weitere Stoßstellen für die akustischen Signale entstehen durch den modularen Aufbau von GIS. Die verschiedenen Module sind durch Schottisolatoren gasdicht voneinander getrennt, wodurch sowohl zwischen den Gasräumen als auch zwischen den verschiedenen Gehäusekomponenten Barrieren für die akustischen Signale entstehen, die eine Dämpfung verursachen. Die modulübergreifende Detektierbarkeit akustischer Signale von Teilentladungen wird hierdurch erschwert [Lun\_92, Lun\_00].

Die komplexen akustischen Signale einer TE werden mit Schallemissions- oder Beschleunigungssensoren erfasst. Jede Fehlstelle erzeugt ein spezifisches Signalmuster, welches in der phasenbezogenen Darstellung analysiert werden kann – analog zu den zuvor vorgestellten Methoden [Boe\_99]. Abbildung 5 zeigt beispielhaft ein akustisches TE-Pattern einer Spitze auf Hochspannungspotential im Vergleich zu einer Messung ohne installierten Fehler, wobei die TE-Impulse phasenbezogen dargestellt werden.

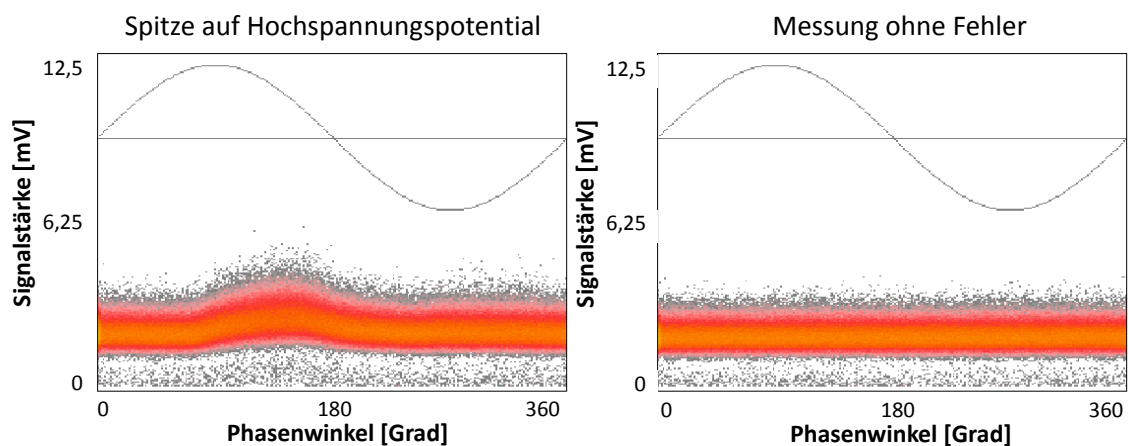


Abbildung 5: Akustische TE-Pattern einer Spitze auf Hochspannungspotential (links) und der Messung ohne Fehler (rechts)

Das Pattern der Spitze auf Hochspannungspotential zeigt zwischen dem Maximum der ersten Halbwelle und dem Nulldurchgang höhere Signale als das Pattern ohne installierten Fehler, wodurch ein Hinweis auf das Vorhandensein eines Fehlers erzeugt wird. Wird kein Fehler installiert, ergeben sich phasenunabhängige Signale mit einer konstanten, niedrigen Signalstärke.

Bei einzelnen Partikeln kann neben der Aufnahme der TE-Muster zusätzlich die Flugzeit bestimmt werden, wodurch weitere Auswertungen zur Sprunghöhe sowie den Eigenschaften von Partikeln ermöglicht werden. Hierbei werden die TE-Signale in Bezug zur Aufnahmezeit analysiert. Sind mehrere Partikel in der GIS vorhanden, so kann diese Auswertung nicht angewendet werden, da die Signale der verschiedenen Partikel sich überlagern und nicht eindeutig bestimmt werden können [Lun\_00, Sch\_13, Lun\_01]. Für praktische Anwendungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist diese Auswertung nicht erforderlich, da die Partikel bereits durch das TE-Muster erkannt werden.

Ein direkter Vergleich von akustischer und konventioneller TE-Messung ist nicht möglich, da die scheinbare Ladung nicht ermittelt werden kann. Zum Nachweis der Detektierbarkeit von Fehlstellen kann hier analog zur UHF-TE-Messung ein Empfindlichkeitsnachweis durchgeführt werden [Boe\_99]. Da das Messsystem relative Signalstärken erfasst, kann das aufgenommene Muster mit einer Datenbank abgeglichen werden, die aufgezeichnete Fehlermuster von vergleichbaren Untersuchungsobjekten enthält (vgl. Anhänge 8.4 und 8.5). Hierdurch werden weitere Rückschlüsse auf das Ausmaß des Fehlers ermöglicht.

Die akustischen TE-Messungen sind nicht-invasiv und können im Gegensatz zu UHF-TE-Messungen auch bei älteren Anlagen durchgeführt werden, welche weder über integrierte noch über die Möglichkeit des Anbringens externer UHF-Sensoren verfügen. Somit kann die Bewertungsmethode universell an verschiedenen GIS-Typen angewendet werden.

#### 2.2.1.4 Eingrenzung des Isolationsfehlerorts

Die Sensoren der akustischen und der UHF-Teilentladungsdetektion können zur örtlichen Eingrenzung von Isolationsfehlern verwendet werden. Verschiedene Vorgehensweisen sind möglich, wie z.B. die Bestimmung des Laufzeitunterschieds von zwei teilentladungsbehafteten Signalen gleichartiger Sensoren. Die zugehörige Auswertung kann im Zeit- oder im Frequenzbereich erfolgen. Da die Teilentladungssignale der unkonventionellen TE-Messungen einer Dämpfung unterliegen, kann die Analyse der Signalamplituden ebenso genutzt werden. Abbildung 6 veranschaulicht das Prinzip der Eingrenzung des Fehlerorts durch die Bestimmung von Laufzeitunterschieden.

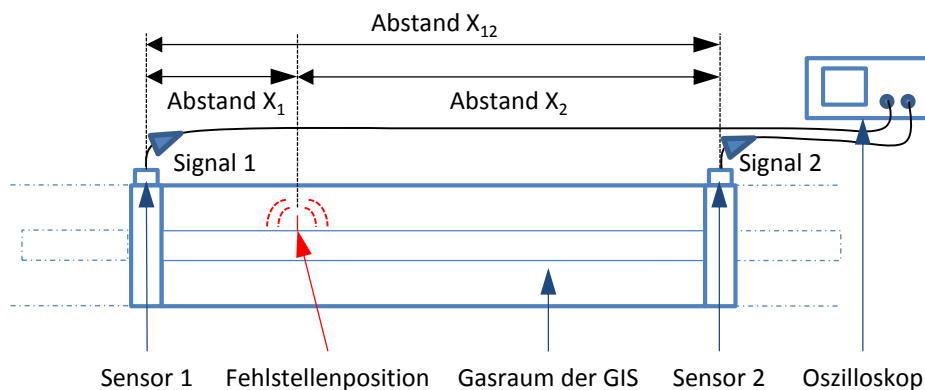


Abbildung 6: Prinzip der Laufzeitmessung in Anlehnung an [HRS\_06]

Die Signale von zwei identischen akustischen oder UHF-Sensoren, die an unterschiedlichen Positionen auf der GIS angebracht sind, werden durch ein digitales Oszilloskop erfasst. Der Laufzeitunterschied  $\Delta t$  wird aus den unterschiedlichen Ankunftszeiten der Signale bestimmt. Mit Gleichung (2.3) kann die Entfernung zum ersten Sensor ermittelt werden, wodurch die lokale Eingrenzung des Fehlerorts ermöglicht wird [HRS\_06]:

$$X_1 = \frac{X_{12} - (X_2 - X_1)}{2} = \frac{X_{12} - c_0 \cdot \Delta t}{2} \quad (2.3)$$



Eine Eingangsgröße stellt der bekannte Abstand  $X_{12}$  der Sensoren zueinander dar. Darüber hinaus wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  benötigt. Bei der Verwendung von UHF-Sensoren liegt diese im Bereich von ca.  $0,3 \text{ m/ns}$  [Hoe\_04, HRS\_06, Ten\_06, Liu\_09]. Die akustische Ausbreitungsgeschwindigkeit befindet sich im Bereich von ca.  $150 \text{ m/s}$  im Gas und mehrerer  $1.000 \text{ m/s}$  in der metallischen Kapselung [Lun\_92, Lun\_00, Mar\_06, Sch\_06]. Die resultierende Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals variiert in Abhängigkeit der Signalwege bzw. der ausbreitungsfähigen Wellenarten in der metallischen Kapselung (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Während der praktischen Anwendung kann die Erfassung des Laufzeitunterschieds mittels Oszilloskop erschwert sein, so dass dieses Verfahren nicht generell anwendbar ist. Zur Anwendbarkeit sind häufig wiederkehrende, ähnliche Signale erforderlich. Die zu ermittelnden Laufzeitunterschiede befinden sich im Bereich weniger Nanosekunden (UHF-TE-Messung), so dass die zugehörige Messtechnik ausreichend sensibel sein muss [HRS\_06, Ten\_06].

Eine weitere Bewertungsmethode nutzt die in GIS auftretende Signaldämpfung und analysiert die Amplituden der Signale von akustischen oder UHF-Sensoren. Zur lokalen Eingrenzung des Fehlerorts wird segmentweise der Bereich gesucht, der die höchste Signalamplitude aufweist. Schwierigkeiten können durch Reflexionen bzw. Signalveränderungen durch den komplexen inneren Aufbau einer GIS auftreten [Lun\_00]. Hinzu kommen Einschränkungen durch vorhandene Ankopplungspunkte für Sensoren, welche die UHF-TE-Messung betreffen. Hochspannungs-GIS – d.h. die Schaltfelder des zu untersuchenden Anlagenkollektivs gemäß Abschnitt 4.2.1 – verfügen über wenige Positionierungsmöglichkeiten, so dass die Teilentladungssignale zur Anwendung des Amplitudenvergleichs bei der UHF-TE-Messung verhältnismäßig weit entfernt vom Fehlerort detektierbar sein müssen.

Generell eignet sich die Bestimmung des Laufzeitunterschieds von Signalen der akustischen oder UHF-Sensoren zur Eingrenzung des Fehlerorts. Die Anwendbarkeit wird aber maßgeblich durch die Signaleigenschaften bestimmt, so dass Fehlinterpretationen nicht auszuschließen sind. Der akustische Amplitudenvergleich zeigt – unter der Voraussetzung, dass die Teilentladung akustisch detektiert werden kann – den größeren Anwendungsbereich auf, da die Sensoren an jedem Punkt der metallischen Kapselung positioniert werden können und die zugehörige Auswertung unkompliziert durchgeführt werden kann.

### **2.2.1.5 SF<sub>6</sub>-Gasanalyse**

Die Gasanalyse fasst in dieser Arbeit die Untersuchung von zwei wesentlichen Aspekten zusammen: die Dichtheitsprüfung und die Überprüfung der Gasqualität. Im Rahmen der Dichtheitsprüfung wird die GIS auf Leckagen untersucht, welche u.a. durch Korrosion oder Degradation von Dichtungen entstehen können. Sowohl der SF<sub>6</sub>-Gasinnendruck der Anlagen als auch die Dichte des Gases können als Indikator genutzt werden [Gra\_09].

Die Analyse der Gasqualität strebt die Identifikation von Zersetzungsprodukten an, welche z.B. durch Wärmeeintrag oder Entladungen innerhalb der GIS entstehen können [Gre\_01], bzw. die Überprüfung der Einhaltung der vorgeschriebenen Gasqualität [DIN\_05]. Hierzu werden der GIS Gasproben entnommen und analysiert, wobei diese nicht in die Umwelt emittiert werden dürfen [VEU\_06, Gre\_01]. Das Gas wird i.d.R. auf folgende Indikatoren untersucht: SF<sub>6</sub>-Gasvolumenanteil, Mineralölgehalt sowie Feuchte-, SO<sub>2</sub>-, SOF<sub>2</sub>-, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-, CF<sub>4</sub>- und HF-Konzentration. Hierzu können Messgeräte wie Prüfröhrchen, Hygrometer, Dichtemesser sowie die Verfahren IR-Spektroskopie, Gas- oder Ionenchromatographie verwendet werden [DIN\_05, Kur\_02]. Weiterhin sind Kombigeräte verfügbar, welche eine Beurteilung aller relevanten Indikatoren mit einem Gerät ermöglichen.

Mit der SF<sub>6</sub>-Gasanalyse wird generell das Vorhandensein von Nebenprodukten sowie eines ausreichenden SF<sub>6</sub>-Anteils im SF<sub>6</sub>-Gas – d.h. die Einhaltung der Grenzwerte – beurteilt. Da solche Nebenprodukte auch durch Teilentladungsvorgänge entstehen, können sie zusätzliche Indikatoren hierfür sein. Sie können die Teilentladungsvorgänge an einem bestehenden Anlagenkollektiv aufgrund zu geringer Sensitivität jedoch nicht eigenständig bewerten [Zen\_14, Wei\_13, Tan\_12].

## **2.2.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit**

Im Folgenden werden die Bewertungsmethoden der Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit dargestellt. Sie konzentrieren sich auf die Detektion von Widerstandserhöhungen bzw. deren Auswirkungen.

### **2.2.2.1 Thermografie**

Jeder Körper kann in Abhängigkeit seiner Temperatur bzw. Eigenschaften und den Umgebungsbedingungen Wärme aufnehmen, abgeben sowie durch sich hindurch leiten. Resultierende Oberflächentemperaturen können durch die hierbei vom Körper abgegebene Strahlung visualisiert werden. Die zugehörigen Strahlungsprozesse werden Emission, Reflexion und Transmission genannt. Für den Einsatz der Thermografie an elektrischen Anlagen kann die Transmission vernachlässigt werden, da sie nicht sichtbar gemacht werden kann. Durch Emission und Reflexion verursachte Strahlung kann dagegen detektiert werden. Die Infrarotthermografie (IR) visualisiert diese und ermöglicht somit Rückschlüsse auf Oberflächentemperaturen bzw. Temperaturverteilungen von elektrischen Anlagen [Hub\_09].

Wärmeströme in GIS entstehen neben den stromabhängigen Wirbelstromverlusten der metallischen Kapselung durch die Verluste der elektrischen Leitung [Kar\_91, Böh\_05, Scl\_11]. An GIS kann die hieraus resultierende Oberflächentemperatur bzw. -verteilung der metallischen Kapselung erfasst werden. Da sie nicht der Ursprungsort der interessierenden, durch ohmsche Verluste der Leiterbahn verursachten Wärmeentwicklung ist, erfolgt eine indirekte Messung, die Rückschlüsse auf den inneren Zustand der Anlage zulässt [PKJ\_04].

Bei gleichbleibender Strombelastung einer fehlerfreien GIS entsteht infolge des Widerstands des Innenleiters ein konstanter Wärmestrom nach Gleichung (2.4), der vom Innenleiter nach außen transportiert wird [Gra\_09]:

$$\dot{Q}_V = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot L}{A_L} \quad (2.4)$$

Dieser ist abhängig vom Strom  $I$ , dem spezifischen Widerstand  $\rho$ , die Querschnittsfläche  $A_L$  des Innenleiters sowie der Länge des betrachteten Leiterelements  $L$ . Der Skin-Effekt wird in dieser Gleichung nicht berücksichtigt [Gra\_09]. Aufgrund der fehlerfreien Anordnung und einem damit verbundenen annähernd identischen Widerstand entlang der Leiterbahn der GIS, wird an jeder Stelle des Innenleiters, d.h. jedem Leiterstück der Länge  $L$ , ein annähernd identischer Wärmestrom in radialer Richtung an die Umgebung abgegeben, wodurch sich nach ausreichend großer Zeit und gleichbleibenden Umweltbedingungen ein thermisches Gleichgewicht einstellt, so dass eine konstante Temperaturverteilung auf der Oberfläche der GIS entsteht. In Abhängigkeit der Verlustleistung – hier des Leiterstroms – wird eine grundlegende Temperaturerhöhung der Kapselung gegenüber der Umgebung erzeugt. Während konstruktive Gegebenheiten wie z.B. auf der metallischen Kapselung angebrachte Antriebskomponenten die resultierende Temperaturverteilung beeinflussen, nimmt die spezifische Temperaturverteilung identischer Bauarten – d.h. unterschiedlicher Phasen eines Schaltfelds – gleiche Ausmaße an. Abbildung 7 visualisiert den prinzipiellen Wärmeübergang vom Innenleiter an die Umgebung.

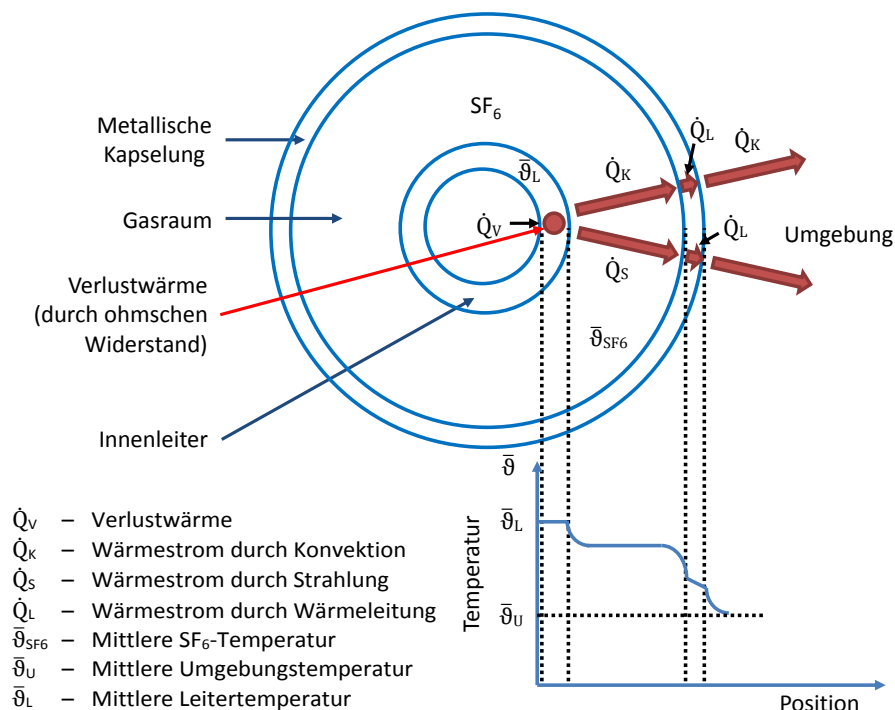


Abbildung 7: Prinzipieller Wärmeübergang einer einphasig gekapselten GIS in Anlehnung an [Sco\_14]

In radialer Richtung wird die Verlustwärme ( $\dot{Q}_V$ ), ausgehend von einem erhitzten Leiter mit der mittleren Temperatur  $\bar{\vartheta}_L$ , durch Konvektion ( $\dot{Q}_K$ ) und Strahlung ( $\dot{Q}_S$ ) an die metallische Kapselung übertragen und durch diese hindurch geleitet.

Die konvektive Wärmeübertragung findet aufgrund von Temperatur- und damit verbundenen Dichteunterschieden innerhalb des SF<sub>6</sub>-Gases statt. Die mittlere SF<sub>6</sub>-Gastemperatur wird mit  $\bar{\vartheta}_{\text{SF}_6}$  bezeichnet. Die Strahlung bezeichnet den Teil der Wärmeübertragung, der nicht an einen Stoff gebunden ist. Dieser Wärmestrom wird durch elektromagnetische Wellen zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen, d.h. zwischen der Oberfläche des Innenleiters und der inneren Oberfläche der Innenseite der Kapselung, übertragen. Innerhalb der metallischen Kapselung wird die Wärme infolge des Temperaturgradienten von der Innen- zur Außenseite durch die sogenannte Wärmeleitung ( $\dot{Q}_L$ ) übertragen. Von der Außenseite der Kapselung wird der Wärmestrom durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben, welche die mittlere Temperatur  $\bar{\vartheta}_U$  hat [Böc\_04, Gra\_09, Böh\_05, Pol\_07, Wag\_11].

Durch die in Abschnitt 2.1.2 aufgezeigten Einflüsse entstehen erhöhte ohmsche Kontaktwiderstände, welche zusätzliche Wärmequellen auf dem Innenleiter erzeugen. Die zusätzliche Verlustwärmequelle befindet sich ausschließlich an Verbindungsstellen des Innenleiters, so dass sie räumlich auf dessen Länge begrenzt ist. Es findet eine Überlagerung zu der zuvor beschriebenen Wärmeübertragung statt. Die zusätzliche Verlustwärme wird sowohl in radialer Richtung als auch längs des Innenleiters abgegeben, wobei sie auf das SF<sub>6</sub>-Gas übertragen wird [Gra\_09, Böh\_05]. Der spezifische Aufbau einer GIS ermöglicht nun die Übertragung der Wärme vom Gasraum durch den Schottisolator auf ein benachbartes Modul oder über die metallische Kapselung an die Umwelt. Da die spezifische Wärmeleitfähigkeit der Schottisolatoren deutlich geringer ist als jene der Kapselung – je nach Material unterscheidet sich der Wert bis zu einem Faktor von 100 – stellen die Schottisolatoren einen verhältnismäßig großen thermischen Widerstand dar und damit eine gute Abgrenzung zur Eingrenzung des Fehlerorts. Demnach wird die Wärme vorrangig über die Kapselung des betroffenen Gasraums an die Umgebung abgegeben, wodurch sich dessen Oberflächentemperaturverteilung im Vergleich zur fehlerfreien Anordnung ändert. Mit ausreichend empfindlicher Messtechnik kann folglich durch die Analyse der Oberflächentemperatur und den Vergleich mit baugleichen und fehlerfreien Bauteilen ein Rückschluss auf das Ausmaß des Fehlers ermöglicht werden.

Thermische Bewertungsmethoden werden bereits umfangreich zur Zustandsbewertung von elektrischen Anlagen eingesetzt [Bee\_12, Hod\_09, PNS\_96, Sie\_09, Tak\_86]. In Bezug auf GIS sind sie bislang wenig verbreitet.

Mit einer IR-Thermografie-Kamera kann die Oberflächentemperaturverteilung einer GIS schnell erfasst werden, wobei eine Vielzahl von Messpunkten integriert wird. Die Bewertungsmethode Thermografie kann die Zustandsbewertung von GIS somit unkompliziert unterstützen, wenn die Wärmeentwicklung durch die eingangs beschriebenen Effekte ausreichend groß ist und hierdurch Temperaturunterschiede in der Oberflächentemperaturverteilung der metallischen Kapselung von GIS entstehen. Die zugehörige Sensitivität wird in den Laboruntersuchungen ermittelt (vgl. Abschnitt 2.3.3.2).

### 2.2.2.2 RFID-Thermoobservation

Die Sensoren der Thermoobservation arbeiten auf Basis der Radio-Frequency-Identification-Technik (RFID). Die RFID-Thermoobservation ist analog zur Thermografie eine indirekte, thermische Bewertungsmethode, so dass die theoretischen Grundlagen identisch sind. Zur Bestimmung der Temperaturverteilung werden passive Temperatursensoren genutzt, deren Messwerte periodisch, berührungslos via RFID-Technik abgefragt werden. Sie können auf jedem Punkt der metallischen Kapselung angebracht werden und bilden jeweils einen Messpunkt, so dass eine Temperaturverteilung durch die Nutzung mehrerer Sensoren bestimmt wird. Die Bewertungsmethode ist nicht-invasiv, wobei das Messsystem aus den spezifischen Sensoren sowie einer Antennen- und Auswerteeinheit besteht. Die Antenne dient simultan als Sender und Empfänger, so dass hierdurch der passive Sensor mit Energie versorgt wird [Ele\_12].

Diese Bewertungsmethode erfasst analog zur Thermografie die Oberflächentemperaturverteilung der GIS. Der Aufwand zur Erzeugung einer Vielzahl von Messpunkten ist jedoch im direkten Vergleich deutlich höher. Aktuell kann das volle Potential dieser Bewertungsmethode durch direkte Temperaturmessungen auf dem Innenleiter nicht genutzt werden, da das Anbringen der Sensoren auf dem Innenleiter vor dem Hintergrund des Weiterentwicklungsbedarfs und des wirtschaftlichen Aufwands für ein aktuell betriebenes GIS-Kollektiv nicht sinnvoll ist. So würden die Sensoren in der aktuellen Bauform z.B. die Isolationsfestigkeit reduzieren. Die direkte Temperaturmessung auf dem Innenleiter mit diesen Sensoren wird jedoch für die Stromversuche der Laboruntersuchungen genutzt.

### 2.2.2.3 Spannungsfallmessung

Die Spannungsfallmessung dient der direkten Erfassung des Widerstands einer Leiterbahn. Gemäß dem ohmschen Gesetz wird ein bekannter Strom in das System eingeprägt und aus der Messung des Spannungsabfalls entlang des Untersuchungsobjekts der elektrische Widerstand der Strombahn berechnet. Zur Anwendung dieser Bewertungsmethode an GIS ist ein direkter Kontakt zum Innenleiter notwendig, was i.d.R. mit der Öffnung von Gasräumen einhergeht. Verfügt die GIS über isoliert aufgestellte Erdungsschalter, so kann auch hierüber eine Verbindung zum Innenleiter ohne eine Öffnung der metallischen Kapselung hergestellt werden. Analog können Durchführungen genutzt werden. Beide Varianten bedingen die Freischaltung der GIS sowie primärtechnische Arbeiten zur Adaption der Messtechnik.

Je nach Zugänglichkeit der GIS unterscheidet sich die Länge der gemessenen Widerstandsbahn. Entsprechend variiert die Anzahl der in das Messergebnis einfließenden Kontaktwiderstände. Detaillierte Messergebnisse einzelner Widerstände erfordern einen hohen Aufwand, so dass i.d.R. die Summe der Widerstände mehrerer in Reihe geschalteter Kontaktelemente sowie des Materials ermittelt wird.

Weisen solche Messungen Auffälligkeiten auf, so kann der Fehlerort sowie die Verteilung der Widerstandserhöhung auf die in die Messung einbezogenen Kontaktstellen nicht eindeutig bestimmt werden, wodurch Fehlinterpretationen möglich sind.

Die Bewertungsmethode ist invasiv und wird im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen eingesetzt, wodurch Eingangsdaten für die Zustandsbewertung erzeugt werden. Für die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Gesamtsystematik zur nicht-invasiven Zustandsbewertung ist diese Bewertungsmethode in erster Instanz nicht geeignet. Liegen Bewertungsergebnisse aus Instandhaltungsmaßnahmen vor, so sollen diese jedoch zur Unterstützung der Zustandsaussage berücksichtigt werden.

### 2.2.3 Bewertungskategorie mechanische Funktion

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick der integrierten messtechnischen Bewertungsmethoden der Bewertungskategorie mechanische Funktion. Sie beinhaltet alle Bewertungsmethoden, die vorrangig der Bewertung der Schaltgeräte und der damit verbundenen Komponenten dienen. Sie unterscheiden sich in Abhängigkeit der eingesetzten Antriebs- bzw. Schaltgeräteart. Während z.B. das dynamische Kontaktsystem bei allen Leistungsschalterarten durch die digitale oder dynamische Schaltzeitmessung bewertet werden kann, unterscheidet sich die Bewertung der Antriebskomponenten je nach verwendetem Antriebssystem: Hydraulik, Federspeicher oder Druckluft. Bei Trenn- und Erdungsschaltern werden dynamische Messungen des Kontaktwegs nicht durchgeführt. Hier wird z.B. die Stromaufnahme des Antriebsmotors bewertet.

Generell werden bei Leistungsschaltern die Auslöser, das Energieübertragungssystem, der Energiespeicher, das Energiebereitstellungssystem sowie das dynamische Kontaktsystem bewertet. Bei Trenn- und Erdungsschaltern sind dies das Energieübertragungssystem, der Energiespeicher und das Energiebereitstellungssystem. Folgende messtechnische Bewertungsmethoden werden angewendet [PNS\_96, HaL\_12]:

- Auslöser: Analyse der Mindestbetätigungsspannung, Widerstandsanalyse der Auslöse-  
spule, Strom-Zeit-Analyse
- Energieübertragungssystem: Weg-Zeit-Analyse, Analyse des Hydrauliksystems
- Energiespeicher: Motorstromanalyse, Druckanalyse
- Energiebereitstellungssystem: Analyse der Aufzugszeit, Strom-Zeit-Analyse

Neben der reinen Bewertung der Schaltgeräteantriebe werden die indirekt hiermit verbundenen Komponenten, d.h. das dynamische Kontaktsystem, mit der Messtechnik dieser Bewertungskategorie analysiert. Im Einzelnen werden die Gleichläufe bei Ein- und Ausschaltvorgängen, Pnelleigenschaften sowie die Länge der Abbrandkontakte beurteilt, wozu digitale und dynamische Schaltzeitmessungen genutzt werden [PNS\_96, Zur\_15, Nen\_15].

Die Bewertungsmethoden dieser Bewertungskategorie sind i.d.R. minimal-invasiv, so dass eine Öffnung der metallischen Kapselung nicht erforderlich ist. Minimale Eingriffe in den Betrieb ergeben sich durch Schalthandlungen, welche der Messwertaufnahme dienen. Eine Freischaltung ist i.d.R. nicht erforderlich.

Die Bewertungskategorie mechanische Funktion wird im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher betrachtet, da sie in den Laboruntersuchungen der vorliegenden Arbeit nicht analysiert wird. Das in die entwickelte Gesamtsystematik integrierte Wissen über die zugehörigen Bewertungsmethoden wurde vom Projektpartner bereitgestellt, der bezüglich dieser Bewertungskategorie über umfangreiche Kenntnisse und langjährige Betriebserfahrung verfügt [Küp\_14, Zur\_15]. Die zugehörigen Bewertungsmethoden werden in einer parallelen Abhandlung ausführlich betrachtet.

## 2.3 Laboruntersuchungen

Nachdem die Bewertungsmethoden dargestellt wurden, sollen nun die Laboruntersuchungen thematisiert werden. Diese sind zum Aufbau des „Know-Hows“ für die Anwendung der unkonventionellen Teilentladungsmessung sowie der Thermografie, welche in die Bewertungskategorien Isolation und Stromtragfähigkeit integriert werden, notwendig. Die Ermittlung des Detektionspotentials sowie die Identifikation von Handlungsempfehlungen für den praktischen Einsatz werden vorgestellt. Hierzu werden spezifische Fehlerarten identifiziert, Referenzmuster für die Fehlerarten aufgenommen sowie verschiedenartige Sensoren untersucht. Die Untersuchungen ermöglichen Interpretationen von Feldmessergebnissen zur Fehlerart, zum Fehlerausmaß sowie zur Aussagekraft des Messergebnisses durch den Vergleich mit den im Labor ermittelten Referenzmustern. Sie sind zur Integration dieser Bewertungsmethoden in die Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung (Kapitel 3) ein wesentlicher und notwendiger Baustein [EPaw\_14, E\_Paw15]. Generell verfolgen die Versuchsreihen folgende Ziele:

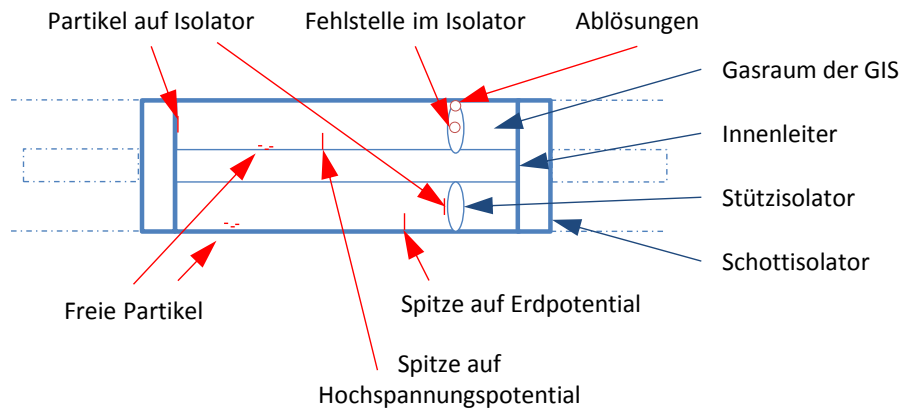
- Untersuchung der Anwendbarkeit,
- Bestimmung der Detektierbarkeit relevanter Fehlstellen und
- Ermittlung der spezifischen Aussagekraft von Bewertungsergebnissen.

### 2.3.1 Fehleridentifikation und Fehlstellenerzeugung

Um die zuvor genannten Ziele erreichen zu können, müssen in einem ersten Schritt die relevanten, realitätsgerechten Fehlerarten identifiziert werden. Den Ausgangspunkt stellen die identifizierten Bewertungskategorien (Abschnitt 2.1) dar, da sie die verschiedenartigen Auswirkungen kategorisieren und die relevanten Fehlerarten innerhalb der Bewertungskategorie identisch sind. Im zweiten Schritt werden zur Untersuchung der spezifischen Detektierbarkeit der zugehörigen Bewertungsmethoden ausgewählte Fehlerarten in einer Laboranlage nachgebildet.

### 2.3.1.1 Bewertungskategorie Isolation

Für die Bewertungskategorie Isolation zeigt Abbildung 8 eine Darstellung typischer Fehlerarten.

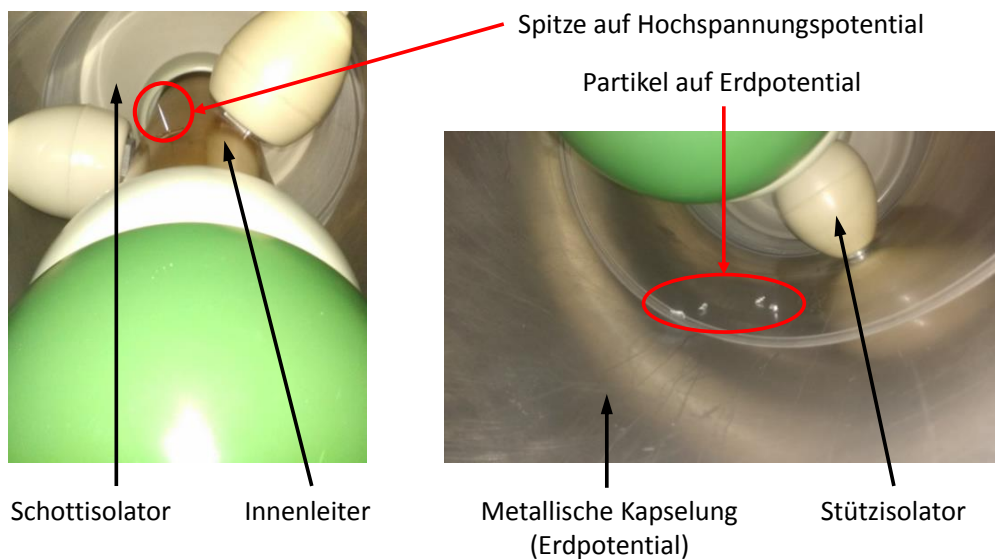


**Abbildung 8: Identifizierte Isolationsfehlerarten in Anlehnung an [Scw\_07]**

Diese bilden die Grundlage für die Konstruktion der Prüfkörper. Die Darstellung bezieht sich auf solche Fehler, die Teilentladungen verursachen [Neu\_06, Gro\_04, Kru\_89]:

- Spitze auf Hochspannungspotential,
- Spitze auf Erdpotential,
- Freie Partikel,
- Partikel auf Isolator,
- Fehlstelle im Isolator und
- Ablösungen.

Die Erzeugung der Fehlstellen wird mit verschiedenen Materialien durchgeführt. Abbildung 9 zeigt beispielhaft zwei nachgebildete Fehlstellen aus den Laboruntersuchungen: Spitze auf Hochspannungspotential und freie Partikel auf Erdpotential.



**Abbildung 9: Nachgebildete Fehlstellen: Spitze auf Hochspannungspotential (links) und freie Partikel auf Erdpotential (rechts)**



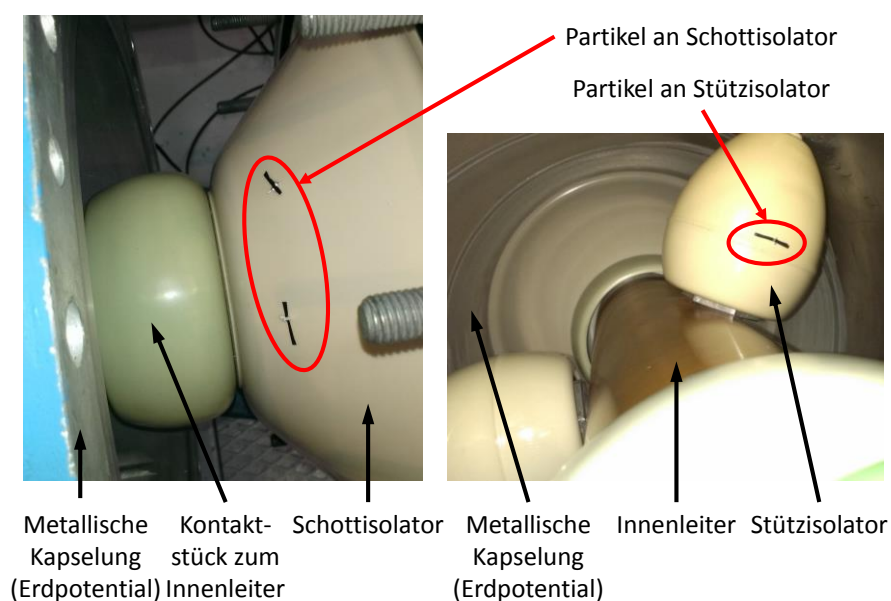
Die Fehlerart „Spitze“ wird durch verschiedenartige Nadeln nachgebildet. Diese unterscheiden sich durch das Material, die Art der Spitze, die Dicke und die Länge. Zur Installation der Spitzen werden leitfähige Verbindungen zum Hochspannungs- bzw. Erdpotential hergestellt ohne dafür den Innenleiter zu verändern bzw. zu beschädigen. Die Spitzen werden mit leitfähigem Klebematerial auf dem Innenleiter fixiert (vgl. Abbildung 9 (links)). In einer weiteren Fehlstellenanordnung werden die Spitzen mit einer speziellen Halterung am Abschluss des Innenleiters installiert. Die Halterung wird in eine feldfreie Öffnung des Abschlusses eingebracht, damit der elektrische Kontakt zum Innenleiter gewährleistet ist ohne das Entladungsverhalten der Spitzen zu verändern.

Für die Fehlerart „freie Partikel“ werden Späne aus einer ausrangierten Leistungsschaltereinheit von verschiedenen Stellen des Kontaktsystems verwendet:

- dem Abbrandkontakt,
- dem Hauptkontakt,
- dem Hilfskontakt,
- der Kontaktbuchse sowie
- den umgebenden Elementen des Kontaktsystems.

Verschiedene Materialien wie Kupfer, Silber, Graphit, Messing und Teflon werden so berücksichtigt. Darüber hinaus werden Aluminium- und Stahlspäne erzeugt. Die Späne werden in den Laborversuchen innerhalb der GIS an verschiedenen Positionen auf Hochspannungs- und Erdpotential installiert. In Abbildung 9 (rechts) werden die freien Partikel direkt unter dem Innenleiter auf Erdpotential positioniert.

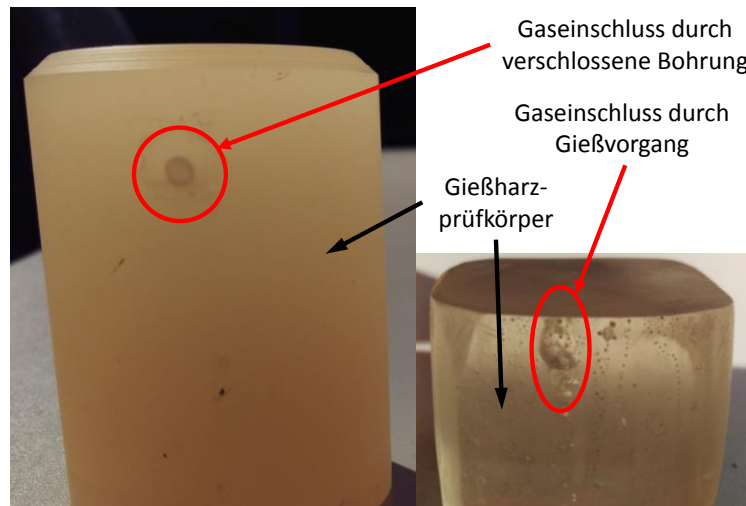
Abbildung 10 zeigt beispielhaft die nachgebildete Fehlstelle „Partikel an Isolator“.



**Abbildung 10: Nachgebildete Fehlstellen: Partikel an Schott- (links) und an Stützisolator (rechts)**

In den Darstellungen werden die Partikel sowohl an Schott- als auch Stützisolatoren montiert. Die zuvor erwähnten Spitzen und freien Partikel werden hierbei zur Nachbildung dieser Fehlerart verwendet. Sie werden sowohl an Stütz- als auch an Schottisolatoren ohne leitfähige Verbindung zum Hochspannungs- oder Erdpotential angebracht.

Abbildung 11 zeigt beispielhaft zwei nachgebildete Fehler in Isolatoren.



**Abbildung 11: Nachgebildete Fehlstelle: Fehlstelle im Isolator**

Fehler in Isolatoren werden durch angefertigte, zylinderförmige Gießharzkörper mit länglichen Gaseinschlüssen simuliert. Die Fehlstellen werden durch Gaseinschlüsse während des Gießvorgangs oder durch nachträglich verschlossene Bohrungen in die Prüfkörper eingebracht. Die hergestellten Prüfkörper werden mit einer Haltevorrichtung zwischen Hochspannungs- und Erdpotential installiert. Für Ablösungen werden Spalte zwischen den eben genannten Prüfkörpern und Erdpotential hergestellt.

Neben Messungen mit den zuvor genannten Fehlerarten werden Messungen ohne installierte Fehler mit der akustischen und der UHF-Teilentladungsmessung durchgeführt, um den Grundstörpegel für beide Bewertungsmethoden zu ermitteln. Diese Messungen werden an verschiedenen Labor- und Feldanlagen durchgeführt.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Fehlerarten werden unter der Verwendung verschiedener Anlagendrucke zwischen 1,5 bar und 3,5 bar sowie bei verschiedenen Spannungen im Intervall von 90 % bis 110 % der relevanten Betriebsspannung von 110 kV untersucht. Sie sind für die Laboruntersuchungen der Bewertungskategorie Isolation, d.h. zur Analyse der unkonventionellen Bewertungsmethoden akustische und UHF-Teilentladungsmessung (schmal- und breitbandig) relevant. Darüber hinaus dienen die Fehlstellen der Untersuchung der Eingrenzung des Isolationsfehlerorts. In diesem Zusammenhang wurden der akustische Amplitudenvergleich sowie Laufzeitmessungen mit akustischen und UHF-Sensoren untersucht.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die im Rahmen der Laboruntersuchungen untersuchten Fehlerarten der Bewertungskategorie Isolation.

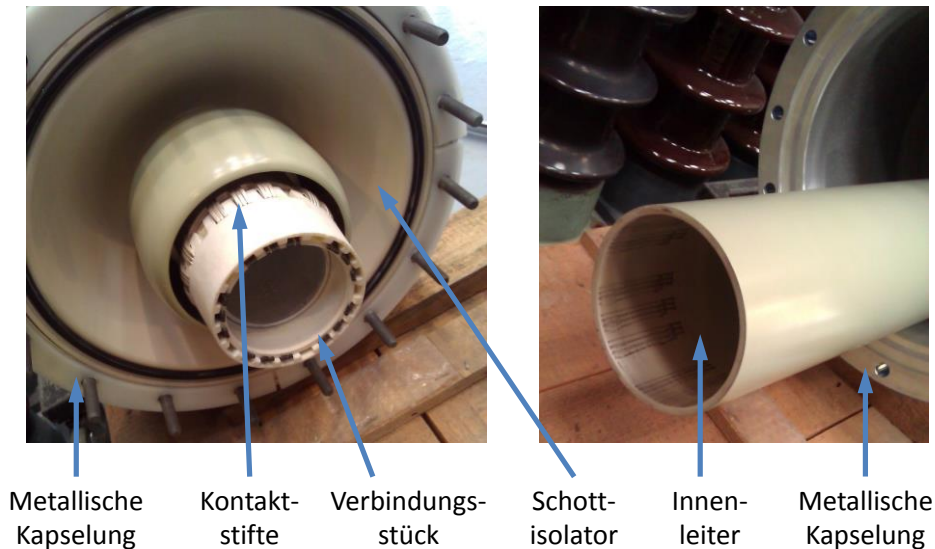
**Tabelle 2: Isolationsfehlerarten und zugehörige Varianten der Laborversuche**

<b>Fehlerart</b>	<b>Varianten</b>
<b>Messung ohne Fehler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung mit akustischer und UHF-TE-Messung</li> <li>• Messung an verschiedenen Labor- und Feldanlagen</li> </ul>
<b>Spitze auf Hochspannungspotential</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerort: Leiter, Halterung am Leiterabschluss</li> <li>• Materialien: Stahl, Messing</li> <li>• Art: Nadeln mit verschiedenen Spitzen</li> <li>• Länge: 5 mm bis 30 mm</li> <li>• Breite: 0,2 mm bis 0,9 mm</li> </ul>
<b>Spitze auf Erdpotential</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerort: Innenseite des metallischen Mantels</li> <li>• Materialien: Stahl, Messing</li> <li>• Art: Nadeln mit verschiedenen Spitzen</li> <li>• Länge: 5 mm bis 30 mm</li> <li>• Breite: 0,2 mm bis 0,9 mm</li> </ul>
<b>Freie Partikel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerort: Erd- und Hochspannungspotential</li> <li>• Materialien: Stahl, Aluminium, Kupfer, Silber, Graphit, Messing, Teflon</li> <li>• Art: Längliche Späne</li> <li>• Längen: 1 mm bis 9 mm</li> <li>• Breite: 1 mm bis 2 mm</li> </ul>
<b>Partikel auf Isolator</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerort: Schott- und Stützisolator</li> <li>• Materialien: Stahl, Aluminium, Kupfer, Silber, Graphit, Messing</li> <li>• Art: Längliche Späne, Nadeln mit verschiedenen Spitzen</li> <li>• Längen: 4 mm bis 30 mm</li> <li>• Breite: 1 mm bis 2 mm</li> </ul>
<b>Fehlstelle im Isolator</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerort: Gießharzprüfkörper in Haltevorrichtung zwischen Hochspannungs- und Erdpotential</li> <li>• Material/Art: Gießharzprüfkörper mit länglichen Gaseinschlüssen</li> <li>• Längen der Gaseinschlüsse: 2 mm bis 7 mm</li> </ul>
<b>Ablösungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlerort: Gießharzprüfkörper in Haltevorrichtung, Luftspalt zwischen Gießharzprüfkörper und Erdpotential</li> <li>• Materialien: Gaseinschluss zwischen Prüfkörper und Potential, abgelöstes Metall im Prüfkörper</li> <li>• Längen der Gaseinschlüsse: 1 mm bis 3 mm</li> </ul>
<b>Fehlerkombinationen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spitze auf Hochspannungspotential und Fehlstelle im Isolator</li> <li>• Spitze auf Hochspannungspotential und Fehlstelle im Isolator sowie Partikel auf Isolator</li> <li>• Freie Partikel und Fehlstelle im Isolator sowie Partikel auf Isolator</li> <li>• Freie Partikel und Spitze auf Hochspannungspotential</li> </ul>

### 2.3.1.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit

Die Isolationsfehler sind als Prüffehlerarten zur Beurteilung der Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit nicht verwendbar. Vielmehr sind Widerstandsänderungen im Verlauf der Leiterbahn relevant.

Solche Widerstandsänderungen können innerhalb einer GIS an den Verbindungsstellen zwischen Leitersegmenten, welche vornehmlich durch Steck- und Schraubverbindungen realisiert sind, und innerhalb von Schaltgeräten an den Kontaktstellen des dynamischen Kontaktsystems auftreten. Abbildung 12 zeigt eine reale Steckverbindung anhand der Kontaktelemente des Innenleiters.

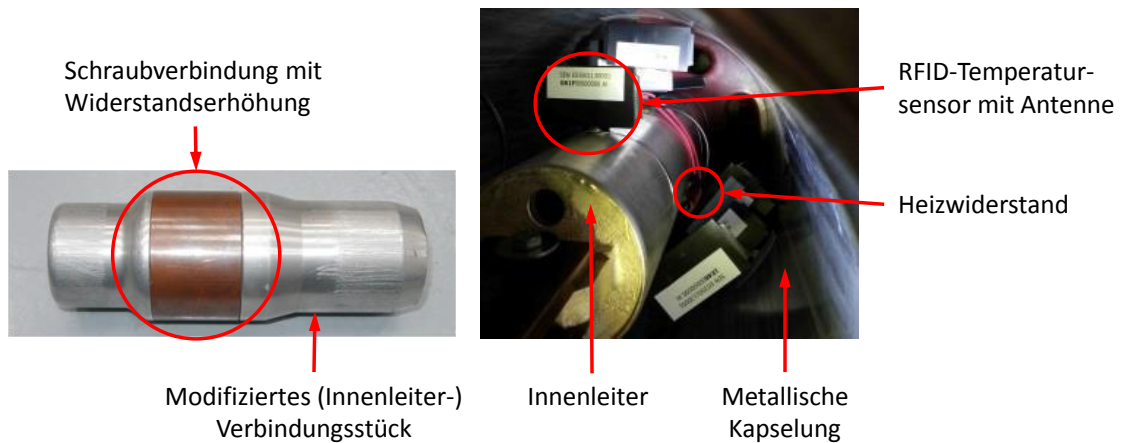


**Abbildung 12: GIS-Kontaktelemente der Innenleiters: Verbindungsstück zum Schottisolator (links) und Innenleiter (rechts)**

Im dargestellten Aufbau wird der hohle Innenleiter auf ein Verbindungsstück geschoben, in welchem der notwendige elektrische Kontakt durch eine Vielzahl von Kontaktstiften hergestellt wird. Zwischen den Kontaktstiften und der Innenseite des hohlen Innenleiters wirkt eine hohe mechanische Kraft. Das Verbindungsstück ist mit einer Schraubverbindung am Schottisolator montiert. Auf der in Abbildung 12 nicht sichtbaren Rückseite des Schottisolators wird der Innenleiter mit einem ähnlichen System fortgeführt. Die Widerstandsänderungen können folglich sowohl zwischen den Kontaktstiften und dem Innenleiter als auch zwischen dem Verbindungsstück und dem Schottisolator entstehen.

Für die Laboruntersuchungen werden unter Berücksichtigung möglicher Orte für Widerstandserhöhungen an realen Kontaktelementen punktuelle Widerstandserhöhungen erzeugt, welche durch die in Abschnitt 2.1.2 erwähnten Einwirkungen hervorgerufen werden können. Zur Untersuchung der thermischen Detektierbarkeit wurde zugrunde gelegt, dass die durch den erhöhten Widerstand verursachte Verlustleistung in Wärme umgewandelt wird, welche über die Kapselung an die Umgebung abgegeben wird (vgl. Abschnitt 2.2.2.1).

Im Rahmen der Laboruntersuchungen werden zwei verschiedene Anlagentypen verwendet, in denen der erhöhte Kontaktwiderstand durch unterschiedliche Methoden simuliert wird. In der Laboranlage I wird die Widerstandserhöhung mechanisch durch ein modifiziertes Verbindungsstück nachgebildet, welches in Abbildung 13 (links) veranschaulicht wird. Die simulierten Widerstandserhöhungen liegen im Bereich von  $60 \mu\Omega$  bis  $180 \mu\Omega$ , die verwendeten Ströme zwischen  $300 \text{ A}$  und  $1.000 \text{ A}$ .



**Abbildung 13: Verbindungstück zur mechanischen (links) und innerer Aufbau (rechts) zur thermischen Simulation von Widerstandserhöhungen**

In einer weiteren Laboranlage wird der erhöhte Widerstand durch drei elektrische Heizwiderstände simuliert, welche an einem Stück des Innenleiters um je  $120^\circ$  versetzt angebracht werden. Abbildung 13 (rechts) zeigt den inneren Aufbau des zugehörigen Prüfstands. In Höhe der roten Verkabelung sind die Heizwiderstände angebracht. Die simulierten Widerstandserhöhungen liegen im Bereich von  $10 \mu\Omega$  bis  $300 \mu\Omega$ , welche bei den verwendeten Strömen von  $100 A$  bis  $1.000 A$  simuliert werden. Zusätzlich werden Referenzwerte für den fehlerfreien Anlagenzustand aufgenommen.

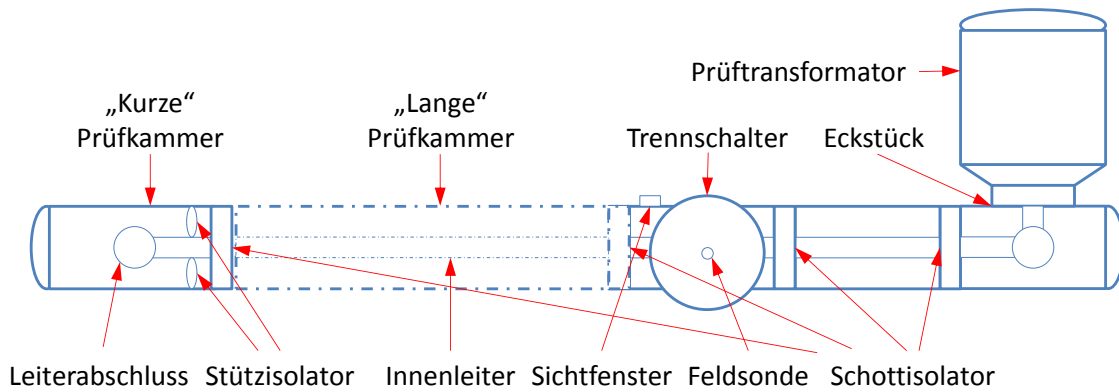
Im Gegensatz zu der Bewertungskategorie Isolation kann bei den Fehlstellenkonstellationen dieses Abschnitts keine Variation des Anlagendrucks vorgenommen werden, so dass die Versuchsreihen aus technischen Gründen bei geringem Überdruck aufgenommen werden. Zur Untersuchung des Einflusses des Anlagendrucks wird eine Versuchsreihe mit Hilfe eines separaten Versuchsaufbaus aufgenommen.

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Untersuchungen zur Bewertungskategorie mechanische Funktion durchgeführt werden, wird diese Bewertungskategorie in Abschnitt 2.3 nicht betrachtet. Diese Bewertungskategorie wird in einer parallelen Abhandlung ausführlich dargestellt.

## 2.3.2 Versuchsdurchführung

### 2.3.2.1 Bewertungskategorie Isolation

Die Untersuchungen zur Bewertungskategorie Isolation erfolgen an einer  $SF_6$ -Hochspannungslaboranlage. Die verwendeten Komponenten wurden Ende der sechziger Jahre gebaut und stehen repräsentativ für die Mehrzahl der zu untersuchenden Anlagen des Kollektivs nach Abschnitt 4.2.1. Abbildung 14 zeigt den grundlegenden, schematischen Aufbau der Laboranlage.



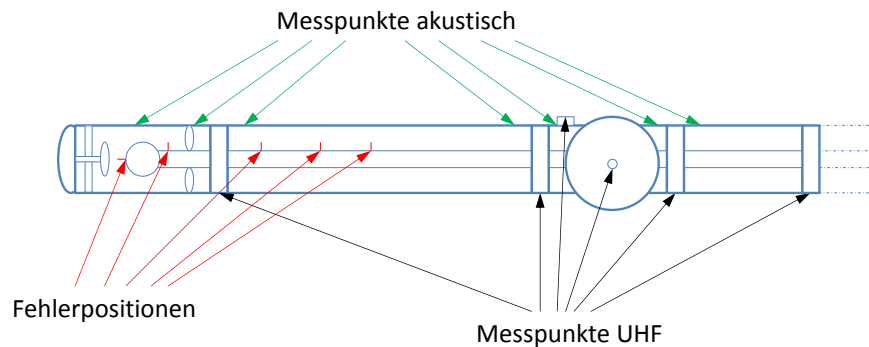
**Abbildung 14: Grundlegender schematischer Aufbau der Laboranlage**

Die Anlage besteht aus einem einphasigen Trennschalter, der mit einem Sammelschienenmodul verbunden ist. Zur Laboranlage gehören somit hauptsächlich die Komponenten des Trennschalters, des Prüftransformators, eines Eckstücks zur Adaption des Prüftransformators und der Sammelschiene, welche die „kurze“ Prüfkammer darstellt. Die Komponenten sind mit SF<sub>6</sub>-Gas isoliert und gasdicht voneinander abgeschottet. Zur Erweiterung der Laboranlage kann eine ca. 300 cm lange Sammelschiene („lange“ Prüfkammer) zwischen der kurzen Prüfkammer und dem Trennschalter angeflanscht werden. Die kurze Prüfkammer ist ca. 110 cm lang und enthält als Innenleiter ein ca. 50 cm langes, hohles Kupferrohr. Dieses besitzt einen Leiterabschluss an seinem Ende. Die weiteren Leiterkomponenten bestehen aus einer beschichteten Legierung. Die Abmessungen im Inneren der Prüfkammer ähneln denen des zu untersuchenden Anlagenkollektivs. Für die Teilentladungsversuche beträgt der maximale SF<sub>6</sub>-Gasdruck 3,5 bar. Der Prüftransformator ist regelbar und besitzt ein Bemessungsübersetzungsverhältnis von 380 V / 230 kV. Die Bemessungsleistung beträgt 45 kVA [Thi\_88].

Im Bereich des Trennschalters verfügt die Laboranlage über eine kapazitive Feldsonde zur Auskopplung von Teilentladungssignalen. Dazu ist am Innenleiter an der betreffenden Stelle eine Gegenelektrode installiert. Weiterhin ist im Bereich des Trennschalters ein Sichtfenster angebracht, auf dem ein passender UHF-Fenstersensor installiert werden kann.

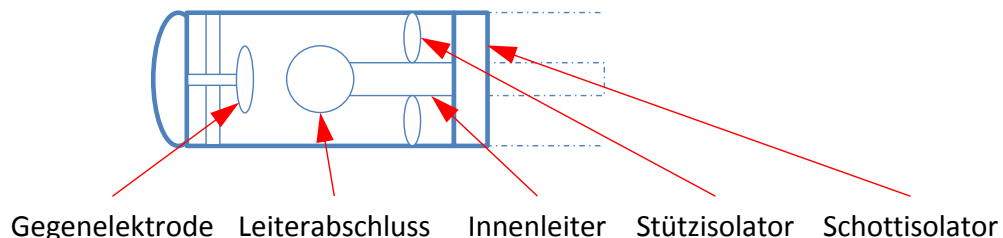
Die Schottisolatoren zwischen den gasdichten Kammern sind nach außen durchgeführt. Sie besitzen nicht-metallische, von außen zugängliche Stellen, an denen mobile Sensoren zur UHF-TE-Messung befestigt werden können. Folglich ist eine Vielzahl von sensorischen Ankopplungsmöglichkeiten vorhanden, die zur Untersuchung der unkonventionellen Teilentladungsmesstechnik genutzt wird. Die kapazitive Feldsonde hat in diesem Zusammenhang eine Doppelfunktion. Sie dient zum einen als Feldsonde der elektrischen TE-Vergleichsmessung zur Bestimmung der scheinbaren Ladung [Kru\_89, Küc\_09]. Zum anderen wird sie als interner Sensor für UHF-TE-Messungen verwendet. Somit sind verschiedene, in der Praxis übliche UHF-Sensoren adaptierbar.

Da die UHF-TE-Messung nicht auf die an der Fehlstelle umgesetzte scheinbare Ladung kalibriert werden kann, wird für die Laboruntersuchungen ein UHF-Impulsgenerator verwendet, um die Anzeigewerte der verschiedenen Sensorarten auf ein einheitliches Niveau abzustimmen. Die akustische TE-Messung ist unabhängig von der Ausstattung der Laboranlage, da die Sensoren an jedem beliebigen Punkt auf der äußeren metallischen Kapselung der Laboranlage angebracht werden können. Abbildung 15 zeigt die verwendeten Sensorpositionen der Bewertungsmethoden für die Laboruntersuchungen.



**Abbildung 15: Sensorpositionen an der Laboranlage**

Insgesamt werden sieben akustische und sechs UHF-Messpunkte verwendet. Der maximale Abstand zum Fehlerort beträgt ca. 435 cm (akustisch) bzw. 455 cm (UHF). Der linke Teil der Abbildung zeigt die beiden Prüfkammern, welche aus einer kurzen (110 cm) und einer langen (300 cm) Sammelschiene bestehen. Beispielhaft sind die Fehlstellenpositionen für eine Spitze auf Hochspannungspotential dargestellt. Abbildung 16 konkretisiert den inneren Aufbau der kurzen Prüfkammer.



**Abbildung 16: Innerer Aufbau der kurzen Prüfkammer**

Die verschiedenen inneren Komponenten sind dargestellt. So verfügt die kurze Prüfkammer über verschiedene Isolatoren und auch eine variable Gegenelektrode, wodurch umfangreiche Laboruntersuchungen ermöglicht werden.

In den Laboruntersuchungen werden die Fehlerarten gemäß Abschnitt 2.3.1.1 genutzt, wobei für die verschiedenen Versuchskonstellationen akustische und UHF-Pattern (breitbandig) aufgezeichnet werden. Ebenso wird die schmalbandige UHF-TE-Messung auf ihre Eignung zur Anwendung für die Zustandsbewertung überprüft. Hierzu werden die Fehlstellen in der linken, kurzen Prüfkammer nach Abbildung 17 installiert und deren Signale an den verschiedenen Messpunkten mit der vorhandenen Messtechnik ermittelt.

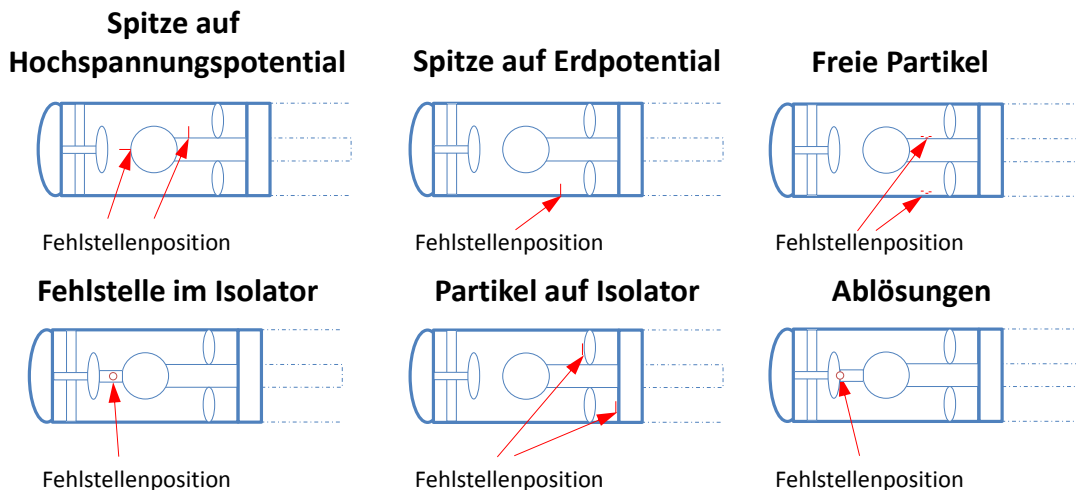


Abbildung 17: Installation der Fehlstellen

Die Fehlerart „Spitze auf Hochspannungspotential“ wird an zwei Positionen innerhalb der kurzen Prüfkammer realisiert. Durch geeignete Vorrichtungen werden die Spitzen direkt auf dem Innenleiter und auf dem Leiterabschluss installiert. An letzterer wird die variable Gegenelektrode zur Realisierung der notwendigen Potentialabstände verwendet. Die Fehlerart „Spitze auf Erdpotential“ wird auf der inneren metallischen Kapselung unterhalb des Innenleiters realisiert. Freie Partikel werden unterhalb des Innenleiters und auf ihm positioniert. Für Fehlstellen an Isolatoren werden die Stütz- und Schottisolatoren der kurzen Prüfkammer genutzt. Ablösungen und Fehler in Isolatoren werden durch hergestellte Prüfkörper simuliert, die zwischen der Gegenelektrode und dem Innenleiter installiert werden.

Abbildung 18 zeigt den Versuchsaufbau zur Untersuchung der Bewertungsmethoden zur Eingrenzung des Isolationsfehlerorts.

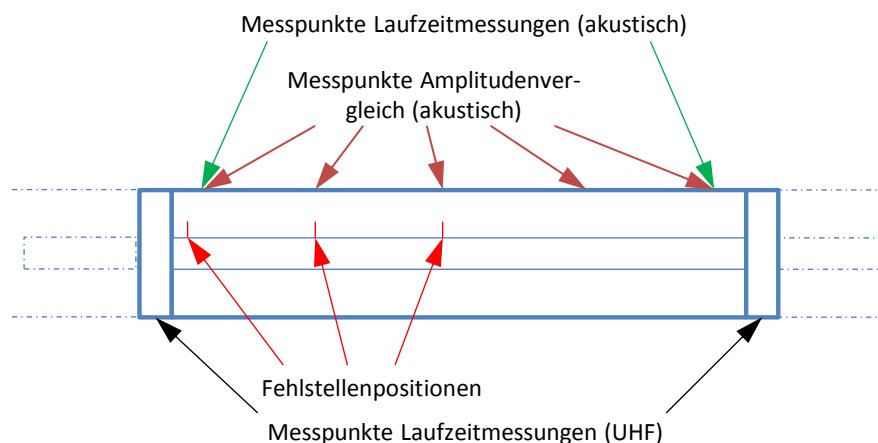


Abbildung 18: Sensorpositionen zur Eingrenzung des Isolationsfehlerorts

Nach der Ermittlung der Detektionsfähigkeit der Bewertungsmethoden wird die Eingrenzung des Isolationsfehlerorts untersucht. Hierzu werden Fehlstellen an verschiedenen Stellen der langen Prüfkammer angebracht. Mit Hilfe von zwei gleichartigen UHF- bzw. akustischen Sensoren werden Laufzeitmessungen durchgeführt. Der Amplitudenvergleich wird mit akustischen Sensoren an verschiedenen Positionen entlang der langen Prüfkammer untersucht.



Abschließend wird die Kombination verschiedener Fehlerarten hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das gemessene akustische bzw. UHF-Pattern untersucht. Hierzu werden mehrere Fehler parallel installiert.

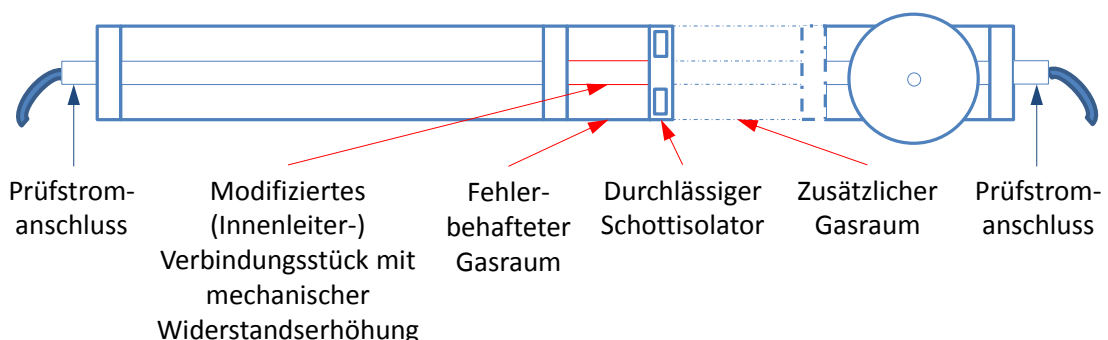
Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der untersuchten Fehlstellenkonstellationen. Die einzelnen Varianten unterscheiden sich vorrangig hinsichtlich des untersuchten Fehlertyps, der Position, des Materials, der Abmessungen sowie des verwendeten Anlagendrucks (vgl. Anhang 8.4). Die installierten Fehlstellen können parallel mit den unkonventionellen Bewertungsmethoden akustische und UHF-TE-Messung erfasst werden, da sich die zugehörigen Messpunkte räumlich unterscheiden.

**Tabelle 3: Untersuchte Konstellationen für Isolationsfehler**

Fehlerart	Konstellationen
Messung ohne Fehler	1
Spitze auf Hochspannungspotential	72
Spitze auf Erdpotential	27
Freie Partikel	49
Partikel auf Isolator	31
Fehlstelle im Isolator	9
Ablösung	3
Fehlerkombinationen	10
Laufzeitmessungen	8

### 2.3.2.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit

Für die zu untersuchenden thermischen Bewertungsmethoden der Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit werden verschiedene Laboranlagen verwendet. Ein Teil der Versuchsreihen wird mit der Laboranlage I für Hochstromversuche unter konstanten, anwendungsbezogenen Innenraumbedingungen aufgenommen. Der prinzipielle Prüfaufbau ist Abbildung 19 zu entnehmen.



**Abbildung 19: Laboranlage I für Hochstromversuche**

Die verwendeten Fehler werden in dem Gasraum zwischen der langen Prüfkammer und dem Trennschalter installiert. Hierfür wird ein modifiziertes (Innenleiter-)Verbindungsstück mit mechanisch erhöhtem Übergangswiderstand verwendet.

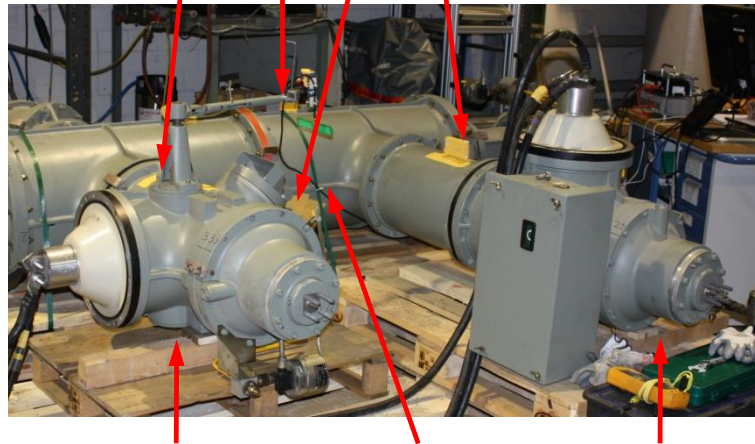
Da der fehlerbehaftete Gasraum verhältnismäßig kurz ist und folglich ein geringeres Gasvolumen beinhaltet, kann zwischen diesem und dem Trennschalter ein zusätzlicher Gasraum installiert werden. Die Verbindung des fehlerbehafteten mit einem zusätzlichen Gasraum wird mit einem durchlässigen Schottisolator realisiert, um das Gasraumvolumen zu erhöhen. Alternativ wird der fehlerbehaftete Gasraum gasdurchlässig mit dem Trennschalter verbunden. Der Prüfstrom wird mit einem Ringkerntransformator erzeugt, dessen Kabel durch die Prüfstromanschlüsse mit der Laboranlage verbunden werden. Die Prüfstromanschlüsse sind an den Schottisolatoren angeschlossen, wodurch sie leitfähig mit dem Innenleiter verbunden sind.

Neben dem fehlerfreien Zustand werden die Widerstandserhöhungen  $60 \mu\Omega$ ,  $100 \mu\Omega$  und  $180 \mu\Omega$  erzeugt. Deren Detektierbarkeit wird jeweils bei  $300 A$ ,  $500 A$  und  $900 A$  ermittelt. Die Versuchsreihen werden innerhalb eines Zeitintervalls von ca. 8 Stunden aufgenommen. Die Aufnahme beginnt jeweils bei unbelasteter, vollständig abgekühlter Anlage. Demnach startet die Messung bei Raumtemperatur der Anlage. Das Ende der jeweiligen Versuchsreihe liegt beim Erreichen des stationären Endzustands, bei dem keine weitere Temperaturerhöhung zu erwarten ist. Darüber hinaus wird ein Langzeitversuch mit einer Dauer von 14 Stunden bei einer Belastung von  $1.000 A$  durchgeführt. Aus technischen Gründen können alle Versuchsreihen, die mit der Laboranlage I aufgenommen werden, ausschließlich bei einem geringen Überdruck der Laboranlage von ca.  $0,3 \text{ bar}$  durchgeführt werden.

Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit einer handelsüblichen Thermografie-Kamera. Periodisch werden in Intervallen von 30 Minuten Thermografie-Aufnahmen erstellt, welche die gesamte Anlage erfassen. Die Kamera wird bei allen Versuchsreihen an einer festen Position installiert. Separat wird der Einfluss des Erfassungswinkels untersucht. Eine spätere rechnergestützte Auswertung ermöglicht die Festlegung beliebiger Messpunkte entlang der Laboranlage, wodurch jedem Bildpunkt sowie ausgewählten Flächenelementen, die z.B. zur Erfassung des Referenzwerts der Umgebungstemperatur verwendet werden, ein Temperaturwert zugeordnet werden kann. Im Gegensatz zu anderen Bewertungsmethoden entfällt eine Festlegung der Messpunkte im Voraus. Die zuvor vorgestellten thermischen Untersuchungen dienen der Erfassung eines Datengrundgerüsts für thermische Betrachtungen zur Stromtragfähigkeit.

Darüber hinaus werden weitere Versuchsreihen an der Laboranlage II durchgeführt. Hierzu zählt die Untersuchung des Einflusses des Anlagendrucks auf das Untersuchungsergebnis bei Verwendung einer konstanten, mechanischen Widerstandserhöhung von ca.  $100 \mu\Omega$ . Für den gleichen Prüfaufbau werden zwei verschiedene Anlagendrücke von  $1 \text{ bar}$  und  $3,4 \text{ bar}$  Überdruck verwendet. Die Versuchszeit beträgt ca. 13 Stunden je Versuchsreihe. Zur Untersuchung werden Gasräume eines Anlagentyps aus dem anwendungsbezogenen Anlagenkollektiv (vgl. Abschnitt 4.2.1) verwendet. Der Prüfaufbau besteht aus zwei Trennschaltern, die an einen Leistungsschalter angeflanscht werden. Abbildung 20 zeigt den zugehörigen Aufbau.

## Sensoren für RFID-Thermoobservation

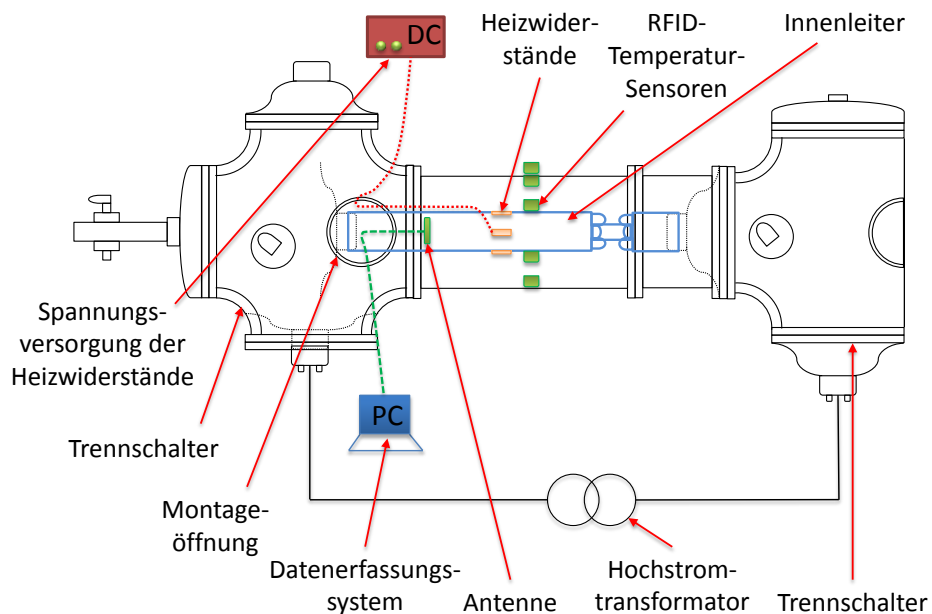


Trennschalter I Leistungsschalter Trennschalter II

**Abbildung 20: Laboranlage II für Hochstromversuche**

Die Erfassung der Messwerte erfolgt sowohl mit der Thermografie-Kamera als auch mit der RFID-Thermoobservation, welche passive Temperatursensoren zur berührungslosen Erfassung der Messwerte nutzt. Während bei Verwendung der Thermografie-Kamera keine vordefinierten Messpunkte notwendig sind, müssen diese – wie in Abbildung 20 zu sehen ist – bei der RFID-Thermoobservation im Voraus festgelegt werden. Die zugehörigen Sensoren werden auf dem Gehäuse der Laboranlage platziert.

Gasräume des gleichen Anlagentyps werden in einem weiteren Prüfaufbau (Laboranlage III) genutzt, welcher in Abbildung 21 dargestellt ist. Dieser besteht aus zwei Trennschaltern, welche durch ein modifiziertes Verbindungsstück miteinander verbunden werden.

**Abbildung 21: Prüfaufbau für Hochstromversuche der Laboranlage III in Anlehnung an [Sco\_14]**

Die Widerstandserhöhung wird hierbei durch Heizwiderstände auf dem Innenleiter simuliert. Die Erfassung des thermischen Verhaltens erfolgt mit der Thermografie-Kamera und Sensoren der RFID-Thermoobservation. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen werden diese auch innerhalb des Prüfausbaus angebracht und ermöglichen somit weitere fundierte Untersuchungen. Für die Untersuchungen werden folgende Ströme gewählt: 100 A, 300 A, 500 A, 700 A und 1.000 A. Neben der fehlerfreien Anordnung werden Widerstandserhöhungen von 18,75  $\mu\Omega$ , 37,5  $\mu\Omega$ , 75  $\mu\Omega$ , 150  $\mu\Omega$  und 300  $\mu\Omega$  als Fehlstelle simuliert. Die Untersuchungsdauer beträgt jeweils ca. 9 Stunden. In den Versuchsreihen wird die Laboranlage III mit gewählten Strömen realitätsnah belastet, um eine grundsätzliche Erwärmung der Anlage zu erzeugen. Parallel hierzu werden die Widerstandserhöhungen durch die Heizwiderstände simuliert.

### 2.3.3 Auswertung der Laboruntersuchungen

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Auswertung der Laboruntersuchungen für die Integration der verschiedenen Bewertungsmethoden in die Gesamtsystematik.

#### 2.3.3.1 Bewertungskategorie Isolation

Die Detektionsfähigkeit, die Anwendbarkeit sowie die zugehörige Aussagekraft der verschiedenen Bewertungsmethoden innerhalb der Bewertungskategorie Isolation werden im Rahmen der Laboruntersuchungen zur Integration in die Gesamtsystematik bestimmt.

##### 2.3.3.1.1 Detektierbarkeit relevanter Fehlerarten

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Detektierbarkeit relevanter Isolationsfehlerarten. In Bezug zu den untersuchten Konstellationen wird die fehlerartspezifische Detektierbarkeit  $d_{\text{rel}}$  der jeweiligen unkonventionellen Bewertungsmethode bei Betriebsspannung dargestellt. Allgemein wird sie nach Gleichung (2.5) bestimmt und stellt das Verhältnis aus den Anzahlen der Mengen der mit einer Bewertungsmethode detektierten Fehler  $D \subseteq F$  zu den untersuchten Fehlern  $F$  einer Fehlerart aus den Laboruntersuchungen dar:

$$d_{\text{rel}} = \frac{|D|}{|F|} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

Somit drückt der Wert eine „Erfolgsquote“ aus. Durch die direkte Gegenüberstellung der Detektierbarkeiten von akustischer und UHF-Teilentladungsmessung wird ein erster Vergleich dieser Bewertungsmethoden ermöglicht. Dieser Vergleich wird durch das Verhältnis  $V_d$  der relativen Detektierbarkeit von akustischer ( $d_{\text{rel, akustisch}}$ ) zu UHF-TE-Messung ( $d_{\text{rel, UHF}}$ ) ausgedrückt. Es wird nach Gleichung (2.6) bestimmt:

$$V_d = \frac{d_{\text{rel, akustisch}}}{d_{\text{rel, UHF}}} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

Weiterhin werden die fehlstellenspezifischen, kritischen Größen den verfahrensspezifischen, detektierten Fehlern aus den Laboruntersuchungen gegenübergestellt. Die kritischen Größen bezeichnen die Abmessungen der Fehlstellen, die einen Zusammenbruch der Isolationsfähigkeit bewirken können, jedoch nicht unmittelbar zum Durchschlag führen müssen. Sie berücksichtigen mögliche Einwirkungen auf die GIS durch Überspannungen wie Blitzstoß- und Schaltstoßspannungen sowie (Wechsel-)Spannungserhöhungen. Somit ist z.B. eine 1 mm lange Spitze auf Hochspannungspotential bereits kritisch, während der Grenzwert bei ausschließlicher Belastung mit Wechselspannung im Bereich von 4 bis 5 mm liegt [Sch\_13, Nai\_08, Sch\_06]. Da das Auftreten der genannten Spannungserhöhungen im praktischen Einsatz nicht ausgeschlossen werden kann, ist die Isolationsfähigkeit bei dem Vorhandensein von Fehlstellen, die mindestens den kritischen Größen entsprechen, nicht sichergestellt. Folglich verursacht das Vorhandensein solcher Fehlstellen einen sofortigen Handlungsbedarf. Die Bestimmung der detektierbaren Größen basiert auf den effizientesten Konstellationen. Daher beziehen sich die Angaben zu den UHF-TE-Messungen auf die jeweils empfindlichsten Sensoren bzw. die akustischen Messergebnisse auf die am nächsten angebrachten, d.h. ebenfalls die empfindlichsten, Sensoren. Die detektierbaren Größen geben die Abmessungen an, ab denen die untersuchten Bewertungsmethoden einen Fehler erkennen können. Der Abstand dieser Größen zu den kritischen Größen stellt ein weiteres Maß für die Aussagekraft der Bewertungsmethoden dar.

Die zusammengefassten Ergebnisse zur Detektierbarkeit relevanter Fehlerarten aus den Laboruntersuchungen können Tabelle 4 entnommen werden [EPaw\_14].

**Tabelle 4: Übersicht zur Detektierbarkeit relevanter Isolationsfehlerarten**

Fehlerart	Laborversuche (gesamte Versuchsreihen)		Verhältnis akustischer zu UHF- TE- Mes- sung <sup>2</sup> ( $V_d$ )	Detektierbare Größe (Laborversuche)		Kritische Größe
	Akustische TE-Messung	UHF- TE- Messung		Akustische TE- Messung	UHF-TE- Messung	CIGRÉ [Sch_13]
<b>Spitze auf Hochspannungs- potential</b>	81%	86%	94%	5 mm	2,5 mm	1 mm
<b>Spitze auf Erdpotential</b>	37%	56%	67%	10 mm	10 mm	4-6 mm
<b>Freie Partikel</b>	82%	82%	100%	1-1,5 mm	1-1,5 mm	3-5 mm
<b>Partikel auf Isolator</b>	45%	74%	61%	10 mm	5-7 mm	1-2 mm
<b>Fehlstelle im Isolator</b>	0%	89%	0%	k.A. <sup>3</sup>	4 mm	3-4 mm
<b>Ablösungen</b>	33%	100%	33%	k.A. <sup>3,5</sup>	k.A. <sup>4</sup>	k.A. <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Verhältnis von detektierten zu untersuchten Fehlern der zugehörigen Versuchsreihen, vgl. Gleichung (2.5)

<sup>2</sup>Verhältnis der relativen Detektierbarkeit von akustischer zu UHF-TE-Messung, vgl. Gleichung (2.6)

<sup>3</sup>Von Fehlerart ausgehende Entladungen nicht detektierbar

<sup>4</sup>Fehlerart detektierbar, Angabe zugehöriger Mindestmaße nicht möglich [Sch\_13]

<sup>5</sup>Fehlerart akustisch detektierbar, wenn mechanische Vibrationen erzeugt werden [Sch\_13]

Die zuvor vorgestellten Maße der relativen Detektierbarkeit sowie der detektierbaren und kritischen Größen werden dargestellt. Als wesentliche Erkenntnis geht aus Tabelle 4 hervor, dass die Mehrzahl der detektierbaren Größen über den kritischen Größen liegt [EPaw\_14]. So sind beispielsweise Spitzen auf Hochspannungspotential ab einer Länge von 1 mm kritisch, wobei solche Fehlstellen jedoch erst ab einer Länge von 2,5 mm detektiert werden können. Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, dass ein Fehler, der mit den hier dargestellten Bewertungsmethoden detektiert wird, überwiegend als kritisch einzustufen ist.

Spitzen auf Hochspannungspotential können sowohl mit der akustischen als auch mit der UHF-TE-Messung sehr gut detektiert werden, wobei letztere geringfügig empfindlicher ist. Mehr als 80 % der untersuchten Fehlstellen werden mit beiden Bewertungsmethoden detektiert. Die detektierbaren Größen liegen mit 2,5 mm (UHF-TE-Messung) bzw. 5 mm (akustische TE-Messung) geringfügig über der kritischen Größe von 1 mm. Bezüglich dieser Fehlerart ist folglich eine hohe Aussagekraft beider Bewertungsmethoden vorhanden.

Die für die Spitze auf Hochspannungspotential getroffenen Aussagen können für die Fehlstelle „Spitze auf Erdpotential“ übernommen werden. Vergleichend sind die Entladungserscheinungen bei letzterer Fehlstelle etwas geringer, so dass detektierbare und kritische Abmessungen größer ausfallen. Bei dieser Fehlerart können sowohl die akustische als auch die UHF-Teilentladungsmessung Größen ab einer Länge von 10 mm detektieren. Das Verhältnis der relativen Detektierbarkeiten der akustischen zur UHF-Teilentladungsmessung mit einem Wert von 67 % zeigt jedoch, dass akustisch deutlich weniger Fehlstellen detektiert werden, wodurch eine geringere „akustische Aussagekraft“ bezüglich dieser Fehlstellenart besteht.

Freie Partikel können mit beiden Bewertungsmethoden detektiert werden. Entscheidend für die messtechnische Erfassung ist hierbei, dass sich die Partikel bewegen. Nicht bewegliche Partikel können als Spitzen angesehen werden. Die Partikel können mit beiden Bewertungsmethoden mit einer relativen Detektierbarkeit von 82 % sehr gut detektiert werden. Die detektierbaren Abmessungen liegen unter den kritischen Größen, so dass die Bewertungsmethoden hinsichtlich dieser Fehlerart eine sehr hohe Aussagekraft besitzen.

Befinden sich leitfähige Partikel auf Isolatoren, so können sie mit der UHF-Messtechnik deutlich besser detektiert werden. Akustische Messungen sind bzgl. dieser Fehlstellenart relativ unempfindlich. Das Verhältnis der Detektierbarkeiten beträgt 61 %. Da die detektierbaren Abmessungen mit 5 mm bis 10 mm deutlich über den kritischen Größen ab 1 mm liegen, kann generell von einer geringen Aussagekraft der Bewertungsmethoden bezüglich dieser Fehlerart ausgegangen werden.

Ablösungen können von beiden Bewertungsmethoden detektiert werden, wobei die UHF-TE-Messung eine deutlich höhere Detektierbarkeit aufweist. Während zur Detektion von Ablösungen beide unkonventionellen Bewertungsmethoden geeignet sind, können Fehler in Isolatoren ausschließlich von der UHF-Messtechnik detektiert werden. Letztere besitzt eine hohe Aussagekraft, da detektierbare Fehler annähernd in der Größenordnung der kritischen Abmessungen liegen.

Generell unterscheidet sich die Detektierbarkeit der verschiedenen, untersuchten Spitzen und Partikel auf Hochspannungs- und Erdpotential (vgl. Anhang 8.4). Da der Einfluss auf die generelle Detektierbarkeit dieser Fehlerarten gering ist und die detektierbaren Abmessungen meist über den kritischen Größenordnungen liegen, soll dieser Sachverhalt an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

In Tabelle 4 bleibt die Kombination von Isolationsfehlern unerwähnt. Die Auswertung der zugehörigen Untersuchungen zeigte, dass sich die Isolationsfehlermuster sowohl bei der akustischen als auch bei der UHF-TE-Messung überlagern, so dass sie eindeutig unterschieden werden können. Für den praktischen Einsatz der Bewertungsmethoden bedeutet dies, dass einzelne Fehlerarten innerhalb der Muster bzw. Pattern von Fehlerkombinationen identifiziert werden können. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 22 anhand der akustischen TE-Messung.

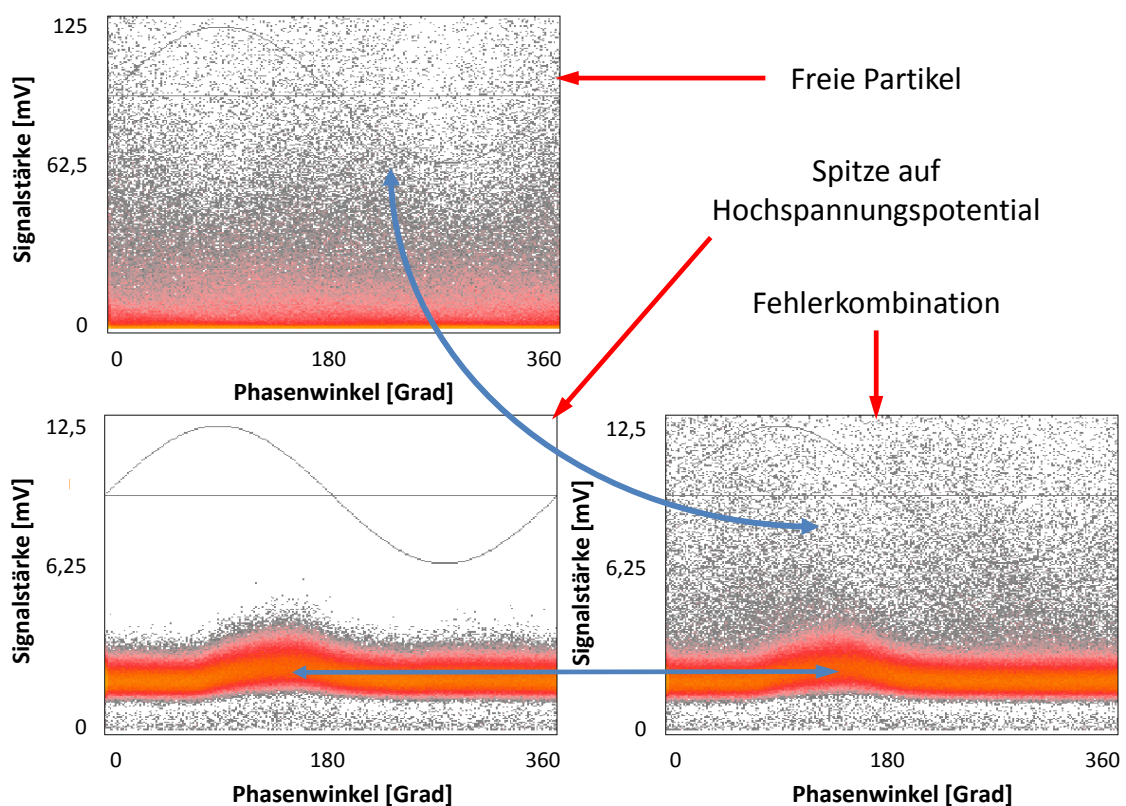


Abbildung 22: Einzelfehleridentifikation bei Fehlerkombinationen (akustische TE-Messung)

Sowohl die Spitze auf Hochspannungspotential als auch die freien Partikel können eindeutig identifiziert werden. Die Fehlerkombination enthält beide Muster überlagert.

Zwischen den detektierbaren und den kritischen Größen besteht ein Abstand, so dass Fehler existieren, die mit den untersuchten Bewertungsmethoden nicht detektiert werden können. Deshalb muss für den praktischen Einsatz dieser Bewertungsmethoden eine Unsicherheit berücksichtigt werden. Mit der UHF-TE-Messung können z.B. Spitzen auf Hochspannungspotential mit einer Länge von 2,5 mm detektiert werden. Da die kritische Größe 1 mm beträgt, existiert zwischen diesen beiden Größen ein Bereich, über den keine Zustandsaussage getroffen werden kann. Dieser ist folglich unsicher. Bei der akustischen TE-Messung ist bei der gleichen Fehlerart von einer höheren Unsicherheit auszugehen, da die detektierbare Größe 5 mm beträgt, wodurch ein größerer Abstand zur kritischen Größe besteht. Diese Unterschiede werden durch die Anzahlen der detektierbaren Fehler konkretisiert.

Weiterhin beeinflussen die verwendeten Sensorarten und -positionen die Detektierbarkeit. Bei der UHF-TE-Messung sind interne Sensoren empfindlicher als Fenstersensoren, welche wiederum empfindlicher sind als die Sensoren für Schottisolatoren. Bei der Anwendung der akustischen TE-Messung zeigt sich, dass die höchste Detektierbarkeit im Nahbereich erzielt wird, d.h. von Sensoren, die direkt auf dem Fehlergasraum in der Nähe des Fehlers angebracht werden. Weiterhin erhöhen geringere Anlagendrucke die Detektierbarkeit (vgl. Abschnitte 2.3.3.1.2 und 2.3.3.1.3). Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, dass eine Vielzahl von Feldanlagen aufgrund der verschiedenen Sensorarten analysiert werden kann, jedoch mit variierender Aussagekraft.

Generell weisen die untersuchten Bewertungsmethoden eine hohe Aussagekraft für den praktischen Einsatz auf. So kann ein Großteil der relevanten Fehler während des Betriebs detektiert werden und die Zustandsbewertung damit wesentlich unterstützen.

#### **2.3.3.1.2 UHF-Teilentladungsmessung**

Die UHF-Teilentladungsmessung wird während der Laboruntersuchungen in mehreren Varianten gemäß Abschnitt 2.2.1.2 untersucht. Ein handelsübliches Messsystem wird hierzu genutzt, mit dem sowohl schmalbandige als auch breitbandige Untersuchungen möglich sind. Beide Varianten können mit allen Sensorarten angewendet werden.

Die breitbandige Variante nutzt das gesamte Frequenzspektrum der Signale im Zeitbereich, in welchem die Signale, d.h. die Teilentladungsimpulse, phasenbezogen entsprechend ihrer Häufigkeit und Signalstärke dargestellt werden (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Es entstehen sogenannte Pattern, wobei jede Fehlstellenart ein spezifisches Muster bzw. Pattern erzeugt. Abbildung 23 zeigt beispielhaft die Pattern einer Spitze auf Hochspannungspotential und freier Partikel auf Erdpotential.



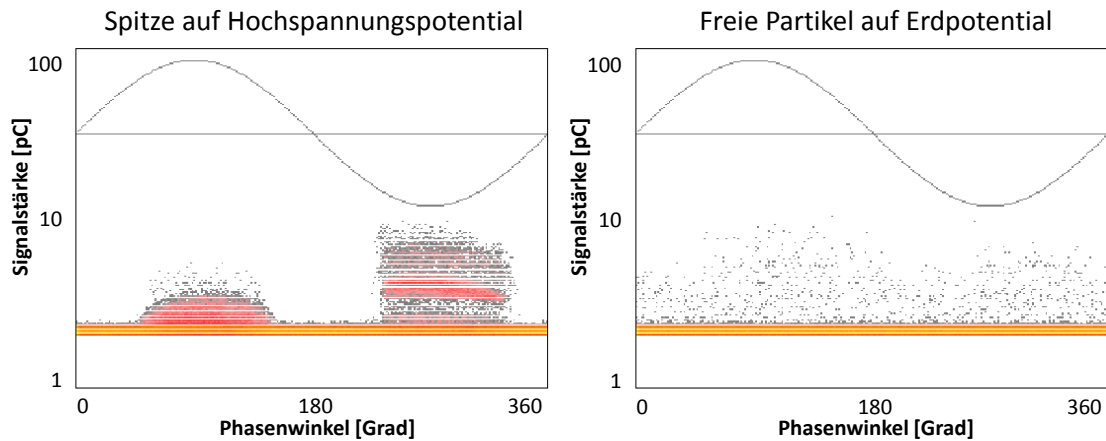


Abbildung 23: Breitbandige UHF-Pattern einer Spitze auf Hochspannungspotential (links) und freier Partikel auf Erdpotential (rechts)

Die einzelnen Muster unterscheiden sich deutlich, so dass die Zuordnung zu den spezifischen Fehlerarten unkompliziert durchgeführt werden kann (vgl. Beispielpattern Anhang 8.5). Während bei Spitzen ausschließlich verhältnismäßig konstante Signale in den Spannungsmaxima auftreten, verteilen sich die Signale von freien Partikeln über die gesamte Phase.

Die in Tabelle 4 dargestellten Detektionsgrenzen beziehen sich auf die breitbandige Variante, d.h. für Fehlerstellen bis zu den genannten Abmessungen konnten entsprechende Pattern aufgezeichnet werden, deren Muster sich in Abhängigkeit der Fehlerstellenart voneinander unterscheiden. Die zugehörige Messtechnik besteht aus für den Feldeinsatz tauglichen Komponenten. Sie kann mit allen handelsüblichen Sensorarten und -typen verwendet werden. Die Auswerteeinheit ist in einem felddauglichen Gehäuse eingefasst, wodurch die Auswertung der Messungen auf dem Display der Auswerteeinheit oder mit einem angeschlossenen PC erfolgen kann. Letzterer bietet mehr Auswertemöglichkeiten. Insgesamt ist die Messtechnik handlich und einfach handhabbar, so dass sie für den großflächigen Feldeinsatz geeignet ist.

Abbildung 24 zeigt die Anwendung der schmalbandigen UHF-Teilentladungsmessung anhand eines Messergebnisses einer Spitze auf Hochspannungspotential.

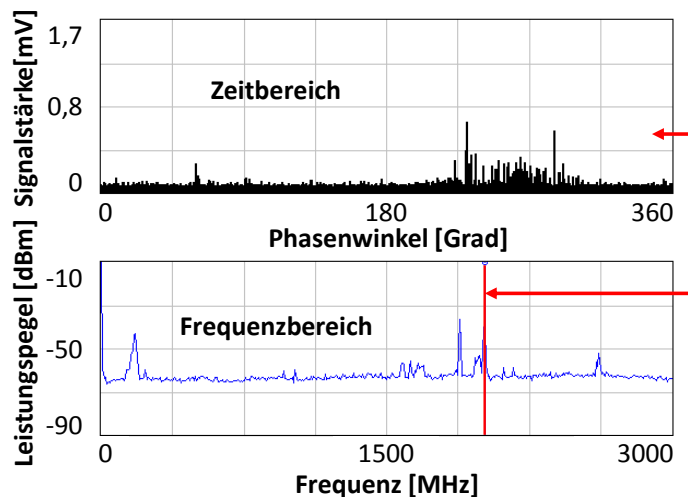


Abbildung 24: UHF-TE-Messung (schmalbandig)

Während bei der breitbandigen UHF-TE-Messung Teilentladungsimpulse über das gesamte Frequenzspektrum bis zu 3 GHz erfasst und in den Zeitbereich transformiert werden, konzentriert sich die schmalbandige Messung auf eine Bandbreite von ca. 3 MHz (roter Balken) des Spektrums und verwendet dieses entsprechend. Der untere Bereich der Darstellung illustriert hierbei das mit dem UHF-Sensor erfasste Frequenzspektrum, wovon der mit dem roten Balken gekennzeichnete Bereich in die obere Darstellung, d.h. den Zeitbereich, überführt wird. Durch die phasenbezogene Lage der Impulse im Zeitbereich kann die Fehlstelle zugeordnet werden (vgl. Abbildung 23 (links) und Anhang 8.5).

Vor dem Hintergrund der Integration in die Gesamtsystematik haben die Untersuchungen ergeben, dass gegenüber der breitbandigen Messung mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik keine wesentliche Verbesserung der Detektionsfähigkeit erzielt wird. Die Bewertungsmethode ist aufwändiger und langandauernder als die breitbandige Variante. Neben der für die breitbandige Messung notwendigen Technik wird ein zusätzlicher Spektrumanalysator benötigt, der die Analyse des Frequenzspektrums ermöglicht.

Zugehörige Auffälligkeiten können selektiv im Zeitbereich analog zur breitbandigen Variante analysiert werden. Die Auffälligkeiten müssen aufgrund des schmalen, analysierten Frequenzbandes sehr genau im gesamten Frequenzbereich identifiziert werden, wobei sich diese Prozedur als zeitaufwändig erweist. Zudem existieren aktuell keine Referenzspektren, die zum Vergleich genutzt werden könnten. Bei einphasig gekapselten Anlagen können zwar die phasenbezogenen Spektren miteinander verglichen werden, jedoch werden die Unterschiede – unter der Voraussetzung, dass es sich um Fehler handelt, die mit der breitbandigen Variante nicht detektiert werden konnten – äußerst gering sein, so dass der Zeitaufwand hierdurch nicht wesentlich minimiert wird. Bei der breitbandigen Variante werden solche Referenzspektren nicht benötigt, da das gesamte, durch den Sensor erfasste Frequenzspektrum direkt im Zeitbereich analysiert wird und hieraus unkompliziert das Vorhandensein eines Fehlers erkannt wird.

Die Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass die Identifikation von Auffälligkeiten des Frequenzspektrums kompliziert und nicht für den Feldeinsatz tauglich ist, so dass der praktische, großflächige Einsatz vor dem Hintergrund des Aufwands nicht durchgeführt werden sollte. Hingegen kann bei begründetem Verdacht auf einen Isolationsfehler, Unempfindlichkeit der breitbandigen Messung oder Störeinflüssen diese Variante verwendet werden. An dieser Stelle wäre der höhere Aufwand gerechtfertigt [EPaw\_14].

Die UHF-TE-Messung ist im Gegensatz zur konventionellen Messtechnik nicht auf die scheinbare Ladung kalibrierbar. Da gemäß Tabelle 4 die detektierbaren Fehler meist oberhalb der kritischen Größenordnungen liegen, ist die absolute Signalstärke der TE-Impulse aber nicht maßgeblich. In erster Linie ist das Erkennen des Fehlers durch dessen Fehlermuster relevant. Hierzu ist die Messtechnik in Bezug auf die bestimmten Fehlergrößenordnungen geeignet.

Die Größenordnung des Fehlers kann fehlerstellenspezifisch aus der Signalstärke im Vergleich zum Grundrauschen, d.h. zum bei jeder Messung vorhandenen Grundstörpegel, und insbesondere durch direkten Vergleich mit den im Labor aufgenommenen Fehlermustern abgeleitet werden.

Tabelle 4 beschreibt das Detektionspotential der UHF-Messtechnik, wobei sich die dargestellten Ergebnisse auf die im Sinne der Messung günstigste Konstellation beziehen. In den Laborversuchen werden zusätzlich verschiedene Sensorarten untersucht. Tabelle 5 gibt einen Überblick der zugehörigen Detektierbarkeiten in Bezug auf die untersuchten Fehlerstellenarten.

**Tabelle 5: UHF-Sensorempfindlichkeit**

Fehlerart	Relative Detektierbarkeit $d_{rel}$		
	Schottsensor	Fenstersensor	Interner Sensor
Spitze auf Hochspannungspotential	60%	83%	85%
Spitze auf Erdpotential	33%	44%	52%
Freie Partikel	82%	78%	80%
Partikel an Isolator	42%	68%	74%
Fehlerstelle im Isolator	11%	44%	89%
Ablösungen	100%	100%	100%
<b>Gesamt (relativ zum internen Sensor)</b>	<b>74%</b>	<b>93%</b>	<b>100%</b>

Hieraus geht hervor, dass die Detektierbarkeit fehlerstellenspezifisch variiert. Die Untersuchung der Fehlerart „freie Partikel“ ergibt eine gleich hohe Detektierbarkeit aller Sensorarten. In Bezug auf die weiteren Fehlerstellenarten sind interne Sensoren am empfindlichsten, gefolgt von Fenstersensoren und Sensoren für die Schottisolatoren [EPaw\_14]. Die relative Detektierbarkeit kann bei Verwendung von anderen Sensorarten als den internen Sensoren um mehr als ein Viertel sinken. Weiterhin variiert die Detektionsfähigkeit der Fehlerstellen in Abhängigkeit des Anlagendrucks, wie in Tabelle 6 gezeigt wird.

**Tabelle 6: Detektierbarkeit in Abhängigkeit des SF<sub>6</sub>-Gasdrucks und der Sensorart**

Anlagendruck	Detektierbarkeit in Abhängigkeit des SF <sub>6</sub> -Gasdrucks		
	Schottsensor	Fenstersensor	Interner Sensor
1,5 bar	100%	100%	100%
2,5 bar	79%	93%	89%
3,5 bar	76%	85%	84%

Je geringer der Anlagendruck ist, umso höher ist die Detektierbarkeit. Die zu bewertenden Anlagentypen im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfügen i.d.R. über einen Anlagendruck von ca. 1,5 bar, so dass hier von einer hohen Detektionsfähigkeit ausgegangen werden kann.

Darüber hinaus muss die Dämpfung der Signale im Sinne der Entfernung des Messpunkts von der Position der Fehlerstelle beachtet werden. Aufgrund der im Verhältnis zu vollständigen Schaltanlagen kurzen Länge der Laboranlage, können hierzu vorrangig qualitative Aussagen getroffen werden. Gemäß Abschnitt 2.3.2.1 sind die Messpunkte des internen Sensors und des Fenstersensors verhältnismäßig weit von der Fehlerposition entfernt.

Ungeachtet dessen weisen sie die höchste Empfindlichkeit auf. Erwartungsgemäß hat hier die Signaldämpfung einen geringen Einfluss im Gegensatz zu Sensoren auf Schottisolatoren, bei welchen die Signale den Feststoff des Schotts durchdringen müssen, wodurch eine höhere Dämpfung hervorgerufen wird. Diese wirkt sich besonders bei Fehlstellen in der Nähe der Detektionsgrenzen aus, so dass jene nur an den direkt angrenzenden Schottisolatoren detektiert werden können. Fehlstellen, die starke Entladungssignale verursachen, können über weite Distanzen hinweg detektiert werden, so dass fast zwei Drittel der mit Schottisolatoren detektierbaren Fehler auch am Ende der Laboranlage gemessen werden. Abbildung 25 stellt die relative Detektierbarkeit der untersuchten Fehler in Bezug zur Sensorart und der Entfernung von der Fehlerstellenposition dar.

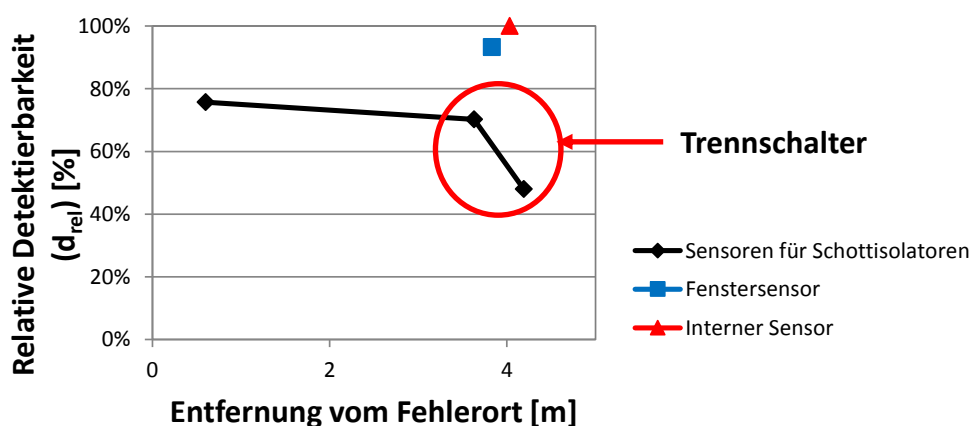


Abbildung 25: Detektierbarkeit verschiedener UHF-Sensoren in Bezug zur Entfernung vom Fehlerort

Die Fehlstellen befinden sich innerhalb der kurzen Prüfkammer, welche mit der langen Prüfkammer und dem Trennschalter verbunden ist. Während die Prüfkammern die Detektionsfähigkeit der Sensoren für Schottisolatoren gering beeinflussen, wird sie durch den Trennschalter wesentlich reduziert. Trotz der verhältnismäßig großen Entfernung vom Fehlerort weisen interne und Fenstersensoren das höchste Detektionspotential auf. Zur Gewährleistung einer konstanten Aussagekraft der Bewertungsmethode im praktischen Einsatz ist aufgrund der Abnahme der Detektierbarkeit relevanter Fehler mit größer werdendem Abstand zum Fehlerort eine ausreichende Bestückung des zu untersuchenden Schaltfelds mit UHF-Sensoren notwendig. Sind Sensoren für Schottisolatoren anwendbar, so sollte jeder Schottisolator, besonders im Bereich von Stoßstellen wie den Schaltgeräten, zur UHF-TE-Messung genutzt werden.

### 2.3.3.1.3 Akustische Teilentladungsmessung

Im Gegensatz zu den Untersuchungen der UHF-Teilentladungsmessung basieren die Untersuchungen der akustischen Teilentladungsmessung ausschließlich auf der breitbandigen Messvariante. Die Messsignale werden im Zeitbereich phasenbezogen wiedergegeben, wobei über einen Untersuchungszeitraum von 60 Sekunden zugehörige Pattern aufgenommen werden. Abbildung 26 zeigt beispielhaft die aufgenommenen Pattern von einer Spitze auf Hochspannungspotential und freier Partikel auf Erdpotential.

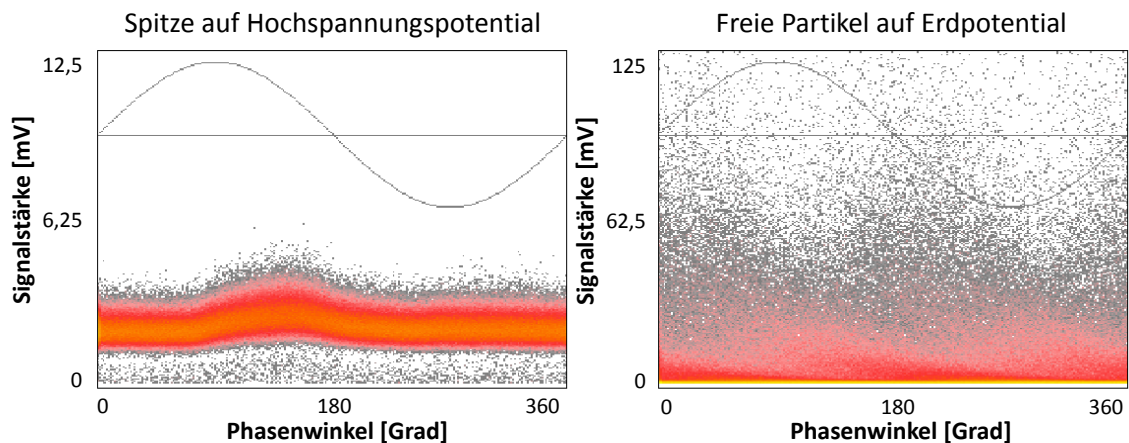


Abbildung 26: Akustische Pattern von einer Spitze auf Hochspannungspotential (links) und freier Partikel auf Erdpotential (rechts)

Durch die Anwendung dieser Bewertungsmethode entstehen für jede Fehlerart spezifische Fehlermuster, die sich wie in Abbildung 26 gezeigt voneinander unterscheiden. Bei der Kombination mehrerer Fehlerarten innerhalb eines aufgezeichneten Patterns können die jeweiligen Arten voneinander unterschieden werden (vgl. Beispielpattern Anhang 8.5).

Analog zur UHF-Messtechnik ist die akustische Messtechnik unkompliziert anwendbar. Unterschiede bestehen in den verwendeten Sensoren und den zugehörigen Verstärkern. Weiterhin sind die Messpunkte nicht an die Ausstattung der Laboranlage gekoppelt. Die Sensoren können an jedem beliebigen Punkt der metallischen Kapselung angebracht werden, wobei die korrekte Anbringung der Sensoren beachtet werden muss. Für die Laboruntersuchungen werden Zurrgurte verwendet, um einen ausreichend hohen Anpressdruck der Sensoren an die Laboranlage zur Erfassung der Signale zu erreichen. Darüber hinaus sollte der entstehende Luftspalt zwischen Sensor und Kapselung mit einem Medium ausgefüllt werden. Dieser entsteht zwangsläufig durch unterschiedliche Wölbungen der Sensorkontaktfläche und der metallischen Kapselung. Hierzu wird ein Kontaktgel verwendet. Durch den Flüssigkeitsfilm wird die Dämpfung der akustischen Signale minimiert, wodurch signifikant bessere Messergebnisse erzielt werden.

Da die verwendete akustische Messtechnik nicht kalibriert werden kann, sind Rückschlüsse zur scheinbaren Ladung, welche bei der konventionellen Teilentladungsmessung ermittelt wird, nicht möglich. Dadurch, dass Referenzwerte aus den Laboruntersuchungen bestehen, ist dies unwesentlich. Unter der Annahme identischer Grundstörpegel (vgl. Abschnitt 2.4.1) können die akustischen Muster – in Grenzen auch deren absolute Werte – mit den Referenzmustern verglichen werden. Wie bereits beschrieben besteht die weitaus wichtigere Aufgabe der unkonventionellen TE-Messung in der Erkennung des Fehlers und der Fehlerart. Dies geht daraus hervor, dass detektierbare Fehler meist über den kritischen Abmessungen liegen. Die Zuordnung zur Art kann über das Fehlermuster nahezu unabhängig von dessen Signalstärke erfolgen.

Im Gegensatz zur UHF-TE-Messung wirkt sich bei der akustischen TE-Messung ein veränderter Anlagendruck kaum auf die Detektionsfähigkeit aus. Die Dämpfung akustischer Signale muss hingegen beachtet werden. Zur Ermittlung der Detektionsgrenzen gemäß Tabelle 4 werden Messergebnisse von Sensoren herangezogen, die direkt auf dem fehlerbehafteten Gasraum installiert sind. Die Untersuchungen zeigen, dass die durch Fehler verursachten akustischen Signale, insbesondere bei Fehlstellen nahe der Detektionsgrenzen, kaum bis gar nicht über die Grenzen eines Gasraums hinaus feststellbar sind. Hohen Dämpfungen unterliegen auch Signale, die im Inneren, d.h. nahe dem Innenleiter der GIS, entstehen. So sind z.B. Partikel auf dem Innenleiter mit deutlich schwächeren Signalen zu detektieren als Partikel, die sich auf dem Mantel der Anlage befinden. Abbildung 27 zeigt die relative Detektierbarkeit in Abhängigkeit der Fehlerart und der Entfernung zum Fehlerort.

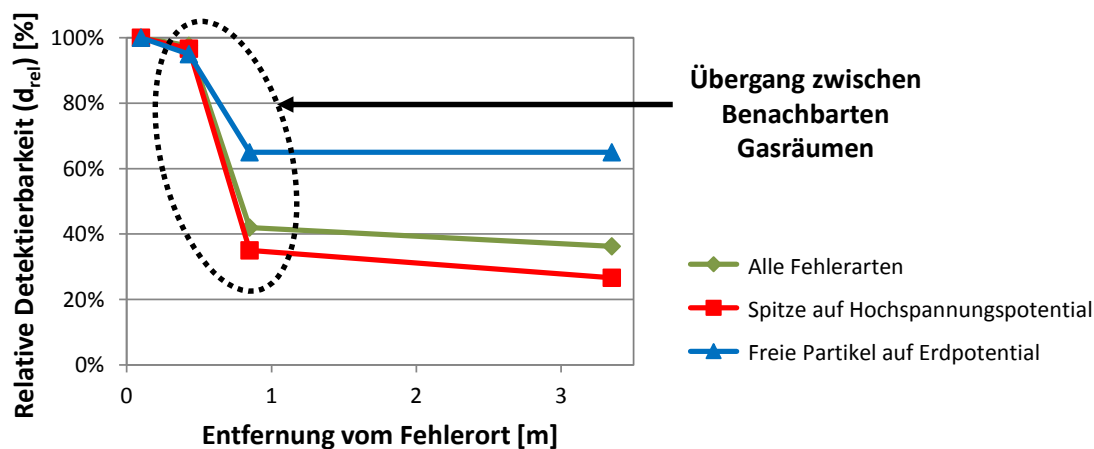


Abbildung 27: Detektierbarkeit relevanter Fehlerarten mit der akustischen TE-Messung in Abhängigkeit der Entfernung zum Fehlerort

Dargestellt sind sowohl die Detektierbarkeit aller Fehlerarten sowie jene von Spitzen auf Hochspannungspotential und Partikeln auf Erdpotential. Letztere sind über weitere Distanzen zum Fehlerort deutlich besser detektierbar als Spitzen auf dem Innenleiter, deren Teilentladungssignale einen weiteren Weg bis zur Erfassung durch den Sensor zurücklegen müssen (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Unabhängig von der Fehlerart wird die Detektierbarkeit an Stoßstellen wie den Schottisolatoren deutlich reduziert. In den Untersuchungen wurden Reduktionen um fast 60 % ermittelt. Innerhalb der untersuchten Gasräume ohne Stoßstellen sank das Detektionspotential im Verhältnis geringfügig.

Folglich sollte zur praktischen Anwendung dieser Bewertungsmethode im Feld die Messung mit mindestens einem Messpunkt je Gasraum erfolgen. Längere Ausführungen, wie z.B. Sammelschienenmodule ab ca. drei 3 m Länge, sollten mit mindestens zwei Messpunkten versehen werden [EPaw\_14]. Hierdurch kann die Detektionsfähigkeit über die gesamte Anlage hinweg als konstant angesehen werden.

### 2.3.3.1.4 Eingrenzung des Isolationsfehlerorts

Nachdem Isolationsfehler erkannt wurden, sollen diese nach Möglichkeit einer Position innerhalb der GIS zugeordnet werden. Vorrangiges Ziel ist die Eingrenzung auf den betroffenen Gasraum. Eine genauere Ortung ist zwar technisch möglich, aber nicht erforderlich, da der betroffene Gasraum für Instandsetzungsmaßnahmen sowieso komplett geöffnet werden muss. Mit der verwendeten Messtechnik kann der Isolationsfehlerort durch den Amplitudenvergleich akustischer Signale, Laufzeitmessungen mit UHF-Sensoren und Laufzeitmessungen mit akustischen Sensoren eingegrenzt werden. Diese Bewertungsmethoden werden in den Laboruntersuchungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagekraft untersucht. Darüber hinaus sind Amplitudenvergleiche mit UHF-Sensoren theoretisch möglich.

Da UHF-Signale einer geringeren Dämpfung als akustische Signale unterliegen – wodurch die verhältnismäßig kurze Laboranlage zur Untersuchung dieser Bewertungsmethode ungeeignet ist – und am zu untersuchenden Anlagenkollektiv i.d.R. wenige Auskopplungs- bzw. Messpunkte vorhanden sind (vgl. Abschnitt 2.4.1), wird die Bewertungsmethode nicht weiter untersucht.

Mit dem Amplitudenvergleich akustischer Signale kann der Fehlerort innerhalb der Laboranlage mit einer Genauigkeit von weniger als 0,5 m eingegrenzt werden. Für den Prüfaufbau wird die lange Prüfkammer (Länge 3 m, vgl. Abbildung 18) genutzt. Zur Überprüfung werden die Fehlerarten „Spitze auf Hochspannung“ und „freie Partikel“ verwendet. Diese werden an unterschiedlichen Positionen innerhalb der GIS angebracht und akustische TE-Muster an definierten Messpunkten der Prüfkammer aufgenommen. Abbildung 28 zeigt die relativen Signalstärken für die genannten Fehlerarten. Die farbigen Kreise markieren die Fehlerposition, die Farben repräsentieren verschiedene Versuchsreihen.

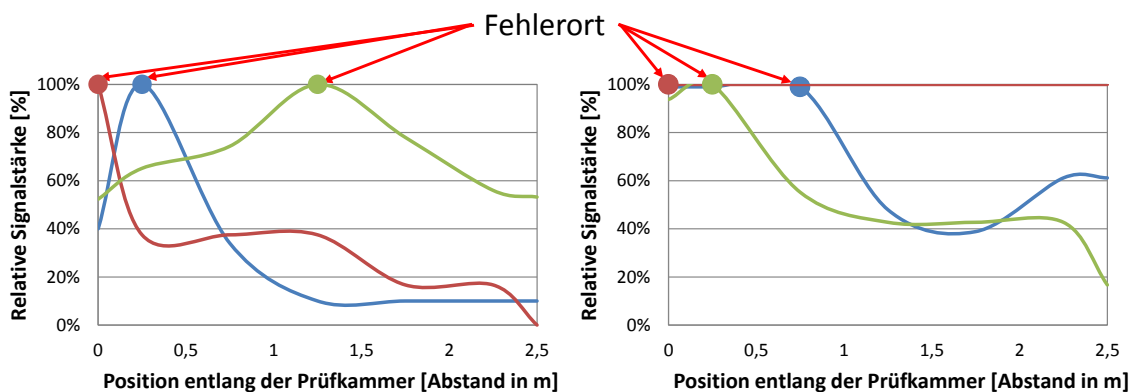


Abbildung 28: Relative, akustische Signalstärke entlang der Prüfkammer einer Spitze auf Hochspannungspotential (links) und freier Partikel (rechts)

Innerhalb der Prüfkammer kann die Position des Fehlers bei nahezu allen Konstellationen eindeutig durch die höchste Signalstärke bestimmt werden. Besonders aktive Entladungserscheinungen können die Eingrenzung verkomplizieren. Exemplarisch hierfür steht die rote Versuchsreihe des Fehlers „freie Partikel“ in Abbildung 28 (rechts).

Eine genaue Zuordnung innerhalb des Gasraums kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Die Signale sind so groß, dass sie sich an der oberen Grenze des Messbereichs befinden, wodurch der exakte Fehlerort innerhalb des Gasraums nicht bestimmt werden kann. Der betroffene Gasraum wird jedoch eindeutig zugeordnet.

Eine weitere Methode zur Bestimmung des Fehlerorts stellen Laufzeitmessungen mit UHF-Sensoren dar. Zur Bewertung der Anwendbarkeit werden die zuvor verwendeten Fehlerarten und -positionen verwendet. Die Erfassung der Teilentladungssignale erfolgt parallel mit zwei identischen Sensoren für Schottisolatoren, zugehörigen Verstärkern und einem Oszilloskop. Zu Beginn muss für den Prüfaufbau die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale bestimmt werden. Hierzu wird ein Fehler in der kurzen Prüfkammer installiert, der mit den beiden, an den Enden der langen Prüfkammer installierten Sensoren erfasst wird. Der installierte Fehler befindet sich hierfür außerhalb der von den Sensoren eingegrenzten Strecke. Da der Abstand sowie die Fehlerposition bekannt sind, kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Ermittlung des Laufzeitunterschieds bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.2.1.4). Sie beträgt  $0,29 \text{ m/ns}$  und ist somit geringfügig kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.

Unter Zuhilfenahme der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit wird die Eingrenzung des Fehlerorts durch Bestimmung des Laufzeitunterschieds durchgeführt. Die installierten Fehlstellen befinden sich hierzu innerhalb der von den Sensoren eingegrenzten Strecke. Zur Anwendung der Methode werden die Sensorsignale, welche in Abbildung 29 als Ausschnitt aus der Oszilloskop-Visualisierung dargestellt sind, parallel erfasst.

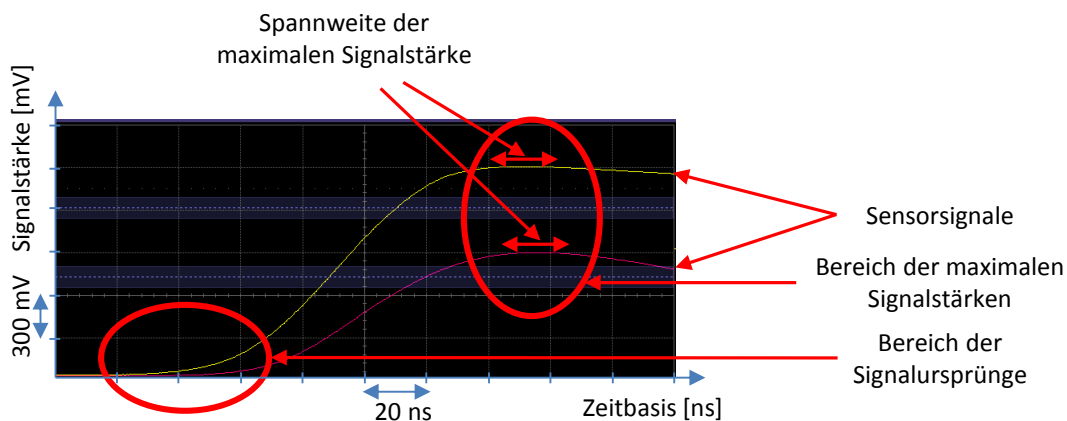


Abbildung 29: Parallel erfasste UHF-Signale zur Anwendung der Laufzeitmessung

In Abbildung 29 sind die unterschiedlichen Verläufe der beiden Sensorsignale dargestellt. Die Mittelwerte mehrerer Perioden werden aufgrund von Signalschwankungen verwendet. Eine Bestimmung der Zeitdifferenz mit den Signalursprüngen sowie den Maxima der Sensorsignale ist nicht möglich, da die zugehörigen Punkte in den Sensorsignalkurven nicht eindeutig bestimmt werden können. So liegen z.B. die maximalen Signalstärken mit einer Spannweite von ca.  $20 \text{ ns}$  vor, wodurch erhebliche Fehlinterpretationen möglich sind, da die in Abbildung 29 gezeigten Sensorsignalkurven einen Laufzeitunterschied im Bereich von ca.  $7 \text{ ns}$  aufweisen sollten.



Um dennoch die Laufzeitunterschiede bestimmen zu können, werden die Zeitdifferenzen bei ausgewählten Signalstärken – bei 20 %, 50 % und 90 % der maximalen Signalstärke – untersucht. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Genauigkeit der Fehlerorteingrenzung. Für die verwendeten Fehlerarten Spitze auf Hochspannungspotential und freie Partikel werden die verschiedenen Versuchsreihen I bis III aufgeführt.

**Tabelle 7: Abweichung zum Fehlerort bei Bestimmung des Laufzeitunterschieds mit ausgewählten Signalstärken der Signale der UHF-Sensoren**

Fehlerart / Messreihe		Abweichung zum Fehlerort [m] bei Bestimmung der Laufzeitunterschiede mit ausgewählten Signalstärken		
		90% der maximalen Signalstärke	50% der maximalen Signalstärke	20% der maximalen Signalstärke
Spitze auf Hoch- spannungs- potential	I	0,95	0,55	0,35
	II	0,32	0,11	0,11
	III	0,39	0,44	0,22
Freie Partikel	I	0,16	0,11	0,11
	II	0,28	0,41	0,32
	III	0,4	0,13	0,05
<b>Mittelwert</b>		<b>0,42</b>	<b>0,29</b>	<b>0,19</b>

Durch die Bestimmung der Laufzeitunterschiede können die Isolationsfehler mit einer mittleren Abweichung von weniger als 0,5 m lokal eingegrenzt werden. Bei Verwendung geringer Signalstärken zwischen 20 % und 50 % der maximalen Signalstärke werden die genauesten Ergebnisse erzielt.

Die zu ermittelnden Laufzeitunterschiede befinden sich im Bereich weniger Nanosekunden, so dass das Messsystem zur Laufzeitbestimmung sehr hoch auflösen muss. Zudem sind die erfassten Sensorsignale nicht vollkommen konstant, da Schwankungen auftreten, welche die Messwertaufnahme beeinträchtigen können. Bereits geringe Ungenauigkeiten der Bestimmung des Laufzeitunterschieds verursachen Fehleinschätzungen. Bei einer zugrunde gelegten Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $c_0 = 0,29 \text{ m/ns}$ , wird bereits bei geringfügig mehr als 3 ns Ungenauigkeit der Laufzeitbestimmung eine Abweichung vom Fehlerort von 1 m erzeugt (vgl. Abschnitt 2.2.1.4). Unter Berücksichtigung dieser Genauigkeit kann es vorkommen, dass der Fehler einem angrenzenden, falschen Gasraum zugeordnet wird.

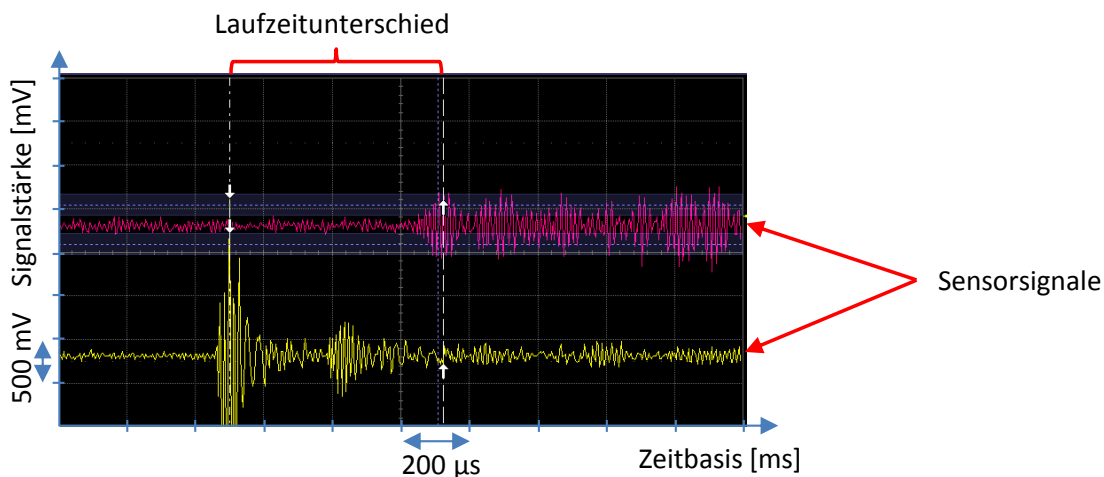
Die Bewertungsmethode erweist sich während der Untersuchungen als störanfällig, so dass Fehlinterpretationen aufgrund stark schwankender Signale nicht ausgeschlossen werden können. In den Laborversuchen ist der Fehlerort bekannt, so dass solche Einflüsse leicht erkannt werden. Bei der Anwendung im Feld kann hiervon nicht ausgegangen werden. Zudem zeigen die Felduntersuchungen, dass zwei identische Sensorpositionen, an denen das Teilentladungssignal erfasst werden kann, keine Grundvoraussetzung sind (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Da diese meist verhältnismäßig weit entfernt sind, falls ausschließlich Sensorpositionen für Fenstersensoren an einem Schaltfeld vorhanden sind, müssen die Teilentladungssignale längere Distanzen mit Stoßstellen überbrücken, wodurch sie verändert werden und weitere Fehlinterpretationen bewirken können.

Die Eingrenzung des Fehlerorts durch die Bestimmung des Laufzeitunterschieds mit UHF-Sensoren kann für den praktischen Einsatz genutzt werden. Aufgrund der Störanfälligkeit sollte diese Bewertungsmethode unter der Voraussetzung, dass z.B. der akustische Amplitudenvergleich anwendbar ist nicht zur Erstdiagnose genutzt werden.

Die Laufzeitmessung wird auch mit den akustischen Sensoren untersucht, wobei die Vorgehensweise identisch zur UHF-Laufzeitmessung ist. Zu Beginn erfolgt die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche  $0,0032 \text{ m}/\mu\text{s}$  beträgt. Während für UHF-Signale davon auszugehen ist, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Feld identische Werte wie im Labor erreicht, kann sie sich je Anlagentyp und Ausführungsart unterscheiden (vgl. Abschnitte 2.2.1.3 und 2.2.1.4). Die Gründe hierfür liegen in den verwendeten Materialien sowie dem Vorhandensein unterschiedlicher Stoßstellen für akustische Signale. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit sollte folglich im Feldeinsatz spezifisch bestimmt werden.

In den Laboruntersuchungen werden die akustischen Signale mit einem Oszilloskop parallel erfasst. Die Signale erweisen sich über mehrere Perioden hinweg als nicht konstant, so dass Momentaufnahmen erforderlich sind. Abbildung 30 zeigt beispielhaft parallel erfasste akustische Signale aus der Oszilloskop-Visualisierung.



**Abbildung 30: Parallel erfasste akustische Signale zur Anwendung der Laufzeitmessung**

Zu sehen sind zwei parallel erfasste Sensorsignale. Die Fehlstelle befindet sich näher am Sensor mit der gelben Signalkurve, so dass dieses Signal zeitlich zuerst erfasst wird. Das rote Signal des von der Fehlstelle weiter entfernten, zweiten Sensors wird entsprechend zeitlich später erfasst. Die Signalcharakteristik bedingt die manuelle Bestimmung der Laufzeitunterschiede, welche in der Darstellung beispielhaft gezeigt wird.

Tabelle 8 gibt eine Übersicht der zugehörigen Genauigkeit. Die Tabelle zeigt die Versuchsreihen I und II der untersuchten Fehlerarten.

**Tabelle 8: Abweichung zum Fehlerort bei Bestimmung des Laufzeitunterschieds mit akustischen Sensoren**

Fehlerart/ Messreihe		Abweichung zum Fehlerort [m]
Freie Partikel	I	0,1
	II	0,13
Spitze auf Hochspannungspotential	I	0
	II	0,08

Trotz manueller Auswertung kann die Eingrenzung des Fehlerorts mit einer Abweichung von weniger als 0,2 m genau erfolgen. Obwohl diese Eingrenzung recht genau erfolgen kann, ergeben sich analog zu den Laufzeitmessungen im UHF-Bereich während der Versuche hohe Signalschwankungen, so dass gravierende Fehlinterpretationen möglich sind. Aufgrund der Störanfälligkeit sowie der damit verbundenen Komplexität der Laufzeitmessungen sollten sie im Feldeinsatz nicht zur Erstdiagnose genutzt werden. Kann der Fehler mit der akustischen TE-Messung detektiert werden, so sollte die Eingrenzung des Fehlerorts mit dem akustischen Amplitudenvergleich vorgenommen werden.

#### 2.3.3.1.5 Wesentliche Schlussfolgerungen für die praktische Anwendbarkeit

Die untersuchten nicht-invasiven Bewertungsmethoden können im Normalbetrieb einen wesentlichen Mehrwert zur Beurteilung der Bewertungskategorie Isolation erbringen, indem relevante Fehlerarten durch verfahrens- bzw. fehlerstellenspezifische Muster erkannt werden. Generell sollten alle bei der individuellen GIS einsetzbaren Bewertungsmethoden angewendet werden, um die Aussagekraft des zugehörigen Bewertungsergebnisses zu erhöhen [EPaw\_14].

Im Mittel können ca. 80 % der relevanten (TE-)Isolationsfehler unkonventionell detektiert werden. Hierbei weist die UHF- im Vergleich zur akustischen Teilentladungsmessung eine höhere Detektierbarkeit relevanter Isolationsfehler auf. Ungefähr 80 % der relevanten, mit der UHF-TE-Messung detektierbaren Fehler können ebenso akustisch detektiert werden. Die detektierbaren Fehlerabmessungen sind in Abhängigkeit der Fehlerart geringfügig größer als die definierten kritischen Größenordnungen [Sch\_13, Sch\_06, EPaw\_14]. Wurde ein Isolationsfehler mit der akustischen oder der UHF-TE-Messung identifiziert, so ist dieser somit auch kritisch.

Bei der UHF-Teilentladungsmessung wird die Detektierbarkeit von Fehlern maßgeblich durch die verwendete Sensorart, welche in Abhängigkeit des Anlagentyps variiert, beeinflusst. Interne Sensoren detektieren mehr relevante Fehler als Fenstersensoren, welche wiederum empfindlicher als Sensoren für Schottisolatoren sind. Generell sollten bei der Anwendung der UHF-Teilentladungsmessung alle an der GIS verfügbaren Sensorpositionen genutzt werden. Bei der akustischen TE-Messung wird die Detektierbarkeit an Stoßstellen, wie den Schottisolatoren so stark reduziert, dass eine separate TE-Messung an jedem Gasraum erforderlich ist.

Wurden Isolationsfehler erkannt, so können diese einer Position innerhalb der GIS zugeordnet werden. Hierzu sollte in erster Instanz der akustische Amplitudenvergleich genutzt werden, sofern der Fehler akustisch detektierbar ist. Ist diese Bewertungsmethode nicht anwendbar, so kann der Fehlerort durch die Bestimmung der Laufzeitdifferenz von zwei identischen UHF-Sensorsignalen eingegrenzt werden. Bei letzterer ist die hohe Störanfälligkeit zu beachten.

Unter Berücksichtigung der Anwendbarkeit an einem bestehenden Kollektiv hat die akustische Teilentladungsmessung den größeren Anwendungsbereich im Vergleich zur UHF-TE-Messung, da die akustischen Sensoren an jeder GIS direkt auf der metallischen Kapselung angebracht werden können und die Position akustisch detektierbarer Isolationsfehler hiermit effizient eingegrenzt wird.

### 2.3.3.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit

Zur Detektion von Stromtragfähigkeitsfehlern können thermische Bewertungsmethoden verwendet werden. Hierzu werden im praktischen Einsatz Unterschiede der Oberflächentemperatur des fehlerbehafteten Gasraums zu fehlerfreien Komponenten ermittelt. Diese basieren auf mittleren Temperaturen, so dass je nach angewendeter Messtechnik der Mittelwert mehrerer Messpunkte bestimmt wird.

#### 2.3.3.2.1 Detektierbarkeit von Stromtragfähigkeitsfehlern

Die Auswertung von Messergebnissen an einer im zu untersuchenden Anlagenkollektiv vorhandenen GIS hat gezeigt, dass bei einem Nennstrom von 1.250 A zulässige Grenztemperaturen bereits ab einer Widerstandserhöhung von geringfügig mehr als  $50 \mu\Omega$  erreicht werden können. Diese Widerstandserhöhung verursacht in Abhängigkeit des Prüfstroms unterschiedliche Oberflächentemperaturen des fehlerbehafteten Gasraums. In Abbildung 31 wird die sich hieraus ergebende Kritikalität einer ermittelten Temperaturerhöhung zwischen identischen Gasräumen – bei einpolig gekapselten Anlagen zwischen identischen Gasräumen unterschiedlicher Phasen – in Abhängigkeit des Prüfstroms bewertet [EPaw\_14].

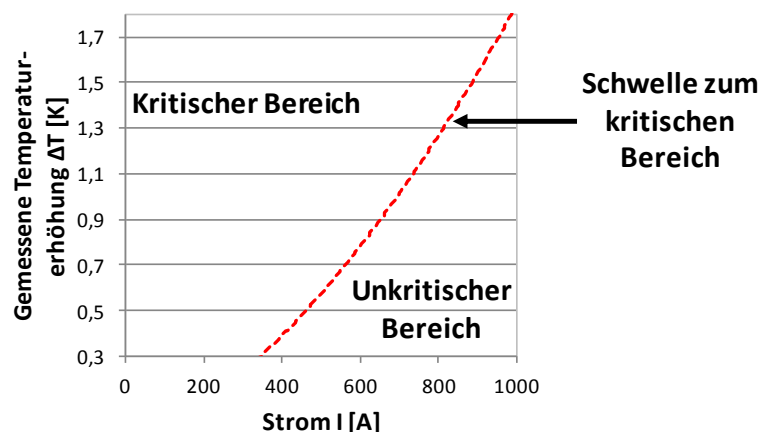


Abbildung 31: Einordnung der gemessenen Temperaturerhöhung in Abhängigkeit des Prüfstroms

Der kritische Bereich dieser Darstellung links bzw. oberhalb der roten Linie basiert auf Widerstandserhöhungen, die unter Beachtung des Bemessungsstroms zum Überschreiten der zulässigen Leitertemperaturen führen können [DIN\_12]. Die hier gezeigte Darstellung bezieht sich auf einen Bemessungsstrom von 1.250 A, eine zulässige Leitertemperatur von 90 °C und eine Gasraumlänge von ca. 100 cm. Sie ermöglicht die Einordnung der Kritikalität eines Messwerts. Die Schwelle zum kritischen Bereich dieser Darstellung variiert in Abhängigkeit des untersuchten Anlagentyps bzw. Gasraums, d.h. in Abhängigkeit der zuvor genannten Größen.

Die Systematik zur Ermittlung der Temperaturunterschiede sieht die Verwendung mittlerer Gasraumtemperaturen vor, um Störeinflüsse sowie Fehlinterpretationen durch die konvektive Temperaturverteilung zu minimieren. Für die praktische Anwendung der Bewertungsmethode sollten Messergebnisse ab einer Temperaturerhöhung von 1 K berücksichtigt werden, um den Einfluss der Messgenauigkeit zu minimieren. Dies ermöglicht unter Beachtung realistischer Auslastungen bzw. Prüfschaltungen von GIS die sinnvolle Ermittlung von relevanten, punktuellen Widerstandserhöhungen ab ca. 50  $\mu\Omega$ . In Analogie zu einem betrieblichen Grenzwert für Leistungsschalter wird dieser Widerstandswert im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Grenzwert verwendet [EPaw\_14].

Aus der bekannten Strombelastung und der festgelegten Toleranzgrenze für Temperaturunterschiede wird die minimal detektierbare Widerstandserhöhung, d.h. die Ansprechschwelle zur Anwendung der Bewertungsmethode, ermittelt, welche die Beurteilung der Sinnhaftigkeit einer Messung ermöglicht. Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Ansprechschwelle [EPaw\_14].

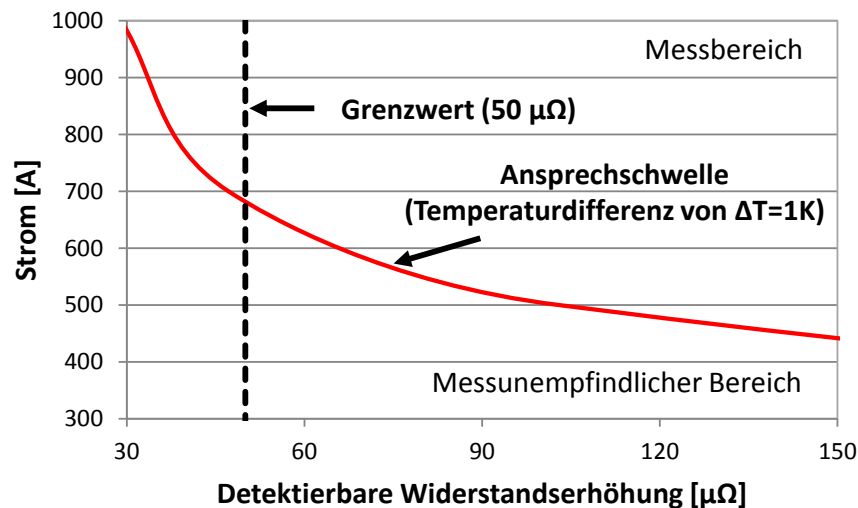


Abbildung 32: Ansprechschwelle für eine tolerierte Temperaturerhöhung von  $\Delta T = 1 K$

Aus der Darstellung geht hervor, dass Messungen bei einer Belastung von mindestens 700 A eine ausreichend hohe Sensibilität für die praktische Anwendung aufweisen. So werden mit einer gemessenen Temperaturdifferenz von 1 K relevante Widerstandserhöhungen identifiziert.

Zur praktischen Ermittlung von Temperaturerhöhungen muss die Auslastung des untersuchten Schaltfelds mindestens über einen Zeitraum von sieben Stunden möglichst konstant sein. Der SF<sub>6</sub>-Gasdruck kann dagegen vernachlässigt werden, da dieser dabei nur geringfügige Auswirkungen hat und im zu untersuchenden Anlagenkollektiv keine wesentlichen Unterschiede aufweist.

Die vorgestellte Systematik zur Ermittlung von Beeinträchtigungen der Stromtragfähigkeit wurde für Gasraumlängen von 40 cm bis 150 cm einer Bauform bestimmt. Zur Übertragung dieser Vorgehensweise auf größere Anordnungen, müssen die Grenzwerte angepasst sowie von einer geringeren Aussagekraft der Bewertungsmethode ausgegangen werden. Kritische Widerstandserhöhungen werden auch bei größeren Anordnungen thermische Auffälligkeiten verursachen, da die Untersuchungen qualitativ zeigen, dass die Auswirkungen lokaler „Hot Spots“ vorrangig auf den Nahbereich um den Ort ihrer Entstehung begrenzt sind.

### 2.3.3.2.2 Thermografie

Die Thermografie erfasst die von der zu untersuchenden GIS ausgehende Strahlung und setzt diese in den sichtbaren Bereich um. Die Strahlung wird so in Form von Oberflächentemperaturen visualisiert. Die Vorteile der Bewertungsmethode liegen im berührungslosen und damit rückwirkungsfreiem Messen [Ber\_14].

Durch die Anwendung der Bewertungsmethode werden großflächige thermische Aufnahmen der zu untersuchenden GIS aufgezeichnet, so dass eine Vielzahl auswertbarer Messpunkte zügig vorliegt und Gasräume innerhalb einer Aufnahme vergleichend analysiert werden können. Hierbei werden punktuelle oder mittlere Flächentemperaturen bestimmt und damit jedem Gasraum eine spezifische Temperatur zugeordnet, wodurch im praktischen Einsatz Temperaturerhöhungen ermittelt werden können.

Abbildung 33 (links) zeigt beispielhaft eine Thermografie-Aufnahme der Laboranlage.

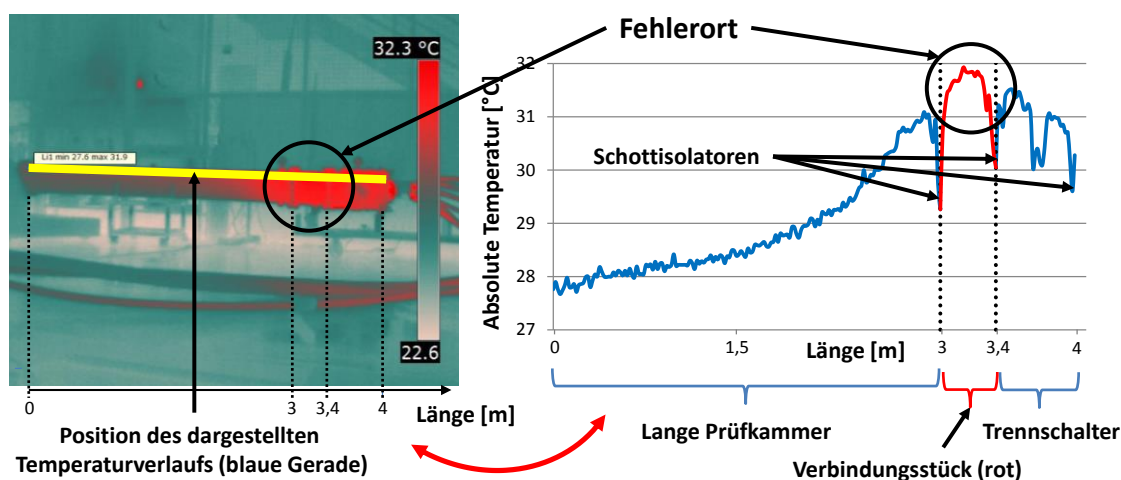


Abbildung 33: Thermografie-Aufnahme (links) und Temperaturverlauf (rechts) entlang der Laboranlage

In der dargestellten Farbskala kann der Fehlerort, der sich durch eine mechanische Widerstandserhöhung von  $100 \mu\Omega$  kennzeichnet, eindeutig identifiziert werden. Zusätzlich enthält die Aufnahme eine gelbe Gerade, deren Temperaturverlauf in Abbildung 33 (rechts) dargestellt ist. Der fehlerhafte Gasraum ist eindeutig am Maximum der Kurve identifizierbar. Er weist eine um mehrere Kelvin höhere Temperatur als z.B. die lange Prüfkammer in dieser Darstellung auf. Die Abgrenzungen der einzelnen Gasräume sind anhand der niedrigeren Temperaturwerte der Schottisolatoren erkennbar.

Thermografie-Aufnahmen können jedoch durch Störeinflüsse beeinträchtigt werden. So kann z.B. die Strahlung von Heizelementen großflächig auftreten und die Temperaturwerte von gesamten Gasräumen während einer Thermografie-Aufnahme beeinflussen. Weiterhin muss der Aufnahmewinkel in Bezug zum Messobjekt beachtet werden. Im praktischen Einsatz ist das Raumangebot begrenzt, so dass Gasräume bzw. Schaltfelder mit verschiedenen Aufnahmewinkeln analysiert werden. Die Distanz zwischen dem Messobjekt und der Optik der Kamera ist demnach über die gesamte Aufnahme hinweg nicht konstant, so dass das von der Thermografie-Kamera aufgespannte Bild unterschiedlich weit entfernte Messpunkte erfasst. Abbildung 34 visualisiert den prinzipiellen Zusammenhang anhand von zwei Bildpunkten, bei denen sich durch unterschiedliche Kamerapositionen die Bezugsfläche ändert.

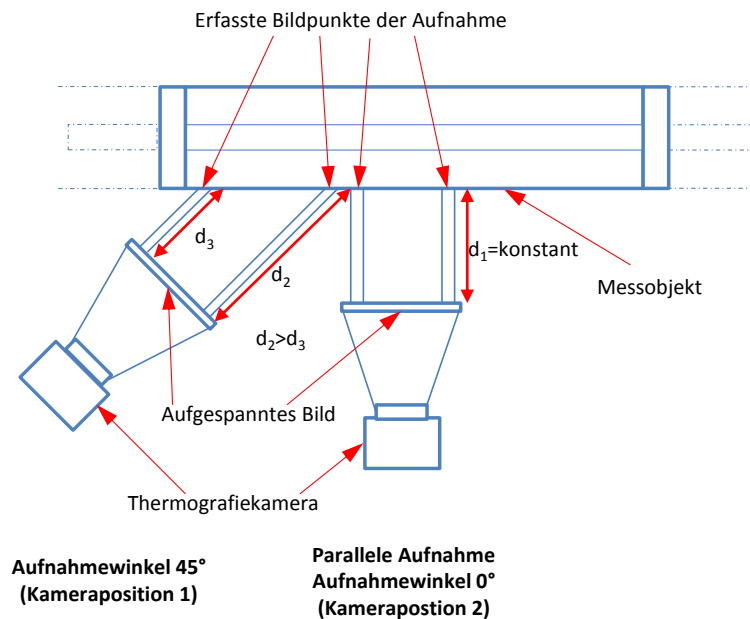


Abbildung 34: Einfluss des Aufnahmewinkels von Thermografie-Aufnahmen

Kameraposition 1 zeigt hierbei den Abstand der erfassten Bildpunkte bei einem Aufnahmewinkel von  $45^\circ$ . Mit der Kameraposition 2 wird der Unterschied zu einer parallelen Aufnahme dargestellt. Während bei letzterer die Abstände aller Bildpunkte von der Optik der Kamera zum Messobjekt konstant sind, variieren diese bei schrägen Aufnahmen. Nach dem fotometrischen Entfernungsgesetz nimmt die Bestrahlungsstärke mit wachsendem Abstand ab [Ber\_14].

Folglich existieren bei Thermografie-Aufnahmen, die nicht parallel zur zu untersuchenden Fläche aufgenommen wurden, unterschiedlich hohe, erfassbare Bestrahlungsstärken, die mit wachsendem Winkel der Aufnahme steigen. Gemäß dem Lambert'schen Gesetz nimmt zudem die Strahlungsleistung mit zunehmender Abweichung von der Parallelität zwischen strahlender und bestrahlter Fläche ab. Bei der Analyse von GIS werden Temperaturdifferenzen innerhalb einer Aufnahme analysiert. Werden die Referenzflächen unter verschiedenen Winkeln erfasst, so ist dieser Effekt zu beachten [Ber\_14].

Diese Effekte wurden durch Aufnahmen mit der vorhandenen Messtechnik untersucht. Durch die Verwendung von mittleren Temperaturen wird bereits eine Vielzahl von Störeinflüssen wie kleine, punktuelle Reflexionen minimiert. Einflüsse durch großflächige Reflexionen und variierende Aufnahmewinkel müssen hingegen beachtet werden. Der mittlere wirksame Anwendungsfehler wird unter Berücksichtigung zufälliger Fehler zu  $0,2\text{ K}$  bestimmt.

#### **2.3.3.2.3 RFID-Thermoobservation**

Die RFID-Thermoobservation ist eine berührungslose und zugleich rückwirkungsfreie Bewertungsmethode zur Bestimmung der Oberflächentemperaturverteilung. Die zugehörigen, passiven Temperatursensoren werden auf der Außenseite der metallischen Kapselung angebracht. Die Messwerte werden mit der RFID-Technik abgefragt. Im Gegensatz zur Thermografie bildet ein Sensor einen Messpunkt. Zur Erfassung einer Vielzahl von Messpunkten, welche zur Bestimmung von mittleren Temperaturen benötigt werden, sind entsprechend viele Sensoren nötig. Hierdurch ist der Messaufwand im Vergleich zur Thermografie deutlich erhöht.

Die Vorteile dieser Bewertungsmethode liegen in der Zugänglichkeit. So können Messpunkte analysiert werden, die z.B. aufgrund baulicher Gegebenheiten mit der Thermografie nur schwer erfasst werden können. Weiterhin können mit dem System unkompliziert Langzeitmessungen ohne permanente Anwesenheit durchgeführt werden. Bei der Thermografie müsste hierzu in regelmäßigen Abständen der Aufnahmeort variiert werden, um die gesamte GIS zu analysieren.

Während der praktischen Anwendung dieser Bewertungsmethode wirken Störeinflüsse auf die erfassten Messwerte, die z.B. durch die Sensoranbringung auf der metallischen Kapselung hervorgerufen werden. Der mittlere wirksame Anwendungsfehler wird zu  $0,2\text{ K}$  bestimmt.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeit wird diese Bewertungsmethode genutzt, um die Temperaturentwicklung im Inneren einer Laboranlage während der Stromversuche zu analysieren. Für den praktischen Einsatz können solche Sensoren im Inneren der Anlagen nicht verwendet werden, da sie aufgrund ihrer Abmessungen die Isolationsfähigkeit beeinträchtigen.



#### **2.3.3.2.4 Wesentliche Schlussfolgerungen für die praktische Anwendbarkeit**

Die Zustandsbewertung kann durch die Analyse der Oberflächentemperatur der GIS wesentlich unterstützt werden. Es wurde gezeigt, dass durch die Bestimmung von Unterschieden der Oberflächentemperaturverteilung innerhalb der Anlage, z.B. zwischen identischen Gasräumen unterschiedlicher Phasen, in Abhängigkeit der Auslastung des zu untersuchenden Schaltfelds relevante kritische Widerstandserhöhungen in praktischen Untersuchungen erfasst und lokal auf den betroffenen Gasraum eingegrenzt werden können. Werden Gasräume analysiert, deren Größenordnungen von den Laboranlagen abweichen, so müssen die verwendeten Grenzwerte ggf. angepasst werden, so dass die thermische Beurteilung der Stromtragfähigkeit umfangreich einsetzbar ist.

Während der praktischen Anwendung kann die Verteilung der Oberflächentemperatur mit der Bewertungsmethode Thermografie zügig analysiert werden. Die RFID-Thermoobservation verursacht hier einen deutlich höheren Aufwand, besitzt jedoch das größere Anwendungspotential für Langzeitmessungen. Bei beiden Bewertungsmethoden ist die Messgenauigkeit aufgrund der verhältnismäßig kleinen zu identifizierenden Temperaturdifferenzen zu beachten. Generell sollten Messergebnisse ab einer Temperaturdifferenz von 1 K berücksichtigt werden.

Die Auswertungen der Untersuchungen zur Bewertungskategorie mechanische Funktion werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da hierzu im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Untersuchungen durchgeführt wurden und diese in einer parallelen Abhandlung detailliert betrachtet werden.

#### **2.3.3.3 Instrumente zur Entscheidungsunterstützung**

Nachdem die geeignete Messtechnik und die zugehörigen Detektionspotentiale identifiziert wurden, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die entwickelten Instrumente zur Entscheidungsunterstützung. Hierbei werden Datenbanken erstellt, die das Wissen aus den Laboruntersuchungen der Bewertungskategorie Isolation einfach zugänglich machen. Durch den unkomplizierten Vergleich von Labor- und Feldmessungen wird die praktische Anwendung der Bewertungsmethoden unterstützt.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde eine Vielzahl von TE-Fehlermustern aufgezeichnet, die zur Einordnung von Messungen im Feld verwendet werden. Hieraus wird ein Katalog mit Beispielpattern erstellt, der zur unkomplizierten Einordnung von Messergebnissen dient (Auszug siehe Anhang 8.5). Darüber hinaus werden die akustischen und UHF-Pattern der detektierbaren Fehler hinsichtlich aussagekräftiger, unkompliziert zu beurteilender Eigenschaften analysiert. Vorrangig werden hieraus die verwendeten Sensorarten, die erfasste Signalstärke sowie die Phasenlage der Signale der jeweiligen Pattern zur Erstellung einer Datenbank genutzt.

Durch die Filterung und den Vergleich von Labormessdaten wird die Zuordnung von Feldmessungen unterstützt. Abbildung 35 zeigt beispielhaft einen Auszug der Datenbank.

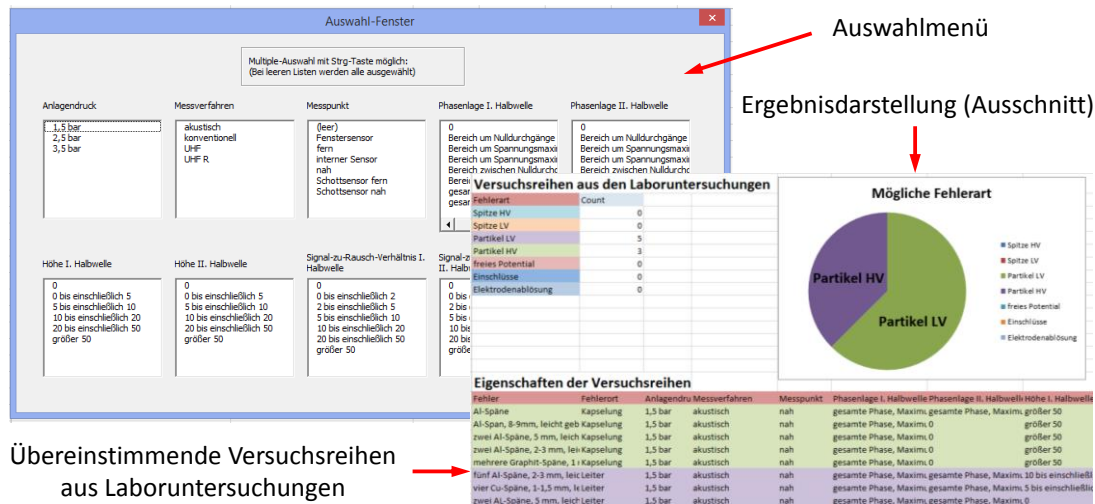


Abbildung 35: Datenbank der TE-Versuchsreihen

Zu erkennen sind das Auswahlmenü und die Ergebnisdarstellung. Durch die Filterung nach den gemessenen Eigenschaften im Auswahlmenü werden die übereinstimmenden Versuchsreihen aus den Laboruntersuchungen angezeigt, wodurch das gemessene Teilentladungsmuster mit den Laborfehlern korreliert werden kann.

Weiterhin wird eine Übersicht erstellt, welche die detektierbaren Fehler nach Bewertungsmethode, Messpunkt und zugehöriger Sensorart kategorisiert darstellt (vgl. Auszug Anhang 8.4). Die Detektierbarkeit des Fehlers wird jedem Messpunkt spezifisch zugeordnet. So ermöglicht die Übersicht eine detaillierte Angabe messbarer Fehler der Bewertungsmethode und des spezifischen Sensors in Abhängigkeit der Entfernung zum Isolationsfehlerort. Die Übersicht kann bei Unstimmigkeiten von Messergebnissen im Feldeinsatz genutzt werden, wenn z.B. ausschließlich die unempfindlichere akustische Bewertungsmethode einen Fehler detektiert, der ebenso im UHF-Bereich messbar sein müsste, aber nicht detektiert wurde. Der Abstand vom Sensor zum Fehlerort, d.h. die Dämpfungseigenschaften, können somit in die Ergebnisinterpretation integriert werden.

## 2.4 Anwendung in Felduntersuchungen

Die Bewertungsmethoden werden umfangreich an GIS eines großen Anlagenkollektivs (vgl. Abschnitt 4.2.1) erprobt. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Erkenntnisse der zuvor im Labor erprobten Messtechnik vorgestellt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die im Labor gewonnenen Kenntnisse zur Anwendbarkeit im Feldtest zu validieren und mögliche Störeinflüsse, die aus der Messtechnik resultieren, zu identifizieren.

### 2.4.1 Bewertungskategorie Isolation

Die Bewertungsmethoden akustische und UHF-Teilentladungsmessung werden im Rahmen der Feldtests an 51 Schaltfeldern angewendet. Während die akustische Teilentladungsmessung an nahezu allen Schaltfeldern angewendet wird, wird die UHF-Teilentladungsmessung an fünf Schaltfeldern bei diesen Untersuchungen angewendet.

Die praktische Anwendbarkeit der UHF-TE-Messung erweist sich generell als begrenzt. Wenige Schaltfelder des Anlagenkollektivs nach Abschnitt 4.2.1 – insgesamt 33 % des Kollektivs – verfügen überhaupt über geeignete Ankopplungspunkte für UHF-Sensoren. Hiervon verteilen sich 23 % auf Fenstersensoren und 10 % auf Sensoren für Schottisolatoren. Interne Sensoren sind nicht vorhanden.

Schaltfelder, an denen die empfindlicheren Fenstersensoren angebracht werden können, verfügen über wenige Messpunkte – i.d.R. zwei bis drei je Schaltfeld. Ist die UHF-TE-Messung mit Sensoren für Schottisolatoren anwendbar, so kann nahezu jeder Schottisolator innerhalb des Schaltfelds als Messpunkt genutzt werden. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Anzahl an Messpunkten ist der zeitliche Messaufwand gering.

Die generelle Handhabbarkeit der Messtechnik gestaltet sich unproblematisch. Das ermittelte Grundrauschen, d.h. der sogenannte Grundstörpegel, ist in derselben Größenordnung wie in den Laboruntersuchungen. Die Ergebnisse sind somit prinzipiell übertragbar. An den untersuchten Feldern wurden mit der UHF-TE-Messung keine Auffälligkeiten ermittelt.

Die Anwendung der akustischen TE-Messung ist prinzipiell an allen Schaltfeldern möglich, wobei die Sensorpositionen beliebig gewählt werden können, da die Sensoren an jedem Punkt des Gehäuses der GIS installierbar sind. Entsprechend den Erfahrungen aus den Laboruntersuchungen wird je Gasraum mindestens ein Messpunkt gewählt. An längeren Ausführungen ab ca. 3 m Länge wird die Anzahl erhöht. Generell ist der hieraus resultierende Messaufwand als hoch einzustufen. Zudem ist der Installationsaufwand für die Sensoren zur Herstellung eines soliden Kontakts im Vergleich zu den UHF-Sensoren höher und zeitaufwändiger.

Durch den größeren Anwendungsbereich im Vergleich zur UHF-TE-Messung wird die akustische TE-Messung während der Untersuchungen an 48 Schaltfeldern untersucht. Der hierbei ermittelte Grundstörpegel gleicht dem der Laborversuche. Die meisten Schaltfelder zeigten keine Auffälligkeiten bei diesen Untersuchungen. Jedoch werden drei fehlerbehaftete Schaltfelder identifiziert, die Fehlermuster von zwei verschiedenen Fehlerarten zeigen. An diesen Schaltfeldern konnten keine UHF-TE-Messungen durchgeführt werden.

Die Muster der ersten Fehlerart werden an zwei baugleichen Schaltfeldern ermittelt und der Fehlerart „Partikel auf Isolator“ zugeordnet. Sie werden als kritisch bewertet. Der fehlerbehaftete Gasraum kann durch die Bewertungsmethode des akustischen Amplitudenvergleichs eingegrenzt werden. Die Diagnose kann jedoch nicht überprüft werden, da eine Öffnung der Schaltfelder aus betrieblichen Gründen nicht möglich ist. Dieses Messergebnis bestätigt allerdings, dass jeder Gasraum separat mit der akustischen TE-Messung untersucht werden sollte (vgl. Abschnitt 2.3.3.1.3), da der Fehler ausschließlich am betroffenen Gasraum gemessen wird.

An einem weiteren Schaltfeld einer anderen GIS wird an einem Leistungsschalter-Gasraum die Fehlerart „freie Partikel“ auf Erdpotential identifiziert. Das Messergebnis wird als kritisch bewertet. Abbildung 36 zeigt ein zugehöriges akustisches Pattern (Feldmessung) sowie ein fehlerfreies Pattern (Grundstörpegel) und das Pattern einer Labormessung der Fehlerart „freie Partikel auf Erdpotential“.

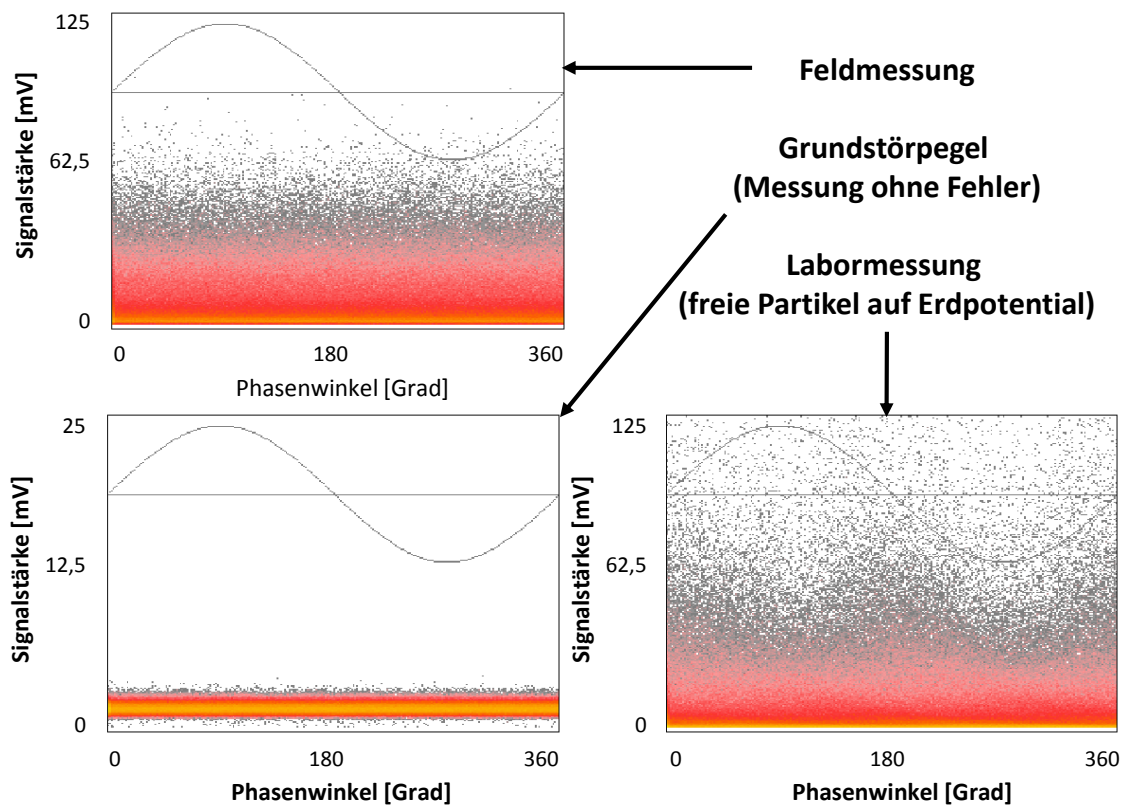


Abbildung 36: Auswertung akustischer TE-Pattern der Felderprobungen

Das Pattern aus der Feldmessung hebt sich deutlich von der Messung ohne Fehler ab. Im Fall von Fehlerfreiheit wäre an dieser Stelle lediglich der Grundstörpegel, d.h. Datenpunkte bis zu einer Signalstärke von ungefähr 4 mV, sichtbar gewesen. Die vorliegenden, aufgezeichneten Signale sind stärker als 100 mV. In den Laboruntersuchungen werden solche hohen Signalstärken vorrangig durch freie Partikel erzeugt. Ein zugehöriges Pattern, welches den Feldmessungen ähnelt, ist in Abbildung 36 (rechts) dargestellt. Die Feldmessung ähnelt sehr stark der Labormessung, wodurch ein Hinweis auf freie Partikel auf Erdpotential in der untersuchten Feldanlage erzeugt wird.

Aufgrund dieser Feldmessung wird der zugehörige Gasraum geöffnet, wobei freie Partikel auf Erdpotential festgestellt werden. Nach anschließender Reinigung des inneren Gasraums werden keine Auffälligkeiten mehr festgestellt.

Während der Feldmessungen werden bei der Sensoranbringung potentielle Störeinflüsse identifiziert. Es ist darauf zu achten, dass der Luftspalt zwischen der Kontaktfläche des akustischen Sensors und der GIS durch ein Kontaktgel ausgeglichen wird und der Anpressdruck ausreichend hoch ist. Weiterhin sind externe akustische Störeinflüsse wie z.B. vorbeifahrende Fahrzeuge oder Stöße an die GIS zu beachten, die kurzzeitige akustische Signale erzeugen und folglich das Messergebnis beeinflussen können. Insgesamt wurden bei fünf Felduntersuchungen Störeinflüsse identifiziert und unterdrückt.

#### **2.4.2 Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit**

Aus den Laboruntersuchungen geht hervor, dass relevante Widerstandserhöhungen erst ab Anlagenströmen von mindestens 700 A detektierbar sind (vgl. Abschnitt 2.3.3.2). Entsprechend werden die Felduntersuchungen erst ab dieser Belastung durchgeführt. Liegen ausreichend hohe Ströme nicht vor, werden sie durch betriebliche (Prüf-)Schaltungen realisiert. Insgesamt werden 14 Schaltfelder mit der Bewertungsmethode Thermografie untersucht. Die Bewertungsmethode RFID-Thermoobservation wird aufgrund des hohen Aufwands nicht in die Felduntersuchungen integriert.

In der praktischen Anwendung können die erforderlichen Betriebsströme von 700 A aufgrund der individuellen Netzsituation nicht an allen Tagen der Messung erreicht werden. In Einzelfällen werden nur maximal 500 A erreicht. Die Untersuchungen werden dennoch unter der Berücksichtigung einer verminderten Aussagekraft durchgeführt. Während der Anwendung werden die zu untersuchenden Gasräume und die zugehörigen Referenzgasräume mit jeweils einer Thermografie-Aufnahme erfasst, so dass die Auswertung der Messdaten analog zu der in Abschnitt 2.3.3.2 vorgestellten Systematik erfolgt. Auffälligkeiten werden mit dieser Bewertungsmethode nicht detektiert.

Aufgrund der überwiegend geringen Auslastung von GIS des Anlagenkollektivs erweist sich der Anwendungsbereich dieser Bewertungsmethode generell als begrenzt. Lediglich 20 % der Schaltfelder des Anlagenkollektivs können untersucht werden. Weiterhin ist eine Anwendung zum Teil nicht notwendig, da verlässliche, invasive Messdaten der Bewertungsmethode Spannungsfallmessung vorliegen. Störeinflüsse ergeben sich durch die Zugänglichkeit der untersuchten Schaltfelder. Aufgrund der Innenraumaufstellung und dem damit verbundenen begrenzten Platzangebot wird die Messwertaufnahme erschwert bzw. der zeitliche Aufwand erhöht.

Die Felduntersuchungen zeigen jedoch einen weiteren Anwendungsbereich der thermischen Bewertungsmethoden. Im konkreten Fall wird bei einer Spannungsfallmessung an einer von drei Phasen innerhalb eines Schaltfelds eine Widerstandserhöhung von  $200 \mu\Omega$  detektiert. Trotz des verlässlichen Messergebnisses kann der Fehlerort nicht zugeordnet werden. Die Messung erfolgt betriebsbedingt über eine Messstrecke von ca. 18 m Länge, wobei ca. 20 Kontaktstellen, d.h. 20 statische Kontaktwiderstände, in den gemessenen Widerstandswert einfließen. Die Kritikalität dieses Messergebnisses kann somit mit der Spannungsfallmessung ohne unzulässig hohen Aufwand nicht ermittelt werden. Deswegen wird mit der Bewertungsmethode Thermografie untersucht, ob entlang der Messstrecke eine punktuelle Widerstandserhöhung vorliegt oder sich die Widerstandserhöhung verteilt.

Durch eine betriebliche Schalthandlung wird die Last für einen Zeitraum von 24 Stunden auf ca. 850 A erhöht, wodurch die Anwendbarkeit mit ausreichend hoher Sensitivität sichergestellt wird. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse ergibt, dass kein kritischer lokaler „Hot Spot“ vorliegt, da keine Temperaturerhöhung festgestellt wird.

### **2.4.3 Wesentliche Schlussfolgerungen aus den Felduntersuchungen**

Die im Labor untersuchten Bewertungsmethoden der Bewertungskategorien Isolation und Stromtragfähigkeit können die Zustandsbewertung im praktischen Einsatz erheblich unterstützen.

Zur Bewertung der Isolation weist die akustische TE-Messung das größte Anwendungspotential auf. Mit dieser Bewertungsmethode können alle Anlagentypen analysiert und aussagekräftige Bewertungsergebnisse erzeugt werden. In den Felduntersuchungen werden hiermit verschiedene Auffälligkeiten an Anlagen festgestellt. Es wurde bestätigt, dass akustische TE-Messungen separat an jedem Gasraum durchgeführt werden sollten. Die UHF-TE-Messung kann an wenigen Anlagen des Kollektivs angewendet werden, wodurch der Anwendungsbereich begrenzt ist [EPaw\_14].

Aufgrund der überwiegend geringen Auslastung von GIS ist der Anwendungsbereich der Thermografie zur Bewertung der Stromtragfähigkeit begrenzt. Insgesamt können nur 20 % der Schaltfelder analysiert werden, da der erforderliche Prüfstrom nicht erreicht wird. Zum Teil müssen ausreichend hohe Ströme durch geeignete Prüfschaltungen realisiert werden [EPaw\_14].

Diese Bewertungsmethode zeigt während der Untersuchungen einen Zusatznutzen. So dient sie der Bewertung von Messergebnissen der invasiven Bewertungsmethode Spannungsfallmessung. Sie wird zur Eingrenzung des Fehlerorts genutzt, da dieser mit der Spannungsfallmessung ohne unzulässig hohen Aufwand nicht zugeordnet werden kann.

## 2.5 Weitere messtechnische Bewertungsmethoden

Neben den in die Gesamtsystematik implementierten Bewertungsmethoden werden weitere Bewertungsmethoden [Gün\_03, Wem\_07, Küc\_09, Scw\_07, Sti\_04, DIN\_94, Spß\_09, Her\_04, Weiß\_10, Tak\_86, NTY\_00, Gra\_09] hinsichtlich ihrer Eignung zur Zustandsbewertung von GIS untersucht. Tabelle 9 gibt hierüber einen Überblick. Aufgrund der anwendungsbezogenen Einschränkungen werden sie jedoch nicht weiter berücksichtigt. Eine nachträgliche Integration in die Gesamtsystematik ist prinzipiell möglich (vgl. Abschnitt 4.1), sollte sich die Praktikabilität in Zukunft weiterentwickeln.

**Tabelle 9: Weitere Bewertungsmethoden zur nicht-invasiven Zustandsbewertung von GIS**

Bewertungskategorie	Zu beurteilende Komponente	Bewertungsmethode	Anwendungsbezogene Einschränkungen
<b>Isolation</b>	Isolationsfähigkeit, Gasräume und Feststoffe	Chemische Teilentladungsmessung	Fehlen von Referenz- bzw. Ausgangsdaten
		Optische Teilentladungsmessung	Hoher Aufwand zur Adaption an Bestandsanlagen
		Eingrenzung des Fehlerorts im Frequenzbereich	Aufwandsminimalere Bewertungsmethoden verfügbar
		Leckdetektion durch Umgebungsluftanalyse	Störanfälligkeit durch Luftbewegungen, Position
<b>Stromtragfähigkeit/ Mechanische Funktion</b>	Innenliegende Komponenten	Röntgenradiographie	Hohe Beschaffungskosten, alternative Bewertungsmethoden verfügbar
		Terahertz-Imaging	Keine erwerbbar Messtechnik
<b>Mechanische Funktion</b>	Schaltgeräte	Ultraschallprüfung	Hoher Aufwand zur Adaption an Bestandsanlagen, Fehlen von Erfahrungswerten bzw. Beurteilungskriterien
	Dynamisches Kontaktsystem	Schwingungsanalysen	Fehlen von Referenz- bzw. Ausgangsdaten, bauartbedingte Rückwirkung auf Bewertungsergebnis
	Durchführungen	tan- $\delta$ -Messung	Fehlender Anwendungsbereich im Anlagenkollektiv, Messtechnik nicht adaptierbar





### 3 Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung gasisolierter Schaltanlagen

Nachdem zuvor die zu integrierende Messtechnik vorgestellt und in den Laborversuchen umfangreich analysiert wurde, konzentriert sich der folgende Abschnitt auf die Entwicklung der zugehörigen Gesamtsystematik, die eine Bewertung des Schaltfeld- und Anlagenzustands unter Einbindung der Messtechnik sowie der spezifischen Aussagequalität ermöglicht. Hierzu werden eingangs die theoretischen Grundlagen vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung des entwickelten Modells.

#### 3.1 Aufbau

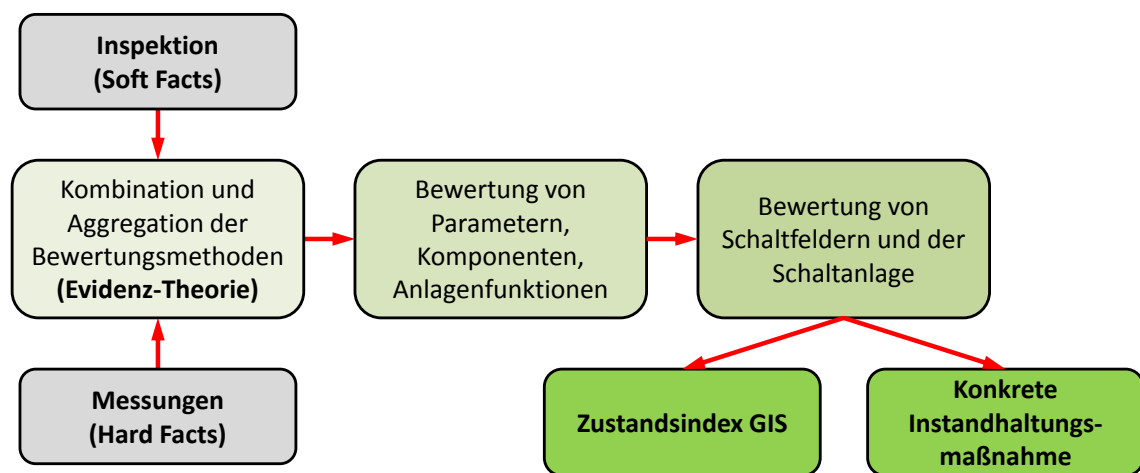


Abbildung 37: Funktionsprinzip der Gesamtsystematik [EPaw\_15a]

Das Funktionsprinzip der Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung von GIS ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Eingangsdaten werden aus verschiedenen Informationsquellen ermittelt (vgl. Abschnitt 3.2.2.1) und spezifisch bewertet (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Es werden sogenannte „Soft Facts“ von Inspektionsergebnissen verwendet, die überwiegend auf visuellen Kontrollen basieren. Einfache Messergebnisse, wie z.B. Anlagendrucke werden ebenso dieser Informationsquelle zugeordnet. Darüber hinaus bilden die komplexeren Messungen wie z.B. die unkonventionelle Teilentladungsmessung die Informationsquelle „Messungen“ ab. Hieraus werden sogenannte „Hard Facts“ gewonnen. Die bewerteten Eingangsdaten werden anschließend miteinander kombiniert, wobei die spezifische Aussagekraft unter Nutzung der Evidenz-Theorie berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 3.2.2.5). Im weiteren Verlauf erfolgt die Aggregation mit Gewichtungsfaktoren (vgl. Abschnitt 3.2.2.6), wodurch Gesamtergebnisse von Schaltfeldern und final der gesamten Schaltanlage erzeugt werden. Das Ergebnis besteht aus einem Zustandsindex (vgl. Abschnitt 3.2.2.8) und der Angabe der zugehörigen Aussagekraft bzw. Unsicherheit (vgl. Abschnitt 3.3) sowie einem Ergebnisbericht, der die identifizierten Auffälligkeiten enthält. Hieraus können konkrete Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden [EPaw\_15a].

Die Hauptfunktion der Gesamtsystematik besteht in der Erzeugung eines Zustandsindex für ein gesamtes Schaltfeld als sinnvoll instand zu haltende Einheit. Dieser wird unter Angabe der zugehörigen Aussagekraft in Form der Unsicherheit erstellt. Zusätzlich werden Zustandsindex und Unsicherheit für die einzelnen Schaltfeldfunktionen sowie die gesamte Schaltanlage als sinnvolle Einheit für Erneuerungsentscheidungen ermittelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Unterstützung des strategischen Asset-Managements, da hier der Gesamtzustand fokussiert wird, wobei prinzipiell durch Aufsummierung der einzelnen Substanzverluste der gesamte Substanzverlust, z.B. der Schaltanlage, des Schaltfelds oder einer Anlagenfunktion, realitätsgerecht dargestellt wird. Der Unsicherheitsbereich beschreibt zusätzlich die Aussagekraft des Befunds. Der Anlagenbetrieb kann bereits durch vereinzelte Substanzverluste gefährdet sein. Einzelne, als „schlecht“ bewertete Bewertungsergebnisse können durch die Vielzahl an Parametern den Gesamtindex nicht wesentlich beeinflussen. Aus diesem Grund werden solche Auffälligkeiten separat ausgegeben, wodurch der Asset-Service konkret unterstützt wird. Die Vereinigung dieser beiden Sichtweisen in der Gesamtsystematik bildet eine solide Basis zur Entscheidungsunterstützung. Wartungs- und Erneuerungsentscheidungen werden fundiert unterstützt. Der Zustandsindex in Kombination mit der spezifischen Aussagekraft ermöglicht einen zustandsorientierten Vergleich der Anlagen- bzw. Schaltfeldzustände als Grundlage strategischer Entscheidungen. Die separate Auflistung der identifizierten Substanzverluste unterstützt insbesondere kurzfristige, konkrete Wartungs- und Erneuerungsentscheidungen.

Die Gesamtsystematik wurde so konzipiert, dass die Bewertungen unterschiedlicher Anlagentypen miteinander verglichen werden können. Jeder Anlagentyp verfügt über spezifische Eigenschaften, weshalb nicht jede Bewertungsmethode bei allen Anlagentypen angewendet werden kann bzw. die Aussagekraft der Bewertungsmethoden sich unterscheidet. Dies liegt beispielsweise vor, wenn Schaltfelder nicht über geeignete Ankopplungspunkte für UHF-Sensoren zur unkonventionellen Teilentladungsmessung verfügen, so dass diese Bewertungsmethode entfällt [EPaw\_15a].

Auch der grundlegende Aufbau der Schaltfelder ist nicht vollkommen identisch. So existieren beispielsweise einphasig und dreiphasig gekapselte Ausführungen im Anlagenkollektiv. Zwar ist hierbei die Art der vorhandenen Komponenten je Schaltfeld identisch, jedoch nicht deren Anzahl. Vor dem genannten Hintergrund wurde ein funktionsorientierter Ansatz als Grundlage der Gesamtsystematik gewählt, wobei die Feldebene den Ausgangspunkt darstellt. Die Bewertung ist auf die identifizierten Schaltfeldfunktionen ausgelegt, die u.a. einzelnen Komponentenarten eines Schaltfelds zuzuordnen sind. Auch übergreifende Funktionen wurden identifiziert, die nicht ausschließlich durch Bewertungskriterien einer Komponentenart beurteilt werden können. Tabelle 10 zeigt die identifizierten Schaltfeldfunktionen, die in der Gesamtsystematik genutzt werden. Sie stellen die höchste Aggregationsebene unterhalb der Schaltfeldebene dar.

Tabelle 10: Schaltfeldfunktionen und Bewertungskategorien

Schaltfeldfunktion	Bewertungskategorie
Spannung halten	Isolation
Strom führen	Stromtragfähigkeit
Fehlerstrom schalten / Strom und Spannung schalten	Mechanische Funktion
Strom oder Spannung schalten	
Aktivteile erden	
Kabel entladen	
Überspannung abbauen	
Strom messen	
Spannung messen	
Steuerung und Überwachung sicherstellen	
Netzanschluss herstellen	

Von der Funktionsebene ausgehend findet eine weitere Unterteilung statt, so dass innerhalb der Aggregationssystematik eine Baumstruktur entsteht, deren Wurzel das Schaltfeld darstellt. Inklusive der Feldebene erstreckt sich die Systematik auf bis zu sieben Ebenen. Eine detailliertere Darstellung wird in Abschnitt 3.2.2 gegeben. Die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Bewertungskategorien werden in diesen Aufbau integriert. Die Bewertungskategorie Isolation wird durch die Schaltfeldfunktion „Spannung halten“ repräsentiert. Sie kann nicht ausschließlich einzelnen Komponenten zugeordnet werden und bildet somit eine feldübergreifende Funktion. Ebenso stellt die Schaltfeldfunktion „Strom führen“ ein übergeordnetes Element dar, welches die Bewertungskategorie Stromtragfähigkeit vollständig umfasst. Die Bewertungskategorie mechanische Funktion wird den weiteren Anlagenfunktionen zugeordnet.

Durch die Integration der Evidenz-Theorie ist die Gesamtsystematik zur Verarbeitung von unsicherem und vor allem auch fehlendem Wissen, z.B. durch nicht erhobene Messdaten, ausgelegt (vgl. Abschnitt 3.2.2.4). Die Systematik ist offen gestaltet und kann jederzeit erweitert werden. Diese Eigenschaft ermöglicht in Zukunft die Integration von weiteren, bisher nicht vorgesehenen Bewertungsmethoden. Zusätzliche Bewertungsergebnisse von invasiven Bewertungsmethoden können somit unter Beibehaltung der Aggregationssystematik bzw. der Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen integriert werden (vgl. Abschnitt 4.1). So können z.B. zur Bewertung der Stromtragfähigkeit Messdaten der invasiven Spannungsfallmessung genutzt werden. Fehlen die Daten, so geht der Punkt mit einer vollkommenen Unsicherheit ein. Ausschließlich bei einem Vorhandensein der Information wird das Bewertungsergebnis im Sinne einer höheren Validität beeinflusst [EPaw\_15a].

Weiterhin wird das Alter der Eingangsdaten berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.2.2.9), da aktuelle Zustandserfassungen mitunter auf Eingangsdaten basieren, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben wurden. Zur Vereinheitlichung der Eingangsdaten wird die Unsicherheit entsprechend des Datenalters angepasst. Die Anpassung folgt der Prämisse, dass älteren Daten nicht so sehr vertraut werden kann, wie solchen, die zum aktuellen Zeitpunkt erhoben werden.

## 3.2 Aggregationssystematik

Das Schema der Aggregation bildet das Kernelement der Gesamtsystematik. Zu Beginn dieses Abschnitts wird eine Übersicht der theoretischen Grundlagen gegeben, wobei der Begriff der Unsicherheit im Sinne der Gesamtsystematik abgegrenzt wird. Darüber hinaus werden verschiedene Ansätze vorgestellt, welche die Verarbeitung unsicherheitsbehafteter Eingangsdaten ermöglichen. Ihre Eignung zur Verwendung in der Gesamtsystematik wird analysiert. Abschließend wird die Umsetzung in die Aggregationssystematik thematisiert.

### 3.2.1 Verarbeitung unsicheren Wissens

#### 3.2.1.1 Begriff der Unsicherheit

Zu Beginn wird der Begriff der Unsicherheit eingegrenzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit müssen folgende zwei Arten der Unsicherheit berücksichtigt werden [GSS\_14, Hiy\_99]:

- **Unwissenheit:** Diese Form der Unsicherheit beschreibt eine eingeschränkte Aussagekraft von Bewertungsmethoden. Der Lösungsraum wird durch die gewählte Bewertungsmethode nicht vollständig abgedeckt. Hieraus resultiert, dass neben dem durch die Bewertungsmethode bestimmten Bewertungsergebnis weitere kritischere Ergebnisse möglich sind, die nicht detektiert werden können. Aus dem zusätzlich möglichen Bereich resultiert demnach eine Unsicherheit.

Einen möglichen Anwendungsbereich stellen Bewertungsmethoden dar, die nicht alle relevanten Fehlerarten ermitteln können. Neben dem Bewertungsergebnis sind nicht detektierbare Bewertungsergebnisse möglich, die der Unsicherheit zugeordnet werden. Eine weitere Quelle der Unwissenheit entsteht durch fehlende Eingangsdaten. Liegen Daten nicht vor, deren Erhebung möglich gewesen wäre, so kann das Bewertungsergebnis der Bewertungsmethode nicht bestimmt werden. Es ist vollkommen unsicher.

- **Bewertungsungenauigkeit:** Diese Form der Unsicherheit beschreibt die Ungenauigkeit von Bewertungsmethoden. Als Bewertungsergebnis wird i.d.R. ein Lösungsraum erzeugt, der mehrere Alternativen enthält. Das wahre Ergebnis befindet sich innerhalb dieses Lösungsraums.

Im Rahmen der Zustandsbewertung können hier z.B. Messungenauigkeiten zugeordnet werden, da jeder Messwert innerhalb eines Intervalls verlässlich ist. Durch das Bewertungsergebnis wird ein Ergebnisintervall erzeugt, welches i.d.R. den konkret ausgegebenen Messwert umschließt. Darüber hinaus werden zufällige Mess- und Bewertungsfehler der Bewertungsungenauigkeit zugeordnet.

Die entwickelte Aggregationssystematik berücksichtigt beide Arten der Unsicherheit.

### 3.2.1.2 Konventionelle Bewertungssystematik

Die konventionelle Bewertungssystematik ist ein Ansatz zur Zustandsbewertung, der auf Bewertungen und Gewichtungsfaktoren basiert. Zu bewertende elektrische Betriebsmittel werden in Unterkategorien, wie z.B. einzelne Komponenten, eingeteilt. Diesen werden wiederum geeignete Bewertungskriterien zugeordnet. Abbildung 38 stellt einen Aufbau beispielhaft dar [Wel\_09, Bee\_12].

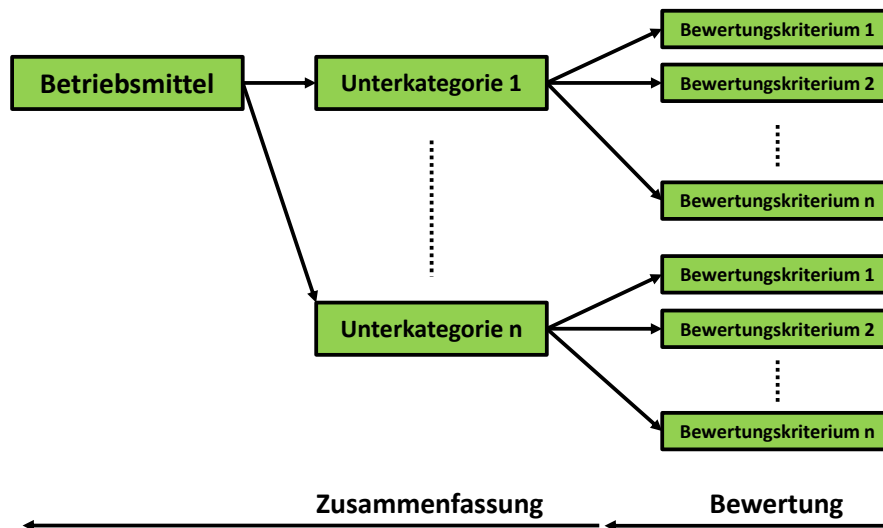


Abbildung 38: Baumstruktur der konventionellen Zustandsbewertung

Durch die Unterteilung entsteht eine Baumstruktur, deren Wurzel das zu bewertende Betriebsmittel bildet. Verschiedene Ausprägungen der Verzweigungen sind möglich. Die unterste Ebene dieser Struktur beinhaltet i.d.R. Informationen, welche aus verschiedenen Informationsquellen, z.B. statistischen Erhebungen, Messergebnissen oder visuellen Inspektionsergebnissen stammen. Die Informationen werden an dieser Stelle bewertet, wobei das Bewertungsintervall bei allen Bewertungskriterien identisch sein sollte, um eine einheitliche Bewertung des Betriebsmittels zu erzeugen. Innerhalb des Bewertungsintervalls müssen in Abhängigkeit des Bewertungskriteriums nicht alle möglichen Abstufungen vorhanden sein.

Diese konventionelle Vorgehensweise erlaubt eine Bewertung ( $B$ ) der Eingangsdaten in den Grenzen von z.B. „gut“ bis „schlecht“. Zur Verarbeitung in einer Systematik können hierfür Bewertungskennzahlen genutzt werden, die beispielsweise dem Schulnotensystem folgen. So können bei einem Bewertungskriterium mehrere diskrete Bewertungsalternativen möglich sein. Die hinterlegte Bewertung kann z.B. in diskreten Abstufungen von „1“ bis „4“ oder kontinuierlich innerhalb dieses Intervalls stattfinden, wobei „1“ die beste Bewertung darstellt.

Zur weiteren Verarbeitung kann das Bewertungsergebnis normiert ( $B_{\text{norm}}$ ) werden. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Transformation von Bewertungsergebnissen ( $B$ ) des Intervalls  $[1,4]$  in das Intervall  $[0\%, 100\%]$  wird gezeigt. Zusätzlich wird beispielhaft das Bewertungsergebnis einer mittelschweren Auffälligkeit der Bewertung  $B = 3$  dargestellt.

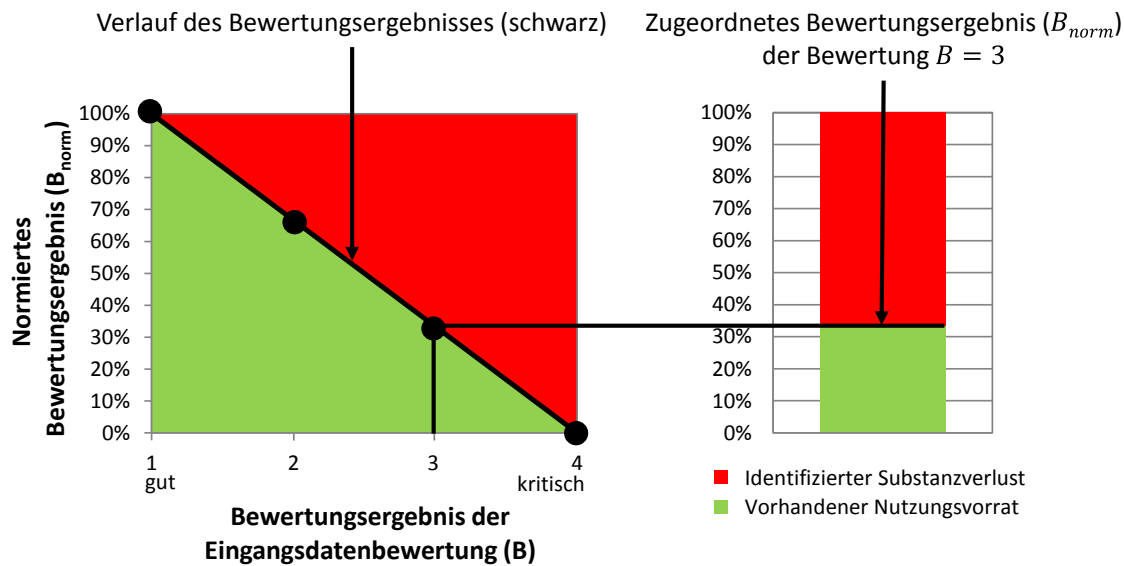


Abbildung 39: Transformation von Bewertungsergebnissen

Diese Darstellung veranschaulicht, wie sowohl diskrete als auch kontinuierliche Bewertungsergebnisse transformiert werden können. Bei diskreten Bewertungsergebnissen der Eingangsdatenbewertungen sind die schwarz markierten Punkte zur Transformation zu verwenden. Bei kontinuierlichen Bewertungsergebnissen kann jeder Punkt entlang der Geraden innerhalb des Bewertungsintervalls der Eingangsdatenbewertung verwendet werden. Als Bewertungsergebnis – im Beispiel der Bewertung  $B = 3$  – entsteht ein transformierter, diskreter Zahlenwert innerhalb des normierten Bewertungsintervalls [0%;100%]. Hierdurch wird das Intervall in den vorhandenen Nutzungsvorrat, welcher sich unterhalb des normierten Bewertungsergebnisses befindet, und den identifizierten Substanzverlust, der sich entsprechend oberhalb befindet, aufgeteilt (vgl. Abschnitt 3.3). Die Lage des normierten Bewertungsergebnisses innerhalb des normierten Bewertungsintervalls ist ein Maß für den Zustand bzw. das Ausmaß der durch die Bewertungsmethode identifizierten Auffälligkeit. Das normierte Bewertungsergebnis 100 % stellt hierbei die bestmögliche Bewertung dar.

Den Bewertungskriterien innerhalb einer Unterkategorie sowie den Unterkategorien werden Gewichtungsfaktoren entsprechend ihrer Wichtigkeit zugeordnet. Die Zustandsbewertung erfolgt von der untersten Ebene ausgehend. Nach der Bewertung der Bewertungskriterien ( $B_B$ ) werden diese mit Hilfe der jeweiligen Gewichtungsfaktoren ( $G_B$ ) innerhalb einer Unterkategorie nach Gleichung (3.1) zusammengefasst:

$$B_U = \frac{\sum_{j=1}^n B_{B,j} \cdot G_{B,j}}{\sum_{j=1}^n G_{B,j}} \quad (3.1)$$

Anschließend werden die bewerteten Unterkategorien ( $B_U$ ) unter Beachtung der zugehörigen Gewichtungsfaktoren ( $G_U$ ) nach Gleichung (3.2) aggregiert:

$$Z_B = \frac{\sum_{j=1}^n B_{U,j} \cdot G_{U,j}}{\sum_{j=1}^n G_{U,j}} \quad (3.2)$$

Alle verwendeten Gewichtungsfaktoren sollten innerhalb einer Bewertungsebene normiert werden [Bee\_12, Wel\_09, Eis\_03, Lag\_07]. Durch die Anwendung der konventionellen Bewertungssystematik wird ein diskretes Gesamtergebnis ( $Z_B$ ) erzeugt, welches sich innerhalb des Bewertungsintervalls eines Bewertungskriteriums befindet. Die Unsicherheit bzw. Aussagekraft von Bewertungskriterien wird bei dieser Methodik nicht separat beachtet.

Zudem ist der Einfluss von fehlenden Eingangsdaten erheblich. Da i.d.R. statische Gewichtungsfaktoren verwendet werden, wird durch nicht bewertete Bewertungskriterien, welche meist mit einer Nichtbeachtung des Bewertungskriteriums sowie der zugehörigen Gewichtung einhergehen, die Systematik zur Ermittlung des Gesamtergebnisses ( $Z_B$ ) beeinflusst. Durch den Wegfall steigt der Einfluss der übrigen Bewertungskriterien aufgrund der nun stärkeren Gewichtung auf das Gesamtergebnis. Je mehr Bewertungspunkte fehlen, desto größer ist der Einfluss auf die Funktionsweise der Bewertungssystematik. Die Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse kann hierdurch eingeschränkt werden, wenn ein vorhandenes Betriebsmittelkollektiv analysiert werden soll.

Durch die konventionelle Bewertungssystematik wird das zu bewertende Betriebsmittel z.B. in Unterkategorien wie Funktionseinheiten unterteilt. Hierdurch wird ein Grundgerüst zur Verfügung gestellt, dass je nach Unterteilung die separate Analyse von Komponenten ermöglicht. Diese Eigenschaft soll ebenso in der Gesamtsystematik integriert werden, so dass dieser Ansatz im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt wird.

### 3.2.1.3 Konfidenzintervalle

Die Konfidenzintervalle dienen in der vorliegenden Arbeit der Berücksichtigung der Bewertungsungenauigkeit. Das Prinzip basiert auf der Bestimmung der auf das Bewertungsergebnis wirksamen Messungenauigkeit. Mehrere Methoden zur Ermittlung dieser sind möglich. Als Resultat entsteht ein Ergebnisintervall, innerhalb dessen sich der tatsächliche Wert befindet. Dem gemessenen Wert werden somit eine obere und eine untere Grenze zugeordnet. Die Größe des Intervalls bestimmt die Ungenauigkeit des Messverfahrens. Das identifizierte Intervall muss anschließend auf das Bewertungsintervall der Gesamtsystematik projiziert werden, wodurch die Messungenauigkeit in eine Bewertungsungenauigkeit umgewandelt wird.

Die Konfidenz- bzw. Vertrauensintervalle behandeln grundsätzlich die Abweichung vom wahren Messwert. Da der wahre Messwert ( $x_w$ ) i.d.R. nicht bekannt ist, wird in der Praxis der richtige Messwert ( $x_r$ ) verwendet, von dem angenommen wird, dass die Abweichung zum wahren Messwert vernachlässigbar klein ist. Der gemessene Wert ( $x_M$ ) enthält eine Abweichung ( $A_r$ ) zum richtigen Messwert, wobei Gleichung (3.3) gilt [Par\_08]:

$$x_M = x_r + A_r \quad (3.3)$$

Die Abweichung kann sowohl absolut als auch relativ ausgedrückt werden. Die Ursache von Messabweichungen kann in zwei Gruppen eingeteilt werden: systematische und zufällige Abweichungen. Die systematischen Abweichungen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie bei wiederholten Messungen in gleicher Höhe mit gleichem Vorzeichen auftreten. Sie sind reproduzierbar, wobei zwei Arten zu unterscheiden sind. Gemäß Gleichung (3.4) besteht die systematische Abweichung ( $A_S$ ) aus einem bekannten ( $A_{S,b}$ ) und einem unbekanntem Teil ( $A_{S,u}$ ), wobei beide Arten reproduzierbar sind [Par\_08]:

$$A_S = A_{S,b} + A_{S,u} \quad (3.4)$$

Eine Korrektur des Messwerts kann ausschließlich um die bekannte Größe erfolgen, da nur sie ermittelt werden kann. Hierzu können theoretische Betrachtungen oder Referenzmessungen verwendet werden. Werden mehrere systematische Abweichungen wirksam, so wird bei bekannten systematischen Abweichungen die Fehlerfortpflanzung verwendet. Dies ist z.B. möglich, wenn die interessierende Größe ( $y$ ) von mehreren gemessenen Werten ( $x_M$ ) abhängt, so dass  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_l)$  gilt. Die Abweichung kann nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gleichung (3.5)) bestimmt werden [Par\_08]:

$$\Delta y = \sum_{M=1}^l \frac{\partial y}{\partial x_M} \cdot \Delta x_M \quad (3.5)$$

Unbekannte systematische Abweichungen müssen separat betrachtet werden. Je nach Bewertungsmethode muss im Einzelfall die korrekte Vorgehensweise gewählt werden. Eine Möglichkeit besteht in der Behandlung als zufällige Abweichung [Par\_08]. Letztere lässt sich nicht korrigieren, da ihr Auftreten nicht vorhersagbar ist. Die Abweichungen treten als Streuung um den Mittelwert einer Messreihe auf. Da die Abweichung des Messwerts vom wahren Wert zufällig auftritt und nicht korrigierbar ist, entsteht ein Intervall, innerhalb dessen der wahre Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit je nach Intervallgröße liegt [Par\_08]. Die Bestimmung eines solchen Unsicherheitsintervalls kann durch separate Versuchsreihen erfolgen. Bei ausreichend großer Wiederholung ( $k$ ) einer Messreihe kann hierbei der arithmetische Mittelwert ( $\bar{x}$ ) als wahrer Wert angenommen werden (vgl. Gleichung (3.6)) [Par\_08]:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{M=1}^k x_M \quad (3.6)$$

Die empirische Standardabweichung kann durch Gleichung (3.7) ermittelt werden:

$$s = s(x) = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{M=1}^k (x_M - \bar{x})^2} \quad (3.7)$$

Weiterhin ist die Standardunsicherheit ( $u(x)$ ) als empirische Standardabweichung des Mittelwerts definiert. Sie drückt die Unsicherheit eines Messergebnisses aus und wird nach Gleichung (3.8) berechnet [Par\_08]:

$$u(x) = \Delta U = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{k}} \quad (3.8)$$



Diese Ermittlung ist unabhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messreihe, so dass eine Normalverteilung nicht erforderlich ist. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist ein um den bekannten systematischen Messfehler korrigiertes Messergebnis ( $M$ ), welches mit einem Unsicherheitsintervall der Form  $M \pm \Delta U$  belegt wird [Par\_08]. Kann den Versuchsreihen eine Normalverteilung zu Grunde gelegt werden, so ist die Bestimmung eines Vertrauensintervalls möglich. Hierzu wird die t-Verteilung (Student-Verteilung) genutzt. In Abhängigkeit der Größe der Grundgesamtheit der Messreihe und dem geforderten Vertrauensniveau ( $1 - \alpha$ ) – z.B. 95 % – kann der für das Vertrauensintervall notwendige t-Faktor bestimmt werden, dessen Werte tabellarisch erfasst sind. Das Vertrauensintervall ( $v$ ) ist in Gleichung (3.9) dargestellt [Par\_08]:

$$v = \pm \frac{t}{\sqrt{k}} \cdot s \tag{3.9}$$

Hieraus können sowohl die obere als auch die untere Grenze des Unsicherheitsbereichs eines Messergebnisses bestimmt werden. Das Ergebnis kann mit einem Intervall dargestellt werden, so dass  $M \pm v$  gilt [Par\_08].

Für die Gesamtsystematik sind die zufälligen Fehler relevant, da sie weder vorhergesagt noch korrigiert werden können. Hierfür sind die Herstellerangaben der Messgeräte zu beachten. Die Messgenauigkeit wird verschiedenartig angegeben. I.d.R. wird das Messergebnis durch ein Intervall und ein zugehöriges Wahrscheinlichkeitsniveau repräsentiert.

Für die Verwendung im Rahmen der Zustandsbewertung sind die tatsächlich wirksamen Abweichungen zu quantifizieren. D.h. es sind nur solche Einflüsse zu beachten, die das Bewertungsergebnis beeinflussen. Hieraus ist wiederum ein Intervall zu bestimmen, in dem sich die tatsächliche Bewertung befindet. Als Ergebnis entsteht für jedes Bewertungsergebnis ( $B$ ) ein Intervall, welches in Abbildung 40 dargestellt ist.

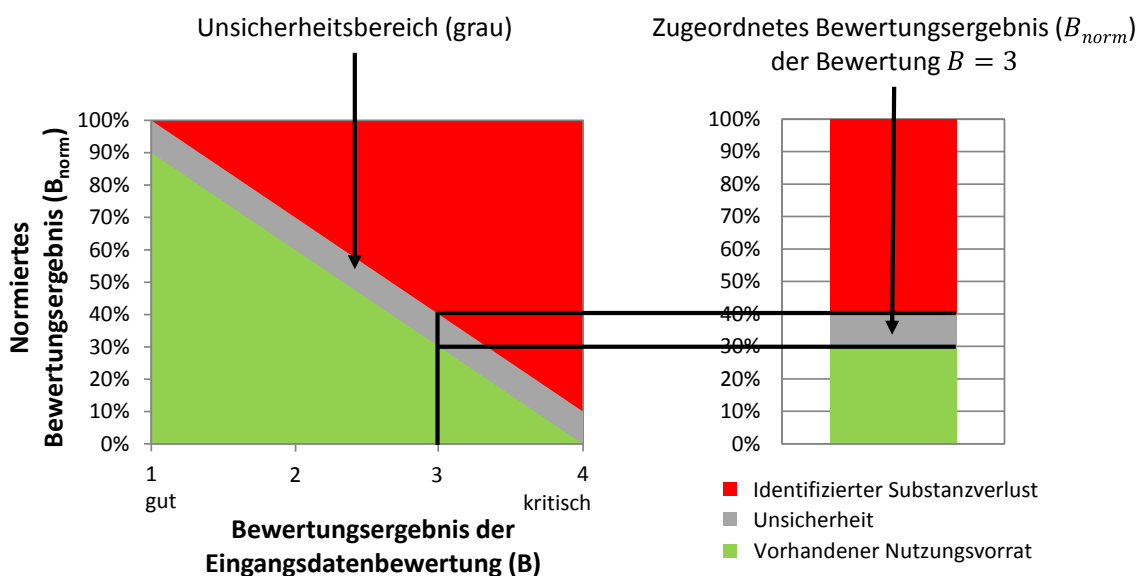


Abbildung 40: Verlauf der Bewertungsungenauigkeit

In der Abbildung wird eine konstante Bewertungsungenauigkeit entlang des Bewertungsintervalls der Eingangsdatenbewertung unterstellt. Beispielhaft ist das zugeordnete, normierte Bewertungsergebnis eines mittelschweren Fehlers der Bewertung  $B = 3$  dargestellt. Im Gegensatz zur konventionellen Bewertungssystematik besteht das normierte Bewertungsergebnis ( $B_{\text{norm}}$ ) nicht aus einem diskreten Zahlenwert, sondern einem Intervall, in welchem sich das konkrete Bewertungsergebnis befindet. Die Spannweite dieses Intervalls drückt die Unsicherheit durch die Ungenauigkeit der durchgeführten Bewertung aus (vgl. Abschnitt 3.3). Das Intervall bildet das Endergebnis dieser Bewertungssystematik.

In Abbildung 40 wird beispielhaft die diskrete Bewertung „3“ des Bewertungsergebnisses der Eingangsdatenbewertung einem normierten Bewertungsergebnis zugeordnet. Die hier gezeigte Darstellung des zugeordneten Bewertungsergebnisses entspricht der Ergebnisdarstellung nach Abschnitt 3.3. Diese Vorgehensweise kann auch für kontinuierliche Bewertungen genutzt werden, bei denen alle Werte innerhalb des Bewertungsintervalls  $[1,4]$  der Eingangsdatenbewertung angenommen werden können.

In der Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung kann der Ansatz der Konfidenzintervalle zur Abbildung der Bewertungsungenauigkeit genutzt werden. Eine Vorgehensweise zur Ermittlung der hierfür benötigten Unsicherheit, z.B. durch Laboruntersuchungen, wurde vorgestellt. Der Anwendungsbereich ist abhängig von der Art der Eingangsdatenbewertung. Erfolgt die Bewertung der Eingangsdaten nicht in den diskreten Schritten bzw. Abstufungen, sondern kontinuierlich wie in Abbildung 40 dargestellt, so ist die Anwendung der vorgestellten Vorgehensweise besonders empfehlenswert. Solch eine Kontinuität liegt beispielsweise vor, wenn dem gesamten Bewertungsintervall ein Funktionsverlauf hinterlegt ist, so dass die Bewertung jede rationale Zahl im Bewertungsintervall  $[1,4]$  der Eingangsdatenbewertung annehmen kann.

Die Voraussetzung zur Anwendung der dargestellten Methodik ist, dass die Ungenauigkeit bestimmt werden kann, was für Bewertungen beruhend auf Messergebnissen gegeben ist. Für visuelle Inspektionen müssen ggf. Annahmen getroffen werden.

Mit der Methodik der Konfidenzintervalle kann somit die Höhe der messtechnischen Bewertungsungenauigkeit bestimmt und in ein Bewertungsergebnis integriert werden. Da diese ein wesentlicher Bestandteil der in dieser Arbeit zu verwendenden Unsicherheit ist, wird die vorgestellte Methodik weiterhin berücksichtigt.

### 3.2.1.4 Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik dient der Verarbeitung der Bewertungsungenauigkeit, d.h. ungenauer Eingangsdaten. Sie basiert auf einer mehrwertigen Logik. So sind nicht ausschließlich zwei Ergebnisse – im Sinne einer Wahrscheinlichkeit für und gegen das Ergebnis – wie z.B. „gut“ und „schlecht“ möglich, sondern die Möglichkeit der Ergebnisse wird mit Werten im Intervall von „0“ bis „1“ beschrieben.

Die Fuzzy-Logik erlaubt die Verarbeitung vager Aussagen wie z.B. „ungefähr 4“ oder „ziemlich hoch“. Weiterhin können Sachverhalte abgebildet werden, deren einzelne Abstufungen untereinander unscharf sind – d.h. der Wechsel zwischen „gut“ und „schlecht“ kann nicht mit einem diskreten Wert ausgedrückt werden, der Übergang ist fließend. Die Funktionsweise basiert auf scharfen bzw. genauen Eingangswerten, die durch die Fuzzifizierung mit einer Unschärfe belegt werden. Die unscharfen, fuzzifizierten Eingangswerte werden unter Zuhilfenahme selbst erstellter Regeln miteinander kombiniert. Hierbei werden logische Verknüpfungen verwendet. Das Ergebnis der Kombination wird anschließend defuzzifiziert, wodurch i.d.R. ein scharfer Ausgangswert entsteht.

Das Kernelement sind sogenannte Fuzzy-Mengen, die der Fuzzifizierung dienen. Innerhalb dieser wird die Unschärfe berücksichtigt. Scharfen Eingangswerten wird eine Zugehörigkeit im Bereich von „0“ bis „1“ zu diesen Mengen zugeordnet. Ein einzelner Eingangswert kann somit gleichzeitig mehreren Mengen mit einer Zugehörigkeit im Intervall  $[0,1]$  zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise schafft weiche Übergänge zwischen den diskreten Eingangsgrößen bzw. Abstufungen der Bewertung [Bei\_08, Spr\_08, Kro\_12, Zad\_65, KaR\_14].

Eine klassische Menge basiert ausschließlich auf der Zuordnung von zwei Werten gemäß Gleichung (3.10):

$$\mu_{A_F}: X \rightarrow \{0; 1\}; \mu_{A_F}(x) = \begin{cases} 1, & \text{für } x \in A_F \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.10)$$

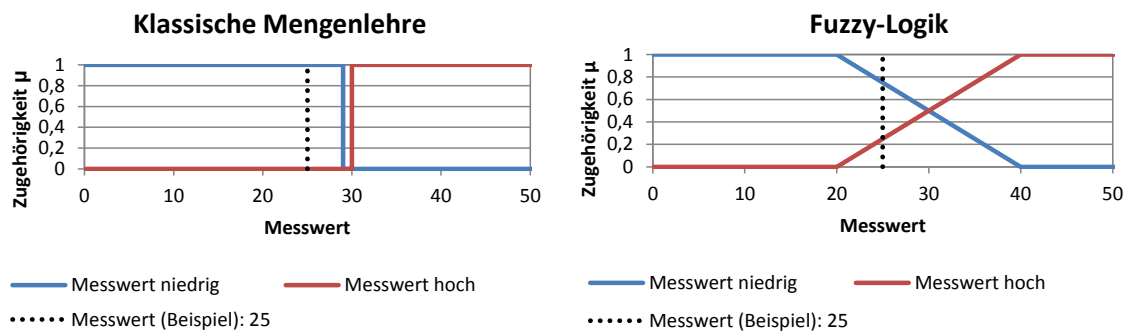
Eine Fuzzy-Menge hingegen beschreibt eine Menge ( $X$ ) mit den Elementen ( $x$ ) durch die charakteristische Zugehörigkeitsfunktion ( $\mu_{A_F}$ ) nach Gleichung (3.11):

$$\mu_{A_F}: X \rightarrow [0; 1]; x \rightarrow \mu_{A_F}(x) \quad (3.11)$$

Im Rahmen dessen sind die Operatoren der zweiwertigen Logik zulässig. Die Zugehörigkeitsfunktionen können wie folgt kombiniert werden:

- Durchschnitt zweier Fuzzy-Mengen  $\mu_{A_F}$  und  $\mu_{B_F}$  (Konjunktion):  $\min \{ \mu_{A_F}(x); \mu_{B_F}(x) \}$
- Vereinigung zweier Fuzzy-Mengen  $\mu_{A_F}$  und  $\mu_{B_F}$  (Disjunktion):  $\max \{ \mu_{A_F}(x); \mu_{B_F}(x) \}$
- Komplement von  $\mu_{A_F}$ :  $1 - \mu_{A_F}(x)$

Zur Verdeutlichung soll der Unterschied an einem Beispiel herausgestellt werden. Es wird die Fragestellung untersucht, ob ein Messwert eines beliebigen Messinstruments hoch oder niedrig ist. Die Eingangsgröße stellt ein scharfer Messwert von 25 (im Beispiel einheitenlos) dar. In der klassischen Vorgehensweise ist lediglich eine Zuordnung möglich. So gilt z.B. ein Messwert ab einem Betrag von 30 als hoch. Folglich würde der Messwert 25 als vollkommen niedrig eingestuft werden. Ab der Erreichung des Betrags 30 kommt es zu einer Umkehrung der Verhältnisse, so dass der Wert nun „plötzlich“ als vollkommen hoch gelten würde. Wie in Abbildung 41 anhand des vorgestellten Beispiels gezeigt, schafft die Fuzzy-Logik hier einen „weichen“ Übergang zwischen den möglichen Ereignissen „niedrig“ und „hoch“.



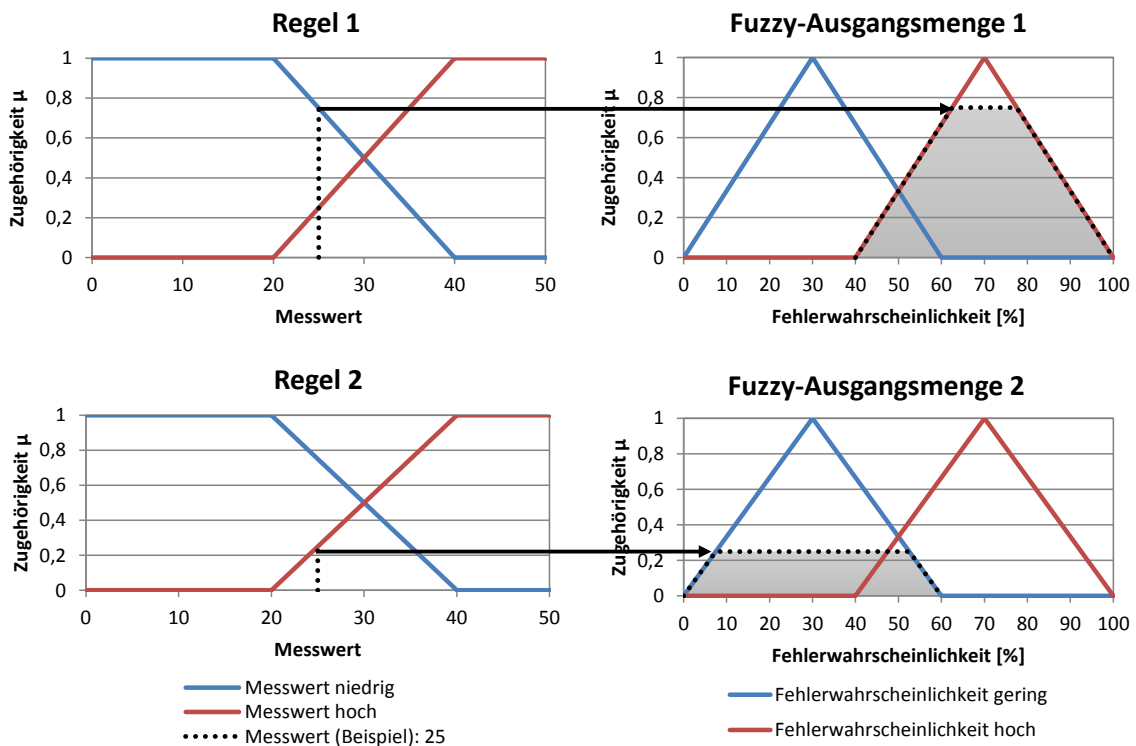
**Abbildung 41: Fuzzy-Mengen im Vergleich zur klassischen Mengenlehre**

Sie beschreibt das Maß der Zuordnung zu diesen Ereignissen, wobei sich die Zuordnungen auch überschneiden können. Sie folgen hinterlegten Funktionsverläufen, die jede Funktionsart annehmen können. Folglich gilt der Messwert 25 des Beispiels nun nicht mehr als „vollkommen niedrig“, sondern entsprechend der Funktionsverläufe als anteilig „niedrig“ und anteilig „hoch“. Ab dem Wert 30 findet strikte keine Umkehrung der Verhältnisse statt. Die Zuordnung entwickelt sich den hinterlegten Funktionsverläufen entsprechend. Die Zuordnung einer Eingangsgröße auf die Fuzzy-Mengen wird Fuzzy-Set genannt [Bei\_08, Spr\_08, Kro\_12, Zad\_65].

Nachdem die Eingangsdaten fuzzifiziert, d.h. durch die anteilige Mengenzuordnung mit Unschärfe belegt wurden, folgt die Kombination mehrerer Eingangsdaten. Hierzu werden Regeln genutzt, die selbst erstellt werden und auf logischen Verknüpfungen basieren. Die Regeln folgen „Wenn-Dann-Beziehungen“: Wenn eine Bedingung erfüllt ist, folgt eine Schlussfolgerung. Aus der scharfen Eingangsvariablen wird der Zugehörigkeitsgrad gemäß der Bedingung ermittelt – d.h. der Wert der Zugehörigkeit zu der Fuzzy-Menge, welche die Bedingung nutzt, wird ermittelt. Dieser Zugehörigkeitsgrad wird auf die Schlussfolgerung, d.h. die Ausgangsvariable, welche die Schlussfolgerung abbildet, übertragen. Diese ist ebenso im Intervall  $[0,1]$  definiert. Als Ergebnis entsteht eine Fläche, welche durch den Verlauf der Ausgangsvariablen in Bezug auf die Schlussfolgerung und den ermittelten Grad der Zugehörigkeit begrenzt wird. Dieser Schritt wird Implikation genannt [Bei\_08, Spr\_08, Kro\_12, Zad\_65].

Anschließend folgt die Akkumulation, welche die Kombination von „Ergebnisflächen“ einer Ausgangsvariablen beinhaltet. Dies setzt voraus, dass mehrere Regeln für eine Ausgangsvariable existieren. Diese Kombination kann durch Konjunktionen erfolgen [Bei\_08, Spr\_08, Kro\_12, Zad\_65].

Zur Darstellung der Funktionsweise wird das eingeführte Beispiel erweitert. Zwei zugehörige Regeln werden erstellt: „Regel 1: Wenn der Messwert niedrig ist, dann ist die Fehlerwahrscheinlichkeit hoch“ und „Regel 2: Wenn der Messwert hoch ist, dann ist die Fehlerwahrscheinlichkeit gering“. Die möglichen Ergebnisse im Sinne der Ausgangsvariablen dieser Regeln lauten „Fehlerwahrscheinlichkeit gering“ und „Fehlerwahrscheinlichkeit hoch“. Die zugehörigen Verläufe wurden fiktiv erstellt. In Abhängigkeit der Eingangsgröße wird die zugeordnete Zugehörigkeit zu einer Fuzzy-Menge nun auf das Ergebnis entsprechend der linguistischen Regel projiziert. Als Ergebnis der Regelanwendung, d.h. der Implikation, entstehen im Beispiel zwei Flächen, welche in Abbildung 42 dargestellt sind.



**Abbildung 42: Regelanwendung der Fuzzy-Logik (Implikation)**

Die Kombination dieser Flächen durch Konjunktion ist in Abbildung 43 dargestellt. Es stellt das Ergebnis des Schritts Akkumulation dar. Anschließend folgt die Defuzzifizierung, um z.B. einen scharfen Ausgangswert und damit eine eindeutige Aussage zu erzeugen. In Abbildung 43 wird hierzu das Ergebnis der Schwerpunktmethod gezeigt. Neben der in der Praxis häufig verwendeten Schwerpunktmethod sind weitere ergebnisbildende Methoden möglich, die hier nicht näher erläutert werden sollen [Bei\_08, Spr\_08, Kro\_12, Zad\_65].

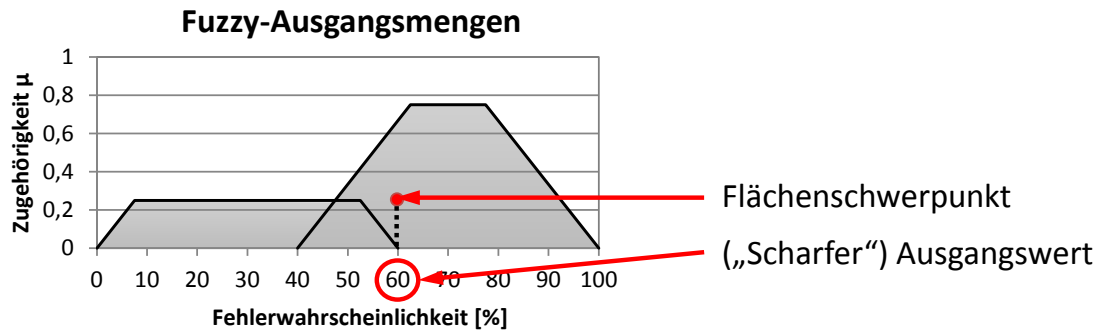


Abbildung 43: Ergebnis der Regelanwendung der Fuzzy-Logik

Das Ergebnis – der Flächenschwerpunkt – wurde in Abbildung 43 mit einem roten Punkt versehen. Hieraus kann ein konkreter Wert der Regelkombination zugeordnet werden. Im vorliegenden Beispiel wurde 60 % ermittelt. Dieser Vorgang der Zuordnung eines konkreten Endergebnisses wird Defuzzifizierung genannt.

Durch die Fuzzy-Mengen kann die spezifische Bewertungsungenauigkeit verarbeitet werden. Einen möglichen Anwendungsbereich im Rahmen der Gesamtsystematik stellt die Bewertung von Eingangsdaten dar, wenn diese in diskreten Abstufungen erfolgt. Durch die Erzeugung von weichen Übergängen zwischen den einst scharfen Abstufungen, werden Fehlinterpretationen, die z.B. auf ungenauen Messergebnissen beruhen, minimiert. Messergebnisse, die sich knapp unterhalb eines kritischen Grenzwerts befinden, wobei das Messergebnis aufgrund der zugehörigen Schwankungsbreite der Messtoleranz ebenso den kritischen Schwellwert erreichen könnte, werden hierdurch nicht als vollkommen unkritisch angesehen. Sie werden als anteilig kritisch beschrieben, wodurch trotz Grenzwertunterschreitung ein Hinweis für einen höheren Substanzverlust erzeugt wird.

Ein Anwendungsbeispiel können  $\text{SF}_6$ -Gasanalysen sein. Für jeden Indikator von Zersetzungsprodukten existieren scharfe Grenzwerte. Erst bei Erreichen dieser Werte würde bei einer zweiwertigen Logik ein kritisches Ergebnis erzeugt werden, wodurch bei Unterschreitung des Schwellwerts – unabhängig von der Höhe der Unterschreitung – kein Hinweis auf das Vorhandensein einer möglichen Beeinträchtigung gegeben wird. Durch die Anwendung der Fuzzy-Logik kann in Abhängigkeit der Messgenauigkeit ein fließender Übergang bis zum Erreichen des Grenzwerts erzeugt werden, so dass bereits vor dem Erreichen des Schwellwerts ein Hinweis auf eine Beeinträchtigung erzeugt wird. Die Voraussetzung der Anwendbarkeit ist, dass die Messungenauigkeit bestimmt werden kann. Dies ist bei Messergebnissen häufig gegeben. Visuelle Inspektionen sind diesbezüglich schwieriger zu bewerten.

Neben ungenauen Eingangsdaten können mit der Fuzzy-Logik ungenaue Ausgangsdaten abgebildet werden. Dies liegt z.B. vor, wenn die Kritikalität eines Messergebnisses aufgrund unvollständiger Erfahrungswerte unbekannt ist oder einer Schwankungsbreite unterliegt. Analog zu den Eingangsdaten werden die Fuzzy-Mengen genutzt, um weiche Übergänge zwischen den diskreten Abstufungen der Ausgangsvariablen zu schaffen.

Zur Aggregation im Rahmen der Gesamtsystematik ist die Fuzzy-Logik ungeeignet, da die Höhe der Bewertungsungenauigkeit nicht ausgegeben wird. Die Fuzzy-Logik verarbeitet die Bewertungsungenauigkeit von diskreten, messtechnischen Bewertungsergebnissen. Dies setzt voraus, dass auf der Grundlage von Messwerten scharfe Abgrenzungen für diskrete Bewertungsabstufungen existieren. Innerhalb der entwickelten Gesamtsystematik existiert hierfür kein Anwendungsfall, da z.B. bei der Bewertung mit der akustischen Teilentladungsmessung aufgrund des Detektionspotentials lediglich zwischen „Fehlerfreiheit“ und „Fehler“ unterschieden werden kann und die absolute Höhe der Signalstärke unerheblich ist (vgl. Abschnitt 2.3.3.1.1). Zudem werden Messwertinterpretationen bzw. messtechnische Bewertungen überwiegend auf Basis hinterlegter Funktionsverläufe durchgeführt. Jedem Messwert wird entsprechend dem Funktionsverlauf ein Bewertungsergebnis zugeordnet. Die Bewertungsabstufungen sind kontinuierlich, so dass keine diskreten Bewertungsabstufungen existieren und die Fuzzy-Logik nicht angewendet werden kann (vgl. Abschnitt 3.2.2.2).

Mit der Fuzzy-Logik wird generell die Bewertungsungenauigkeit bei diskreten Bewertungsabstufungen, welche auf scharfen Mess- bzw. Zahlenwerten basieren, verarbeitet. Das Endergebnis der Bewertung besteht aus einem unsicherheitsbefreiten, diskreten Zahlenwert. Da die konkrete Höhe der Bewertungsungenauigkeit nicht bestimmt wird und der Anwendungsbereich für diskrete, messtechnikbasierte Bewertungsabstufungen nicht gegeben ist, wird die Fuzzy-Logik im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt.

#### 3.2.1.5 „MYCIN“-Ansatz

„MYCIN“ ist ein regelbasiertes Expertensystem, das auf Sicherheitsfaktoren basiert, welche die Aussagekraft des Ergebnisses angeben. Der Sicherheitsfaktor bzw. „certainty factor ( $CF$ )“ ergibt sich aus der Differenz von „measure of belief ( $MB$ )“ und „measure of disbelieve ( $MD$ )“, wobei diese jeweils Werte zwischen „0“ und „1“ annehmen können. Die sich ergebene Differenz, d.h. der Sicherheitsfaktor, liegt im Bereich von „-1“ bis „1“. Beträgt der Sicherheitsfaktor „1“, so ist das Ergebnis wahr bzw. vollkommen sicher. Entsprechend drücken Sicherheitsfaktoren, deren Wert „-1“ beträgt, vollkommen falsche bzw. unsichere Ergebnisse aus. Der Wert „0“ drückt eine indifferente Aussagekraft aus. Bestehen mehr Hinweise für ein Ergebnis, so wird  $CF$  positiv. Im gegenteiligen Fall wird  $CF$  negativ.

Ähnlich der Fuzzy-Logik nutzt dieser Ansatz selbst erstellte Regeln, die auf „Wenn-Dann-Beziehungen“ basieren. Wenn eine Prämisse bzw. Bedingung ( $B_m$ ) erfüllt ist, dann ergibt sich die abgeleitete Schlussfolgerung bzw. Konklusion ( $K$ ). Die Sicherheitsfaktoren werden sowohl den einzelnen Bedingungen, d.h. den Startwerten der Regeln, als auch den zugehörigen Regelinstanzen zugeordnet. Neben einem einzelnen Element kann der Bedingungsteil aus einem komplexen Ausdruck bestehen – i.d.R. einer logischen Verknüpfung wie z.B. einer Konjunktion oder einer Disjunktion.

Im Fall einer Konjunktion ergibt sich der Sicherheitsfaktor der Bedingung als Minimalwert der Sicherheitsfaktoren der einzelnen Elemente. Liegt eine Disjunktion zu Grunde, so wird der Maximalwert gewählt. Das zugehörige Regelwerk zur Ermittlung des Sicherheitsfaktors der Bedingung ( $CF(B_m)$ ), welche aus den Elementen  $A_M$  und  $B_M$  besteht, ist nachfolgend dargestellt [Bei\_08, Spr\_08, Sho\_76, HHN\_97]:

- Konjunktion:  $CF(A_M \wedge B_M) = \min[CF(A_M), CF(B_M)]$
- Disjunktion:  $CF(A_M \vee B_M) = \max[CF(A_M), CF(B_M)]$
- Negation:  $CF(\bar{A}_M) = 1 - CF(A_M)$

Durch die Anwendung der Regeln entstehen Ausgangsgrößen mit dem Sicherheitsfaktor  $CF(K)$ , der sich aus der Kombination mit dem zugehörigen Regelwerk ergibt. Liegt eine Regel der Form „Wenn  $B_m$  dann  $K$  mit Sicherheitsfaktor  $CF(B_m \rightarrow K)$ “ zugrunde, so ist das zugehörige Regelwerk wie folgt definiert [Bei\_08, Spr\_08, Sho\_76, HHN\_97]:

- Serielle Kombination:  $CF(K \setminus B_m) = CF(B_m \rightarrow K) \cdot \max\{0, CF[B_m]\}$
- Parallele Kombination:  $CF(K \setminus B_1, \dots, B_n) = CF(K \setminus B_1, \dots, B_{n-1}) \oplus CF(K \setminus B_n)$

Die  $\oplus$ -Verknüpfung der parallelen Kombination wird verwendet, wenn mehrere Regeln für die gleiche Konklusion bestehen. Für verschiedene Fälle ist die  $\oplus$ -Verknüpfung wie folgt definiert [Bei\_08, Spr\_08, Sho\_76, HHN\_97]:

- $CF_1 \oplus CF_2 = CF_1 + CF_2 - CF_1 \cdot CF_2$ , für  $CF_1, CF_2 \geq 0$
- $CF_1 \oplus CF_2 = CF_1 + CF_2 + CF_1 \cdot CF_2$ , für  $CF_1, CF_2 < 0$
- $CF_1 \oplus CF_2 = \frac{CF_1 + CF_2}{1 - \min\{|CF_1|, |CF_2|\}}$ , für  $CF_1 \cdot CF_2 < 0$

Die Funktionsweise dieses Ansatzes soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Hierzu werden folgende Regeln und Startbedingungen verwendet:

- Regel 1: Schlechte Gasqualität führt zu Substanzverlust mit  $CF = 0,4$
- Regel 2: Teilentladungstätigkeit führt zu Substanzverlust mit  $CF = 0,8$
- Bedingung 1: Schlechte Gasqualität mit  $CF(B_1) = 1$
- Bedingung 2: Teilentladungstätigkeit mit  $CF(B_2) = 1$

Durch die Kombination der Hinweise nach dem vorgegebenen Regelwerk von „MYCIN“ ergibt sich folgende Schlussfolgerung: Aus Regel 1 und der seriellen Kombination folgt:

$$CF(\text{Substanzverlust} \setminus \text{schlechte Gasqualität}) = 0,4 \cdot \max\{0,1\} = 0,4.$$

Es entsteht ein Sicherheitsfaktor für den Substanzverlust:  $CF(\text{Substanzverlust}) = 0,4$ . Durch Kombination mit dem zweiten Hinweis und der parallelen Kombination folgt:

$$CF(\text{Substanzverlust} \setminus \text{Teilentladungstätigkeit}) = 0,4 + 0,8 - 0,8 \cdot 0,4 = 0,88.$$



Durch die Kombination mit dem zweiten Hinweis konnte die Diagnose des Substanzverlusts bestärkt werden. Der neue Sicherheitsfaktor der Schlussfolgerung, der das Maß für die Aussagekraft des Befundes bildet, beträgt [Bei\_08, Spr\_08, Sho\_76, HHN\_97]:

$$CF(\text{Substanzverlust}) = 0,88.$$

Generell dient dieser Ansatz der Quantifizierung der Aussagekraft von kombinierten Bewertungsergebnissen. In Abhängigkeit des Betrachtungsrahmens könnten mit den Sicherheitsfaktoren verschiedene Arten der Unsicherheit verarbeitet werden. Durch ein aufwändiges Modell könnte z.B. die Aussagekraft als zusätzlicher Wert einer konventionellen oder Fuzzy-Logik-basierten Bewertungssystematik bestimmt werden. Bei allen hierauf basierenden Modellen wird die Unsicherheit nicht im z.B. konventionellen Bewertungsergebnis integriert, sondern als separater Wert ausgedrückt.

Für die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Gesamtsystematik ist der „MYCIN“-Ansatz nicht verwendbar. Die Bestimmung der Höhe der Aussagekraft einer einzelnen Bewertungsmethode wird nicht dargestellt. Der Ansatz beschäftigt sich mit der Verarbeitung der zuvor bestimmten Unsicherheit von Bewertungsergebnissen. Diese Unsicherheit bzw. Aussagekraft einzelner Bewertungsergebnisse wird kombiniert und als alleinstehender Wert ausgegeben. Da die kombinierte Unsicherheit nicht direkt im Endergebnis integriert wird, ist dieser Ansatz für die Verwendung in der vorliegenden Systematik ungeeignet.

### 3.2.1.6 Rough-Set-Theorie

Die Rough-Set-Theorie stellt einen Ansatz dar, der auf der Zuordnung zu (Teil-)Mengen basiert, die den Sachverhalt – im Rahmen dieser Theorie als „Universum“ bezeichnet – beschreiben. Sie ist eine Erweiterung der Mengenlehre, die auf einer dreiwertigen Logik beruht. Kann eine Menge eindeutig durch die Zuordnung der in ihr enthaltenden Elemente zu vorgegebenen Teilmengen beschrieben werden, so wird die beschriebene Menge „Crisp Set“ genannt. „Rough Sets“ werden gebildet, wenn eine eindeutige Beschreibung nicht möglich ist. Neben den Elementen, die eindeutig zugeordnet werden, gibt es folglich solche, die indifferent sind. Sie können keiner Teilmenge eindeutig zugeordnet werden, wodurch Grenz- bzw. Unsicherheitsbereiche entstehen.

Jede Grundmenge besteht aus Objekten bzw. Elementen, die durch ihre Attribute beschrieben werden. Elemente der Grundmenge, die hinsichtlich eines ausgewählten Zielattributs identisch sind, werden zu Äquivalenzklassen zusammengefasst. Die so entstandenen Teilmengen werden auch Approximationsraum genannt. Innerhalb der verschiedenen Äquivalenzklassen existieren Elemente, die hinsichtlich des Zielattributs unterschiedlich, jedoch bezüglich der weiteren, beschreibenden Attribute ununterscheidbar sind. Solche Elemente werden bei der Beschreibung einer Teilmenge des Universums mit einbezogen.

Hierzu werden zwei Grenzen verwendet: Die untere Annäherung enthält alle Elemente, die hinsichtlich des Zielattributs und der weiteren Eigenschaften eindeutig der Teilmenge zugeordnet werden können. Die obere Annäherung erweitert diese Grenze, so dass sie alle Elemente enthält, die von der Teilmenge nicht ausgeschlossen werden können. Neben den Elementen, die eindeutig zugeordnet werden können, sind folglich auch solche enthalten, deren Zuordnung zuvor nicht eindeutig erfolgen konnte. Die hinsichtlich des Zielattributs unterschiedlichen, aber unter Berücksichtigung ihrer weiteren Attribute ununterscheidbaren Elemente werden somit dem Bereich zwischen unterer und oberer Annäherung zugeordnet [Spr\_08, Paw\_82, Reb\_03].

Der Ansatz geht davon aus, dass ein beschreibbares Universum  $U_R$  existiert. Dieses enthält alle möglichen Elemente, welche hinsichtlich der Ausprägung eines ausgewählten Zielattributs in disjunkte Teilmengen bzw. Äquivalenzklassen  $U_R := \{X_1^R, \dots, X_n^R\}$  unterteilt werden können. Eine beliebige Teilmenge  $X$  des Universums  $U_R$ , die Elemente  $x$  mehrerer Äquivalenzklassen  $X^R$  enthalten kann, kann hinsichtlich eines Zielattributs bzw. einer hieraus resultierenden Äquivalenzklasse durch die weiteren beschreibenden Attribute  $A_R$  mit folgenden Annäherungen beschrieben werden [Spr\_08, Paw\_82, Reb\_03]:

- Untere Annäherung („Lower-Approximation“):  $\underline{A}_R(X) = \{x \in U_R: A_R(x) \subseteq X\}$
- Obere Annäherung („Upper-Approximation“):  $\overline{A}_R(X) = \{x \in U_R: A_R(x) \cap X \neq \emptyset\}$

Aus dieser Definition folgt:  $\underline{A}_R(X) \subseteq X \subseteq \overline{A}_R(X)$ . Die Differenzmenge zwischen unterer und oberer Annäherung wird Grenzregion genannt:  $BND_{A_R}(X) = \overline{A}_R(X) \setminus \underline{A}_R(X)$ . Sie enthält alle Elemente, die sich bezüglich der Zielattribute unterscheiden, jedoch in Bezug auf ihre weiteren Eigenschaften ununterscheidbar sind und somit von der beliebigen Teilmenge  $X$  nicht ausgeschlossen werden können.

Durch die Beschreibung der Menge  $X$  mit der oberen und der unteren Annäherung wird das Universum in drei Teilmengen unterteilt, welche in Abbildung 44 dargestellt werden.

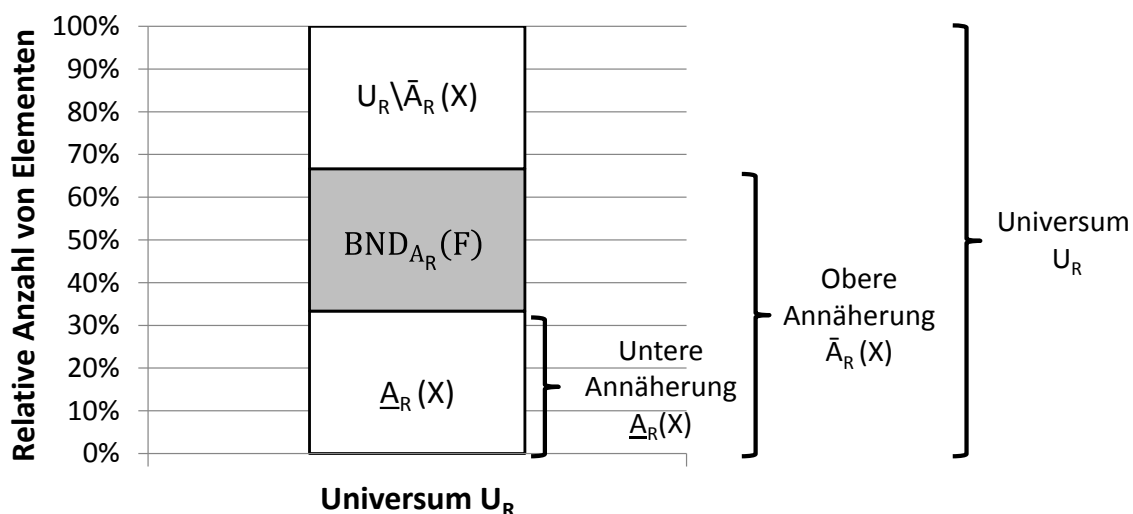


Abbildung 44: Beschreibung der Teilmenge  $X$  im Universum  $U_R$

Die Menge  $\underline{A}_R(X)$  enthält alle Elemente, die hinsichtlich eines gemeinsamen Zielattributs identisch ausgeprägt sind. Weiterhin existiert eine Komplementärmenge  $U \setminus \bar{A}_R(X)$ , die alle Elemente enthält, die unterscheidbar von den Elementen der Menge  $\underline{A}_R(X)$  sind und deren Zielattribut abweicht. Zwischen diesen Mengen existiert eine Grenzregion  $BND_{A_R}(X)$ , deren Elemente nicht eindeutig zugeordnet werden können [Spr\_08, Paw\_82, Reb\_03].

Der Rough-Set-Ansatz soll an einem fiktiven Beispiel der thermischen Analyse veranschaulicht werden. Hierzu werden drei Attribute verwendet: die Temperaturerhöhung, die Strombelastung und das Vorhandensein eines Fehlers, welches das Zielattribut darstellt. Insgesamt besteht das Beispiel aus sechs Elementen, welche verschiedene Versuchsreihen darstellen und das Universum vollständig beschreiben. Tabelle 11 zeigt die Elemente mit der jeweiligen Attributausprägung.

Tabelle 11: Anwendungsbezogenes Beispiel der Rough-Set-Theorie

Versuchsreihen	Attribut 1: Temperaturerhöhung	Attribut 2: Strombelastung	Zielattribut: Fehler
V1	hoch	mittel	ja
V2	hoch	hoch	ja
V3	mittelhoch	mittel	ja
V4	mittelhoch	mittel	nein
V5	niedrig	niedrig	nein
V6	niedrig	hoch	nein

Dieses Beispiel wurde so gewählt, dass keine scharfe Abgrenzung hinsichtlich des Zielattributs möglich ist. Die Versuchsreihen „V3“ und „V4“ sind bezüglich der Attribute 1 und 2 ununterscheidbar. Auf dieser Grundlage kann keine eindeutige Zuordnung zum Zielattribut erfolgen, weshalb beim Vorliegen dieser Konstellation die Kritikalität nicht eindeutig bestimmt werden kann. Folglich werden diese Elemente bzw. Versuchsreihen der Grenzregion zugeordnet. Das vollständige Ergebnis der Anwendung der Rough-Set-Theorie ist in Abbildung 45 dargestellt. Der graue Grenzbereich umfasst die Elemente „V3“ und „V4“. Die anderen Elemente können eindeutig zugeordnet werden.

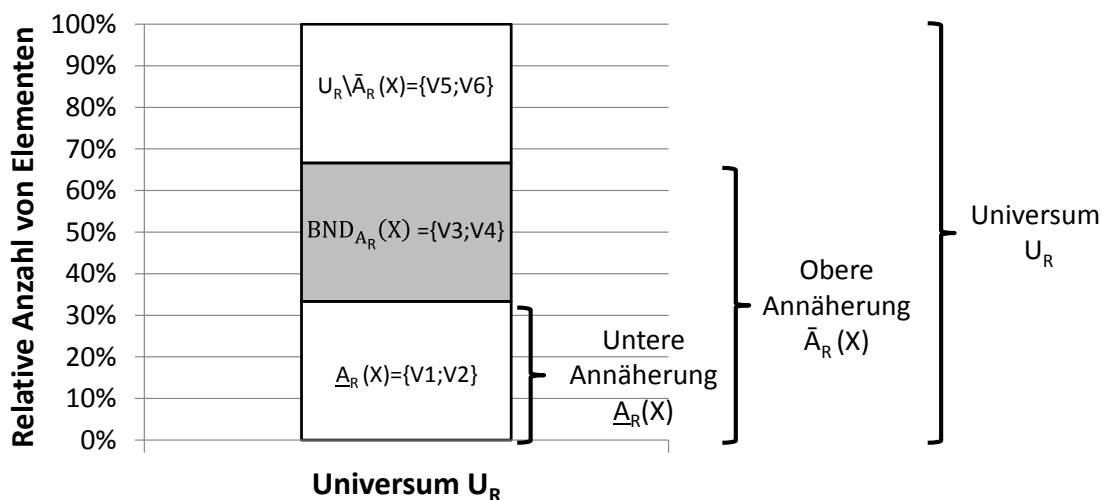


Abbildung 45: Teilmengen der beispielhaften Anwendung der Rough-Set-Theorie

Die Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung soll Eingangsdaten unter Berücksichtigung der spezifischen Aussagekraft bewerten und aggregieren. Die Rough-Set-Theorie kann diese Forderungen nicht eigenständig erfüllen. Der Ansatz kann jedoch ein wesentlicher Bestandteil der Aggregationssystematik zur Bestimmung der Aussagekraft von Bewertungsergebnissen sein. Je nach Informationslage und Definition des Universums sind verschiedene Ansätze möglich.

So kann die Bewertungsungenauigkeit bei ausreichender Informationslage spezifisch je Bewertungsmethode bestimmt werden, wenn die wirksame Bewertungsungenauigkeit nicht auf einer Messwertabweichung, sondern auf zufälligen Ereignissen bzw. Fehlern basiert. Neben messtechnischen Bewertungsmethoden stellen visuelle Inspektionspunkte, die durch Subjektivität des Bewertenden beeinflusst sein können, ein mögliches Anwendungsgebiet dar. Sind die Bewertungen von mehreren Bewertenden vorhanden, so kann der Ansatz die Grundlage zur spezifischen Bestimmung der Bewertungsungenauigkeit bilden.

Durch die Verwendung der dreiwertigen Mengenlehre kann die Rough-Set-Theorie weiterhin die Basis zur Ermittlung der Unwissenheit bilden (vgl. Abschnitt 3.2.2.4). Die Unwissenheit wird durch einen Glaubensgrad repräsentiert, der das Maß der Unterstützung von Aussagen bzw. Bewertungsergebnissen abbildet und durch die Rough-Set-Theorie bestimmt werden kann [Yao\_98]. Hierfür werden die durch die Rough-Set-Theorie erzeugten Teilmengen verwendet. Mögliche Ergebnisse von Bewertungsmethoden sind hinsichtlich der realitätsgerechten Abbildung von Substanzverlusten zu klassifizieren. Ununterscheidbare Ergebnisse, die zum zuvor genannten Zielattribut indifferent sind, müssen der Grenzregion, d.h. der Unwissenheit, zugeordnet werden. Hieraus wird die spezifische Aussagekraft der Bewertungsmethode hinsichtlich ihrer Detektionsfähigkeit bestimmt.

Je nach Definition des Universums kann die Ermittlung spezifisch für jedes diskrete Bewertungsergebnis oder einheitlich für die gesamte Bewertungsmethode bzw. das gesamte Bewertungsintervall erfolgen. Darüber hinaus kann die Unwissenheit der Kombination mehrerer Bewertungsmethoden zur Bewertung eines gemeinsamen Parameters bestimmt werden. Hierfür muss das Universum so erweitert werden, dass die gemeinsame Detektionsfähigkeit der Bewertungsmethoden berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 3.2.2.5).

Mit dem Ansatz der Rough-Set-Theorie kann die Höhe der Unwissenheit und der auf zufälligen Fehlern basierenden Bewertungsungenauigkeit einer Bewertungsmethode bestimmt werden. Gemäß Abschnitt 3.2.1.1 sind diese wesentliche Bestandteile der in die entwickelte Gesamtsystematik zu integrierenden Unsicherheit. Da diese konkreten Höhen zur Verarbeitung von Bewertungsergebnissen benötigt werden, soll der Ansatz im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt werden.

### 3.2.1.7 Evidenz-Theorie

Die Evidenz-Theorie ist eine Erweiterung der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie. Sie basiert auf mengentheoretischen Grundlagen und wird bereits im Rahmen von Zustandsbewertungen genutzt [Bee\_15, Fei\_05, Han\_07, FGH\_01, NeU\_98]. Die Theorie konzentriert sich auf die Verarbeitung von zustandsbestimmenden Hinweisen und nutzt hierfür die zugehörigen Grade der Unterstützung für oder gegen eine Aussage. In diesem Zusammenhang wird die Kombination der Hinweise besonders beachtet. Durch die Anwendung des entsprechenden Regelwerks werden die Sicherheit des Ergebnisses mit steigender Anzahl an Hinweisen erhöht und die Maße der Unterstützung für oder gegen eine Aussage ermittelt [Dem\_67, Sha\_76].

Im Gegensatz zur klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie, die ausschließlich auf einem Ereignis, dessen Gegenereignis bzw. den zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten basiert, wobei  $p(A) + p(\bar{A}) = 1$  gilt, erweitert die Evidenz-Theorie diesen Ansatz um die Ebene der Unsicherheit. Dieser sogenannte „Graubereich“ kann weder dem Ereignis noch dessen Komplement eindeutig zugeordnet werden, wobei beide Zugehörigkeiten möglich sind. So wird ein schwacher Hinweis für ein Ereignis nicht automatisch als starker Hinweis für dessen Komplement gewertet.

Den Ausgangspunkt stellt eine Menge von Alternativen bzw. Ereignissen ( $A_n$ ) dar, die im gegebenen Betrachtungsrahmen aufgrund von Hypothesen möglich sind:  $\Theta = \{A_1, \dots, A_n\}$ . Die Menge  $\Theta$  beschreibt den Betrachtungsrahmen vollständig und wird als disjunkt angenommen.

Die Evidenz-Theorie bewertet im Gegensatz zur klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie nicht die einzelnen Hinweise für die jeweiligen Ereignisse der Menge  $\Theta$ , sondern deren Kombinationen. Die Menge aller möglichen Kombinationen besteht aus  $2^\theta$  Elementen. Sie werden mit einem Basismaß, den sogenannten Massezahlen beschrieben, wobei gelten muss:  $m: 2^\theta \rightarrow [0,1]$ ,  $m(\emptyset) = 0$ . Für eine Teilmenge  $T$ , die Hinweise für die Alternativen des Betrachtungsrahmens bereitstellt und Elemente der möglichen Kombinationen enthält gilt:  $\sum_{T \subseteq \Theta} m(T) = 1$ .

Folglich können jeder Massezahl Werte zwischen „0“ und „1“ zugeordnet werden. Die Höhe des Werts repräsentiert das Basismaß, mit dem die jeweilige Kombination der Ereignisse unterstützt wird. Der Wert „0“ bedeutet, dass keine Unterstützung möglich ist. Ein Wert von „1“ repräsentiert die vollkommene Unterstützung [Fei\_05, FGH\_01, Spi\_93].

Die Summe aller Massezahlen, die ausschließlich Hinweise für ein Ereignis ( $A$ ) beinhaltet, d.h. der Massezahlen der Teilmenge ( $T$ ), welche echte Teilmengen des Ereignisses ( $A$ ) darstellen, wird Glaubensgrad („degree of belief“ –  $Bel(A)$ ) genannt, wobei gilt:  $Bel(A) = \sum_{T \subseteq A} m(T)$ . Dieser repräsentiert prinzipiell die Häufigkeit, mit der das Ereignis ( $A$ ) auftritt. Alle Ereignisse mit einem positiven Glaubensgrad werden fokale Elemente genannt.

Der zugehörige Plausibilitätsgrad („degree of plausibility“ –  $Pl(A)$ ) erweitert den Glaubensgrad. Es werden alle Massezahlen berücksichtigt, die einen Hinweis für das Ereignis ( $A$ ) bereitstellen, d.h. deren Schnittmenge mit dem Ereignis ( $A$ ) weder leer noch eine echte Teilmenge des Ereignisses ( $A$ ) ist. Somit werden auch jene Kombinationen berücksichtigt, die bezüglich des Ereignisses ( $A$ ) eine Unsicherheit aufweisen, wobei gilt:  $Pl(A) = \sum_{T \cap A \neq \emptyset} m(T)$ . Hieraus folgt, dass der Glaubensgrad nicht größer sein kann als der Plausibilitätsgrad:  $Bel(A) \leq Pl(A)$ . Darüber hinaus gilt:  $Pl(\bar{A}) = 1 - Bel(A)$ . Die Differenz  $Pl(A) - Bel(A)$  drückt das Maß der Unwissenheit bzw. Unsicherheit aus, da in diesem Bereich ausschließlich Elemente enthalten sind, die nicht vollkommen dem Ereignis ( $A$ ) zuzuordnen sind. Sie besitzen lediglich eine gemeinsame Schnittmenge [Fei\_05, FGH\_01, Spi\_93].

Abbildung 46 veranschaulicht die zuvor genannten Sachverhalte zur Verarbeitung eines Hinweises bzw. im Rahmen der Zustandsbewertung eines Bewertungsergebnisses.

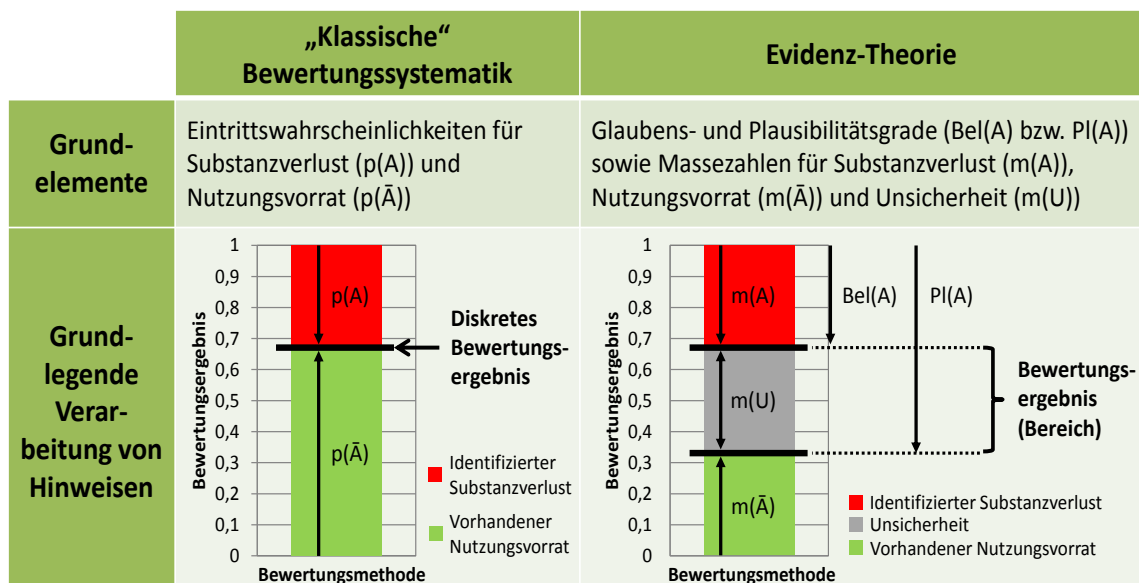


Abbildung 46: Vergleich von Wahrscheinlichkeits- und Evidenz-Theorie

Die Evidenz-Theorie wird der klassischen Bewertungssystematik, basierend auf der Wahrscheinlichkeitstheorie, gegenübergestellt. Die linke Spalte repräsentiert die klassische Bewertungssystematik. In der Darstellung wird das Bewertungsergebnis ausschließlich durch eine Alternative ausgedrückt, wodurch der Betrachtungsrahmen das Ereignis ( $A$ ) und das zugehörige Gegenereignis ( $\bar{A}$ ) umfasst. Ereignis ( $A$ ) bezeichnet hier einen identifizierten Substanzverlust, das Gegenereignis ( $\bar{A}$ ) den vorhandenen Nutzungsvorrat. Ein weiteres Ereignis ist bei der Zustandsbewertung nicht möglich, so dass  $A$  und  $\bar{A}$  den kompletten Betrachtungsrahmen bilden.

Aus Abbildung 46 geht hervor, dass die klassische Bewertungssystematik keine Möglichkeit zur unabhängigen Darstellung der Unsicherheit bereitstellt, die z.B. durch fehlende oder unsichere Messergebnisse entsteht. Folglich wird aus dem Hinweis für ein Ereignis direkt auf das Gegenereignis geschlossen. Als Bewertungsergebnis entsteht ein diskreter Wert.

Durch die Anwendung der Evidenz-Theorie entstehen drei Bereiche, welche Werte zwischen „0“ und „1“ annehmen können und in der Darstellung durch die Massezahlen repräsentiert werden. Die Summe aller drei Bereiche beträgt „1“. Die Evidenz-Theorie ermöglicht somit einen zusätzlichen „Graubereich“, der die Unsicherheit abbildet und das Bewertungsergebnis darstellt. Der jeweilige Glaubensgrad besteht aus den Massezahlen  $m(A)$  bzw.  $m(\bar{A})$ . Der Plausibilitätsgrad erweitert diese um die Unsicherheit  $m(U)$ .

Es entstehen je ein Plausibilitätsgrad und ein Glaubensgrad für das Ereignis und das Gegenereignis. Die Werte sind nicht mit Eintrittswahrscheinlichkeiten gleichzusetzen. Die Mengenlehre bildet die Grundlage, so dass relative Häufigkeiten ausgedrückt werden. Jeder Hinweis bzw. jedes Bewertungsergebnis enthält drei Massezahlen – für das Ereignis, das zugehörige Gegenereignis sowie die Unsicherheit.

Die Darstellung der Evidenz-Theorie nach Abbildung 46 gilt sowohl für kombinierte als auch für einzelne Hinweise bzw. Bewertungsergebnisse, deren zugehörige Grade durch Massezahlen ausgedrückt werden. Der komplette Satz der Massezahlen für einen Hinweis wird als Evidenz-Körper bezeichnet. Zur Kombination von zwei unabhängigen Hinweisen werden die einzelnen Massezahlen der Evidenz-Körper gemäß der Dempster'schen Regel nach Gleichung (3.12) kombiniert [Fei\_05, FGH\_01, Spi\_93, Dem\_67, Sha\_76]:

$$m_1(A) \oplus m_2(A) = \frac{\sum_{T_1 \cap T_2 = A} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2)}{1 - \sum_{T_1 \cap T_2 = \emptyset} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2)} \quad (3.12)$$

Soll beispielsweise die kombinierte Massezahl von zwei Hinweisen ermittelt werden, die auf ein Ereignis ( $A$ ) deuten, so werden im Zähler alle Kombinationen summiert, die einen Hinweis hierfür bereitstellen – auch solche, die mit Unsicherheit behaftet sind. Der Nenner beinhaltet die Konstellationen, die in Bezug auf das Ereignis ( $A$ ) unmöglich sind, d.h. solche, die sich widersprechen. Der Nenner dient somit der Normierung, um im Endergebnis wieder die Summe „1“ des gesamten Evidenz-Körpers zu erhalten. Die Regel wird für die zugehörigen Massezahlen separat angewendet.

Müssen mehr als zwei Hinweise miteinander kombiniert werden, so erfolgt die Kombination nacheinander nach Gleichung (3.13):

$$m_{1,\dots,n} = (\dots ((m_1 \oplus m_2) \oplus m_3) \oplus \dots m_n) \quad (3.13)$$

Durch die Kombination von Hinweisen werden die Maße der Unterstützung entsprechend der Höhe der Einzelhinweise ermittelt, wodurch i.d.R. die Unsicherheit im Vergleich zu jener von einzelnen Hinweisen sinkt [Fei\_05, FGH\_01, Spi\_93, Bei\_08, Spr\_08, Han\_07]. Die Kombination von Hinweisen ist in Abbildung 47 am Beispiel von Bewertungsergebnissen der Zustandsbewertung gezeigt. In der Darstellung werden die drei benötigten Massezahlen als Bewertungsergebnis je Bewertungsmethode übereinander aufgetragen. Ihre Höhe wird prozentual angegeben (vgl. Abschnitt 3.2.2.3).

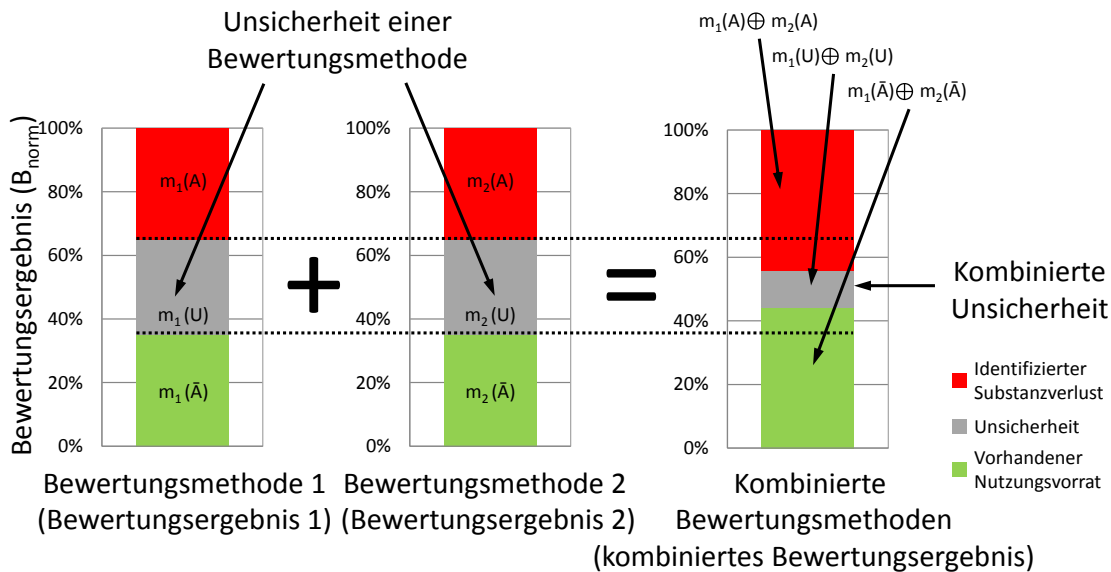


Abbildung 47: Kombination von Bewertungsergebnissen mit der Evidenz-Theorie

Im Beispiel werden zwei Bewertungsergebnisse während einer Zustandsbewertung von zwei verschiedenen Bewertungsmethoden erzeugt. Die einzelnen Bewertungsergebnisse haben die gleiche Höhe von Substanzverlust, Unsicherheit und Nutzungsvorrat. Durch die Kombination der Bewertungsergebnisse mit dem Regelwerk der Evidenz-Theorie wird die Unsicherheit wesentlich reduziert. Die Aussagekraft des kombinierten Bewertungsergebnisses ist demnach höher als jene eines einzelnen Bewertungsergebnisses.

Mit dem Ansatz der Evidenz-Theorie können unsichere und auch fehlende Eingangswerte abgebildet werden, wobei die Unwissenheit repräsentiert wird. In Abhängigkeit des Betrachtungsrahmens kann die Bewertungsungenauigkeit zusätzlich abgebildet und verarbeitet werden. Darüber hinaus wird eine Möglichkeit zur Verfügung gestellt, um die Höhe der Eingangsdatenbewertung abzubilden. Hierfür können die Maße, welche die Hinweise für und gegen das Ereignis repräsentieren, genutzt werden. Sie sind normiert, da die Summe aller Massezahlen stets „1“ ergibt, wodurch gewährleistet ist, dass alle Bewertungsergebnisse im gleichen Intervall liegen.

Die Evidenz-Theorie ist geeignet, um Eingangswerte realitätsgerecht zu bewerten und eine zugehörige Aussagekraft zu erzeugen. Sie stellt somit einen Ansatz dar, mit dem die gesamte Unsicherheit von Bewertungsergebnissen verarbeitet wird. Ebenso wird die Kombination von Bewertungsergebnissen dargestellt. Die Unsicherheit wird direkt im Bewertungsergebnis berücksichtigt. Die Lage des Unsicherheitsbereichs sowie dessen Spannweite innerhalb eines normierten Bereichs bilden das Bewertungsergebnis. Die Unsicherheit ist ein Maß für die Aussagekraft des Bewertungsergebnisses. Da somit sowohl die Aussagekraft als auch das Bewertungsergebnis vereint sind, soll dieser Ansatz im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden.



### 3.2.1.8 Anwendungspotentiale im Rahmen einer Zustandsbewertung

Die vorangegangenen Betrachtungen stellen verschiedene Ansätze zur Verarbeitung bzw. den Umgang mit unsicherem Wissen dar. Jede Theorie verfolgt unterschiedliche Ziele, so dass die Einsatzmöglichkeiten variieren. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht der untersuchten Ansätze. Die Fähigkeit Unsicherheit abzubilden, die Anwendungsbereiche und die Auswahl zur Verwendung in der Gesamtsystematik werden dargestellt.

**Tabelle 12: Anwendungsbereiche der untersuchten Aggregationsverfahren**

Ansatz	Berücksichtigung der Unsicherheit	Anwendungsbereich	Verwendung in Gesamtsystematik
<b>Konventionelle Bewertungssystematik</b>	Nicht separat vorgesehen	Zusammenfassung von Parametern etc.	x
<b>Konfidenzintervalle</b>	Bewertungsungenauigkeit	Ermittlung der messtechnischen Bewertungsungenauigkeit	x
<b>Fuzzy-Logik</b>	Bewertungsungenauigkeit	Bewertung von Eingangsdaten, Verarbeitung der Bewertungsungenauigkeit (diskrete Bewertungsabstufungen)	-
<b>„MYCIN“</b>	Unwissenheit, Bewertungsungenauigkeit	Kombination der Unsicherheit (separater Wert)	-
<b>Rough-Set-Theorie</b>	Unwissenheit, Bewertungsungenauigkeit	Ermittlung der Höhe der Unwissenheit und Bewertungsungenauigkeit (zufällige Fehler)	x
<b>Evidenz-Theorie</b>	Unwissenheit, Bewertungsungenauigkeit	Kombination und Bewertung unter Berücksichtigung der gesamten Unsicherheit	x

Die Zustandsbewertung muss die spezifische Aussagekraft der Bewertung abbilden, wobei sowohl die Unwissenheit als auch die Bewertungsungenauigkeit direkt im Bewertungsergebnis berücksichtigt werden sollen. Ein einzelner theoretischer Ansatz kann nicht alle Anforderungen eigenständig erfüllen, wodurch mehrere Ansätze miteinander kombiniert werden.

Die übergeordnete Bewertungsstruktur wird durch die Anwendung der konventionellen Bewertungssystematik erzeugt. Hierdurch wird das Betriebsmittel, z.B. das GIS-Schaltfeld, in die relevanten Komponenten unterteilt. Durch die Unterteilung und die hieraus entstehenden, verschiedenen Bewertungsebenen, können das Betriebsmittel vielseitig analysiert und konkrete Schwachstellen identifiziert werden. Die Unterteilung findet bis zu der Ebene der Parameter statt.

Durch die konventionelle Bewertungssystematik wird somit eine Methodik zur Verfügung gestellt, welche die Kombination der Parameter bis zur obersten Ebene, z.B. dem Schaltfeld der GIS, vollzieht.

Die Parameter werden mit verschiedenen Bewertungsmethoden bewertet. Zur Aggregation dieser Bewertungsergebnisse wird die Evidenz-Theorie als Basis gewählt. Durch deren Anwendung wird die Unsicherheit in das Bewertungsergebnis integriert. Gleichzeitig repräsentieren die normierten Massezahlen der Evidenz-Theorie die Kritikalität der Bewertung. Somit werden sowohl das Maß des Substanzverlusts als auch die Aussagekraft bzw. die Unsicherheit in einem Bewertungsergebnis kombiniert dargestellt. Darüber hinaus stellt die Theorie ein „Werkzeug“ zur Kombination von Bewertungsergebnissen zur Verfügung. Die Evidenz-Theorie dient somit der Ergebnisbildung von Parameterbewertungen.

Die Ermittlung der notwendigen Glaubensgrade bzw. Massezahlen zur Anwendung der Evidenz-Theorie wird durch die Rough-Set-Theorie sowie die Methodik der Konfidenzintervalle unterstützt. Die zu ermittelnden Massezahlen basieren auf der Unsicherheit der einzelnen Bewertungsergebnisse. Diese Unsicherheit besteht sowohl aus der Bewertungsungenauigkeit als auch aus der Unwissenheit. Zur Bestimmung der Höhe der Bewertungsungenauigkeit werden die Vorgehensweisen der Konfidenzintervalle für messtechnische Ungenauigkeiten und der Rough-Set-Theorie für zufällig auftretende, nicht messwertbezogene Ungenauigkeiten genutzt. Für die Bestimmung der Höhe der Unwissenheit wird die Rough-Set-Theorie verwendet.

Die Fuzzy-Logik zur Verarbeitung der Bewertungsungenauigkeit zwischen diskreten Bewertungsabstufungen wird nicht umgesetzt, da keine Ansatzpunkte für diese Theorie vorhanden sind. Zwar werden diskrete Abstufungen zur Bewertung von Eingangsdaten genutzt, jedoch konnte hierfür keine sinnhafte Bewertungsungenauigkeit zur Verwendung von Fuzzy-Mengen unterstellt werden. Beispielhaft seien Funktionskontrollen erwähnt, deren Abstufung „funktionsfähig“ und „nicht funktionsfähig“ umfassen, so dass ausschließlich eine scharfe Abgrenzung zwischen den Abstufungen sinnvoll erscheint.

„MYCIN“ – zur Verarbeitung unsicherheitsbehafteter Bewertungsergebnisse – wird ebenso nicht umgesetzt, da die Theorie die Aussagekraft als separaten Wert bestimmt. Die Evidenz-Theorie stellt hierzu die geeignetere Alternative dar.

### **3.2.2 Modellbildung**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Systematik zur Aggregation der erfassten Eingangsdaten entwickelt. Hierzu werden die im vorangegangenen Abschnitt ausgewählten Ansätze verwendet. Tabelle 13 gibt einen Überblick der angewendeten Ansätze in den verschiedenen Aggregationsebenen.

Tabelle 13: Überblick der Aggregationssystematik

Ebene	Bezeichnung	Aggregation
1	Feld	
2	Schaltfeldfunktion	Konventionell / Gewichtung
3	Hauptkomponente	Konventionell / Gewichtung
4	Ggf. Baugruppe	Konventionell / Gewichtung
5	Parameter	Konventionell / Gewichtung
6	Bewertungsmethode	<b>Evidenz-Theorie,</b> (Rough-Set-Theorie, Konfidenzintervalle)
7	Eingangsdaten	Bewertung von Mess- und visuellen Inspektions- ergebnissen

Der Ursprung der Aggregation liegt in der untersten Ebene der Gesamtsystematik (Ebene 7). Die erfassten Mess- und visuellen Inspektionsergebnisse, d.h. die Eingangsdaten, werden bewertet und zur Erzeugung des Bewertungsergebnisses der Bewertungsmethoden verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Auf der Ebene 6 der Bewertungsmethoden werden die Evidenz-Theorie, die Rough-Set-Theorie und die Konfidenzintervalle genutzt (vgl. Abschnitte 3.2.2.3 und 3.2.2.4). Unter Beachtung des zugehörigen Regelwerks werden die Bewertungsergebnisse der Bewertungsmethoden zur Beurteilung des zugehörigen Parameters kombiniert (Ebene 5, vgl. Abschnitt 3.2.2.5) [EPaw\_15].

Die weitere Kombination auf den höheren Ebenen erfolgt konventionell durch die Verwendung von Gewichtungsfaktoren (vgl. Abschnitt 3.2.2.6). Hierdurch werden Bewertungsergebnisse von Baugruppen (Ebene 4), Hauptkomponenten (Ebene 3) und Schaltfeldfunktionen (Ebene 2) erzeugt. Diese Unterteilung wurde gewählt, um vielseitige Auswertemöglichkeiten zur Verfügung zu stellen und somit konkrete Schwachstellen identifizieren zu können. Je nach Art der Schaltfeldfunktion unterscheidet sich die Belegung dieser Ebenen. So sind die meisten Unterteilungen beim Leistungsschalter als Hauptkomponente vorzufinden. Diese sind aufgrund einer Vielzahl verschiedenartiger Parameter sinnvoll.

Diese Vorgehensweise resultiert in der Bewertung eines Schaltfelds (Ebene 1), da dieses im Fokus der Gesamtsystematik als sinnvoll instand zu haltende Einheit steht (vgl. Abschnitt 3.3). Weiterhin können die einzelnen Schaltfeldbewertungen durch Gewichtungsfaktoren zur Gesamtbewertung der Schaltanlage – als sinnvolle Einheit für die Erneuerungsplanung – kombiniert werden.

### 3.2.2.1 Eingangsdatenquellen

Die Eingangsdaten werden aus den Mess- und Inspektionsprotokollen (Ebene 7) ermittelt. Diese werden zur Bestimmung des Bewertungsergebnisses ( $B$ ) der Eingangsdatenbewertung benötigt, welches in der nächst höheren Ebene der Bewertungsmethoden (Ebene 6) genutzt wird.

Die Bewertungsmethoden basieren auf der in den Laborversuchen untersuchten Messtechnik, den weiteren Bewertungsmethoden gemäß Tabelle 1 sowie ausgewählten visuellen Inspektionen. Abbildung 48 visualisiert die Verarbeitung der Eingangsdatenquellen im Rahmen der Gesamtsystematik.

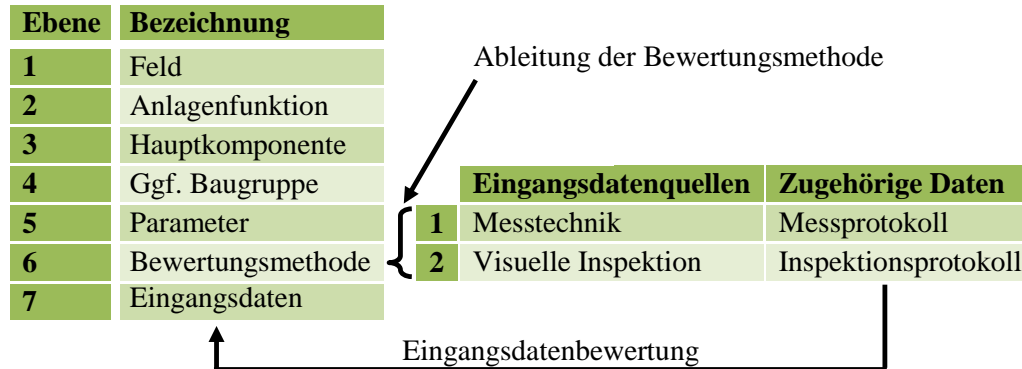


Abbildung 48: Eingangsdatenquellen der Gesamtsystematik

Jeder Bewertungsmethode gehören die spezifischen Eingangsdaten an, die zur Erzeugung des Bewertungsergebnisses verwendet werden. So stellt beispielsweise die akustische TE-Messung eine Bewertungsmethode dar. Die zugehörigen Eingangsdaten sind Signalstärke, Fehlermuster etc. des Messprotokolls, wodurch als Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung z.B. die Fehlerfreiheit festgestellt wird.

Insgesamt werden 54 Bewertungsmethoden (Ebene 6) verwendet. Diese Anzahl stellt den Maximalwert zur Abdeckung aller Variationen dar, die z.B. aus unterschiedlichen Antriebsarten resultieren. Je nach Anlagentyp werden unterschiedliche Anzahlen zur Bewertung genutzt. Zudem treten Dopplungen auf, da gleiche Bewertungsmethoden zur Bewertung verschiedener Parameter genutzt werden. Beispielsweise sind visuelle Inspektionen mehrfach vertreten.

Die Erfassung der Eingangsdaten kann durch das Instandhaltungspersonal durchgeführt werden. Jenes verfügt i.d.R. über Anlagenkenntnisse sowie Erfahrungen im Bereich der Inspektion und Messtechnik. Die Bewertung der Daten erfolgt durch hinterlegte Algorithmen zur Minimierung von subjektiven Einflüssen.

### 3.2.2.2 Bewertung von Eingangsdaten

Die Eingangsdaten der untersten Ebene der Aggregationssystematik (Ebene 7) werden zur Erzeugung des Bewertungsergebnisses ( $B$ ) genutzt, welches in der Ebene der Bewertungsmethoden (Ebene 6) benötigt wird. Die Bewertung basiert auf den Erkenntnissen aus dem Anlagenbetrieb, den Laboruntersuchungen sowie der Einhaltung gesetzlicher oder herstellerspezifischer Vorgaben – den sogenannten zulässigen Grenzwerten. Das zugeordnete Bewertungsergebnis kann vom Nutzer nicht direkt eingesehen oder vorgegeben werden. Es wird in Abhängigkeit der zugehörigen Eingangsdaten ermittelt.

Neben Auswahlmenüs werden Freifelder zur Eingangsdatenerfassung verwendet. Je nach Art der Eingangsdaten werden zwei verschiedene Methoden zur Bewertung dieser genutzt: Wird ein Mess- oder Inspektionsergebnis mit Hilfe eines Auswahlmenüs erfasst, ist jeder Auswahlmöglichkeit eine Bewertung hinterlegt, so dass diskrete Abstufungen zwischen den Bewertungsergebnissen existieren. Ein Anwendungsfall sind beispielsweise Funktionskontrollen mit den Auswahlmöglichkeiten „funktionsfähig“ und „nicht funktionsfähig“. Erfolgt hingegen die Abfrage eines konkreten (Mess-)Werts in Freifeldern, so ist ein Algorithmus hinterlegt, der in Abhängigkeit der Grenzwerte die Bewertung kontinuierlich vollzieht.

Das mögliche Bewertungsintervall wird einheitlich durch die Werte „1“ und „4“ begrenzt, wobei  $B = 1$  das bestmögliche Ergebnis darstellt. Die diskreten Bewertungsabstufungen können wie folgt interpretiert werden:

- Bewertung „1“: Es wurden keine Substanzverluste identifiziert.
- Bewertung „2“: Geringe Substanzverluste wurden identifiziert. Die Funktionsfähigkeit ist weiterhin gegeben und es werden keine zulässigen Grenzwerte überschritten. Die identifizierten Substanzverluste sollten beobachtet und ggf. beseitigt werden.
- Bewertung „3“: Mittelschwere Substanzverluste wurden identifiziert. Die Funktionsfähigkeit ist noch gegeben. Zulässige Grenzwerte werden noch nicht überschritten, können jedoch mittelfristig verletzt werden. Die identifizierten Substanzverluste sollten mittelfristig beseitigt werden.
- Bewertung „4“: Gravierende bzw. kritische Substanzverluste wurden identifiziert. Die Funktionsfähigkeit ist eingeschränkt. Zulässige Grenzwerte werden überschritten. Die identifizierten Substanzverluste sollten kurzfristig beseitigt werden.

Weitere Bewertungsabstufungen sind i.d.R. nicht erforderlich, da ein höherer Detaillierungsgrad nicht erfasst bzw. sinnvoll zugeordnet werden kann. So kann z.B. die untersuchte Messtechnik nahezu ausschließlich kritische bzw. gravierende Substanzverluste identifizieren (vgl. Abschnitt 2.3.3), so dass die Bewertung überwiegend zwischen den Abstufungen „1“ und „4“ stattfindet. Geringe und mittelschwere Substanzverluste können i.d.R. nicht identifiziert werden. Weiterhin wurde eine ungerade Anzahl an Bewertungsergebnissen vermieden, um eine Tendenz zum mittleren Bewertungsergebnis zu vermeiden [Alb\_11].

Exemplarisch soll die Erzeugung des Bewertungsergebnisses  $B$  der Bewertungsmethode akustische Teilentladungsmessung (Ebene 6) dargestellt werden. Hierzu werden folgende Eingangsdaten (Ebene 7) verwendet: Fehlerart und Signalstärke. Die Erfassung der Fehlerart erfolgt durch ein Auswahlmenü, welches die relevanten Fehlerarten nach Abschnitt 2.3.1.1 sowie die Auswahlmöglichkeiten „Fehlerfreiheit“ und „unbekannt“ enthält. Die Auswahl wird durch die in Abschnitt 2.3.3.3 erstellten Datenbanken unterstützt. Die maximale Signalstärke wird durch ein Freifeld erfasst, in welchem der ermittelte Wert in der Einheit Millivolt ( $mV$ ) eingetragen wird.

Die Bewertung der Eingangsdaten erfolgt in diskreten Bewertungsabstufungen. Die Fehlerfreiheit erhält das Bewertungsergebnis „1“. Wird eine Fehlerart ausgewählt, so werden die Eingangsdaten mit den Labormessungen aus der Datenbank verglichen. Durch den Vergleich und die Zuordnung einer bekannten Labormessung wird die Abmessung des Fehlers ermittelt. Ist diese größer als die kritische Abmessung, so wird das Bewertungsergebnis „4“ zugeordnet. Die Funktionserfüllung ist nicht mehr sichergestellt, weil die Isolationsfähigkeit nicht mehr gewährleistet werden kann. Da die akustische Teilentladungsmessung nahezu ausschließlich kritische Fehler detektieren kann (vgl. Abschnitt 2.3.3.1), wird bei einem detektierten Fehler vorrangig das Bewertungsergebnis „4“ zugeordnet. In wenigen Einzelfällen ist die ermittelte Abmessung geringfügig kleiner als die kritische Abmessung, so dass das Bewertungsergebnis „3“ zugeordnet wird. Da die akustische Teilentladungsmessung nahezu ausschließlich kritische Fehler detektieren kann, wird bei einem unbekanntem bzw. nicht identifizierten Fehlermuster das Bewertungsergebnis „4“ zugeordnet.

Wird z.B. eine Spitze auf Hochspannungspotential mit einer Signalstärke von 10 mV detektiert, so wird durch den Vergleich mit den Labormessungen festgestellt, dass die Bewertungsmethode ausschließlich kritische Spitzen auf Hochspannungspotential identifizieren kann. Folglich wird dem Bewertungsergebnis der Wert „4“ zugeordnet:  $B = 4$ .

Innerhalb der Grenzwerte „1“ und „4“ des Bewertungsintervalls sind verschiedene Anzahlen an Bewertungsabstufungen möglich, so dass auch eine kontinuierliche Bewertung der Eingangsdaten erfolgen kann. Diese ist z.B. bei der Bewertung der Eingangsdaten (Ebene 7) der Bewertungsmethode Gasanalyse (Ebene 6) notwendig. Zur Bewertung des Feuchtegehalts des SF<sub>6</sub>-Gases wurde der zulässige Grenzwert des Taupunkts des SF<sub>6</sub>-Gases zu  $-5\text{ °C}$  für einen Gasraum bestimmt. Diejenigen Messwerte, die diesen zulässigen Grenzwert erreichen und überschreiten, werden mit dem Bewertungsergebnis „4“ bewertet. Neuwertiges SF<sub>6</sub>-Gas besitzt einen Taupunkt von ca.  $-36\text{ °C}$ . Messwerte mit maximal  $-36\text{ °C}$  erzeugen das Bewertungsergebnis „1“. Zwischen diesen beiden Taupunkt-Werten ist die Bewertung linear verteilt. Abbildung 49 zeigt den Bewertungsverlauf sowie einen beispielhaften Messwert.

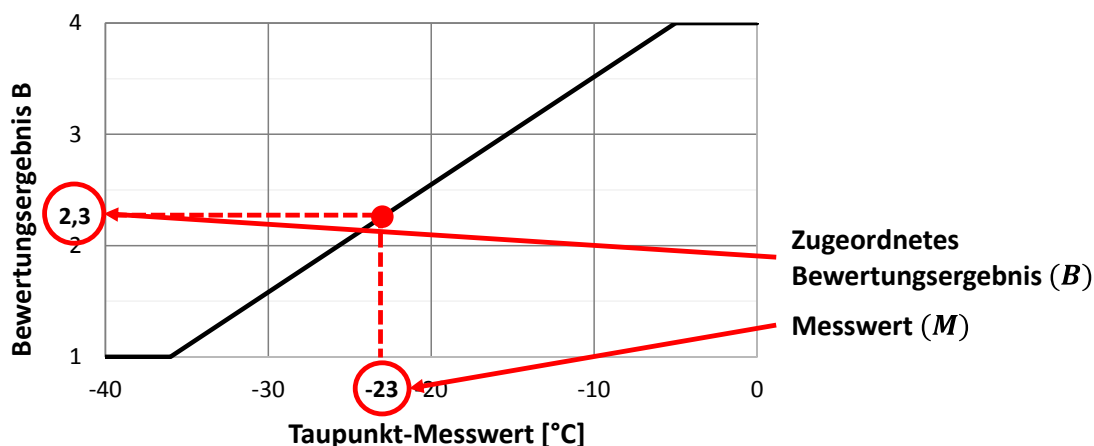


Abbildung 49: Beispiel der kontinuierlichen Eingangsdatenbewertung

Die gemessenen Taupunkt-Werte werden entsprechend des ermittelten Funktionsverlaufs dem Bewertungsergebnis zugeordnet. In der Darstellung wird beispielhaft der gemessene Taupunkt  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  dem Bewertungsergebnis 2,3 zugeordnet:  $B \approx 2,3$ .

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Eingangsdaten verschiedenartig bewertet. Hierfür werden sowohl diskrete Bewertungsabstufungen als auch die kontinuierliche Eingangsdatenbewertung verwendet. Das Resultat der Bewertung der Eingangsdaten ist ein Bewertungsergebnis  $B$  im Intervall  $[1,4]$ . Jeder Bewertungsmethode wird demnach ein konkreter Zahlenwert zugeordnet, der ausschließlich das Ausmaß des mit der Bewertungsmethode erfassten Substanzverlusts bewertet. Die Unsicherheit wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

### 3.2.2.3 Integration der Unsicherheit

Nachdem die Eingangsdaten bislang ausschließlich befreit von der Unsicherheit betrachtet wurden, erfolgt an dieser Stelle der Arbeit die Vorstellung des Modells zur Integration der Unsicherheit. Gemäß Abschnitt 3.2.1.1 werden hierdurch die Detektionsfähigkeit bzw. Unwissenheit, das Fehlen von Eingangsdaten sowie die Bewertungsungenauigkeit abgebildet.

Den Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen stellt die Evidenz-Theorie dar. Das zugehörige Modell wird in der Ebene 6 der Gesamtsystematik integriert. Zur Anwendung der Evidenz-Theorie ist eine Adaption an das vorliegende Modell nötig. Die Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung erlaubt ausschließlich eine Hypothese, bei der das grundsätzliche Ziel die Quantifizierung von Abnutzungen ist. Demnach stellt die Identifikation des vorhandenen Substanzverlusts eine Alternative dar, welche mit „ $A$ “ bezeichnet werden soll. Das einzig mögliche Gegenereignis „ $\bar{A}$ “ beschreibt die Identifikation des vorhandenen Nutzungsvorrats. Der Betrachtungsrahmen ( $\Theta$ ) enthält folgende Elemente:  $\Theta = \{A, \bar{A}\}$ . Eine Teilmenge  $T$  kann folgende Elemente enthalten:  $T = \{\emptyset, A, \bar{A}, U\}$  (vgl. Abschnitt 3.2.1.7), wobei  $m(\emptyset) = 0$  gilt. Die Unsicherheit wird durch „ $U$ “ beschrieben und bezeichnet jene Teilmenge, die sowohl  $A$  als auch  $\bar{A}$  bedeuten könnte und somit unsicher ist. Aus diesen Annahmen heraus ergeben sich der Glaubens- und der Plausibilitätsgrad für die Alternative ( $A$ ):

$$Bel(A) = \sum_{T \subseteq A} m(T) = m(A) \text{ und } Pl(A) = \sum_{T \cap A \neq \emptyset} m(T) = m(A) + m(U).$$

Entsprechendes gilt für das Gegenereignis ( $\bar{A}$ ):

$$Bel(\bar{A}) = \sum_{T \subseteq \bar{A}} m(T) = m(\bar{A}) \text{ und } Pl(\bar{A}) = \sum_{T \cap \bar{A} \neq \emptyset} m(T) = m(\bar{A}) + m(U).$$

Jeder Hinweis, d.h. das Bewertungsergebnis jeder Bewertungsmethode, besteht somit aus folgenden Massezahlen [FGH\_01, NeU\_98]:

- $m_{i,j}(A)$  für den identifizierten Substanzverlust,
- $m_{i,j}(\bar{A})$  für den vorhandenen Nutzungsvorrat und
- $m_{i,j}(U)$  für die Unsicherheit.

Der Index  $i$  bezeichnet die Ebene der Gesamtsystematik. Der Index  $j$  zählt die in der Ebene enthaltenen Elemente. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden anstelle der Glaubens- und Plausibilitätsgrade vornehmlich die Massezahlen verwendet, deren normierte Bereiche prozentual angegeben werden, so dass die Summe aller Massezahlen im vorliegenden Modell stets 100 % statt „1“ beträgt. Abbildung 50 zeigt die gestapelte Darstellung der Massezahlen, welche eine übersichtliche Einordnung des Zustands ermöglicht und als normiertes Bewertungsergebnis  $B_{norm}$  bezeichnet wird.

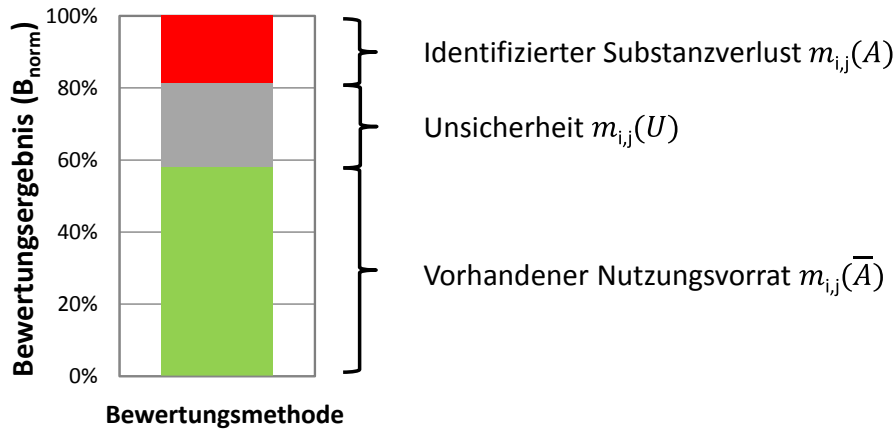


Abbildung 50: Gewählte Darstellungsform von Bewertungsergebnissen der Evidenz-Theorie

Im dargestellten Bewertungsergebnis einer Bewertungsmethode ist ein identifizierter Substanzverlust von fast 20 % sichtbar. Der vorhandene Nutzungsvorrat wurde zu 58 % bestimmt. Als Ergebnis, d.h. der Bewertung mit einer Bewertungsmethode, ist in erster Instanz der Unsicherheitsbereich zu verstehen. Je höher die Lage dieses Bereichs, d.h. je höher die zugeordneten prozentualen Werte innerhalb dieser Darstellung sind, desto geringer ist das Maß der identifizierten Substanzverluste. Die Spannweite des Bereichs bildet die Aussagekraft des Ergebnisses ab. Je nach identifizierten Maßen von Substanzverlust und Nutzungsvorrat ändern sich die Lage und die Größe des Unsicherheitsbereichs innerhalb der normierten Darstellung.

Die Zuordnung der für die Anwendung der Evidenz-Theorie notwendigen Massezahlen wird in Abbildung 51 dargestellt [EPaw\_15].

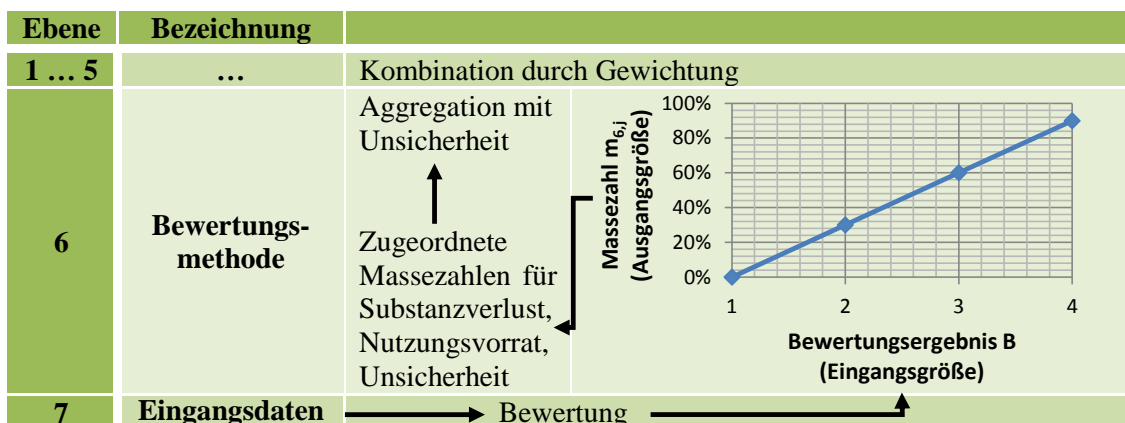


Abbildung 51: Zuordnung von Massezahlen



Den Ausgangspunkt bildet das ermittelte Bewertungsergebnis ( $B$ ) der Ebene 7 der Aggregationssystematik (vgl. Abschnitt 3.2.2.2), welches den Betrag bzw. die Größe aller drei Massezahlen bestimmt. Auf Grundlage dessen wird die Massezahl zugeordnet. In der Darstellung ist beispielhaft der Verlauf einer Massezahl dargestellt. Allgemein können die spezifischen Massezahlen in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses ( $B$ ) nach den Gleichungen (3.14) bis (3.16) zugeordnet werden:

$$B \rightarrow m_{6,j}(A) \text{ mit } \begin{cases} m_{6,j}(A) \in [0 \%, 100 \%], \text{ für } B \in [1,4] \\ m_{6,j}(A) = 0 \%, \text{ für } B \in \emptyset \end{cases} \quad (3.14)$$

$$B \rightarrow m_{6,j}(\bar{A}) \text{ mit } \begin{cases} m_{6,j}(\bar{A}) \in [0 \%, 100 \%], \text{ für } B \in [1,4] \\ m_{6,j}(\bar{A}) = 0 \%, \text{ für } B \in \emptyset \end{cases} \quad (3.15)$$

$$B \rightarrow m_{6,j}(U) \text{ mit } \begin{cases} m_{6,j}(U) \in [0 \%, 100 \%], \text{ für } B \in [1,4] \\ m_{6,j}(U) = 100 \%, \text{ für } B \in \emptyset \end{cases} \quad (3.16)$$

Dem Bewertungsintervall entsprechend ist der Verlauf für Eingangsgrößen ( $B$ ) im Bereich von „1“ bis „4“ definiert. Die zugeordnete Massezahl kann Werte im Bereich von 0 % bis 100 % annehmen und wird durch hinterlegte Funktionsverläufe zugeordnet. Resultat dieses Schritts sind insgesamt drei zugeordnete Massezahlen, deren Summe 100 % ergibt. Das konkrete Bewertungsergebnis der Ebene 7 wird in der Ebene 6 mit einer spezifischen Unsicherheit belegt, deren Höhe in separaten Untersuchungen bestimmt wird (vgl. Abschnitt 3.2.2.4).

Einen Spezialfall bilden fehlende Eingangsdaten. Worden Daten nicht erhoben, obwohl dies möglich gewesen ist, so gehen diese mit einer vollkommenen Unsicherheit ein. Der Wert 100 % wird der Massezahl der Unsicherheit zugeordnet:  $m_{6,j}(U) = 100\%$ . Die anderen Maße erhalten den Wert 0%:  $m_{6,j}(A) = m_{6,j}(\bar{A}) = 0\%$ . Fehlende Eingangsdaten führen im Gegensatz zu konventionellen Bewertungsschemata nicht zum Ausschluss der Bewertungsmethode. In der vorliegenden Systematik wird jede anwendbare Bewertungsmethode berücksichtigt.

Folglich werden übergeordnete Parameter (Ebene 5), welche durch die Bewertungsmethoden (Ebene 6) beschrieben werden, sowie hinterlegte Gewichtungsfaktoren nicht verändert und das Funktionsprinzip bleibt erhalten. Die fehlenden Eingangsdaten wirken sich lediglich auf die Unsicherheit des Gesamtergebnisses aus. Je mehr Eingangsdaten fehlen, umso größer ist diese. Hierdurch ist gewährleistet, dass Bewertungsergebnisse von bspw. Schaltfeldern trotz ungleicher Datengrundlage vergleichbar sind. Die Grundgesamtheit der Parameter bleibt identisch.

Sind Komponenten nicht vorhanden, d.h. die Bewertungsmethoden bzw. Parameter sind nicht relevant, ist eine Erfassung der zugehörigen Daten unmöglich. Dieser Fall verursacht in den höheren Ebenen der Aggregationssystematik eine Nichtbeachtung dieser Komponenten. Im Rahmen des vorliegenden Anwendungsbereichs (vgl. Abschnitt 4.2.1) ist dies nicht relevant, so dass dieser Spezialfall nicht näher behandelt werden soll.

### 3.2.2.4 Bestimmung der Unsicherheit

Zur Bestimmung der spezifischen Unsicherheit muss jede Bewertungsmethode separat analysiert werden. Im entwickelten Modell resultiert die Unsicherheit aus der Unwissenheit sowie der Bewertungsungenauigkeit von Bewertungsmethoden – d.h. den ermittelten, charakteristischen Detektionsgrenzen aus Abschnitt 2.3.3. Die durchgeführten Laboruntersuchungen sind somit eine wesentliche Voraussetzung zur Bestimmung der Unsicherheit. Ihre Anwendung zur Bestimmung der Unsicherheit wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Zur Bestimmung der Unsicherheit von Bewertungsergebnissen der Bewertungsmethoden sind im vorliegenden Modell folgende Schritte notwendig, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden:

- Bestimmung der Funktionsverläufe der Massezahlen (vgl. Abschnitt 3.2.2.4.1) und
- Bestimmung der konkreten Massezahlen (vgl. Abschnitt 3.2.2.4.2).

In Abschnitt 3.2.2.4.3 werden Anwendungsbeispiele zur Bestimmung der Unsicherheit gezeigt. Zur Veranschaulichung wird die ermittelte Unsicherheit einer Bewertungsmethode, d.h. deren Lage und Höhe, in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses der Eingangsdatenbewertung dargestellt. Der so dargestellte Verlauf der Unsicherheit wird in Abschnitt 3.2.2.4.4 gezeigt.

#### 3.2.2.4.1 Bestimmung der Funktionsverläufe der Massezahlen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits darauf verwiesen, dass jeder Massezahl ein Funktionsverlauf hinterlegt ist, welcher die Zuordnung der Höhe der Massezahl in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses ermöglicht. Die Funktionsverläufe werden in einem ersten Schritt für jede Bewertungsmethode identifiziert. Hierzu wird die Aussagekraft der Bewertungsmethode im fehlerfreien und im fehlerbehafteten Zustand analysiert.

Zu Beginn müssen die Grundformen der Verläufe betrachtet werden, welche den Verlauf einer Massezahl repräsentieren und in Abbildung 52 dargestellt sind [EPaw\_15].

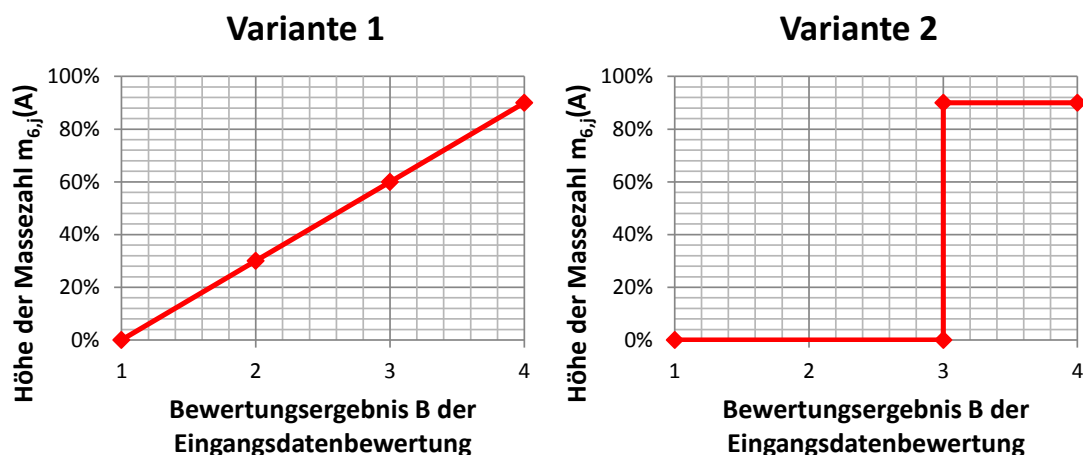


Abbildung 52: Grundlegende Verläufe einer Massezahl

Die Höhe der Massezahl ist im Intervall [0%, 100%] definiert. Je höher dieser Wert ist, desto größer ist das Maß der Unterstützung der Aussage. Die Massezahlen sind in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses ( $B$ ) dargestellt, welches im Intervall [1,4] definiert ist. Während  $B = 1$  den bestmöglichen Zustand repräsentiert, wird durch  $B = 4$  ein kritisches Bewertungsergebnis ausgedrückt. Der Bereich der Funktionsverläufe, der nicht der dargestellten Massezahl zugeordnet wird ( $100\% - m_{6,j}(A)$ ), verteilt sich auf die beiden nicht abgebildeten Massezahlen.

Variante 1 beschreibt ein wachsendes Maß der Unterstützung – im vorliegenden Fall der Massezahl  $m_{6,j}(A)$  – mit steigender Bewertung. Es wird ein linearer Zusammenhang unterstellt. Umso kritischer das Bewertungsergebnis ist, desto höher ist das Maß der Unterstützung der Aussage. Variante 2 beschreibt eine sprunghafte Änderung, wobei die Massezahl durch zwei diskrete Größen definiert ist, deren Zuordnung sich in Abhängigkeit einer Grenzwertüberschreitung ergibt.

Um neben der Unsicherheit auch den Grad der Abnutzung ausdrücken zu können, werden die Varianten 1 und 2 zur Verwendung in der Aggregationssystematik gewählt. So kann z.B. mit dem Verlauf der Massezahl aus Variante 1 ein steigender Grad des Substanzverlusts mit kritischerer Bewertung ausgedrückt werden. Variante 2 findet Anwendung, wenn z.B. ausschließlich zwischen Fehlerfreiheit und dem Vorhandensein eines Fehlers unterschieden wird. Abbildung 53 zeigt die kombinierten Verläufe aller drei Massezahlen, die in der Aggregationssystematik verwendet werden [EPaw\_15, Fei\_05].

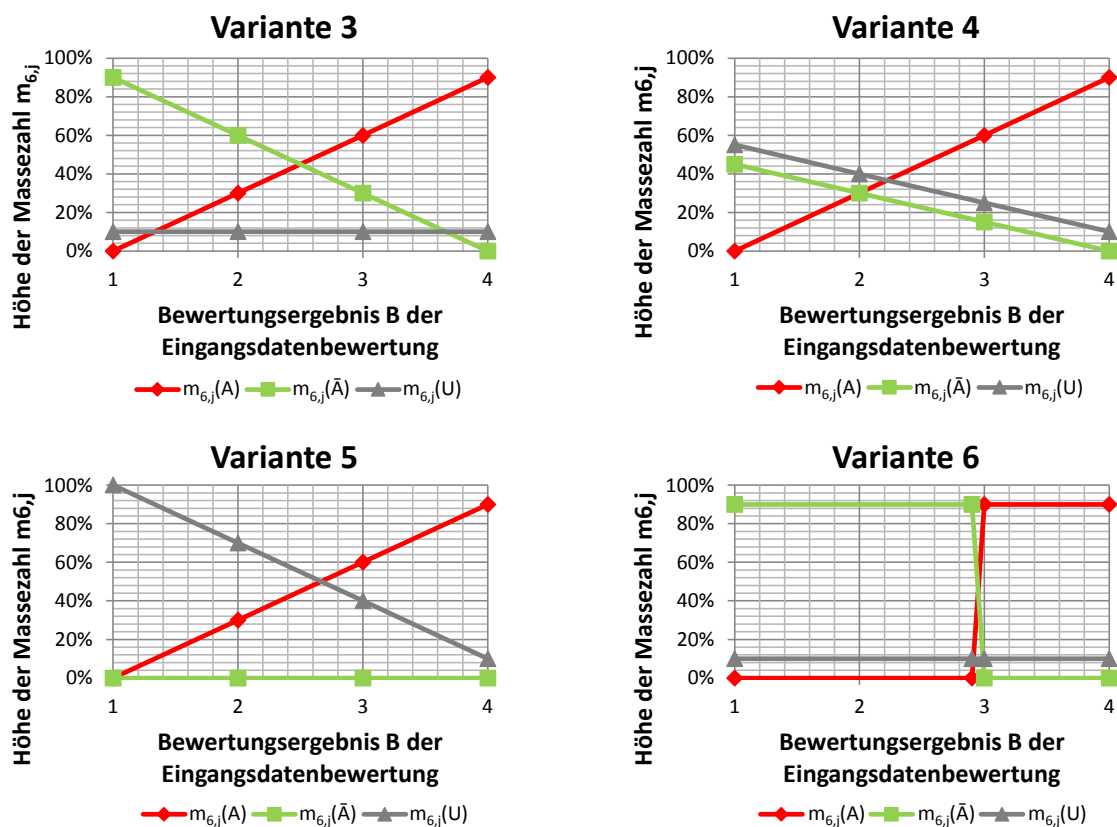


Abbildung 53: Kombinierte Verläufe der Massezahlen (Beispiele)

Bei der Anwendung der Evidenz-Theorie sind immer alle drei Massezahlen parallel zu berücksichtigen. Die Summe aller drei Massezahlen beträgt für jedes diskrete Bewertungsergebnis  $B$  stets 100 %. In Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses  $B$  ermöglichen die Darstellungen die Analyse der Unsicherheit ( $m_{6,j}(U)$ ).

Variante 3 zeigt ein Szenario, bei dem die Bewertungsmethode sowohl bezüglich des Substanzverlusts ( $m_{6,j}(A)$ ) als auch des Nutzungsvorrats ( $m_{6,j}(\bar{A})$ ) die gleiche Aussagekraft besitzt. Die Verläufe dieser zwei Massezahlen sind spiegelverkehrt aufgetragen. Hierdurch ergibt sich, dass die Unsicherheit im gesamten Bewertungsintervall konstant ist. Einen Anwendungsfall stellt die SF<sub>6</sub>-Gasanalyse dar, für die im gesamten, relevanten Messbereich eine konstante Detektionsfähigkeit identifiziert wurde, so dass sowohl im Fall einer Auffälligkeit als auch bei dem Gegenereignis gleich verlässliche Hinweise entstehen.

Sind die Verläufe der Massezahlen für den Substanzverlust und den Nutzungsvorrat nicht spiegelverkehrt, so bewirkt dies eine Anpassung der Unsicherheit. In Variante 4 wird hierdurch eine sinkende Unsicherheit mit steigender Höhe der Bewertung, d.h. mit wachsender Kritikalität der identifizierten Auffälligkeit, erzielt. Ein Anwendungsbereich ist die unkonventionelle Teilentladungsmessung. Identifizierte, kritische Fehler – das zugehörige Bewertungsergebnis beträgt „4“ – können eindeutig identifiziert werden, wodurch sehr verlässliche Hinweise erzeugt werden. Die Unsicherheit durch Unwissenheit ist an dieser Stelle gering. Die verbleibende Unsicherheit resultiert aus zufälligen Fehlern bzw. der Bewertungsungenauigkeit.

Wird kein Fehler identifiziert – Bewertungsergebnis  $B = 1$  –, so können nicht derart sichere, aussagekräftige Hinweise erzeugt werden. Da die Detektionsfähigkeit der Bewertungsmethode begrenzt ist, sind trotz positivem Messergebnis kritische Fehler möglich, die nicht detektiert werden können. Hieraus resultiert, dass die Aussagekraft der Bewertungsmethode im fehlerfreien Zustand geringer ist, wodurch die Unsicherheit höhere Werte annimmt.

Die sinkende Unsicherheit mit kritischerem Bewertungsergebnis wird ebenso in Variante 5 genutzt. Sie nimmt einen Wert von 100 % an, falls kein Fehler identifiziert wurde, und sinkt mit steigendem Bewertungsergebnis. Die Bewertungsmethode erlaubt nur eine Aussage in eine zustandsbestimmende Richtung. Im vorliegenden Fall kann die Bewertungsmethode ausschließlich einen Fehler identifizieren und zwar umso sicherer, je gravierender dieser bewertet wird. Ein abstraktes Beispiel stellt die visuelle Suche nach Lecks an der metallischen Kapselung einer GIS dar. Werden hierbei Lecks identifiziert, ist ein sicherer Hinweis für eine Beeinträchtigung vorhanden. Wird kein Leck durch die visuelle Inspektion gefunden, so ist die zugehörige Aussagekraft gering. Da die zu identifizierenden Leckagen visuell schwer zu identifizieren sind, kann kein sicherer Hinweis für eine intakte Anlagenfunktion abgeleitet werden.

In Variante 6 wird ein Szenario konstanter Unsicherheit demonstriert. Im Unterschied zu Variante 3 basiert dieses auf zwei sprunghaften Änderungen. Bei einer Grenzwertüberschreitung erfolgt eine Umkehrung der Verhältnisse. Ein Sprung mit konstanter Unsicherheit wird z.B. bei Funktionskontrollen angewendet. An dieser Stelle kann lediglich überprüft werden, ob die Funktion erfüllt wird. Weitere Abstufungen sind nicht integriert.

Prinzipiell sind weitere Variationen der vorgestellten Verläufe möglich. Die hier gezeigten Funktionsverläufe sollen zur Veranschaulichung der Funktionsweise der Aggregationssystematik dienen. Für die Anwendung im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden alle relevanten Funktionsverläufe dargestellt. Jeder Bewertungsmethode werden die spezifischen Funktionsverläufe der Massezahlen zugeordnet [EPaw\_15].

#### 3.2.2.4.2 Bestimmung der konkreten Massezahlen

Nachdem die spezifischen Verläufe der Massezahlen von Bewertungsmethoden bestimmt wurden, muss die absolute Aussagekraft je Bewertungsergebnis der Bewertungsmethode – d.h. die zugeordnete Höhe der Massezahl – ermittelt werden.

Die folgenden Betrachtungen dienen der Ermittlung der Massezahl der Unsicherheit. Hierzu werden die Unwissenheit und die Bewertungsungenauigkeit für die diskreten Bewertungsergebnisse ( $B$ ) „1“ und „4“ analysiert [EPaw\_15a]. Zwischen den diskreten Bewertungsergebnissen ( $B$ ) „1“ und „4“ wird die Höhe der Unsicherheit durch lineare Interpolation ermittelt.

Die Unwissenheit repräsentiert die Möglichkeit kritischerer nicht detektierbarer Fehler (vgl. Abschnitt 3.2.1.1). Da zur Ermittlung der Unsicherheit ausschließlich die Bewertungsergebnisse ( $B$ ) „1“ und „4“ betrachtet werden, ist die Unwissenheit nur für das Bewertungsergebnis „1“ relevant. Das Bewertungsergebnis „4“ bildet bereits die kritischste Bewertung ab, so dass keine weitere Steigerung in Bezug auf das Bewertungsergebnis möglich ist und die Unwissenheit 0 % beträgt.

Zur Ermittlung der Höhe der Unwissenheit für das Bewertungsergebnis „1“ wird die Rough-Set-Theorie genutzt, wobei die Elemente des Universums ( $U_{5,j}$ ) vom zu beurteilenden Parameter – d.h. den zugehörigen relevanten Fehlerarten – bestimmt werden. Das Zielattribut zur Ermittlung der Teilmengen der Rough-Set-Theorie ( $\underline{A}_{6,j}(F)$  und  $\overline{A}_{6,j}(F)$ ) stellt die korrekte Zuordnung des vorhandenen Substanzverlusts zum Bewertungsergebnis – d.h. die Detektierbarkeit des installierten Fehlers bzw. der Fehlerfreiheit – dar. Die relevanten Fehlerarten ( $F$ ) werden nach folgender Fragestellung (Zielattribut) unterteilt bzw. angenähert: „Kann ein vorhandener Substanzverlust (Fehler) folgerichtig detektiert werden?“ Das Zielattribut kann „nein“ und „ja“ annehmen. Das Universum enthält somit detektierbare und nicht detektierbare Fehler. Die weiteren Attribute der Elemente des Universums werden durch das dem Fehler zugehörige Bewertungs- bzw. Messergebnis gebildet.

Die relevanten Fehlerarten ( $F$ ) innerhalb des Universums werden unter Unkenntnis des Zielattributs hinsichtlich ihrer Detektierbarkeit unterteilt und durch die Teilmengen  $\underline{A}_{6,j}(F)$  und  $\overline{A}_{6,j}(F)$  der Rough-Set-Theorie angenähert. Zwischen diesen existiert eine Grenzregion ( $BND_{A_{6,j}}(F)$ ), welche ununterscheidbare Elemente des Universums enthält – d.h. solche Fehlerarten, die sich hinsichtlich ihres Zielattributs unterscheiden, deren weitere Attribute jedoch identisch sind. Dies liegt beispielsweise vor, wenn bei der akustischen TE-Messung lediglich das Grundrauschen aufgenommen wird, obwohl ein Fehler installiert ist. Hier ist keine Unterscheidung zur Messung ohne installierten Fehler möglich.

Die Größe der Grenzregion repräsentiert die Höhe der Unwissenheit, da diese Region alle Elemente enthält, die keiner Teilmenge mit Sicherheit zugeordnet werden können. Aus den Anzahlen der Elemente in den so ermittelten Teilmengen kann die Höhe der Unwissenheit  $UW_{6,j}(B)$  mit  $|BND_{A_{6,j}}(F)| = |\overline{A}_{6,j}(F)| - |\underline{A}_{6,j}(F)|$  nach Gleichung (3.17) ermittelt werden:

$$UW_{6,j}(B) = \begin{cases} \frac{|BND_{A_{6,j}}(F)|}{|U_{5,j}|} \cdot 100 \%, \text{ für } B = 1 \\ 0 \%, \text{ für } B = 4 \end{cases} \quad (3.17)$$

Zu beachten ist, dass die Elemente der Teilmengen in Abhängigkeit der Nebenbedingungen variieren, so dass z.B. die unkonventionellen TE-Messungen in Bezug zur verwendeten Sensorart unterschiedliche Detektionsfähigkeiten aufweisen (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Neben der Unwissenheit muss die Bewertungsungenauigkeit ( $BG_{6,j}(B)$ ) der Bewertungsmethoden zur Bestimmung der Unsicherheit berücksichtigt werden, welche mit den Ansätzen aus Abschnitt 3.2.1.8 ermittelt werden kann. Um diese im vorliegenden Modell nutzen zu können, muss ihre Höhe prozentual in Bezug zum normierten Bewertungsbereich ausgedrückt werden.

Da im vorliegenden Modell davon ausgegangen wird, dass beide Quellen der Unsicherheit voneinander unabhängig sind, wird die Massezahl der Unsicherheit für die im Modell verwendeten Bewertungsergebnisse ( $B$ ) „1“ und „4“ der Eingangsdatenbewertung mit  $BG_{6,j}(B) \in [0\%, 100\%]$  nach Gleichung (3.18) bestimmt:

$$m_{6,j}(U_B) = \max\{UW_{6,j}(B); BG_{6,j}(B)\} \quad (3.18)$$

Zur Bestimmung der Höhe aller Massezahlen im vorliegenden Modell werden der fehlerfreie ( $B = 1$ ) und der fehlerbehaftete ( $B = 4$ ) Zustand unter Berücksichtigung der zuvor ausgewählten Verläufe separat betrachtet. Kann die Bewertungsmethode keinen Fehler detektieren, so folgt aus den vorangegangenen Betrachtungen, d.h. den Funktionsverläufen, dass die Massezahl für den Substanzverlust den Wert 0 % erhält:  $m_{6,j}(A_1) = 0 \%$ . Es ist kein Hinweis für einen bestehenden Substanzverlust vorhanden. Die Höhe der Unsicherheit ( $m_{6,j}(U_1)$ ) ergibt sich nach Gleichung (3.18). Die Höhe des vorhandenen Nutzungsvorrats wird durch:  $m_{6,j}(\overline{A}_1) = 100 \% - m_{6,j}(U_1)$  bestimmt.

Aus Gleichung (3.18) geht hervor, dass die Massezahl der Unsicherheit ( $m_{6,j}(U_1)$ ) – falls die Bewertungsmethode nicht alle relevanten Fehler detektieren kann und die Bewertungsungenauigkeit gering ist – durch das Verhältnis von nicht detektierbaren zu relevanten Fehlern bestimmt wird – d.h. beispielsweise durch  $100\% - d_{\text{rel}}$  nach Abschnitt 2.3.3.1.1. Die Massezahl des Nutzungsvorrats ( $m_{6,j}(\bar{A}_1)$ ) ergibt sich hierbei aus dem Verhältnis der detektierbaren zu den relevanten Fehlern – d.h.  $d_{\text{rel}}$  nach Abschnitt 2.3.3.1.1.

Können alle möglichen Fehler durch die Bewertungsmethode identifiziert werden, d.h. die Unwissenheit ist kleiner als die Bewertungsungenauigkeit, so ist die Bewertungsungenauigkeit maßgebend für die Unsicherheit. Der Substanzverlust erhält den Wert  $0\%$ :  $m_{6,j}(A_1) = 0\%$ . Der vorhandene Nutzungsvorrat wird durch:  $m_{6,j}(\bar{A}_1) = 100\% - BG_{6,j}(1)$  ermittelt.

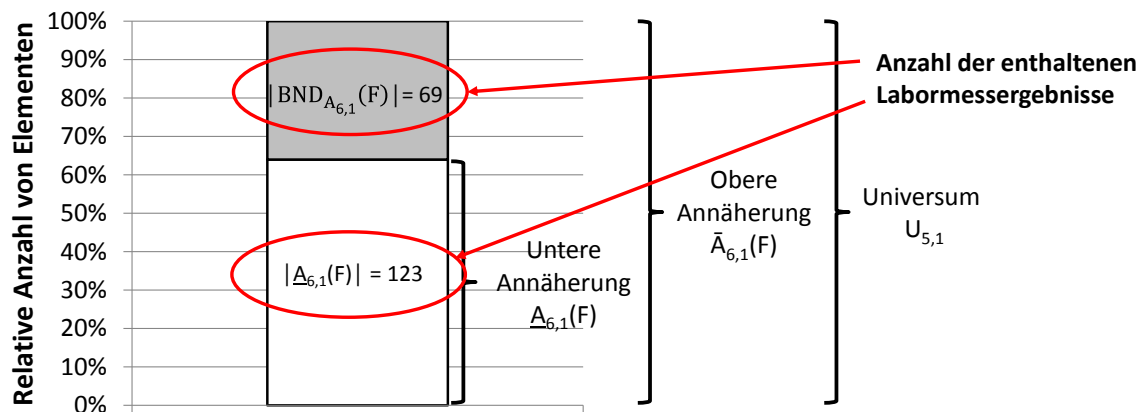
Im fehlerbehafteten Zustand, d.h. das kritischste Bewertungsergebnis wird durch die Bewertungsmethode ermittelt, ergibt sich die Massezahl für die Unsicherheit ( $m_{6,j}(U_4)$ ) nach Gleichung (3.18). Die Ungenauigkeit der Bewertungsmethode ist für die Massezahl der Unsicherheit maßgeblich:  $m_{6,j}(U_4) = BG_{6,j}(4)$ . Die Massezahl des Substanzverlusts wird durch:  $m_{6,j}(A_4) = 100\% - m_{6,j}(U_4)$  bestimmt. Der vorhandene Nutzungsvorrat beträgt  $0\%$ :  $m_{6,j}(\bar{A}_4) = 0\%$ . An dieser Stelle ist es irrelevant, ob die Bewertungsmethode generell alle Fehler identifizieren kann, da das kritischste Bewertungsergebnis ermittelt wurde und keine weitere Steigerung in Bezug auf das Bewertungsergebnis möglich ist. Zwischen dem fehlerfreien und dem fehlerbehafteten Zustand werden die Massezahlen den identifizierten Verläufen entsprechend verteilt.

### 3.2.2.4.3 Anwendungsbeispiele zur Bestimmung der Unsicherheit

Zur Veranschaulichung wird die vorgestellte Vorgehensweise an einem Beispiel erläutert: Die akustische TE-Detektion wird allgemein hinsichtlich ihrer Aussagekraft untersucht, wobei die Laboruntersuchungen herausstellen, dass diese Bewertungsmethode nicht alle relevanten Fehlerarten des zugehörigen Parameters „Teilentladungsfreiheit“ detektieren kann, jedoch in der Lage ist, kritische Fehler zu erkennen. Aus diesen Überlegungen heraus wird Variante 4 aus Abbildung 53 für die Massezahlenverläufe gewählt. Anschließend werden die zugehörigen konkreten Massezahlen bestimmt. Die Bewertungsergebnisse  $B = 1$  (Fehlerfreiheit) und  $B = 4$  (kritischer Fehler) werden hierfür separat betrachtet.

Im Fall der festgestellten Fehlerfreiheit kann das Maß der Unterstützung ausschließlich einen Wert repräsentieren, der angibt, inwiefern das Verfahren überhaupt in der Lage ist, relevante Fehler zu detektieren. Dieser Wert wird aus den Laboruntersuchungen (vgl. Abschnitt 2.3.3) ermittelt. Die untersuchten Fehler, die innerhalb des Parameters Teilentladungsfreiheit der Gesamtsystematik relevant sind, bilden die Elemente des Universums ( $U_{5,1}$ ).

Die Labormessergebnisse der akustischen TE-Messung werden unter Unkenntnis des Zielattributs (vgl. Abschnitt 3.2.2.4.2) in die Teilmengen der Rough-Set-Theorie aufgeteilt. Es wird untersucht, ob der tatsächlich vorhandene Substanzverlust folgerichtig durch das Messergebnis abgebildet wird, wodurch sich folgende Teilmengen ergeben: Die untere Annäherung  $\underline{A}_{6,j}(F)$  enthält alle Labormessergebnisse, die den installierten Fehler folgerichtig erkannten. Die obere Annäherung  $\overline{A}_{6,1}(F)$  erweitert diese, so dass zusätzlich ununterscheidbare Labormessergebnisse enthalten sind – d.h. diejenigen, die der Messung ohne Fehler gleichen, obwohl ggf. ein Fehler vorhanden war. Die Differenzmenge beider Annäherungen bildet die Grenzregion ( $BND_{A_{6,j}}(F)$ ). Weitere Teilmengen sind im Universum nicht vorhanden. Abbildung 54 zeigt die Teilmengen. In der Darstellung sind zusätzlich die Anzahlen der enthaltenen Labormessergebnisse dargestellt.



#### Teilmengen der Rough-Set-Theorie (Bewertung „1“)

Abbildung 54: Teilmengen der Rough-Set-Theorie am Beispiel der akustischen TE-Messung (Bewertung „1“)

Mit Gleichung (3.17) wird die Höhe der Unwissenheit  $UW_{6,j}(1)$  aus den Anzahlen der Labormessergebnisse in den Teilmengen bestimmt, welche 36 % beträgt und für das Bewertungsergebnis „1“ der Eingangsdatenbewertung gilt – d.h. 36 % der installierten, kritischen Fehler aus den Laboruntersuchungen konnten nicht detektiert werden, was aus  $1 - d_{rel,akustisch}$  nach Abschnitt 2.3.3.1.1 resultiert. Die Unwissenheit für das Bewertungsergebnis „4“ beträgt nach Gleichung (3.17) 0 %:  $UW_{6,j}(4) = 0 \%$ . Die Unwissenheit ist nicht relevant, wenn die akustische TE-Messung einen kritischen Fehler detektiert.

Neben der Unwissenheit muss die Bewertungsungenauigkeit betrachtet werden. Die Bestimmung mit der Methodik der Konfidenzintervalle kann nicht erfolgen, da Messwertabweichungen für die Bewertung nicht ausschlaggebend sind (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Ein mit der akustischen Teilentladungsmessung aufgenommenes Fehlermuster bedeutet meist einen kritischen Fehler der Bewertung  $B = 4$ , wobei die absolute Höhe des Signals nicht ausschlaggebend ist.

Die Bewertungsungenauigkeit der akustischen TE-Messung resultiert aus zufälligen Fehlern, z.B. durch die Sensoranbringung, externe Störeinflüsse etc., und wird in Anlehnung an eine Analyse der Felduntersuchungen ermittelt. Während dieser Untersuchungen wurden 48 Schaltfelder mit der akustischen TE-Messung untersucht.



Hierbei traten an fünf Schaltfeldern zufällige Fehler auf, die erkannt und somit beseitigt wurden. Im praktischen Einsatz, d.h. bei ermittelten Messergebnissen, können solche Fehler nicht ausgeschlossen werden, wodurch hieraus die Bewertungsungenauigkeit resultiert. Durch die Einteilung in die Teilmengen der Rough-Set-Theorie – analog zu Abbildung 54 und der zuvor vorgestellten Vorgehensweise zur Bestimmung der Unwissenheit – wird eine Bewertungsungenauigkeit von 10 % ermittelt. Sie wird im gesamten Bewertungsintervall als konstant angenommen.

Da die Höhen der Unwissenheit und der Bewertungsungenauigkeit für die Bewertungsergebnisse „1“ und „4“ bestimmt und die Verläufe der Massezahlen zugeordnet wurden, werden hieraus die weiteren Massezahlen bestimmt. Aus den Verläufen der Massezahlen geht hervor, dass dem Substanzverlust für das Bewertungsergebnis „1“ der Wert 0 % zugeordnet wird:  $m_{6,1}(A_1) = 0 \%$ . Nach Gleichung (3.18) wird der Unsicherheit das Maximum aus der Unwissenheit und der Bewertungsungenauigkeit zugeordnet, wodurch die Unsicherheit 36 % beträgt:  $m_{6,1}(U_1) = 36 \%$ . Die Massezahl des Nutzungsvorrats beträgt entsprechend 64 %:  $m_{6,1}(\bar{A}_1) = 64 \%$ .

Wird ein kritischer Fehler identifiziert, so besteht kein Hinweis für die Fehlerfreiheit bzw. einen bestehenden Nutzungsvorrat, so dass diesem die Massezahl 0 % zugeordnet wird:  $m_{6,1}(\bar{A}_4) = 0 \%$ . Nach Gleichung (3.18) drückt die Unsicherheit die Bewertungsungenauigkeit aus, so dass dessen Massezahl verhältnismäßig geringe Werte (10 %) annehmen kann:  $m_{6,1}(U_4) = 10 \%$ .

Zwar kann die akustische TE-Messung nicht alle relevanten Fehler detektieren, jedoch ist die Aussage im Fall eines als kritisch identifizierten Fehlers sehr sicher. Der Substanzverlust beträgt 90 %:  $m_{6,1}(A_4) = 90 \%$ . Zwischen den Extrempunkten  $B = 1$  und  $B = 4$  der Eingangsdatenbewertung werden die Massezahlen linear verteilt. Abbildung 55 zeigt die zugeordneten Massezahlen inklusive ihrer Verläufe.

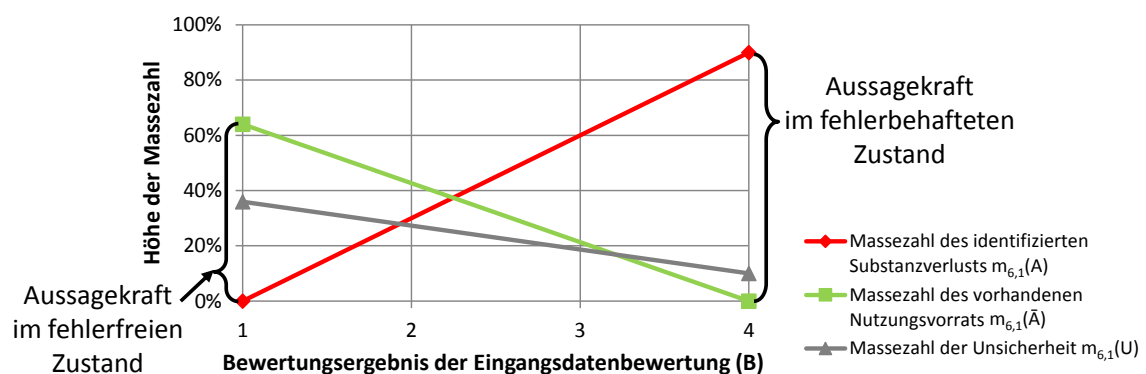


Abbildung 55: Verlauf der Massezahlen der akustischen TE-Messung

Die Unsicherheit ist in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses nicht konstant. Sie sinkt mit steigender Bewertung, d.h. je gravierender ein Fehler ist, desto sicherer ist das Bewertungsergebnis [EPaw\_15, EPaw\_15a]. Dies resultiert daraus, dass mit steigendem Bewertungsergebnis die Möglichkeit kritischerer, nicht detektierbarer Fehler sinkt. Die Massezahl des Substanzverlusts steigt mit kritischerer Bewertung, die Massezahl für den Nutzungsvorrat sinkt. Hieraus resultiert, dass die Aussagekraft der Bewertungsmethode im fehlerbehafteten Zustand deutlich höher ist als bei festgestellter Fehlerfreiheit.

Während an den Extrempunkten eine Massezahl immer den Wert 0 % annimmt, sind zwischen den Extrempunkten alle drei Massezahlen größer als 0 %. Es bestehen Hinweise für einen Substanzverlust und einen Nutzungsvorrat, da das Bewertungsergebnis weder vollkommene Kritikalität noch Fehlerfreiheit ausdrückt. Die Verteilung der Anteile bestimmt das Bewertungsergebnis ( $B$ ).

Zur Bestimmung der Höhe der Bewertungsungenauigkeit wurde im vorliegenden Beispiel die Rough-Set-Theorie genutzt. Für einzelne Bewertungsmethoden wird die Höhe der Bewertungsungenauigkeit durch die Methodik der Konfidenzintervalle bestimmt. Ein Beispiel hierfür ist die Gasanalyse. Gemäß Abschnitt 3.2.2.2 werden die zugehörigen Eingangsdaten kontinuierlich bewertet, so dass jedem Messwert entsprechend dem hinterlegten Funktionsverlauf ein Bewertungsergebnis zugeordnet wird. Eine mögliche Messwertabweichung ist somit für die Bewertungsungenauigkeit entscheidend.

Zur Bestimmung der zugehörigen Konfidenzintervalle werden die Herstellerangaben für die Ungenauigkeit der Messwerte genutzt. Hieraus resultiert eine konstante Bewertungsungenauigkeit im gesamten Bewertungsintervall. Abbildung 56 visualisiert die Vorgehensweise anhand der Bewertung des gemessenen Taupunkts der Bewertungsmethode SF<sub>6</sub>-Gasanalyse.

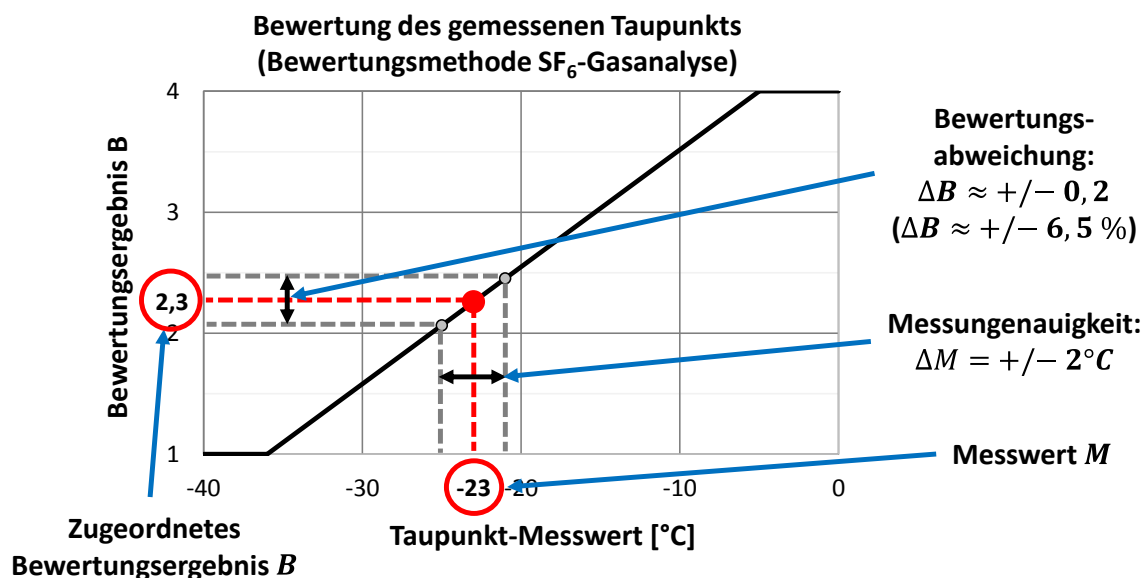


Abbildung 56: Bestimmung der Bewertungsungenauigkeit mit Konfidenzintervallen (Beispiel)

In der Darstellung wird der Taupunkt-Messwert  $M = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen, welcher mit dem Bewertungsergebnis  $B \approx 2,3$  bewertet wird. Da das Messsystem eine Messungenauigkeit von  $\Delta M = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufweist, resultiert hieraus:  $\Delta B \approx \pm 0,2$  bzw.  $\Delta B \approx \pm 6,5\%$ , woraus die Bewertungsungenauigkeit für diesen Messwert zu  $BG \approx 13\%$  bestimmt wird.

Generell werden durch die Analyse der Unwissenheit und der Bewertungsungenauigkeit der Bewertungen „1“ und „4“ der Eingangsdatenbewertung sowie der Verläufe der Massezahlen die konkreten Massezahlen für jedes mögliche Bewertungsergebnis bestimmt. Diese werden realitätsgerecht und anwendungsbezogen aus den Laboruntersuchungen ermittelt. Sie sind für die Verarbeitung von Bewertungsergebnissen erforderlich.

### 3.2.2.4.4 Verlauf der Unsicherheit

Der Verlauf der Unsicherheit geht aus einer weiteren Visualisierung der zuvor bestimmten Massezahlen hervor. Zur Veranschaulichung werden die Massezahlen spezifisch je Bewertungsmethode in Abhängigkeit der Eingangsdatenbewertung dargestellt. Jedem diskreten Bewertungsergebnis des Bewertungsintervalls [1,4] der Eingangsdatenbewertung werden die spezifischen Massezahlen gestapelt zugeordnet, so dass die Massezahlen des Nutzungsvorrats, der Unsicherheit und des Substanzverlusts in eben genannter Reihenfolge übereinander aufgetragen werden und somit das normierte Bewertungsergebnis bilden.

Abbildung 57 veranschaulicht den sich ergebenden Verlauf der Unsicherheit der akustischen Teilentladungsmessung sowie die Ermittlung eines Bewertungsergebnisses. Im Beispiel hat die akustische TE-Messung mit der Bewertung „3“ einen mittelschweren Fehler ermittelt. Die zugehörige Unsicherheit sowie die Massezahlen für den Substanzverlust und den Nutzungsvorrat werden dem diskreten Bewertungsergebnis  $B = 3$  zugeordnet.

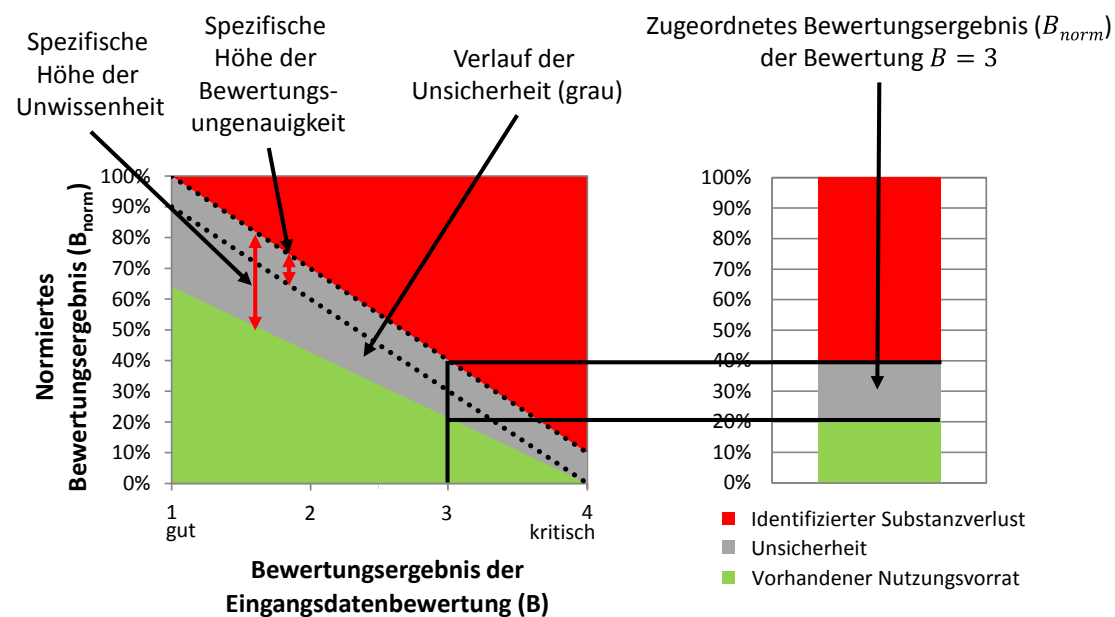


Abbildung 57: Verlauf der Unsicherheit der akustischen TE-Messung

Die Unsicherheit sinkt mit steigendem Bewertungsergebnis. Zur Veranschaulichung sind die je Bewertungsergebnis spezifischen Höhen der Unwissenheit und der Bewertungsungenauigkeit im Verlauf der Unsicherheit dargestellt. Hieraus geht hervor, dass die Unwissenheit maßgeblich die Höhe der Unsicherheit bestimmt.

Der Verlauf der Unsicherheit entsteht spezifisch je Bewertungsmethode (Ebene 6) in Relation zum Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung (Ebene 7). Dem diskreten Bewertungsergebnis wird hieraus der Unsicherheitsbereich im normierten Intervall  $[0\%, 100\%]$ , d.h. die Massezahlen der Unsicherheit, des Substanzverlusts und des Nutzungsvorrats, zugeordnet, welcher die Grundlage zur weiteren Verarbeitung von Bewertungsergebnissen bildet.

### 3.2.2.5 Kombination von Bewertungsergebnissen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Kombination von Bewertungsergebnissen, wobei die Ergebnisse der Bewertungsmethoden (Ebene 6), die denselben Parameter (Ebene 5) bewerten, miteinander kombiniert werden. Als Ergebnis entsteht für jeden Parameter ein Bewertungsergebnis, welches aus den Massezahlen der Unsicherheit ( $m_{5,j}(U)$ ), des Substanzverlusts ( $m_{5,j}(A)$ ) und des Nutzungsvorrats ( $m_{5,j}(\bar{A})$ ) besteht. Zur Kombination von Bewertungsergebnissen werden in den folgenden Abschnitten zwei wesentliche Methoden vorgestellt.

Jedes Bewertungsergebnis einer einzelnen Bewertungsmethode besteht aus einem Unsicherheitsbereich, dessen normierte Lage innerhalb des Intervalls von 0 % bis 100 % das Maß der Bewertung darstellt. Die Kritikalität wird durch die Lage des Unsicherheitsbereichs in Abhängigkeit der Eingangsdatenbewertung bestimmt. Die Spannweite der Unsicherheit ist ein Maß für die Aussagekraft des Bewertungsergebnisses.

Durch die Kombination von Bewertungsergebnissen sollen diese wesentlichen Eigenschaften der Bewertungsergebnisse einzelner Bewertungsmethoden (Ebene 6) beibehalten werden, so dass ebenso ein Unsicherheitsbereich spezifisch für jeden Parameter (Ebene 5) erzeugt wird. Die kombinierten Unsicherheiten der genutzten Bewertungsmethoden müssen die Aussagekraft der Parameterbewertung darstellen – d.h. bei der Kombination wird eine realitätsgerechte Anpassung der Unsicherheit vorgenommen. I.d.R. sollte die kombinierte Unsicherheit kleiner als eine einzelne sein, da durch mehrere Bewertungsergebnisse die Aussagekraft erhöht wird.

#### 3.2.2.5.1 Kombination mit der Rough-Set-Theorie

Die erste Variante erweitert den in Abschnitt 3.2.2.4 integrierten Ansatz der Rough-Set-Theorie zur Bestimmung der Massezahlen einer Bewertungsmethode. Den Ausgangspunkt hierfür stellt die Relation von detektierbaren zu relevanten Fehlern dar. Jede Bewertungsmethode kann eine bestimmte Anzahl an Fehlern detektieren, wobei die Menge der relevanten Fehler, d.h. aller Fehler inklusive der kritischen Fehler, bekannt ist.

Prinzipiell werden mittels Verhältnisbildung von detektierbaren zu relevanten Fehlern in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses der Eingangsdatenbewertung die zugehörigen Massezahlen einer Bewertungsmethode wesentlich bestimmt (vgl. Abschnitt 3.2.2.4).

Durch die Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden (Ebene 6), die denselben Parameter (Ebene 5) beschreiben, verändert sich die Menge der erfassbaren Fehler. Sie wird erhöht, wenn die Schnittmenge der detektierbaren Fehler mehr Elemente enthält als eine einzelne Bewertungsmethode erfassen kann. Das Universum ( $U_{5,j}$ ), welches alle relevanten Fehler enthält, wird nicht verändert.

Hierdurch werden die Unwissenheit verringert und die Aussagekraft bei einem festgestellten fehlerfreien Zustand – Bewertung „1“ der Eingangsdatenbewertung – erhöht. Die parallele Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden bewirkt somit eine Anpassung der verwendeten unteren Annäherung  $|\underline{A}_{6,j}(F)|$  nach Abschnitt 3.2.2.4 für das Bewertungsergebnis „1“ der Eingangsdatenbewertung, so dass anstelle dieser die kombinierte untere Annäherung zur Bestimmung der Massezahlen eines Parameters genutzt wird, welche in Gleichung (3.19) dargestellt ist:

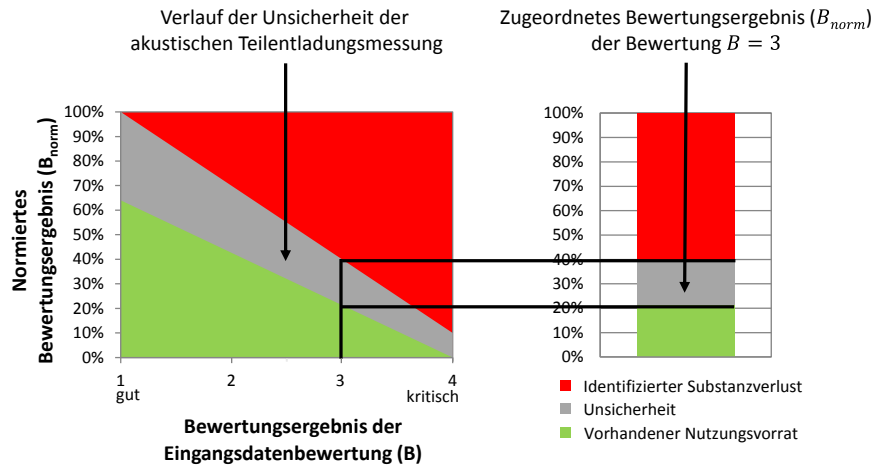
$$|\underline{A}_{6,k}(F)| = |\underline{A}_{6,1}(F) \cup \underline{A}_{6,2}(F) \cup \dots \cup \underline{A}_{6,n}(F)| \quad (3.19)$$

Sie nimmt im fehlerfreien Zustand höhere Werte an, wodurch die Unsicherheit, welche aus Unwissenheit resultiert, nach Gleichung (3.17) sinkt und der Nutzungsvorrat steigt.

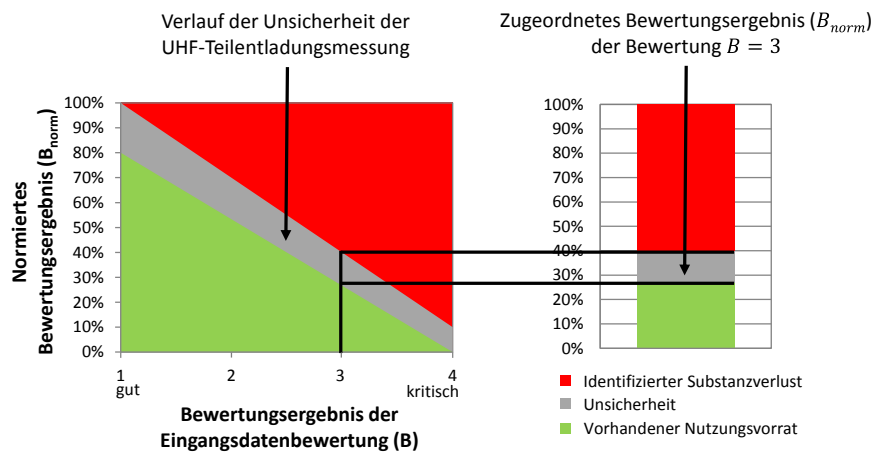
Im fehlerbehafteten Zustand – Bewertungsergebnis „4“ der Eingangsdatenbewertung – bestimmt die Bewertungsungenauigkeit der Bewertungsmethode, die den kritischeren Fehler ermittelt hat die Höhe der Unsicherheit. An dieser Stelle ist die Unwissenheit nicht maßgeblich (vgl. Abschnitt 3.2.2.4).

Die Kombination von Bewertungsmethoden bewirkt somit eine Reduktion der Unsicherheit in Abhängigkeit des kombinierten Detektionsvermögens gemäß Abbildung 58. Beispielhaft ist in der Abbildung die kombinierte Unsicherheit der akustischen und der UHF-Teilentladungsmessung mit dem empfindlichsten Sensor dargestellt.

### Akustische Teilentladungsmessung

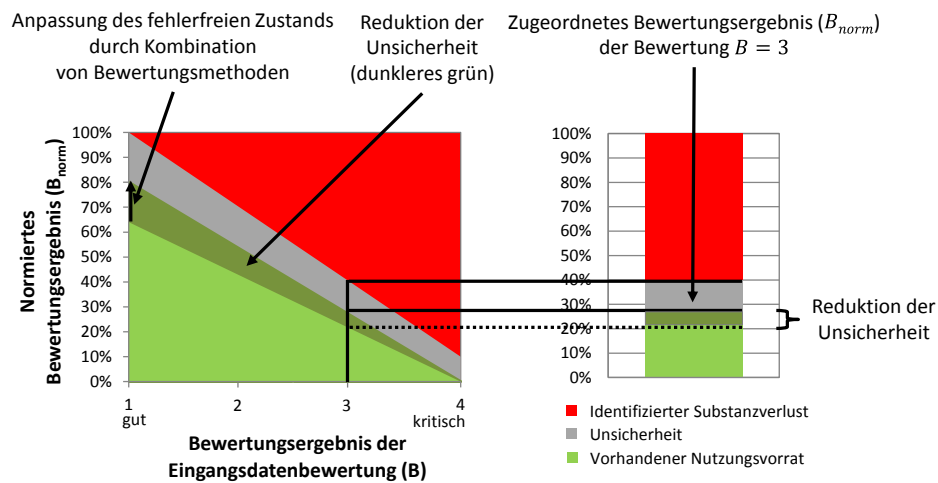


### UHF-Teilentladungsmessung



+

### Akustische und UHF-Teilentladungsmessung kombiniert



=

Abbildung 58: Verringerung der Unsicherheit durch die Kombination mit der Rough-Set-Theorie

Durch die parallele Anwendung der Bewertungsmethoden wird die Aussagekraft im Vergleich zur alleinigen Anwendung der akustischen Teilentladungsmessung im fehlerfreien Zustand (Bewertung „1“) von 64 % auf 80 % erhöht.

Für das Bewertungsergebnis „4“ der Eingangsdatenbewertung bleibt die Höhe der Unsicherheit unverändert, da hier die Bewertungsungenauigkeit maßgeblich ist und beide Bewertungsmethoden die gleiche Höhe der Bewertungsungenauigkeit aufweisen. Da die Höhe der Unsicherheit zwischen den Bewertungsergebnissen „1“ und „4“ durch lineare Interpolation ermittelt wird, wird im gesamten Bewertungsintervall [1,4] Aussagekraft in Form des dunkleren grünen Bereichs hinzugewonnen.

In der Darstellung sind die der Bewertung „3“ zugeordneten Bewertungsergebnisse sowie die zugehörige Reduktion der Unsicherheit durch die Kombination beider Bewertungsmethoden dargestellt. Bei der unteren Darstellung wird davon ausgegangen, dass beide Bewertungsmethoden das Bewertungsergebnis „3“ der Eingangsdatenbewertung ermittelt haben. Die detektierbaren Fehler der akustischen TE-Messung werden von den detektierbaren Fehlern der UHF-TE-Messung nahezu vollkommen eingeschlossen. Hierdurch wird in der Darstellung bewirkt, dass die resultierende Unsicherheit jener der alleinigen Anwendung der UHF-Teilentladungsmessung entspricht.

Um die Höhe der Unsicherheit für die kombinierte Anwendung beider Bewertungsmethoden bzw. das kombinierte Bewertungsergebnis bestimmen zu können, wird ein Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung – der beiden Bewertungsmethoden – benötigt. Jede Bewertungsmethode kann eine Teilmenge der Fehler detektieren, jedoch nicht alle. Entsprechend muss das kritischere Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung der akustischen oder der UHF-Teilentladungsmessung verwendet werden, um ein realitätsgerechtes Bewertungsergebnis zu erzeugen.

In Abbildung 58 (untere Darstellung) haben beide Bewertungsmethoden dasselbe Bewertungsergebnis erzeugt. Abbildung 59 zeigt die die Kombination von unterschiedlichen Bewertungsergebnissen.

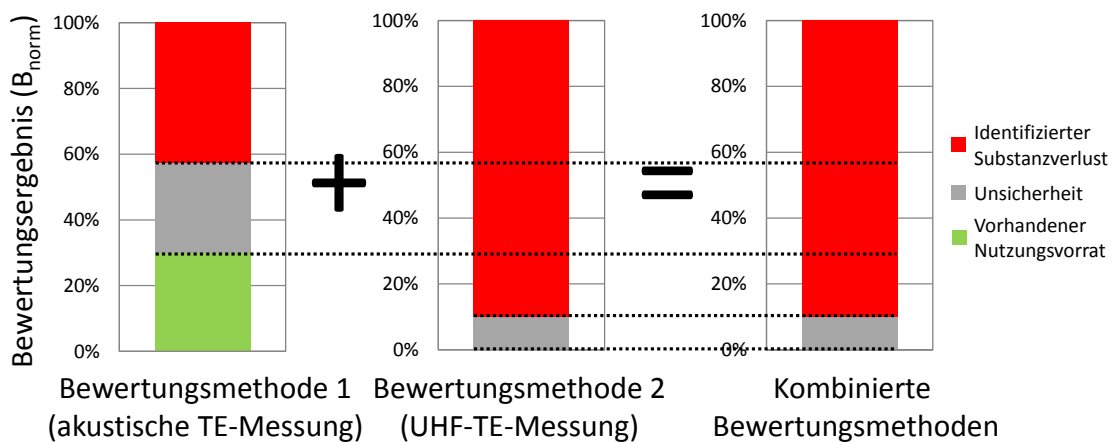


Abbildung 59: Kombination von unterschiedlichen Bewertungsergebnissen mit der Rough-Set-Theorie

In der Darstellung sind die Bewertungsergebnisse der Eingangsdatenbewertung der akustischen und der UHF-Teilentladungsmessung dargestellt. Die UHF-Teilentladungsmessung hat den kritischeren Fehler detektiert, wodurch dessen Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung für die Bestimmung des kombinierten Bewertungsergebnisses nach Abbildung 58 (untere Darstellung) relevant ist. Da die UHF-TE-Messung die kombinierte Unsicherheit bestimmt, entspricht das kombinierte Bewertungsergebnis in diesem Fall dem der alleinigen Anwendung der UHF-TE-Messung.

Prinzipiell kann die Rough-Set-Theorie zur Kombination von Bewertungsergebnissen genutzt werden. Es wird ein Unsicherheitsbereich erzeugt, dessen Lage innerhalb des normierten Bewertungsintervalls von 0 % bis 100 % die Kritikalität ausdrückt. Die Spannweite der Unsicherheit ist ein Maß für die Aussagekraft der Parameterbewertung.

Die Höhe der Unsicherheit wird durch die Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden jedoch nicht wesentlich reduziert. Im gezeigten Beispiel nimmt die kombinierte Unwissenheit trotz der Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden die Ausmaße einer Bewertungsmethode an. Die Bewertungsungenauigkeit wird nicht reduziert, wodurch diese Vorgehensweise nur auf die Unwissenheit wirkt. Generell werden Bewertungsergebnisse durch eine Vielzahl von Hinweisen deutlich präziser, was durch diese Vorgehensweise nicht abgebildet wird. Weiterhin resultiert das kombinierte Bewertungsergebnis aus dem Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung einer einzelnen Bewertungsmethode – die kritischere (Einzel-)Bewertung wird zur Bestimmung des kombinierten Bewertungsergebnisses genutzt. Hierdurch ist die Anfälligkeit für zufällige Fehler, die das gewählte Bewertungsergebnis betreffen und folglich auf den gesamten Parameter wirken, verhältnismäßig hoch.

### 3.2.2.5.2 Kombination mit der Dempster'schen Regel

Ein weiterer Ansatz nutzt die Dempster'sche Regel der Evidenz-Theorie zur Kombination von Bewertungsergebnissen (vgl. Abschnitt 3.2.1.7). Die zuvor ermittelten Massezahlen jeder Bewertungsmethode werden als Eingangsdaten verwendet. Durch die Regelanwendung werden die spezifischen Massezahlen nacheinander mit den Gleichungen (3.20) bis (3.22) kombiniert, wodurch als Ergebnis die Massezahlen der Unsicherheit ( $m_{5,1}(U)$ ), des Substanzverlusts ( $m_{5,1}(A)$ ) und des Nutzungsvorrats ( $m_{5,1}(\bar{A})$ ) enthalten sind, welche das Bewertungsergebnis des Parameters (Ebene 5) darstellen [FGH\_01]:

$$m_{5,1}(A) = m_{6,1}(A) \oplus m_{6,2}(A) = \frac{m_{6,1}(A) \cdot m_{6,2}(A) + m_{6,1}(A) \cdot m_{6,2}(U) + m_{6,1}(U) \cdot m_{6,2}(A)}{1 - (m_{6,1}(A) \cdot m_{6,2}(\bar{A}) + m_{6,1}(\bar{A}) \cdot m_{6,2}(A))} \quad (3.20)$$

$$m_{5,1}(\bar{A}) = m_{6,1}(\bar{A}) \oplus m_{6,2}(\bar{A}) = \frac{m_{6,1}(\bar{A}) \cdot m_{6,2}(\bar{A}) + m_{6,1}(\bar{A}) \cdot m_{6,2}(U) + m_{6,1}(U) \cdot m_{6,2}(\bar{A})}{1 - (m_{6,1}(A) \cdot m_{6,2}(\bar{A}) + m_{6,1}(\bar{A}) \cdot m_{6,2}(A))} \quad (3.21)$$

$$m_{5,1}(U) = m_{6,1}(U) \oplus m_{6,2}(U) = \frac{m_{6,1}(U) \cdot m_{6,2}(U)}{1 - (m_{6,1}(A) \cdot m_{6,2}(\bar{A}) + m_{6,1}(\bar{A}) \cdot m_{6,2}(A))} \quad (3.22)$$



Die dargestellten Gleichungen zeigen die Kombination von zwei Bewertungsergebnissen der Bewertungsmethoden („6,1“ und „6,2“) innerhalb eines Parameters „5,1“. Müssen mehr als zwei Bewertungsergebnisse kombiniert werden, erfolgt dies nacheinander gemäß Gleichung (3.23):

$$m_{5,1} = ((m_{6,1} \oplus m_{6,2}) \oplus m_{6,3}) \oplus \dots m_{6,n} \quad (3.23)$$

Die Unsicherheit sinkt stets mit steigender Anzahl von parameterbeschreibenden Bewertungsergebnissen. Zudem wird durch die Lage des Unsicherheitsbereichs innerhalb des normierten Bewertungsintervalls von 0 % bis 100 % die Kritikalität ausgedrückt. Im Gegensatz zu der eingangs vorgestellten Kombination durch die Anwendung der Rough-Set-Theorie werden alle Bewertungen der kombinierten Bewertungsmethoden verwendet. Abbildung 60 zeigt den durch die Kombination von akustischer und UHF-TE-Messung erzeugten Unsicherheitsbereich in Abhängigkeit der Eingangsdatenbewertung.

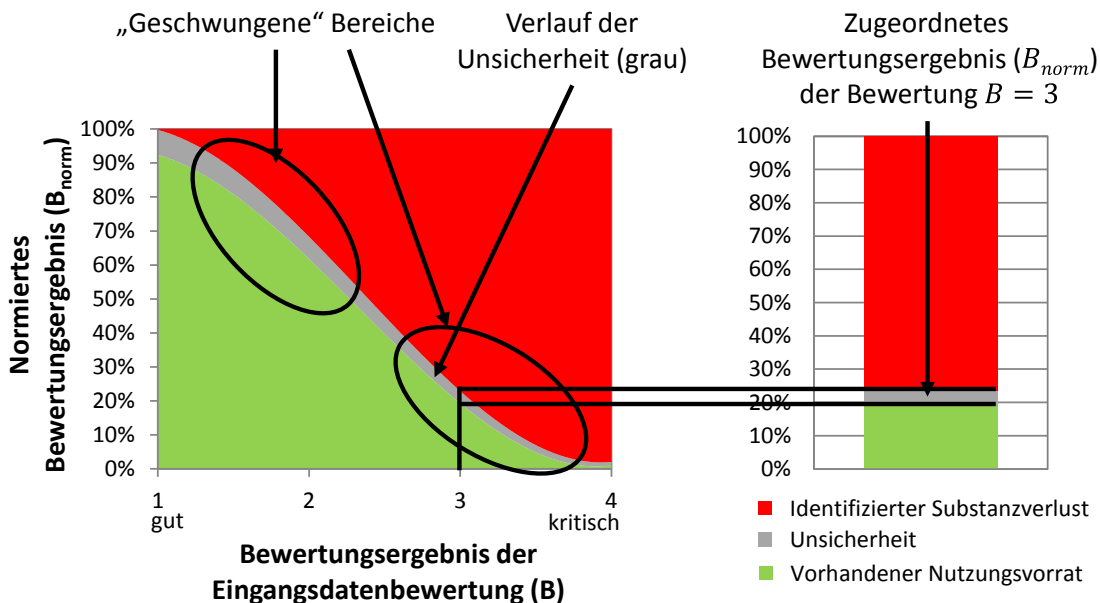


Abbildung 60: Kombination von identischen Bewertungsergebnissen mit der Dempster'schen Regel

Zur Darstellung der Unsicherheit wurden vollkommen identische Bewertungsergebnisse der Bewertungsmethoden unterstellt, wodurch sich der „geschwungene“ Verlauf der Unsicherheit ergibt. Im „geschwungenen“ Bereich wird das kombinierte Bewertungsergebnis in Richtung des zustandsbestimmenden Grenzbereichs verstärkt. So bewirken z.B. identisch ermittelte Bewertungsergebnisse, die größer als „2,5“ sind, dass das kombinierte Bewertungsergebnis tendenziell „schlechter“ bewertet wird als ein einzelnes.

Identische Bewertungsergebnisse sind jedoch keine Grundvoraussetzung für die Bewertungsmethoden der Gesamtsystematik. Generell können verschiedene Bewertungsergebnisse durch die Regelanwendung folgerichtig kombiniert werden. Abbildung 61 zeigt die Kombination von unterschiedlichen Bewertungsergebnissen der akustischen und der UHF-TE-Messung mit der Dempster'schen Regel.

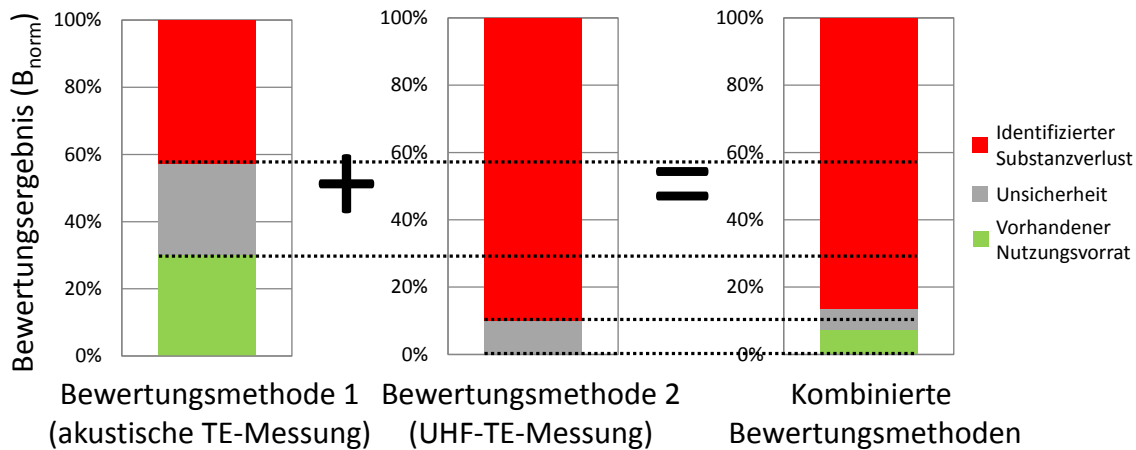


Abbildung 61: Kombination von unterschiedlichen Bewertungsergebnissen mit der Dempster'schen Regel

Das kombinierte Bewertungsergebnis wird maßgeblich durch das Bewertungsergebnis bestimmt, welches die höhere Aussagekraft besitzt. Im vorliegenden Modell haben Bewertungsergebnisse, die Hinweise auf Fehler erzeugen, eine höhere Aussagekraft. Deshalb wird das Bewertungsergebnis „2“ durch die Regelanwendung im Endergebnis stärker berücksichtigt. Die kombinierte Unsicherheit der genutzten Bewertungsmethoden befindet sich folglich im unteren Bereich des Bewertungsintervalls. Die Größe der Unsicherheit wird verringert, da der Parameter durch die Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden umfassender bewertet wird.

Durch die Dempster'sche Regel wird ein kombinierter Unsicherheitsbereich erzeugt, dessen Lage innerhalb des normierten Bewertungsintervalls von 0 % bis 100 % die Kritikalität ausdrückt. Die Spannweite der Unsicherheit bildet das Maß für die Aussagekraft der Parameterbewertung. Im Gegensatz zum Ansatz der Rough-Set-Theorie wird die Aussagekraft durch die Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden wesentlich erhöht. So nimmt die Unsicherheit der kombinierten Bewertungsergebnisse im gezeigten Beispiel kleinere Werte an als jene eines einzelnen Bewertungsergebnisses. Im Gegensatz zur Rough-Set-Theorie werden alle Eingangsdaten – d.h. die Massezahlen aller Bewertungsergebnisse – zur Parameterbewertung berücksichtigt, wodurch die Fehleranfälligkeit der Kombination reduziert wird.

### 3.2.2.5.3 Kombination von Bewertungsergebnissen in der Gesamtsystematik

Das vorgestellte Schema zur Kombination von Bewertungsergebnissen mit der Dempster'schen Regel wird für die Verwendung in der Gesamtsystematik gewählt. Die Kombination findet ausschließlich Anwendung, wenn mehrere Bewertungsmethoden (Ebene 6) einen Parameter (Ebene 5) bewerten. Liegen keinerlei Bewertungsergebnisse von Bewertungsmethoden vor, so gilt der Parameter als vollkommen unsicher, wodurch der Wert der Unsicherheit 100 % annimmt. Wurden nicht alle möglichen Bewertungsmethoden angewendet, so dass Bewertungsergebnisse fehlen, so bestimmen die vorliegenden Bewertungen das Bewertungsergebnis. Die Kombination mit einem zu 100 % unsicheren Bewertungsergebnis bewirkt keine Veränderung des sicheren Bewertungsergebnisses.

### 3.2.2.6 Aggregation durch Gewichtung

Neben den Massezahlen beeinflussen die Gewichtungsfaktoren die Aggregation innerhalb der Gesamtsystematik. Sie repräsentieren den Einfluss des Bewertungsergebnisses eines Parameters auf die höheren Ebenen der Systematik. Im Rahmen der Aggregationssystematik werden solche Faktoren ab der Ebene der Parameter (Ebenen 1 bis 5) benötigt. Die Aggregation unterhalb (Ebene 6) wurde in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Als Ergebnis der vorangegangenen Aggregation wurde für jeden Parameter der Unsicherheitsbereich, d.h. die Massezahlen der Unsicherheit, des Substanzverlusts und des Nutzungsvorrats, auf Ebene 5 bestimmt. Die weitere Kombination in den höheren Ebenen, d.h. z.B. die Kombination der Parameter, folgt der konventionellen Bewertungssystematik. Gemäß Gleichung (3.24) werden die Massezahlen der Ebene  $i$ , welche die nächst höhere Ebene  $i - 1$  bewerten, unter Verwendung von Gewichtungsfaktoren miteinander kombiniert:

$$m_{i-1,j}(T) = \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}(T) \cdot G_{ij}}{\sum_{j=1}^n G_{ij}}, \text{ für } T = \{A, \bar{A}, U\}, 2 \leq i \leq 5 \quad (3.24)$$

Dieser Vorgang vollzieht sich bis in die höchste Ebene der Systematik, so dass als Endergebnis die Bewertung des Schaltfelds vorliegt, welche ebenso aus den drei Massezahlen der Unsicherheit ( $m_1(U)$ ), des Substanzverlusts ( $m_1(A)$ ) und des Nutzungsvorrats ( $m_1(\bar{A})$ ) besteht.

Die Gewichtungsfaktoren sollen in der vorliegenden Systematik die Wichtigkeit repräsentieren. Bezüglich der Schaltfeldfunktionen wird daher die Wichtigkeit einzelner Funktionen innerhalb des Schaltfelds bestimmt. Die Ermittlung dieser Gewichtungsfaktoren basiert auf mehreren Ansätzen. So werden interne Fehlerstatistiken in einem statistischen Ansatz herangezogen, welche die herstellerunabhängige und zugleich funktionsorientierte Bestimmung des Ausfallrisikos auf Grundlage repräsentativer, historischer Daten ermöglichen. Dieses charakterisiert die Wichtigkeit einer Schaltfeldfunktion. Die Grundgesamtheit der vorliegenden Daten ist jedoch gering, weshalb weitere, heuristische Faktoren zur Bestimmung eines validen Gewichtungsdatensatzes genutzt werden.

Experten aus verschiedenen Bereichen werden für den heuristischen Ansatz systematisch befragt, wobei die Befragung die relevanten Bereiche der Netzfürung, der Instandhaltung und der Planung abdeckt. Die Auswertung der Daten folgt dem Analytic Hierarchy Process (AHP) [Saa\_90]. Hierdurch werden die Rangfolge der Wichtigkeit sowie der Abstand zueinander bestimmt. Durch Normierung ergeben sich die Gewichtungsfaktoren. Die Datenerhebung erfolgt hersteller- und typunabhängig, so dass die Daten mit der Aggregationssystematik korreliert werden können. Trotz der verhältnismäßig großen und breit aufgestellten Grundgesamtheit beruht diese Datenquelle der Gewichtungsfaktoren auf einzelnen subjektiven Einschätzungen der Befragten, so dass davon auszugehen ist, dass dieser Teil der Gewichtungsfaktoren nicht subjektivitätsbefreit ist.

Deswegen wird der wertorientierte Ansatz zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren zusätzlich integriert. Experten bewerteten die Auswirkung eines Fehlers, wobei eine Beurteilung des sofortigen Handlungsbedarfs vor dem Hintergrund der Reaktionszeit stattfand. Dieser Ansatz ist subjektivitätsbehaftet, beurteilt die Wichtigkeit jedoch unter einem weiteren Blickwinkel.

Durch die Kombination der unabhängigen Ansätze werden die benötigten Gewichtungsfaktoren bestimmt. Tabelle 14 zeigt beispielhaft die ermittelten normierten Gewichtungsfaktoren der Schaltfeldfunktionen, welche in der Gesamtsystematik statisch angewendet werden.

**Tabelle 14: Normierte Gewichtungsfaktoren der Hauptfunktionen (Ebene 2)**

<b>Schaltfeldfunktion</b>	<b>Statistischer Ansatz</b>	<b>Heuristischer Ansatz</b>	<b>Wertorientierter Ansatz</b>	<b>Gewichtungsfaktoren <math>G_{2,j}</math> (Mittelwert)</b>
<b>Spannung halten</b>	0,04	0,25	0,16	0,15
<b>Strom führen</b>	0,01	0,19	0,05	0,08
<b>Last-/Fehlerströme schalten</b>	0,17	0,24	0,16	0,19
<b>Strom oder Spannung schalten</b>	0,17	0,07	0,11	0,12
<b>Aktivteile erden</b>	0,17	0,04	0,11	0,11
<b>Kabel entladen</b>	0,17	0,03	0,11	0,10
<b>Strom messen</b>	0,05	0,03	0,05	0,05
<b>Spannung messen</b>	0,05	0,02	0,05	0,04
<b>Überspannung abbauen</b>	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>Netzanschluss herstellen</b>	0,05	0,03	0,05	0,05
<b>Steuerung / Eigenüberwachung</b>	0,04	0,04	0,11	0,06

Durch die Verwendung der Statistiken wird die vergangenheitsbezogene Betriebserfahrung in die Systematik integriert (statistischer Ansatz). Da jene nicht allumfassend ist, wird sie durch Expertenwissen erweitert (heuristischer und wertorientierter Ansatz). Ein Beispiel stellt die Stromtragfähigkeit dar. Statistisch sind wenige Vorfälle dokumentiert, die auf Fehler hinweisen. Jedoch kann an dieser Stelle nicht eindeutig geklärt werden, ob solche Fehler tatsächlich nicht vorlagen oder lediglich nicht detektiert wurden bzw. werden konnten (vgl. Abschnitt 2.3.3). Besonders im Hinblick auf die häufig geringe Auslastung von GIS ist eine Unauffälligkeit von Fehlern nicht auszuschließen [FGH\_01].

Die weiteren Gewichtungsfaktoren der Ebenen 3 bis 5 basieren auf heuristischen Ansätzen. Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wurde Expertenwissen erhoben, welches wiederum mit AHP ausgewertet wird. Die ermittelten Gewichtungsfaktoren sind in Anhang 8.3 aufgeführt.

Die in Tabelle 14 gezeigten Gewichtungsfaktoren dienen der Schaltfeldbewertung, welche das Endergebnis – zur Unterstützung der Instandhaltung – der Aggregationssystematik bildet. Aufgrund des hohen Einzelwerts eines Schaltfelds ist eine Aggregation bis zu dieser Ebene ausreichend.

Um dennoch für die gesamte Schaltanlage – zur Unterstützung der Erneuerungsplanung – ein Bewertungsergebnis zu erzeugen, werden die Schaltfelderergebnisse mit Gewichtungsfaktoren aggregiert. Diese sind analog auf die Perspektive der Wichtigkeit ausgerichtet, wobei zwei unabhängige Faktoren herangezogen werden. Eine Grundlage der Gewichtungsfaktoren bildet die Wichtigkeit der Schaltaufgabe. Weiterhin wird eine mögliche Redundanz im Sinne einer Schaltung zur Fortführung des Anlagenbetriebs ohne das betroffene Schaltfeld bewertet.

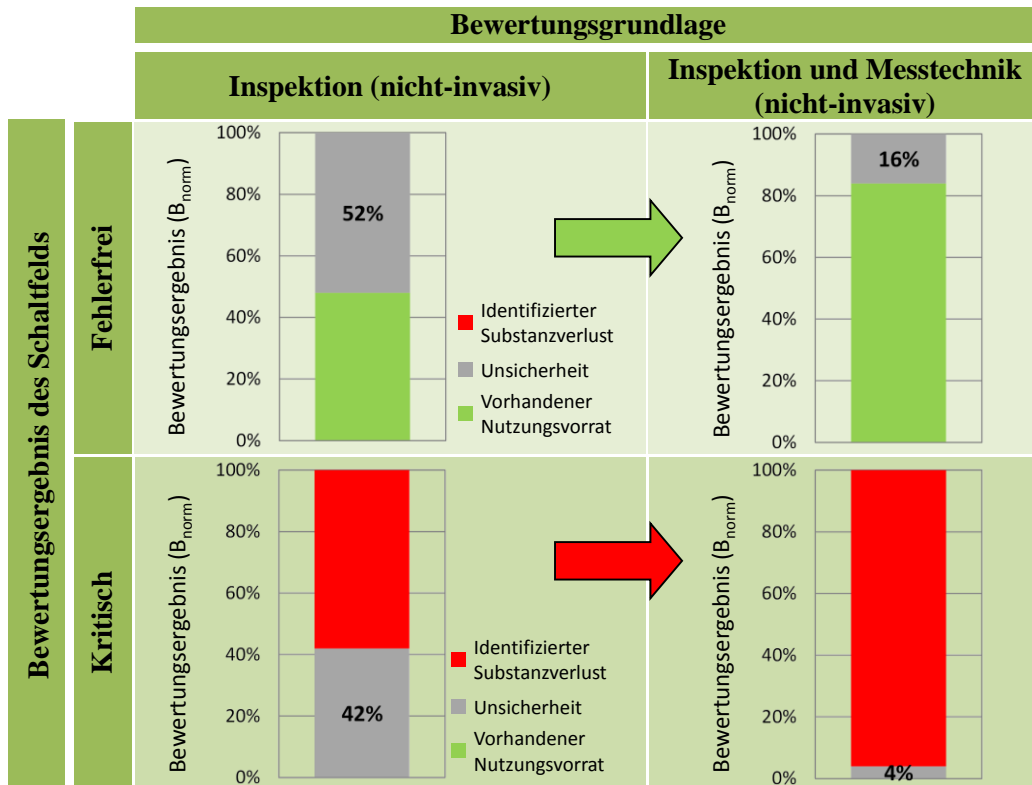
Bei der Nutzung eines solch hoch aggregierten Bewertungsergebnisses einer Schaltanlage ist besonders zu beachten, dass aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Parametern und Ebenen, die dem Schaltanlagenindex zu Grunde liegen, einzelne Fehler nicht herausragend abgebildet werden. Aus diesem Grund wird hierfür ein separater Bericht erstellt, der die identifizierten Fehler enthält.

**3.2.2.7 Systematische Unsicherheit**

Da die Aussagekraft nicht-invasiver Bewertungsmethoden auf deren Detektionsfähigkeit beschränkt ist (vgl. Abschnitt 2.3.3), weisen die erzeugten Schaltfeldbewertungen immer eine restliche Unsicherheit auf. Diese ist abhängig von den zur Verfügung stehenden Daten und deren Bewertung, da die Unsicherheit je nach Datengrundlage variiert. Weitere Variationen ergeben sich zusätzlich durch die je Anlagentyp anwendbaren Bewertungsmethoden.

Tabelle 15 zeigt die sich ergebenden Unsicherheiten der Schaltfeldbewertungen.

**Tabelle 15: Minimale Unsicherheit von nicht-invasiven Bewertungsergebnissen**



Sie differenziert zwischen den Bewertungsgrundlagen, d.h. zwischen Bewertungen basierend auf visuellen Inspektionen und solchen, die zusätzlich nicht-invasive Messtechnik nutzen. Weiterhin findet eine Unterscheidung zwischen ausschließlich fehlerfreier und kritischer Bewertung statt. Zur Erzeugung dieser Bewertungsergebnisse wurden alle Eingangsdaten mit  $B = 1$  (fehlerfrei) bzw.  $B = 4$  (kritisch) bewertet.

Die Darstellung verdeutlicht, dass die Unsicherheit durch den Einsatz von Messtechnik wesentlich reduziert wird. Während unabhängig vom Bewertungsergebnis Reduktionen um mehr als 30 % erreicht werden, ist die verbleibende Unsicherheit umso geringer, je kritischer die Bewertung erfolgt. Werden Fehler identifiziert, so ist das Bewertungsergebnis folglich besonders aussagekräftig. Die Unsicherheit ist bis zu dreifach niedriger.

Weiterhin ist die Unsicherheit des Bewertungsergebnisses vom zu beurteilenden Anlagentyp, d.h. von den anwendbaren Bewertungsmethoden, abhängig. Eine genaue, herstellerbezogene Zuordnung der erreichbaren, minimalen Unsicherheit einer Bewertung ist nicht möglich, da eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten von anwendbaren Bewertungsmethoden – vor dem Hintergrund verschiedener baulicher Ausführungen – besteht, die unabhängig vom Hersteller bzw. Anlagentyp ist. Da sich diese Variationen vornehmlich auf die nicht- bzw. minimal-invasive Messtechnik beziehen, kann die Unsicherheit von 42 % (kritisch) bis 52 % (fehlerfrei) der reinen Inspektion (vgl. Tabelle 15) als maximal zu erwartende Unsicherheit einer mit Messtechnik unterstützten Zustandsbewertung angesehen werden.

Die minimale Unsicherheit der Schaltfeldbewertung befindet sich je nach Bewertungsergebnis zwischen 4 % und 16 %, wenn alle nicht-invasiven Bewertungsmethoden angewendet werden. Kritische Bewertungen sind im Verhältnis 4 : 1 sicherer. Durch den Verzicht auf messtechnische Bewertungsmethoden wird die Unsicherheit um mehr als 30 % erhöht.

### **3.2.2.8 Ermittlung des Zustandsindexes**

Der Bereich der Unsicherheit innerhalb des Bewertungsintervalls [0%, 100%] bildet das eigentliche Endergebnis der Aggregationssystematik. Dieses ist im Hinblick auf ein untersuchtes Schaltfeld sinnvoll, da an dieser Stelle eine zügige Beurteilung des Bewertungsergebnisses eines Schaltfelds erfolgen kann.

Sollen hingegen mehrere Schaltfelder miteinander verglichen werden, so erweist sich die alleinige Begutachtung der Unsicherheit als nicht praktikabel. Mit steigender Anzahl der zu beurteilenden Schaltfelder wird diese Analyse unüberschaubarer. Konkrete Zahlenwerte, d.h. ein einzelner Zustandsindex je Schaltfeld, erleichtern die Übersicht erheblich und sollten daher in erster Instanz zur Beurteilung genutzt werden. In zweiter Instanz dient die ermittelte Unsicherheit der Unterstützung der Zustandsaussage. Folglich wird im Rahmen der Gesamtsystematik die Zuweisung eines konkreten Zustandsindexes durchgeführt.

Im entwickelten Modell beschreibt der Bereich der Unsicherheit den Teil des Gesamtergebnisses, welcher beruhend auf der Aussagekraft und der Bewertungsungenauigkeit der Bewertungsmethoden weder dem Nutzungsvorrat noch dem Substanzverlust eindeutig zugeordnet werden kann. Die Lage und die Spannweite des Bereichs in der normierten Darstellung bilden das Bewertungsergebnis, weshalb ein Zustandsindex innerhalb des Bereichs liegen muss. Verschiedene Strategien zur Bestimmung der Position des Zustandsindex sind möglich, wobei vor dem Hintergrund konsistenter Bewertungsergebnisse die gewählte Variante einmalig festgelegt werden sollte [EPaw\_15a].

### 3.2.2.8.1 Konstante Aufteilung der Unsicherheit

Um einen konkreten Zustandsindex für das Bewertungsergebnis eines Schaltfelds bestimmen zu können, wird die Risikoneigung des Anwenders analysiert. Hieraus resultieren verschiedene Strategien, die im Rahmen der Anwendung der Gesamtsystematik gewählt werden können. Sie basieren auf der konstanten Aufteilung der Unsicherheit. Hierfür wird die Hypothese zugrunde gelegt, dass risikofreudige Anwender Indexe im oberen Teil des Unsicherheitsbereichs, d.h. nahe des identifizierten Substanzverlusts, bevorzugen und folglich den größeren Teil der Unsicherheit dem Nutzungsvorrat zuordnen. Risikoscheue Anwender würden sich entsprechend entgegengesetzt verhalten. Risikoneutrale Anwender bevorzugen eine Gleichverteilung der Unsicherheit.

Die konstante Aufteilung der Unsicherheit integriert diese in den Zustandsindex, so dass ein konstanter, relativer Anteil der Unsicherheit dem Nutzungsvorrat zugeordnet wird. Dieser Zustandsindex wird allgemein nach Gleichung (3.25) bestimmt:

$$Z_{1,z} = \begin{cases} m_1(\bar{A}) + e_z \cdot m_1(U) & \text{mit } e_z \in [0,1], \text{ für } m_1(A) + m_1(\bar{A}) > 0 \\ 0 \% & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.25)$$

Werden für die Massezahlen des Substanzverlusts und des Nutzungsvorrats keine Werte ermittelt, d.h. die Unsicherheit der Schaltfeldbewertung beträgt 100 %, so wird dem Zustandsindex der Wert 0 % zugeordnet:  $Z_{1,z} = 0 \%$ .

Der Faktor  $e_z$  gibt den Beitrag der Unsicherheit zum Zustandsindex an. In Abhängigkeit der Höhe der Unsicherheit bzw. der Relationen der drei Massezahlen zueinander variiert dessen Einfluss auf das Bewertungsergebnis, so dass der Zustandsindex mit wachsender Unsicherheit umso stärker von dieser bestimmt wird. Ist die Massezahl der Unsicherheit deutlich größer als jene des Substanzverlusts und des Nutzungsvorrats, nähert sich der Zustandsindex dem zuvor gewählten, relativen Anteil der Unsicherheit an (vgl. Gleichung (3.26)):

$$Z_{1,z} \rightarrow e_z \cdot m_1(U) \text{ für } m_1(U) \gg (m_1(A) + m_1(\bar{A})) \quad (3.26)$$

Durch die Aufteilung bleibt ein Restrisiko bestehen, dessen Höhe durch den Abstand des Zustandsindex zum Bereich des Nutzungsvorrats „ $R_{1,i} = Z_{1,i} - m_1(\bar{A})$ “ bestimmt wird. Das Risiko beschreibt hierbei die Gefahr eines zu hoch bestimmten Zustandsindexes.

Der sich ergebende Zustandsindex kann nicht jeden beliebigen Wert innerhalb des Bewertungsintervalls  $[0\%, 100\%]$  annehmen. Er befindet sich stets innerhalb des Unsicherheitsbereichs. In Abhängigkeit der Höhe der verbleibenden Unsicherheit von Bewertungsergebnissen und der relativen Aufteilung  $e_i$  kann er sich den äußeren Grenzen des Bewertungsintervalls lediglich annähern – in der vorliegenden nicht-invasiven Systematik gilt:  $Z_{1,z} \in [e_z \cdot 4\%, (84\% + e_z \cdot 16\%)]$  (vgl. (vgl. Abschnitt 3.2.2.7)).

Die Zustandsindexe ausgewählter Strategien sind in Abbildung 62 dargestellt.

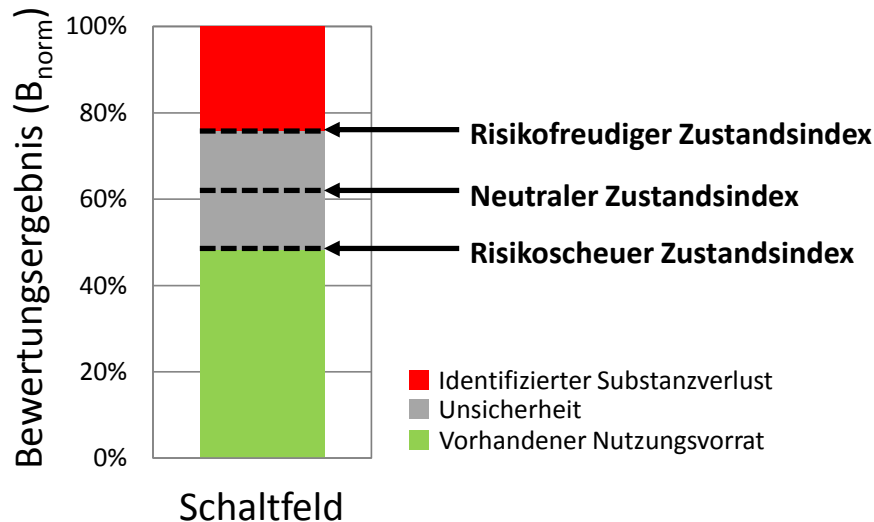


Abbildung 62: Ausgewählte Zustandsindexe bei konstanter Aufteilung der Unsicherheit

Wird die Unsicherheit so aufgeteilt, dass sie vollständig dem Nutzungsvorrat ( $e_z = 1$ ) oder dem Substanzverlust ( $e_z = 0$ ) zugeordnet wird, werden hieraus die risikofreudige und die risikoscheue Strategie gebildet. Die Gleichverteilung der Unsicherheit ( $e_z = 0,5$ ) bildet die neutrale Strategie.

Der Zustandsindex der risikofreudigen Strategie wird auf Basis des ermittelten Substanzverlusts gebildet, so dass die Höhe der Unsicherheit den Zustandsindex nicht direkt beeinflusst. Der Index wird nach Gleichung (3.27) ermittelt:

$$Z_{1,1} = \begin{cases} 1 - m_1(A), & \text{für } m_1(A) + m_1(\bar{A}) > 0 \\ 0 \% & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.27)$$

Das verbleibende Risiko „ $R_{1,1} = m_1(U)$ “ ist hoch, da die Unsicherheit vollkommen dem Nutzungsvorrat zugeordnet wird. Ausschließlich sicher identifizierte Abnutzungen bestimmen somit die Höhe des Indexes. Innerhalb des Bewertungsintervalls  $[0\%, 100\%]$  kann der Zustandsindex nicht jeden Wert annehmen.

Während die obere Grenze von 100 % erreichbar ist, wird die untere Grenze durch die stets verbleibende Unsicherheit von Zustandsbewertungen bestimmt, welche in der vorliegenden Systematik 4 % beträgt. Daher gilt:  $Z_{1,1} \in [4\%, 100\%]$ .



Der Zustandsindex der risikoscheuen Strategie wird auf Basis des ermittelten Nutzungsvorrats gebildet, so dass die Höhe der Unsicherheit den Zustandsindex nicht direkt beeinflusst. Gleichung (3.28) beschreibt die Ermittlung des Zustandsindexes:

$$Z_{1,2} = \begin{cases} m_1(\bar{A}), & \text{für } m_1(A) + m_1(\bar{A}) > 0 \\ 0 \% & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.28)$$

Die Unsicherheit wird vollkommen dem Substanzverlust zugeordnet, so dass das Risiko eines zu hoch gewählten Zustandsindexes „0“ beträgt. Die Aussagekraft der genutzten Bewertungsmethoden bestimmt die Höhe des Nutzungsvorrats, so dass z.B. die Höhe des Zustandsindexes bei einem als fehlerfrei bewerteten Schaltfeld – da die Detektionsfähigkeit bei einem fehlerfreien Zustand die Zuordnung der Massezahl  $m_1(\bar{A})$  bestimmt (vgl. Abschnitt 3.2.2.4) – in Abhängigkeit der Aussagekraft der Bewertung variiert. Der Zustandsindex ist umso größer, je höher die Detektionsfähigkeit der angewendeten Bewertungsmethoden ist. Innerhalb des Bewertungsintervalls [0%, 100%] kann der Zustandsindex nicht jeden Wert annehmen. Während die untere Grenze von 0 % erreicht wird, bestimmt die verbleibende Unsicherheit von Bewertungen die obere Grenze, welche in der vorliegenden Systematik 16 % beträgt. Daher gilt:  $Z_{1,2} \in [0\%, 84\%]$ .

Der Zustandsindex der risikoneutralen Strategie teilt die Unsicherheit zu gleichen Teilen auf die verbleibenden Bereiche auf. Der Zustandsindex wird nach Gleichung (3.29) bestimmt:

$$Z_{1,3} = \begin{cases} m_1(\bar{A}) + 0,5 \cdot m_1(U), & \text{für } m_1(A) + m_1(\bar{A}) > 0 \\ 0 \% & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.29)$$

Das verbleibende Restrisiko entspricht der halben Höhe der Unsicherheit. Diese Strategie bildet eine triviale Bestimmung des Zustandsindexes ab. Es wird unterstellt, dass die Unsicherheit gleichwahrscheinlich dem Substanzverlust oder dem Nutzungsvorrat angehört. Innerhalb des Bewertungsintervalls [0%, 100%] gilt für die Zustandsindexe:  $Z_{1,3} \in [2\%, 92\%]$ .

### 3.2.2.8.2 Dynamische Aufteilung der Unsicherheit

Die dynamische Aufteilung der Unsicherheit ist in Abbildung 63 dargestellt.

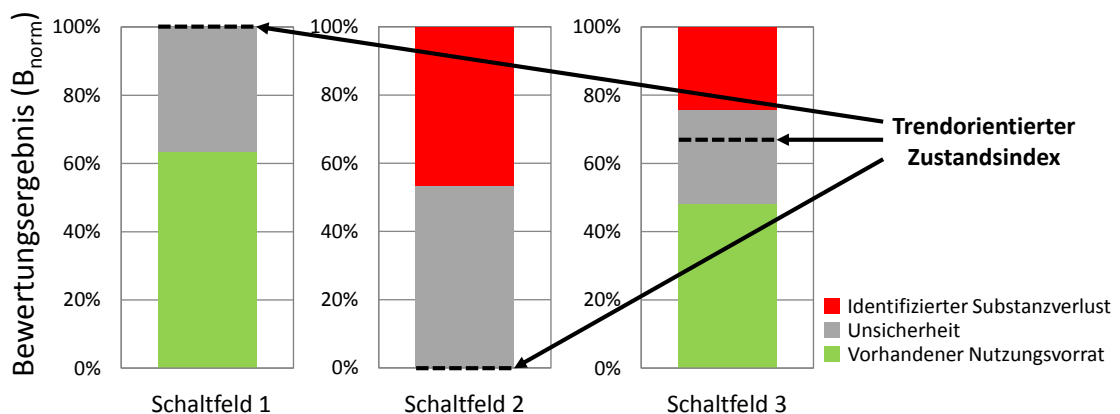


Abbildung 63: Trendorientierter Zustandsindex bei dynamischer Aufteilung der Unsicherheit

Sie wird bei der Bestimmung des trendorientierten Zustandsindexes genutzt. Da der relative Anteil der Unsicherheit, der in diesen Zustandsindex integriert wird, nicht konstant ist, werden die trendorientierten Zustandsindexte von drei verschiedenen Bewertungsergebnissen dargestellt. Diese Strategie unterstellt eine Übertragbarkeit der Ergebnisse des Substanzverlusts und des Nutzungsvorrats auf die Unsicherheit. Die Relation dieser bestimmt die Lage des Indexes innerhalb des Unsicherheitsbereichs. Der Index wird nach Gleichung (3.30) berechnet:

$$Z_{1,t} = \begin{cases} m_1(\bar{A}) + \frac{m_1(\bar{A})}{m_1(\bar{A})+m_1(A)} \cdot m_1(U), & \text{für } m_1(A) + m_1(\bar{A}) > 0 \\ 0 \% & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.30)$$

Das verbleibende Risiko „ $R_{1,t} = Z_{1,t} - m_1(\bar{A})$ “ – d.h. die Aufteilung der Unsicherheit in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses – variiert, so dass bei einer verhältnismäßig großen Unsicherheit der Zustandsindex maßgeblich durch die Höhe des identifizierten Substanzverlusts bestimmt wird – da nach Abschnitt 4.2.2 geringere Substanzverluste als Nutzungsvorräte zu erwarten sind.

Für besonders unsichere Bewertungsergebnisse besteht die Möglichkeit, dass dieser Zustandsindex falsche bzw. volatile Impulse für Maßnahmen bei geringen Variationen des Bewertungsergebnisses erzeugt. Innerhalb des Bewertungsintervalls [0%, 100%] kann jeder Zahlenwert erreicht werden. Daher gilt:  $Z_{1,t} \in [0\%, 100\%]$ .

### 3.2.2.8.3 Zustandsindex der Gesamtsystematik

Prinzipiell kann jede der vorangegangenen Strategien zur Ermittlung des Zustandsindexes genutzt werden, solange sie konstant verwendet wird. Jede der Strategien hat jedoch spezifische Eigenschaften, welche deren Anwendungsbereich einschränken können. Der Zustandsindex dieser Arbeit soll als alleinstehender Wert den Handlungsbedarf durch eine hohe Unsicherheit und einen hohen Substanzverlust abbilden.

Für ein bestehendes Anlagenkollektiv sind i.d.R. geringe Substanzverluste zu erwarten, deren Höhe geringer als die Unsicherheit ist. Der Nutzungsvorrat wird den größten Anteil des Bewertungsergebnisses besitzen (vgl. Abschnitt 4.2.2). Folglich wird die sich ergebende Unsicherheit maßgeblich durch die Unwissenheit, d.h. durch die Detektionsfähigkeit (vgl. Abschnitt 3.2.2.4) und die Anzahl der angewendeten Bewertungsmethoden, bestimmt und in Abhängigkeit des bewerteten Schaltfelds unterschiedliche Höhen aufweisen, so dass kleine, aber auch sehr große Unsicherheiten von Bewertungsergebnissen vorliegen können.

Der trendorientierte Zustandsindex ist besonders für den zuvor geschilderten Anwendungsfall ungeeignet, da aufgrund der dynamischen Aufteilung der Unsicherheit falsche Anreize verursacht werden können. Die sich ergebenden Zustandsindexte können bei minimalen Bewertungsunterschieden überproportionale Werte annehmen, wodurch die Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen anhand des Zustandsindexes eingeschränkt wird.

Durch die konstante Aufteilung der Unsicherheit im Bewertungsergebnis werden solche minimalen Unterschiede verhältnismäßig durch den Zustandsindex abgebildet. Die gewählte konstante Aufteilung  $e_1$  der Unsicherheit bestimmt, wie stark der Zustandsindex durch die Höhe der Unsicherheit beeinflusst wird. Hierbei basiert die risikofreudige Strategie auf den identifizierten Substanzverlusten, so dass bei sehr unsicheren Bewertungsergebnissen Fehlinterpretationen bei alleiniger Betrachtung des Zustandsindexes möglich sind, da wenige Bewertungsmethoden genutzt wurden und der Zustandsindex dennoch sehr hohe Werte annimmt. Die risikoscheue Strategie bildet das entgegengesetzte Extrem ab, so dass sehr hohe Unsicherheiten äußerst niedrige Zustandsindexe bilden, obwohl gegebenenfalls nur geringe oder keine Substanzverluste vorhanden sind. Beide Strategien bilden somit kein ausgewogenes Verhältnis von Unsicherheit und Substanzverlust im Zustandsindex ab.

Der neutrale Zustandsindex teilt die Unsicherheit zu gleichen Teilen auf. Bei fehlerfreien Schaltfeldern bestimmt somit die aufgeteilte Unsicherheit, d.h. 50 % der Unsicherheit, die Höhe des Zustandsindexes. Die Höhe des Zustandsindexes von Bewertungsergebnissen mit identischer Aussagekraft bzw. gleicher Unsicherheit wird durch die Höhe des Substanzverlusts beeinflusst. I.d.R. ist der identifizierte Substanzverlust jedoch kleiner als die aufgeteilte Unsicherheit (vgl. Abschnitt 4.2.2), so dass die Höhe des Zustandsindexes stärker durch die aufgeteilte Unsicherheit als durch den identifizierten Substanzverlust bestimmt wird. Der Teil der Unsicherheit, der die Höhe des Zustandsindexes bestimmt, sollte folglich kleiner als 50 % der Unsicherheit sein, um durch den Zustandsindex ein ausgewogenes Verhältnis von Unsicherheit und Substanzverlust abzubilden. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit 25 % der Unsicherheit – ausgehend vom Substanzverlust – in den Zustandsindex integriert. Da der Index höhere Werte als der neutrale Index annimmt, wird diese Strategie chancenorientierte Strategie genannt. Der zugehörige chancenorientierte Zustandsindex ist in Abbildung 64 dargestellt [EPaw\_15a].

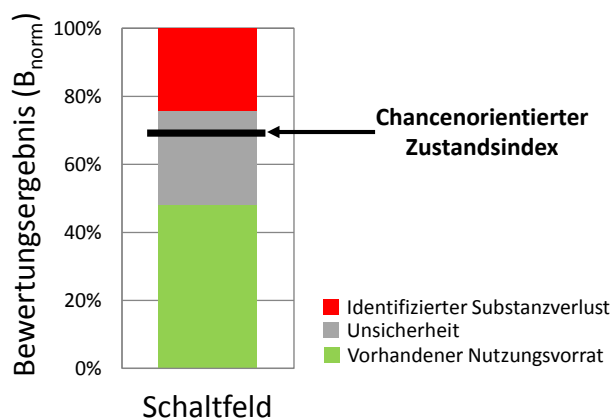


Abbildung 64: Chancenorientierter Zustandsindex

Er befindet sich im oberen Teil des Unsicherheitsbereichs und bildet ein ausgewogenes Verhältnis von Unsicherheit und Substanzverlust ab. Die Unsicherheit wird mit dem konstanten Faktor  $e_{1,co} = 0,75$  aufgeteilt, wodurch gilt:  $Z_{1,co} \in [3\%, 96\%]$ .

### 3.2.2.9 Berücksichtigung des Datenalters

Analysen der zur Zustandsbewertung zur Verfügung stehenden Daten haben ergeben, dass diese oft zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben werden, was aus den betrieblichen Abläufen zur Erfassung von Inspektions- und Messdaten resultiert. Um einen möglichst aussagekräftigen Befund einer Zustandsbewertung zu erzeugen, sollten aber alle zur Verfügung stehenden Daten verwendet werden. Da auch „gealterte Daten“ integriert werden sollen, besteht eine Funktion der Aggregationssystematik in der Berücksichtigung des zugehörigen Datenalters, um die Datengrundlage der Bewertung in eine einheitliche zeitliche Ebene zu überführen. Diese Berücksichtigung wirkt sich im vorliegenden Modell auf die Unsicherheit der verwendeten Bewertungsmethoden aus. Die Ermittlung des Zustandsindex wird hierdurch nicht beeinflusst, so dass als Ergebnis der Integration des Datenalters ausschließlich die Unsicherheit des Bewertungsergebnisses angepasst wird. Die Eingangsdaten werden auf den Tag der Zustandsbewertung ( $t_0$ ) angepasst, wobei zwei Hypothesen zugrunde gelegt werden:

- Älteren Bewertungsergebnissen, welche einen Hinweis für die Fehlerfreiheit erzeugen, kann nicht so stark vertraut werden wie aktuellen Bewertungsergebnissen.
- Hinweise auf Fehler müssen hingegen ebenso stark berücksichtigt werden, wodurch sogenannte „Selbsteilungseffekte“ ausgeschlossen werden.

Die zugeordneten Massezahlen (vgl. Abschnitt 3.2.2.3) der Bewertungsmethoden werden unabhängig von der Ermittlung des Zustandsindex (vgl. Abschnitt 3.2.2.7) angepasst. Die Anpassungen betreffen die Massezahlen des Nutzungsvorrats einer Bewertungsmethode, so dass diese um 10 % pro Jahr des Datenalters reduziert wird.

Diese Reduktion ist eine Annahme in Anlehnung an folgende Überlegung: Ausgehend von dem möglichen Bewertungsergebnis der Gesamtsystematik im fehlerfreien Zustand, d.h. einem Nutzungsvorrat von 84 % und einer Unsicherheit von 16 % (vgl. Abschnitt 3.2.2.7), besitzen Bewertungsdaten mit einem Alter von fünf Jahren eine Unsicherheit von ca. 50 %, wenn die Massezahl des Nutzungsvorrats jährlich um 10 % reduziert wird. Somit befindet sich die Aussagekraft der ursprünglich messtechnisch unterstützten Bewertung an der Grenze zum Bereich der visuellen Inspektion und ist deutlich weniger vertrauenswürdig.

Die Gleichungen (3.31) bis (3.33) bilden das zugehörige Regelwerk zur Integration des Datenalters ab:

$$m_{6,j,t_0}(A) = m_{6,j,t_n}(A) \quad (3.31)$$

$$m_{6,j,t_0}(\bar{A}) = 0,9^{t_n} \cdot m_{6,j,t_n}(\bar{A}) \quad (3.32)$$

$$m_{6,j,t_0}(U) = 1 - m_{6,j,t_0}(A) - m_{6,j,t_0}(\bar{A}) \quad (3.33)$$

Der Zeitpunkt  $t_0$  bezeichnet den Tag der Zustandsbewertung. Durch  $t_n$  wird das Eingangsdatenalter in Jahren in Relation zum Tag der Zustandsbewertung integriert. Es ergeben sich Auswirkungen auf die Unsicherheit, welche mit steigendem Datenalter wächst. Die zugeordnete Massezahl für den Substanzverlust wird nicht verändert (kein „Selbsteilungseffekt“). Abbildung 65 zeigt den Einfluss dieser Vorgehensweise auf die Verläufe der Massezahlen einer Bewertungsmethode am Beispiel einer vor 10 Jahren durchgeführten akustischen TE-Messung.

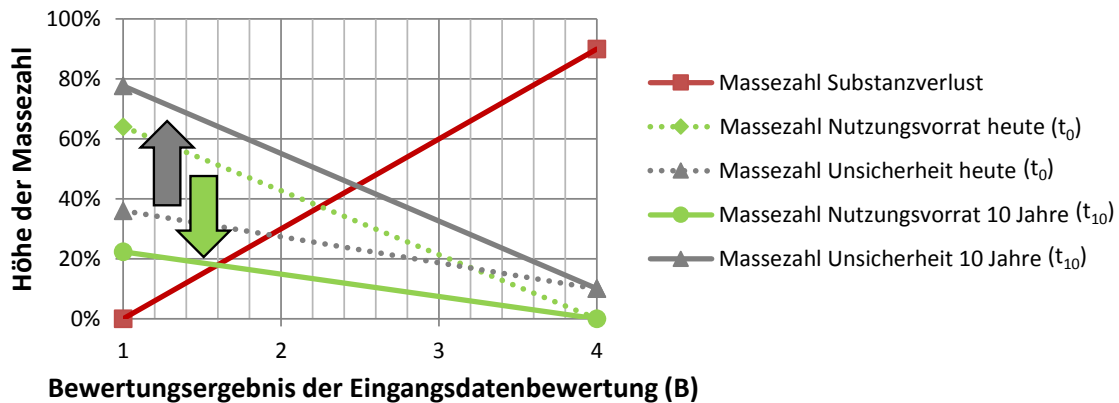


Abbildung 65: Veränderung der Massezahlenverläufe bei Verwendung eines Datenalters von 10 Jahren

Während die Massezahl für den Substanzverlust nicht beeinflusst wird, ergeben sich große Einflüsse auf die Massezahlen der Unsicherheit und des Nutzungsvorrats. Die Unsicherheit wächst zu Lasten des Nutzungsvorrats. Die Veränderungen werden durch Pfeile hervorgehoben. Die Unsicherheit steigt im Extremfall auf mehr als das Doppelte ihres ursprünglichen Werts, wodurch die Aussagekraft des fehlerfreien Zustands mehr als halbiert wird. Dieses Beispiel soll den Effekt auf einzelne Bewertungsmethoden verdeutlichen.

Die im Rahmen einer Zustandsbewertung benötigten Anpassungen werden weniger gravierend ausfallen, da die anzupassenden Zeitintervalle wenige Jahre umfassen sollten. Die Integration des Datenalters wird im vorliegenden Modell in einem separaten Rechenschritt realisiert, damit ausschließlich im Bewertungsergebnis eines Schaltfelds (Ebene 1) die hieraus ermittelten Massezahlen des Nutzungsvorrats ( $m_{1,t_0}(\bar{A})$ ) und der Unsicherheit ( $m_{1,t_0}(U)$ ) verwendet werden. Die Höhe der Massezahl des Substanzverlusts ergibt sich bereits ohne die zeitliche Berücksichtigung ( $m_{1,t_0}(A) = m_{1,t_n}(A)$ ).

### 3.3 Ergebnisdarstellung

Zur Ergebnisdarstellung können mehrere Varianten gewählt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ausgewählte Darstellungen vorgestellt. Differenziert werden muss hierbei zwischen der Ergebnisdarstellung eines Schaltfelds und der vergleichbaren Visualisierung der Bewertungsergebnisse eines Kollektivs. Die Darstellung des Bewertungsergebnisses eines Schaltfelds erfolgt nach Abbildung 66.

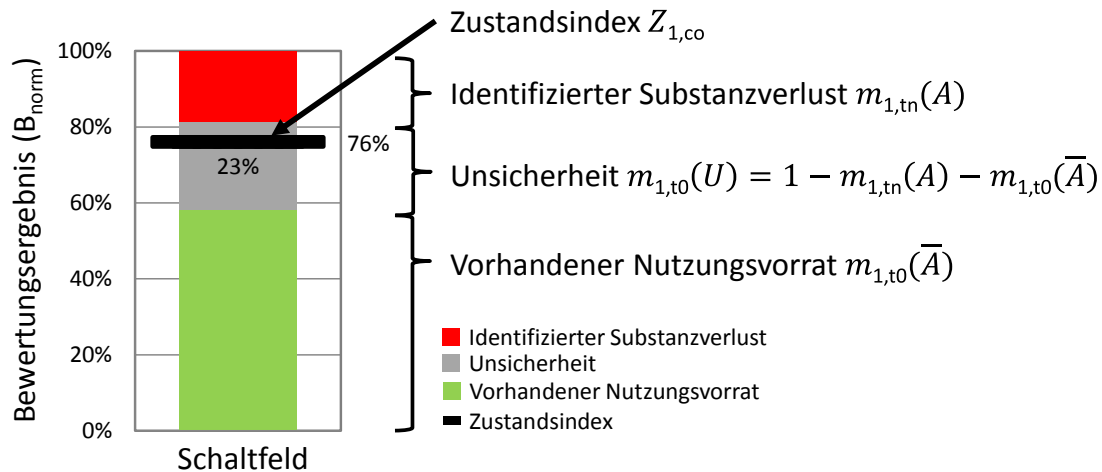


Abbildung 66: Ergebnisdarstellung eines Schaltfelds

Die ermittelten Massezahlen sowie der zugehörige chancenorientierte Zustandsindex  $Z_{1,co}$ , der sich im oberen Bereich des Unsicherheitsbereichs befindet, werden dargestellt. Die Massezahl  $m_{1,tn}(A)$  repräsentiert den identifizierten Substanzverlust, die Massezahl  $m_{1,t0}(\bar{A})$  den vorhandenen Nutzungsvorrat. Zwischen diesen existiert die Unsicherheit  $m_{1,t0}(U)$ . Die farbliche Einteilung unterstützt die Zustandsaussage. Sowohl der identifizierte Grad der Abnutzung in Form des vorhandenen Substanzverlusts und des Indexes als auch die Aussagekraft in Form der Unsicherheit des Bewertungsergebnisses des Schaltfelds können beurteilt werden. Die identifizierten Substanzverluste sind zusätzlich in einem separaten Bericht aufgeführt. Dies ist notwendig, da einzelne Beeinträchtigungen nicht durch einen konkreten Zahlenwert in Form des hoch aggregierten Zustandsindex abgebildet werden können, aber nicht verloren gehen dürfen.

Die Visualisierung zur vergleichenden Analyse mehrerer Schaltfeldbewertungen wird in Abbildung 67 gezeigt. Im Beispiel wird die Bewertung einer gesamten Schaltanlage abgebildet.

### Zustandsübersicht einer Schaltanlage

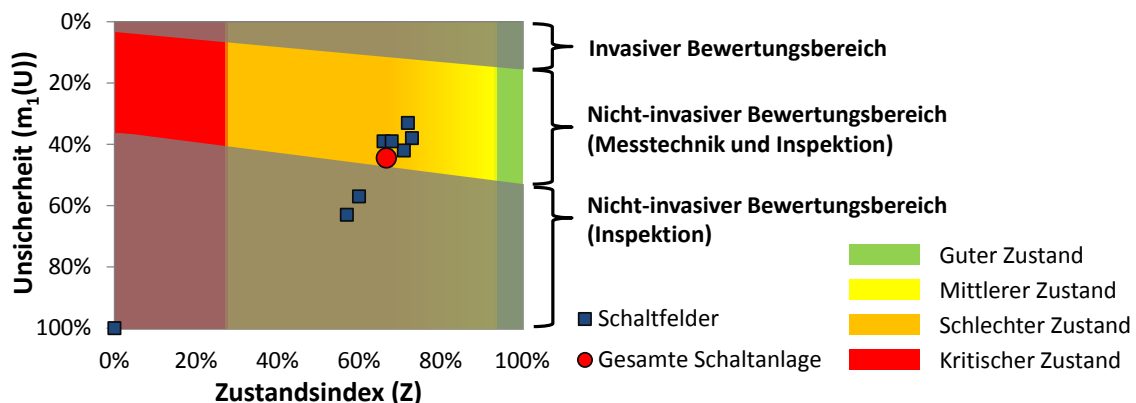


Abbildung 67: Zustandsübersicht der Schaltanlagenbewertung

Sowohl die Zustandsbewertungen der einzelnen Schaltfelder als auch die Bewertung der gesamten Schaltanlage sind dargestellt. Die Bewertungsergebnisse werden nach Unsicherheit und Zustandsindex aufgetragen [EPaw\_15a].

Die Abstufungen der Helligkeit basieren auf möglichen Bewertungsergebnissen der Gesamtsystematik. Hierfür wurden alle nicht-invasiven Bewertungsmethoden nacheinander mit „1“, „2“, „3“ und „4“ bewertet und die zugehörigen vier Schaltfeldbewertungen ermittelt. Da für den praktischen Einsatz nicht davon auszugehen ist, dass immer alle Eingangsdaten vorliegen, wurden vier weitere Schaltfeldbewertungen erzeugt, bei denen keine Messtechnik angewendet wird, so dass höhere Unsicherheiten entstehen. Für alle acht Bewertungsergebnisse wurde der chancenorientierte Zustandsindex gebildet. Aus diesen Unsicherheiten in Kombination mit den zugehörigen Zustandsindexen resultiert in Abbildung 67 die Abgrenzung des hellen nicht-invasiven Bewertungsbereichs (Inspektion und Messtechnik) zu den anderen beiden Bereichen.

Die Abgrenzung zum unteren, grau hinterlegten Bereich basiert auf den Bewertungsergebnissen ohne Messtechnik. Somit repräsentiert der untere, grau hinterlegte Bereich Bewertungsergebnisse deren Unsicherheit sich ergibt, wenn die Bewertung rein auf (visuellen) Inspektionen beruht (Soft Facts). Der helle, mittlere Bereich beschreibt die Größenordnung der sich ergebenden Unsicherheit durch Bewertungen mit nicht-invasiver Messtechnik und (visuellen) Inspektionen gemäß den in dieser Arbeit integrierten Bewertungsmethoden. Die Abgrenzung zum oberen grauen Bereich basiert auf den Bewertungsergebnissen mit zusätzlicher Messtechnik. Zur Erreichung des oberen, grauen Bereichs und damit zur weiteren Reduzierung der Unsicherheit werden invasive Bewertungsmethoden und damit ein Öffnen der GIS erforderlich.

Die Schaltfeldbewertungen, die sich in Abbildung 67 im hellen Bereich befinden, sind vertrauenswürdig, können jedoch mit weiteren Bewertungsmethoden konkretisiert werden. Die Schaltfeldbewertungen im unteren grauen Bereich besitzen eine geringe Aussagekraft und sollten konkretisiert werden. Die beispielhafte Darstellung enthält einen groben Ausreißer, dessen Unsicherheit 100 % beträgt. In diesem Fall konnte aufgrund fehlender Eingangsdaten keine Bewertung vorgenommen werden, so dass die Bewertung vollkommen unsicher ist.

Zur Erstellung der farblichen Einteilung wurde der neutrale Zustandsindex aus den mit nicht-invasiver Messtechnik erhobenen Bewertungsergebnissen gebildet. So bildet z.B. die Höhe des neutralen Zustandsindex des Bewertungsergebnisses, bei dem alle Bewertungsmethoden mit „1“ bewertet wurden, die Abgrenzung zwischen dem grünen und dem gelben Bereich. Analog werden die weiteren farblichen Abgrenzungen erstellt. Die Abgrenzungen der farblichen Einteilungen spiegeln die diskreten Bewertungsabstufungen „1“ bis „4“ (vgl. Abschnitt 3.2.2.2) bezogen auf das gesamte Schaltfeld und die neutrale Strategie nach Abschnitt 3.2.2.8 wieder. Die farblichen Bereiche werden wie folgt bezeichnet:

- Grün: Guter Zustand
- Gelb: Mittlerer Zustand
- Orange: Schlechter Zustand
- Rot: Kritischer Zustand

Die Schaltanlagen- sowie die Schaltfeldbewertungen in Abbildung 67 befinden sich im gelben Bereich, so dass mittlere Zustände vorliegen. Instandhaltungsmaßnahmen können mit dieser Darstellung auf Basis der Zustandsindexe priorisiert werden.

Eine gezielte Schwachstellenanalyse wird darüber hinaus durch die Analyse der Substanzverluste unterstützt. Die identifizierten Substanzverluste mehrerer Schaltfelder sind in Abbildung 68 vergleichend gezeigt.

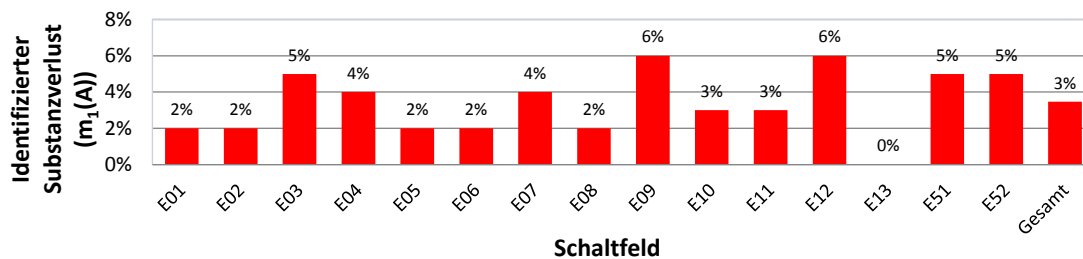


Abbildung 68: Übersicht der Substanzverluste

Da sich der Substanzverlust auf die Bereiche konzentriert, die auf identifizierte Fehler zurückzuführen sind, ermöglicht diese Visualisierung weitere Interpretationen des Ausmaßes der Schwachstellen. Aus dieser Visualisierung ergibt sich die Dringlichkeit von Handlungsmaßnahmen nach der Höhe der Substanzverluste. Die Schaltfelder mit den höchsten Substanzverlusten – 6 % in Abbildung 68 – sollten priorisiert werden. In Kombination mit dem Ergebnisbericht, der die identifizierten Fehler enthält, werden die notwendigen Maßnahmen konkretisiert. Die separate Analyse der Substanzverluste ist nicht erforderlich, wenn die risikofreudige Strategie gewählt wird, da deren Höhen direkt durch die zugehörigen Zustandsindexe ausgedrückt werden (vgl. Abschnitt 3.2.2.8).

Eine automatisierte Erzeugung von Handlungsempfehlungen ist dagegen nicht sinnvoll. GIS und die zugehörigen Instandhaltungsmaßnahmen sind zu komplex und von mehreren Faktoren, z.B. Aufstellungsart, feldbezogener Fehlerort, Ausstattung der Anlage, Personal- und Ersatzteilverfügbarkeit, abhängig, so dass individuelle Entscheidungen notwendig sind. Automatisierte Handlungsempfehlungen können dies nicht allumfassend abbilden.

Die gezeigten Visualisierungen ermöglichen die einfache und übersichtliche, vergleichende Analyse eines Anlagenkollektivs. Der Gesamtzustand sowie Ausreißer werden zügig identifiziert. Fehlinterpretationen durch Zustandsbewertungen auf Grundlage nicht valider Eingangsdaten werden durch die Angabe der Unsicherheit unterbunden. Das gesamte Bewertungsergebnis unterstützt langfristige Maßnahmen, d.h. Erneuerungsentscheidungen, da der Schaltfeldzustand in Bezug zu weiteren Schaltfeldern analysiert wird. Die identifizierten Substanzverluste sowie der Ergebnisbericht unterstützen insbesondere kurzfristige Maßnahmen.



## **4 Evaluierung der Gesamtsystematik**

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Evaluierung der entwickelten Gesamtsystematik. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Erstellung der Gesamtsystematik liegt, konzentrieren sich die kommenden Abschnitte auf die praktische Anwendung an einem Anlagenkollektiv, wobei einzelne Anwendungsbereiche dargestellt werden. Der großflächige und auch strategische Einsatz der vielfältigen Gesamtsystematik wird in einer parallelen Abhandlung ausführlich betrachtet. In den folgenden Abschnitten werden eingangs einzelne Anwendungsmöglichkeiten dargestellt. Anschließend erfolgt die Evaluierung der Gesamtsystematik anhand der Anwendung an einem Anlagenkollektiv. Abschließend werden die Grenzen der Gesamtsystematik diskutiert.

### **4.1 Anwendungsmöglichkeiten**

Mit der Gesamtsystematik sind verschiedene Anwendungsmöglichkeiten umsetzbar. Den Ausgangspunkt hierfür stellt jeweils das Bewertungsergebnis eines Schaltfelds dar, welches durch den Zustandsindex, die Massezahlen des identifizierten Substanzverlusts, des vorhandenen Nutzungsvorrats und der Unsicherheit sowie den Ergebnisbericht beschrieben wird. Je nach Anwendungsfall werden unterschiedliche Bestandteile der Bewertungsergebnisse benötigt.

#### **4.1.1 Asset-Service**

Der Asset-Service, der für die operativen Tätigkeiten, d.h. die Instandhaltungsmaßnahmen, zuständig ist, erhält aus dem Bewertungsergebnis die Information, ob Substanzverluste identifiziert wurden. Wurden diese identifiziert, so sind sie im Ergebnisbericht mit der zugehörigen Bewertung aufgeführt. Weiterhin werden diese Substanzverluste dem Ort bzw. der Komponente innerhalb des Schaltfelds zugeordnet. Aus diesen Informationen können notwendige Instandhaltungsmaßnahmen sowie deren Dringlichkeit spezifiziert werden, wodurch die Planung der notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen unterstützt wird. Liegen die Bewertungsergebnisse mehrerer Schaltfelder vor, so kann aus diesen Informationen eine z.B. schaltfeldbezogene Priorisierung der Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Der Asset-Service ist weiterhin für die Erzeugung der Eingangsdaten, d.h. der Inspektions- und Messergebnisse, der Gesamtsystematik zuständig. Werden durch den Asset-Service neue bzw. bislang unberücksichtigte Bewertungsmethoden identifiziert, so können diese zur Bewertung der Schaltfelder unkompliziert in die Gesamtsystematik integriert werden. Sie werden den Parametern (Ebene 5) der Aggregationssystematik, welche durch die Bewertungsmethoden (Ebene 6) bewertet werden, zugeordnet. Die Anzahl der Parameter bleibt trotz zusätzlicher Bewertungsmethoden unverändert, wodurch die Funktionsweise der Aggregationssystematik nicht verändert wird, da keine Änderung der Gewichtungsfaktoren notwendig ist. Die Unsicherheit bildet den Informationsgewinn der neuen Bewertungsmethoden ab.

Zur Integration müssen lediglich die Messgenauigkeit, das Detektionsvermögen sowie die Systematik zur Bewertung der Eingangsdaten bekannt sein, woraus die Werte der Massezahlen bzw. deren spezifische Verläufe bestimmt werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Kombination mit vorhandenen Bewertungsmethoden erfolgt durch das implementierte Regelwerk der Evidenz-Theorie. Die Integration weiterer Bewertungsmethoden bezieht sich nicht ausschließlich auf die in dieser Arbeit vorgesehenen nicht-invasiven Bewertungsmethoden. Invasive Methoden können ebenso verwendet werden, wodurch der Anwendungsbereich der Gesamtsystematik erweitert wird. So können auch invasive Bewertungsergebnisse, die im Rahmen von Wartungen etc. erzeugt werden, zur Zustandsbewertung herangezogen werden. Darüber hinaus ist ein Wegfall aktuell integrierter Bewertungsmethoden oder deren Austausch möglich.

Die operativen Tätigkeiten des Asset-Services werden somit vorrangig durch die unteren Ebenen der Gesamtsystematik umfangreich unterstützt.

#### **4.1.2 Asset-Management**

Das Asset-Management ist für die strategische (Erneuerungs-)Planung und damit für die Budgetsteuerung verantwortlich. Es kann analog zum Asset-Service die Schaltfeldbewertungen als Ausgangspunkt nutzen, benötigt jedoch nicht die Betrachtungstiefe des Asset-Services. Die ermittelten Schaltfeldbewertungen werden einzeln oder zusammengefasst als Schaltanlagenbewertung vergleichend analysiert (vgl. Abschnitt 3.3), womit Ausreißer identifiziert werden. Es wird eine Zustandsübersicht der bewerteten Schaltfelder und Schaltanlagen erzeugt, wodurch z.B. Erneuerungsentscheidungen unterstützt oder Maßnahmen zur Konkretisierung von Bewertungsergebnissen initiiert werden (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Bei der Erzeugung der zugehörigen Zustandsindexe für die vergleichende Zustandsübersicht wird die Risikoneigung des Asset-Managements einbezogen (vgl. Abschnitt 3.2.2.8), so dass durch den Zustandsindex das individuelle, anwenderbezogene Verhältnis aus den identifizierten Substanzverlusten und der Unsicherheit der Bewertung ausgedrückt wird.

Die Erzeugung einer einheitlichen Entscheidungsgrundlage für das Asset-Management kann durch die Festlegung einer minimalen Aussagekraft von Zustandsbewertungen umgesetzt werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, interne Grenzwerte für die Unsicherheit einer Schaltfeldbewertung festzulegen, so dass alle durchgeführten Schaltfeldbewertungen eine einheitliche Datengrundlage aufweisen. Die zugehörigen Arbeitsschritte zur Erreichung der minimalen Aussagekraft bzw. maximal tolerierten Unsicherheit in Abhängigkeit des zu bewertenden Betriebsmittels können unkompliziert bestimmt werden. Da die konkreten, nötigen Arbeitsschritte bekannt sind, kann die Zustandsbewertung mit den zugehörigen Kosten belegt werden, wodurch der finanzielle Aufwand zur Erreichung der Aussagekraft erfassbar ist und die Budgetsteuerung unterstützt wird.

Das Asset-Management kann weiterhin durch die Nutzung des Alters von Bewertungsergebnissen (vgl. Abschnitt 3.2.2.9) unterstützt werden. So dient die Unsicherheit in einem anwendungsbezogenen Kontext als spezifischer Auslöser von erneuten Zustandsbewertungen. Hierzu wird die in Abschnitt 3.2.2.9 eingeführte Hypothese der sinkenden Aussagekraft des Maßes eines bestehenden Nutzungsvorrats in Abhängigkeit des Eingangsdatenalters auf das Bewertungsergebnis eines gesamten Schaltfelds übertragen. Daraus resultiert, dass mit wachsender zeitlicher Entfernung vom Zustandsbewertungszeitpunkt die Unsicherheit des Bewertungsergebnisses in Richtung des Nutzungsvorrats steigt. Die Höhe des ursprünglich ermittelten Substanzverlusts wird nicht beeinflusst. Abbildung 69 verdeutlicht den Effekt der anwendungsbezogenen „Alterung“ von Zustandsbewertungsergebnissen.

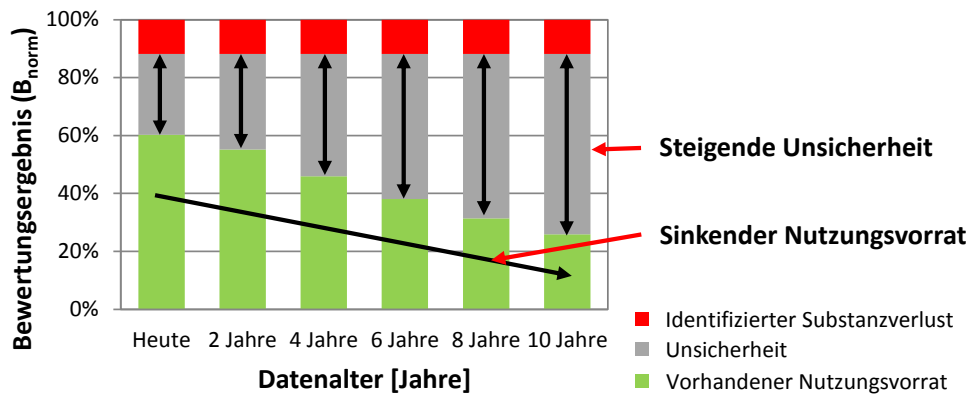


Abbildung 69: „Alterung“ von Bewertungsergebnissen der Zustandsbewertung

Die zeitliche Entwicklung der Bewertungsergebnisse kann im Rahmen von zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien zur Ableitung notwendiger Zustandsbewertungen dienen. Verschiedene Variationen sind hierbei möglich. Sowohl der Unsicherheitsbereich als auch der Nutzungsvorrat können als Auslöser genutzt werden, da sich ihre Verteilung mit wachsendem Datenalter ändert. Eine Kombination mit der zuvor beschriebenen maximal tolerierten Unsicherheit ist ebenso möglich. Durch die Festlegung innerbetrieblicher Schwellwerte kann bei Unter- bzw. Überschreitung dieser ein Handlungsbedarf für die erneute Zustandsbewertung ausgelöst werden. Abbildung 70 stellt diese Vorgehensweise beispielhaft dar.

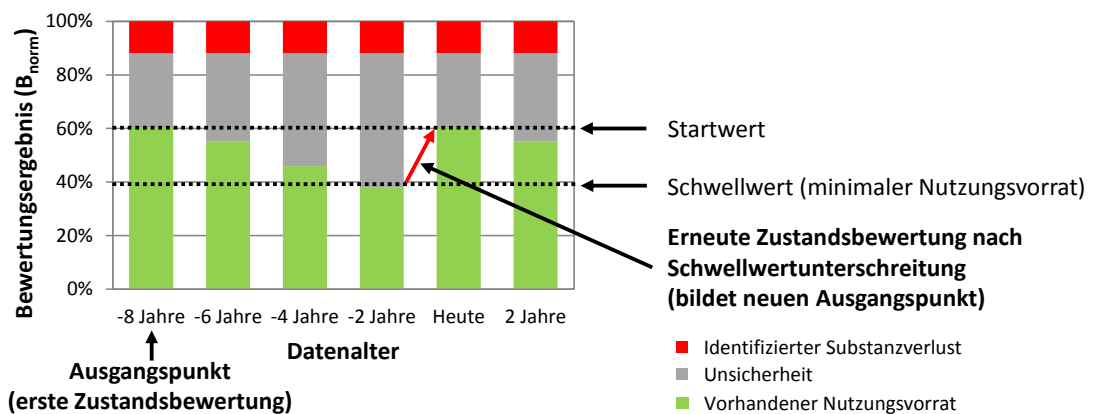


Abbildung 70: Ableitung des Handlungsbedarfs für erneute Zustandsbewertungen aus der zeitlichen Entwicklung von Bewertungsergebnissen

Im Beispiel wird der Handlungsbedarf bei der Unterschreitung eines minimalen Nutzungsvorrats ausgelöst. Den Ausgangspunkt stellt eine durchgeführte Zustandsbewertung dar. In Abhängigkeit des Datenalters sinkt die Massezahl des Nutzungsvorrats. Wird der definierte Grenzwert erreicht, werden erneute Zustandsbewertungen ausgelöst. Im vorliegenden Beispiel wird durch die erneute Zustandsbewertung ein neuer Ausgangspunkt erstellt, der in diesem Beispiel dem ursprünglichen Ausgangspunkt gleicht. Hieraus geht hervor, dass die Aussagekraft bzw. die Unsicherheit und der identifizierte Substanzverlust eines Zustandsbewertungsergebnisses den Zeitpunkt der erneuten Zustandsbewertung bestimmen. Je größer der festgestellte Substanzverlust und die Unsicherheit des Startwerts sind, desto eher werden Schwellwerte zur Auslösung von erneuten Zustandsbewertungen erreicht. Durch die Anwendung dieser Vorgehensweise auf alle zu untersuchenden Schaltfelder können die Zeitpunkte aller erneuten Zustandsbewertungen bestimmt und damit die Budgetplanung unterstützt werden [EPaw\_15a].

Die Betrachtungen zeigen bereits, dass umfangreiche Anwendungsmöglichkeiten der vielseitigen Gesamtsystematik bestehen, wodurch sowohl der Asset-Service als auch das Asset-Management unterstützt werden. Der spezifische Anwendungsbereich bestimmt hierbei die zu verwendende Betrachtungsebene der Gesamtsystematik.

## 4.2 Anwendung an einem Anlagenkollektiv

Zu ihrer Evaluation wird die entwickelte Gesamtsystematik an einem realitätsgerechten Ausschnitt eines aktuell betriebenen Anlagenkollektivs angewendet. Während die separate Anwendung der im Labor untersuchten Messtechnik bereits in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurde, konzentriert sich dieser Teil der Auswertung auf die vollständige Anwendung der Gesamtsystematik, womit insgesamt 67 Schaltfelder in zwölf Schaltanlagen bewertet werden [EPaw\_15a].

### 4.2.1 Anlagenkollektiv

Abbildung 71 zeigt die Alters- sowie die Herstellerverteilung der Schaltfelder des bewerteten Anlagenkollektivs, wobei die relativen Anteile am Anlagenkollektiv dargestellt sind.

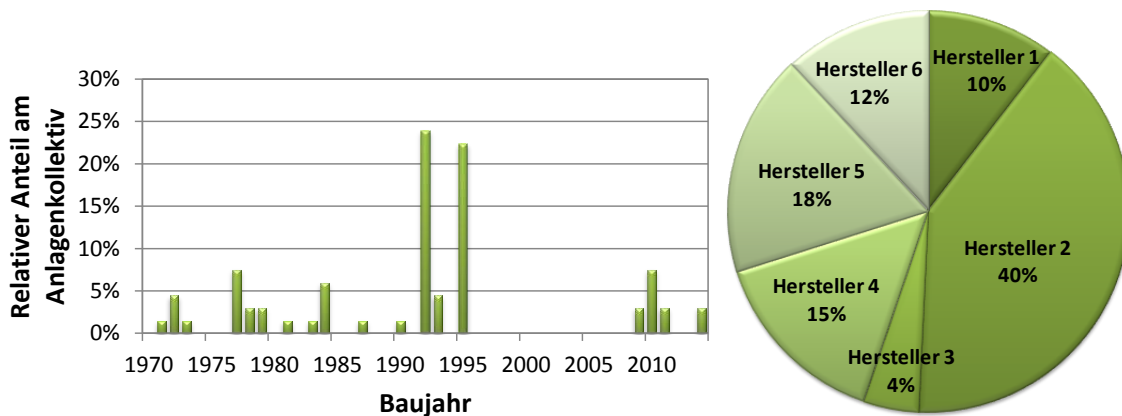


Abbildung 71: Altersstruktur (links) und Herstellerverteilung (rechts) der Schaltfelder des Anlagenkollektivs

Das Evaluationskollektiv besteht aus verschiedenen Schaltfeldtypen von sechs unterschiedlichen Herstellern. Das zugehörige Baujahr variiert in einem Zeitraum von mehr als 40 Jahren. Die ältesten Schaltfelder wurden im Jahr 1971 installiert. Darüber hinaus dienen die eingesetzten Schaltfelder verschiedenen Zwecken, so dass verschiedene Einsatzbereiche bzw. Schaltaufgaben, z.B. bei Generator-, Transformator- oder Kabelfeldern, im Anlagenkollektiv vorhanden sind.

Die Ausführungen verdeutlichen, dass das Erprobungskollektiv inhomogen strukturiert ist. Die divergente Hersteller- und Altersstruktur stellt einen Hinweis für eine Variation der anwendbaren Bewertungsmethoden, d.h. der Aussagekraft von Bewertungsergebnissen, dar. Die verschiedenen Schaltaufgaben weisen auf eine unterschiedliche Belastung der Schaltfelder während ihrer Betriebszeit und des Zustandsbewertungszeitraums hin. Letztere beeinflusst die Anwendbarkeit von Bewertungsmethoden. So sind beispielsweise thermische Untersuchungen zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit nur bei ausreichend hoher Strombelastung sinnvoll durchführbar (vgl. Abschnitt 2.3.3). Da einige Bewertungsmethoden nur während des Betriebs anwendbar sind, wird die Bewertung von nicht betriebenen Schaltfeldern, z.B. von Reservefeldern, erschwert bzw. erfordert zusätzlichen Aufwand.

Insgesamt besitzt das Anlagenkollektiv eine ausreichend große Anzahl von Schaltfeldern zur Evaluierung der Gesamtsystematik. Es beinhaltet alle signifikanten Hersteller und eine große Spannweite der Baujahre, so dass alle relevanten Variationen und Schaltfeldtypen enthalten sind. Durch die Inhomogenität eignet es sich besonders zur Evaluierung der Gesamtsystematik.

## **4.2.2 Bewertungsergebnisse**

In diesem Abschnitt werden die erhobenen Bewertungsergebnisse dargestellt. Hierbei werden die Bewertungsergebnisse der einzelnen Schaltfeldbewertungen sowie die Relationen aller Schaltfeldbewertungen zueinander im Kollektiv dargestellt.

### **4.2.2.1 Schaltfeldbewertungen**

Zur Schaltfeldbewertung werden visuelle und messtechnische Eingangsdaten verwendet, welche im Rahmen von Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb eines Zeitraums von drei Jahren erhoben wurden. Der Zeitpunkt der Zustandsbewertung ( $t_0$ ) befindet sich am Ende dieses Zeitraums. Die Daten werden so gewählt, dass sie ein realitätsgerechtes Abbild der Eingangsgrößen im zukünftigen Praxiseinsatz darstellen, wodurch der überwiegende Anteil der Bewertungen nicht auf allen technisch möglichen Untersuchungen, sondern auf den realitätsgerecht einzusetzenden Bewertungsmethoden basiert. Wirtschaftliche Restriktionen müssen in diesem Zusammenhang ebenfalls beachtet werden, so dass zusätzliche Untersuchungen ausschließlich bei begründetem Verdacht durchgeführt werden.

Das vorgestellte Anlagenkollektiv (vgl. Abschnitt 4.2.1) wird mit der Gesamtsystematik bewertet, wobei der Unsicherheitsbereich mit dem zugehörigen chancenorientierten Zustandsindex ( $Z_{1,co}$ ) für 67 Schaltfelder ermittelt sowie schaltfeldspezifische Ergebnisberichte erzeugt werden. Abbildung 72 zeigt die ermittelten Zustandsindexe, welche in Bezug zum Schaltfeld bzw. deren Nummer dargestellt werden. Die farbliche Einteilung basiert auf den theoretischen und vollständigen neutralen Zustandsbewertungsergebnissen der Schaltfelder (vgl. Abschnitt 3.3).

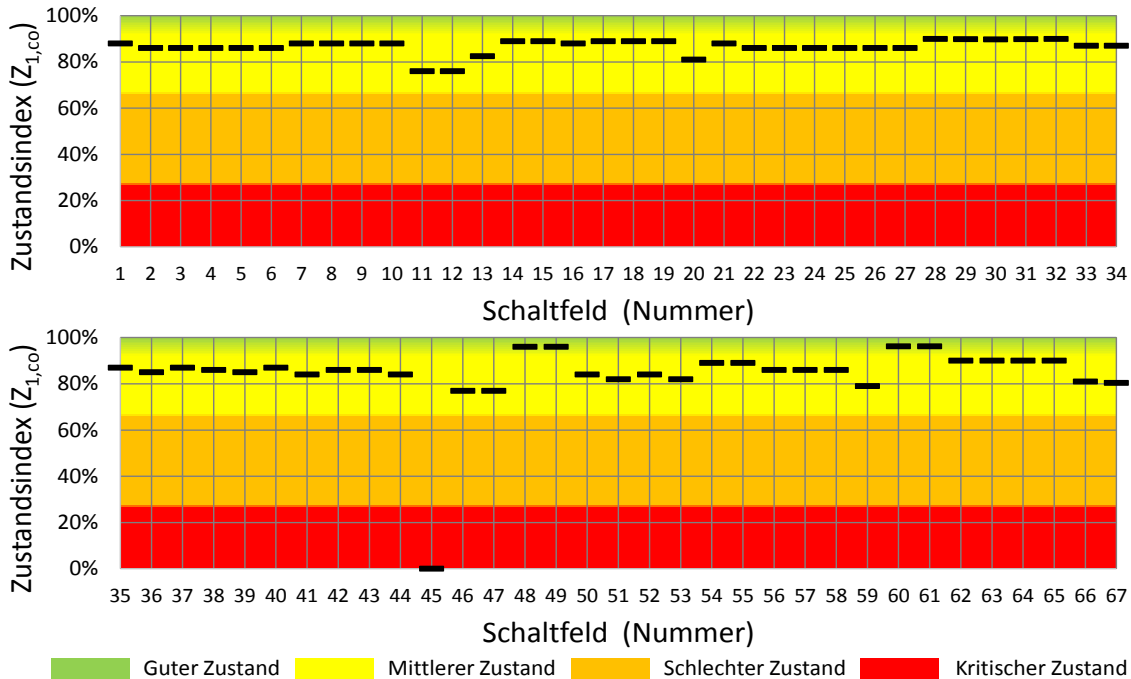


Abbildung 72: Zustandsindexe der Schaltfeldbewertungen

Die Zustandsindexe der Schaltfelder liegen tendenziell eng im oberen Bereich beieinander. Einzelne Schaltfelder, z.B. 11 oder 45, fallen durch niedrige Zustandsindexe auf, andere, wie z.B. 48 oder 60, zeigen überdurchschnittlich hohe Zustandsindexe. Insgesamt deutet die einheitliche Höhe der Zustandsindexe auf einen homogenen, mittleren bis guten Zustand des Kollektivs hin, welches einzelne Ausreißer aufweist. Aus der Höhe der Zustandsindexe kann bereits ein Handlungsbedarf abgeleitet werden. So sollten hieraus die Schaltfelder mit den niedrigsten Zustandsindexen zuerst detaillierter betrachtet werden. Abbildung 73 konkretisiert den Handlungsbedarf anhand ausgewählter, vollständiger Schaltfeldbewertungen.

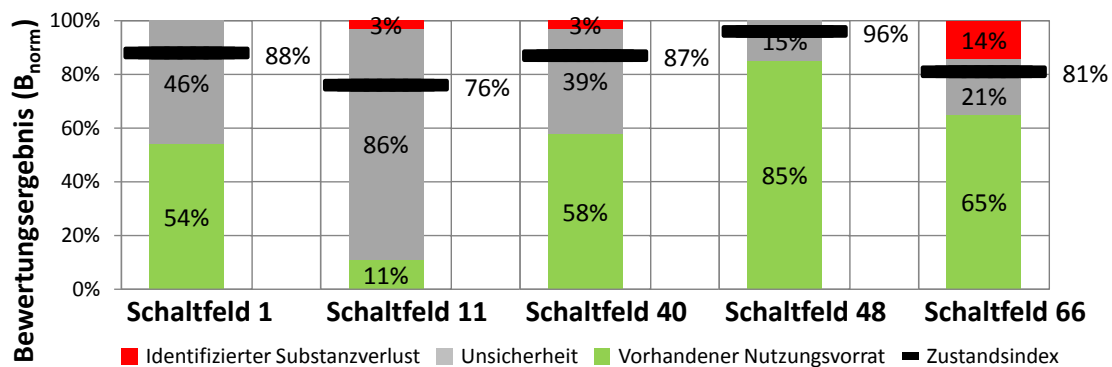


Abbildung 73: Vollständige Bewertungsergebnisse ausgewählter Schaltfelder

Die erforderlichen Maßnahmen werden durch diese vollständigen Bewertungsergebnisse konkretisiert. Hierbei fallen vorrangig die Schaltfelder 1 und 11 durch hohe Unsicherheiten auf. Bei diesen Schaltfeldern wurden wenige Bewertungsmethoden angewendet. Es existiert ein Handlungsbedarf zu Konkretisierung des Bewertungsergebnisses, da nach Abschnitt 3.2.2.7 eine deutliche Verringerung der Unsicherheit möglich ist. Das Schaltfeld 48 zeigt exemplarisch ein sehr sicheres Bewertungsergebnis. Die überwiegende Mehrheit der Schaltfeldbewertungen weist keine bis geringe Substanzverluste auf, welche in Abbildung 73 durch die Schaltfelder 1 bis 48 repräsentiert werden. Das Schaltfeld 66 weist einen überdurchschnittlich hohen Substanzverlust auf, wodurch hier ein Handlungsbedarf erzeugt wird. Die einzelnen Bewertungsergebnisse zeigen generell, dass Schaltfeldbewertungen mit sehr hohen Unsicherheiten oder hohen Substanzverlusten durch geringe Zustandsindexe auffallen.

Die identifizierten Substanzverluste werden durch die schaltfeldspezifischen Ergebnisberichte konkretisiert. Substanzverluste bis ca. 5 % werden durch „kleinere“ bzw. vereinzelte Auffälligkeiten gebildet. Überwiegend ergibt die SF<sub>6</sub>-Gasanalyse einen Handlungsbedarf, so dass die identifizierten Auffälligkeiten mit relativ geringem Aufwand – im Sinne einer nicht durchzuführenden Öffnung – mittelfristig beseitigt werden können. Ein höherer Substanzverlust geht mit einem größeren Instandsetzungsaufwand einher. Substanzverluste von mindestens 5 % werden durch mehrere Auffälligkeiten hervorgerufen, so dass neben Gasverlusten mechanische Einschränkungen, z.B. von Antrieben, und Teilentladungsvorgänge identifiziert werden. An diesen Schaltfeldern besteht unverzüglicher Handlungsbedarf, wobei die identifizierten Isolationsfehler eine Öffnung der Schaltanlage verlangen. Der größte Substanzverlust (14 %) wird durch Teilentladungsvorgänge sowie Auffälligkeiten der Gasanalyse und eines Schaltgeräts hervorgerufen. Die Anzahl der identifizierten Substanzverluste der bewerteten Schaltfelder werden in Tabelle 16 gezeigt.

**Tabelle 16: Verteilung der identifizierten Substanzverluste**

Schaltfeldfunktion (Ebene 2)	Hauptkomponente (Ebene 3)	Anzahl Substanz- verluste (Ebene 6)		Summe
		Gering	Kritisch (Bewertung größer 3)	
<b>Spannung halten</b>	Innere Gasräume inkl. Feststoffe	0	3	3
	SF <sub>6</sub> -Gas (Isoliergas)	15	44	59
<b>Strom führen</b>	Statisches Kontaktsystem	0	1	1
<b>Fehlerstrom aus- schalten / Strom und Spannung schalten</b>	Federspeicherantrieb	4	1	5
	Hydraulikantrieb	4	0	4
	Schaltkammer	21	24	45
<b>Strom oder Spannung schalten</b>	Elektrischer Antrieb	1	1	2
<b>Aktivteile erden</b>	Elektrischer Antrieb	2	0	2
<b>Steuerung und Überwachung sicherstellen</b>	Funktionskontrollen	10	0	10

In der Tabelle wird zwischen geringen und kritischen Substanzverlusten unterschieden, welche durch einzelne Bewertungsmethoden identifiziert wurden. Zur Übersichtlichkeit werden sie den Schaltfeldfunktionen bzw. den Hauptkomponenten zugeordnet. Der größte Anteil der identifizierten Substanzverluste wird durch die Bewertungsmethode SF<sub>6</sub>-Gasanalyse (Ebene 6) sowohl für das Isoliergas innerhalb der Schaltfeldfunktion Spannung halten als auch für das Löschgas innerhalb der Schaltkammer erzeugt. Da in diesem Zusammenhang überwiegend eine Überschreitung von betrieblichen Grenzwerten vorliegt, werden diese von der hinterlegten Bewertungssystematik als kritisch eingestuft, wodurch Instandsetzungsmaßnahmen ausgelöst werden. Da die Schaltfelder hierzu nicht geöffnet werden müssen, ist der resultierende Instandsetzungsaufwand verhältnismäßig gering. Die kritischen Substanzverluste an Antriebskomponenten sowie den inneren Gasräumen (Teilentladungen) erfordern einen deutlich höheren Instandsetzungsaufwand.

Aus den gezeigten Darstellungen der Zustandsindexe sowie der einzelnen Schaltfeldbewertungen werden unsichere Bewertungsergebnisse bereits zügig identifiziert. Bei diesen sollte das Bewertungsergebnis mit zusätzlichen Bewertungsmethoden konkretisiert werden. Hohe Substanzverluste werden ebenfalls einfach identifiziert. Die Bewertungsergebnisse mit den höchsten Substanzverlusten und sehr hohen Unsicherheiten zeigen die geringsten Zustandsindexe und grenzen sich hierdurch von den unauffälligen Bewertungsergebnissen ab. Durch die Ergebnisberichte werden die konkreten Substanzverluste innerhalb der Schaltfelder identifiziert.

#### 4.2.2.2 Bewertung des Anlagenkollektivs

Zur vergleichenden Analyse aller Schaltfeldbewertungen wird die in Abschnitt 3.3 eingeführte Darstellung der Schaltfeldbewertungen nach Unsicherheit und Zustandsindex genutzt. Abbildung 74 zeigt die Zustandsübersicht der bewerteten Schaltfelder (chancenorientierte Strategie).

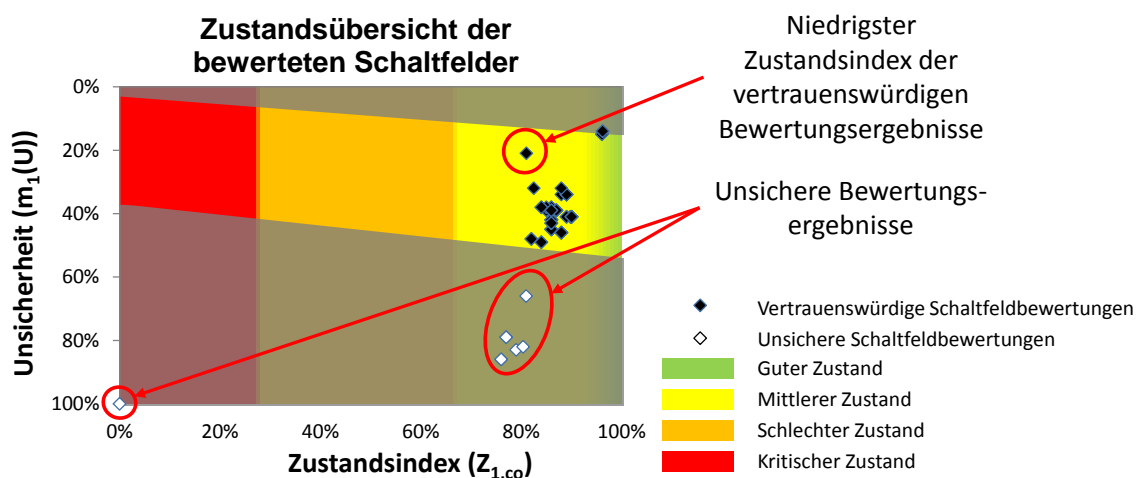


Abbildung 74: Zustandsübersicht der bewerteten Schaltfelder (chancenorientierte Strategie) [EPaw\_15a]

In der Darstellung sind die bewerteten Schaltfelder als weiße und schwarze Datenpunkte dargestellt, welche in der Grafik zügig miteinander verglichen werden können [EPaw\_15a].



Ein Handlungsbedarf zur Konkretisierung des Bewertungsergebnisses ergibt sich vorrangig bei den weißen Datenpunkten, da diese hohe Unsicherheiten aufweisen und sich im unteren grauen Bereich befinden. Die Mehrzahl der Bewertungsergebnisse (schwarze Datenpunkte) befindet sich auf einem einheitlichen Niveau der Unsicherheit im hellen Bewertungsbereich. Da die Unsicherheiten dieser Bewertungsergebnisse kleiner als jene der visuellen Inspektion (unterer grauer Bereich) sind, werden sie als vertrauenswürdig bezeichnet. Die schwarzen Datenpunkte befinden sich im grünen und gelben Bereich des guten bis mittleren Zustands. Bei diesen Bewertungsergebnissen liegen geringe bis mittlere Substanzverluste und mittlere Unsicherheiten vor. Diese werden durch den Zustandsindex quantifiziert, so dass der Lotabstand dieser Bewertungsergebnisse zur Ordinatenachse ein Maß für den Handlungsbedarf auf Grundlage der chancenorientierten Strategie darstellt. Umso geringer dieser Abstand ist, desto größer ist der Handlungsbedarf. Für die Schaltfeldbewertung der schwarzen Datenpunkte mit dem niedrigsten Zustandsindex besteht somit der größte Handlungsbedarf der vertrauenswürdigen Bewertungsergebnisse. Für die unsicheren Schaltfeldbewertungen (weiße Datenpunkte) ergeben sich ebenso sehr niedrige Zustandsindexe, wodurch ein Handlungsbedarf erzeugt wird. Die Höhe der Unsicherheit ist ein zusätzliches Maß für die Aussagekraft der Bewertungsergebnisse.

Zusammenfassend geht aus der Visualisierung hervor, dass Bewertungsergebnisse verschiedener Anlagentypen vergleichbar analysiert werden können. Die Relationen zueinander werden durch die Zustandsindexe auf Basis der Aussagekraft und der Substanzverluste abgebildet.

Abbildung 74 bezieht sich auf die chancenorientierte Strategie zur Bestimmung des Zustandsindexes. Wird eine andere Strategie zur Bestimmung der Zustandsindexe gewählt, so ändert sich die Verteilung der Schaltfeldbewertungen. Abbildung 75 zeigt die Zustandsindexe der Schaltfeldbewertungen der risikofreudigen Strategie.

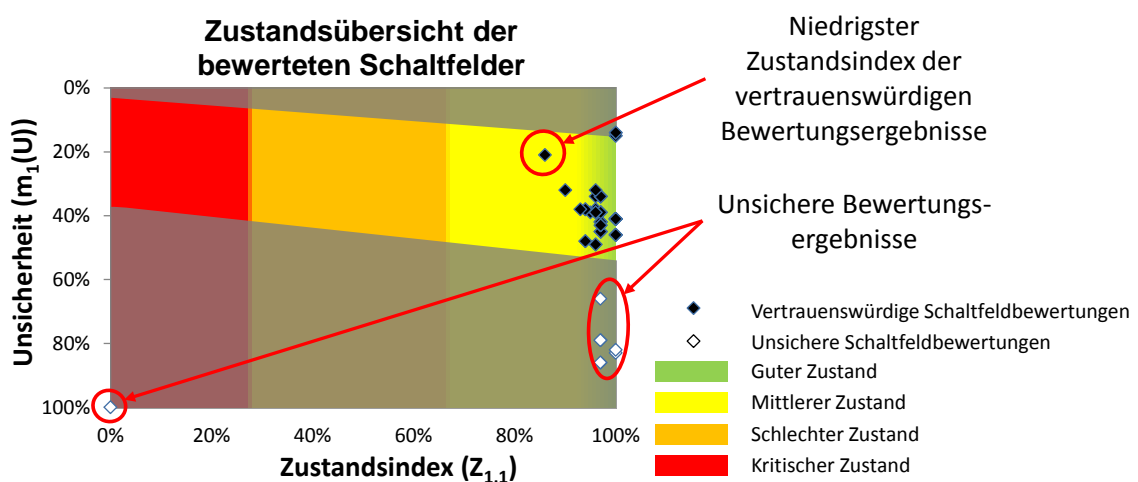


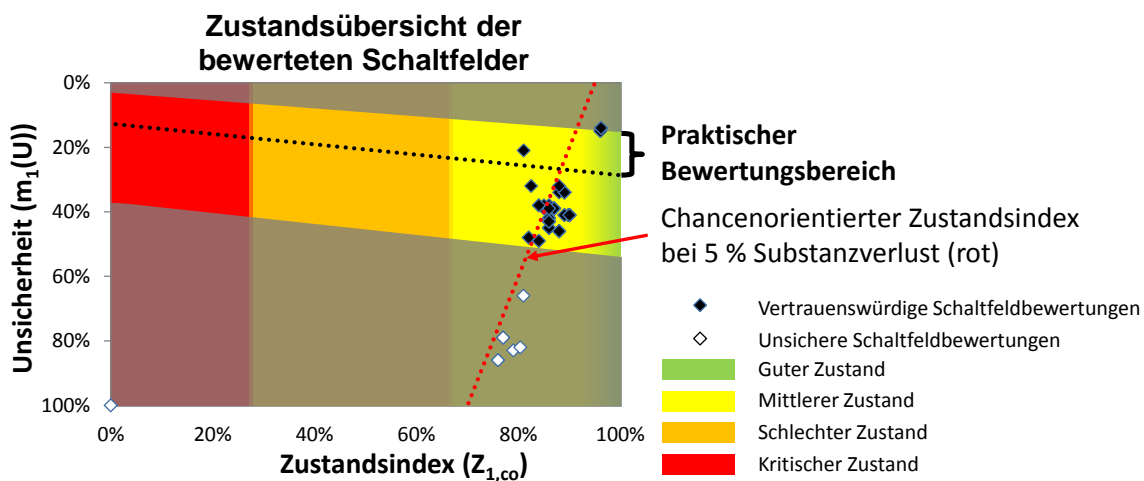
Abbildung 75: Zustandsübersicht der bewerteten Schaltfelder (risikofreudige Strategie)

Die Zustandsindexe dieser Strategie basieren ausschließlich auf dem Substanzverlust (vgl. Abschnitt 3.2.2.8), so dass sich die Verteilung der Schaltfeldbewertungen im Vergleich zu Abbildung 74 ändert.

Die Zustandsindexe der Bewertungsergebnisse liegen tendenziell näher beieinander. Der größte Handlungsbedarf wird analog für das Schaltfeld mit dem geringsten Zustandsindex erzeugt. Die Reihenfolge des Handlungsbedarfs ändert sich im Vergleich zu Abbildung 74 (chancenorientierte Strategie). So wird z.B. für die unsicheren, weißen Datenpunkte ein geringerer Handlungsbedarf – durch die alleinige Betrachtung des Zustandsindexes – erzeugt, da diese Schaltfeldbewertungen nun deutlich höhere Zustandsindexe annehmen. Der Zustandsindex bildet somit ausschließlich den identifizierten Substanzverlust ab. Die Höhe der Unsicherheit muss separat als Maß der Aussagekraft begutachtet werden.

Diese Visualisierung verdeutlicht, dass besonders die weißen Bewertungsergebnisse konkretisiert werden können. Die Relation der Schaltfeldzustände wird durch diesen Zustandsindex auf Basis der identifizierten Substanzverluste erzeugt. Die überwiegende Mehrheit der Schaltfelder weist keine bis mittlere Substanzverluste auf. Vereinzelt Schaltfelder mit hohen Substanzverlusten fallen analog zur chancenorientierten Strategie durch geringe Zustandsindexe auf (gelber Bereich, mittlerer Zustand), wodurch für diese Schaltfelder der größte Handlungsbedarf ausgedrückt wird.

Eine erweiterte Analyse zur Bewertung des Schaltfeldkollektivs ist in Abbildung 76 dargestellt. Die Darstellung beinhaltet zusätzlich zur Zustandsübersicht nach Zustandsindex (chancenorientierte Strategie) und Unsicherheit den praktischen Bewertungsbereich.



**Abbildung 76: Erweiterte Zustandsübersicht der bewerteten Schaltfelder (chancenorientierte Strategie)**

Dieser Bereich beschreibt die minimale Unsicherheit eines Bewertungsergebnisses, die durch die praktische Anwendung der Gesamtsystematik an dem Anlagenkollektiv nach Abschnitt 4.2.1 erreicht werden kann. Bauart- und betriebsbedingt können nicht an jedem Schaltfeld alle Bewertungsmethoden angewendet werden, so dass die minimale Unsicherheit der Schaltfeldbewertungen um bis 12 % steigen kann. Hierfür sind die Anwendbarkeit der Bewertungsmethoden UHF-TE-Messung, Thermografie und Schaltzeitmessungen sowie die Art des Leistungsschalterantriebs ausschlaggebend. Diese Steigerung der minimalen Unsicherheit durch solche Bewertungsunterschiede wird durch die schwarze, gestrichelte Linie repräsentiert.

Der Bereich oberhalb dieser Linie kann durch alle Bewertungsergebnisse erreicht werden und beinhaltet folglich sehr sichere Bewertungsergebnisse. Zusätzlich ist der chancenorientierte Zustandsindex von Bewertungsergebnissen mit einem Substanzverlust von 5 % dargestellt. Da der chancenorientierte Zustandsindex nach Gleichung (3.25) einen konstanten Teil der Unsicherheit beinhaltet, ergibt sich der monoton steigende Verlauf in der Darstellung. Je geringer die Höhe der Unsicherheit ist, umso stärker nähert sich der chancenorientierte Zustandsindex dem Substanzverlust von 5 % an. Dieser Substanzverlust wird als Schwellwert gewählt, da bis zu einem Substanzverlust von 5 % vereinzelte bzw. verhältnismäßig unkritische Auffälligkeiten abgebildet wurden (vgl. Abschnitt 4.2.2.1).

Die anzustrebenden Bereiche der Zustandsbewertung ergeben sich im oberen, rechten Bereich der Darstellung (vgl. Abschnitt 3.3). Die Beurteilung der Schaltfeldbewertungen wird durch den linksseitigen Lotabstand dieser zu der Geraden, die einen Zustandsindex mit einem Substanzverlust von 5 % repräsentiert (gestrichelte rote Linie), unterstützt. Der Abstand ist ein Maß für die Dringlichkeit und das Ausmaß von Wartungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen. Die überwiegende Mehrzahl der bewerteten Anlagen wies weniger als 5 % Substanzverlust auf.

Der Lotabstand eines Bewertungsergebnisses, welches sich unterhalb des praktischen Bewertungsbereichs (gestrichelte schwarze Linie) befindet, zum praktischen Bewertungsbereich repräsentiert die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen. So fallen einzelne Ausreißer (weiße Datenpunkte) durch hohe Unsicherheiten und verhältnismäßig geringe Zustandsindexe auf, so dass bei den zugehörigen Schaltfeldern weitere Untersuchungen zur genaueren Bestimmung des Zustands und Minimierung des Risikos durchgeführt werden sollten. Einem dieser Schaltfelder wurde eine Unsicherheit von 100 % zugeordnet, da für die Zustandsbewertung keine Daten vorlagen und das Feld somit nicht bewertet werden konnte. Die weiteren Bewertungen mit auffällig hoher Unsicherheit (weiße Datenpunkte) basieren auf schwacher Datengrundlage.

Ausgehend von den zuvor eingeführten Grenzen können die Schaltfeldbewertungen in vier verschiedene Bereiche eingeteilt werden, welche in Abbildung 77 gezeigt sind.

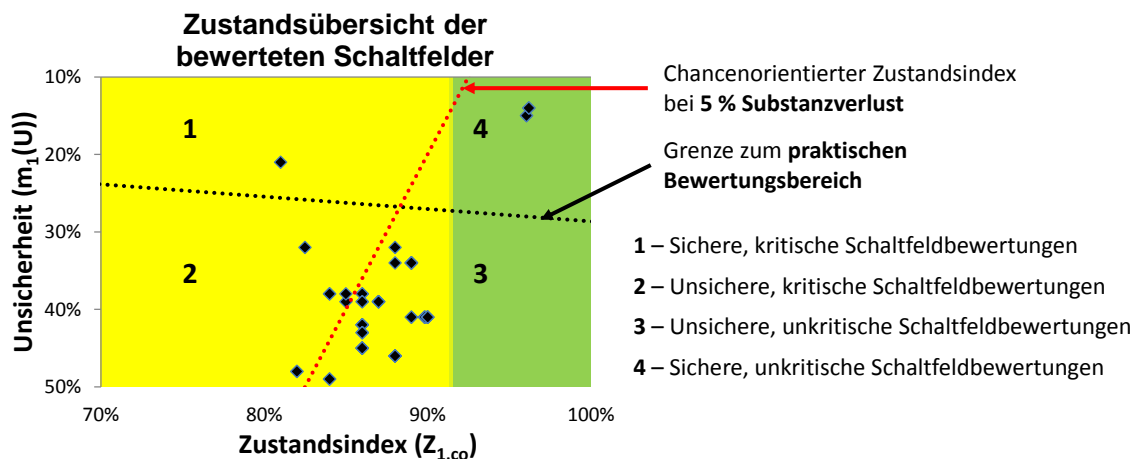


Abbildung 77: Kategorisierung von Schaltfeldbewertungen des Anlagenkollektivs

Die Darstellung ist ein Ausschnitt der Zustandsübersicht aus Abbildung 76, wobei ausschließlich die Schaltfeldbewertungen enthalten sind, deren Unsicherheit unterhalb der oberen Grenze des systematischen Unsicherheitsbereichs liegt (vgl. Abschnitt 3.2.2.7). Die weißen Datenpunkte aus Abbildung 76 werden somit nicht dargestellt, da ihre Aussagekraft zu gering ist und somit in diesem Bereich ein Handlungsbedarf zur Konkretisierung des Ergebnisses durch weitere Bewertungsmethoden besteht.

Der Bereich 1 der Darstellung enthält sichere Zustandsbewertungen bei denen insgesamt ein verhältnismäßig hoher und somit als kritisch bezeichneter Substanzverlust festgestellt wurde, so dass unverzügliche Instandsetzungsmaßnahmen notwendig sind. Diese sind ebenso für Schaltfeldbewertungen im Bereich 2 notwendig. Zusätzlich sollten die vergleichsweise schlechten Bewertungsergebnisse in diesem Bereich durch die Anwendung weiterer Bewertungsmethoden konkretisiert werden. Bewertungsergebnisse, die sich im Bereich 3 befinden, sollten ebenso weitergehend verifiziert werden. Sofern ein Substanzverlust identifiziert wurde, sollte dieser je nach spezifischem Bewertungsergebnis mittelfristig beseitigt werden. Die Bewertungsergebnisse im Bereich 4 stellen auf der Grundlage der entwickelten Gesamtsystematik gesicherte Zustandsbewertungen dar. Identifizierte Auffälligkeiten sollten, falls vorhanden, mittelfristig beseitigt werden.

Die überwiegende Mehrheit der Bewertungen (70 %) befindet sich im Bereich 3 dieser Darstellung, so dass, falls vorhanden, die mittelfristige Mängelbeseitigung überwiegt. Für 12 % der untersuchten Schaltfelder sind unverzügliche Instandsetzungsmaßnahmen notwendig. Mehr als 80 % der Bewertungsergebnisse können durch die Anwendung weiterer Bewertungsmethoden konkretisiert werden, da sich die zugehörige Unsicherheit unterhalb des erreichbaren Schwellwerts befindet. Durch die erweiterte Zustandsübersicht und die Kategorisierung der Bewertungsergebnisse werden die Zustandsaussage und somit der notwendige Handlungsbedarf nach Dringlichkeit von Maßnahmen und Notwendigkeit weiterer Untersuchungen präzisiert.

Abbildung 78 zeigt eine altersbezogene Analyse der Schaltfeldbewertungen. Dargestellt sind die baujahrbezogenen Mediane (rot) der Substanzverluste sowie deren Spannweite (grau).

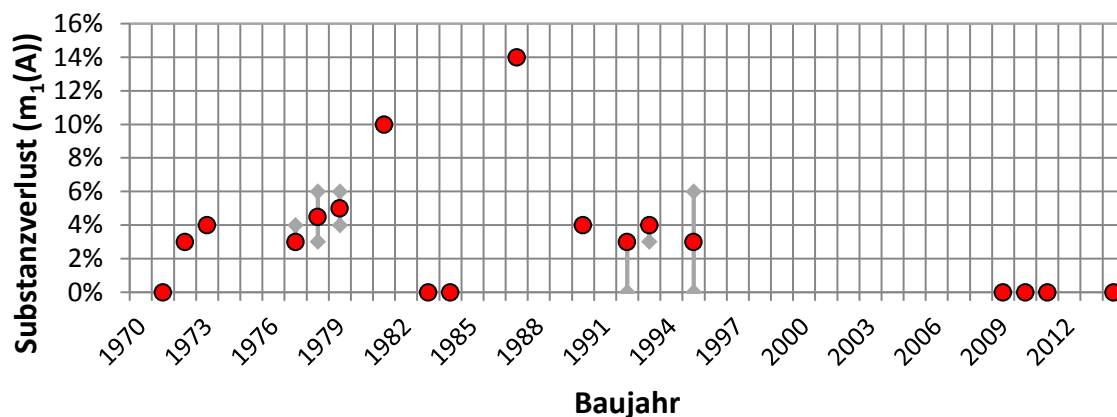
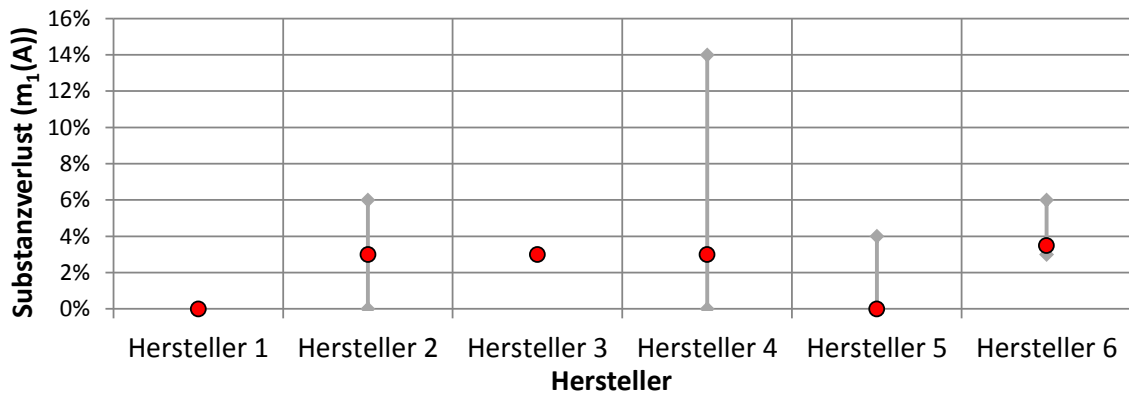


Abbildung 78: Baujahrbezogene Substanzverluste der Schaltfelder

Da die Substanzverluste die identifizierten Fehler abbilden, kann mit dieser Darstellung das Alterungsverhalten des Kollektivs analysiert werden. Auf der Datengrundlage der Schaltfeldbewertungen kann kein konkretes Alterungsverhalten abgeleitet werden. Tendenziell weisen ältere Schaltfelder höhere Substanzverluste auf als junge Schaltfelder. Eine baujahrbezogene Korrelation ist jedoch nicht vorhanden.

Abbildung 79 zeigt die herstellerspezifische Auswertung mit den herstellerbezogenen Medianen (rot) der Substanzverluste sowie deren Spannweite (grau).



**Abbildung 79: Herstellerepezifische Substanzverluste der Schaltfelder**

Aus der Analyse der Substanzverluste geht hervor, dass in Bezug zum Hersteller keine wesentlichen Ausreißer identifiziert werden können. Die Mediane befinden sich herstellerbezogen auf einem ähnlichen Niveau.

Bei den baujahr- und herstellerbezogenen Auswertungen muss beachtet werden, dass die Grundgesamtheit von 67 bewerteten Schaltfeldern verhältnismäßig gering ist, so dass für eine generelle Übertragbarkeit der hieraus ermittelten Erkenntnisse eine größere Grundgesamtheit erforderlich ist. Diese Auswertungen beziehen sich somit auf das bewertete Anlagenkollektiv.

Eine Anwendung der Bewertungsergebnisse der Schaltfeldbewertungen des Anlagenkollektivs ist in Tabelle 17 gezeigt. So kann auf der Grundlage der erhobenen Bewertungsergebnisse im Rahmen einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie die Fälligkeit der nächsten Zustandsbewertung abgeleitet werden.

**Tabelle 17: Fälligkeit der erneuten Schaltfeldbewertung**

	Maximaler Zeitverzug bis zur erneuten Zustandsbewertung										
Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Anzahl Schaltfelder	7	1	0	2	5	18	13	17	0	0	4

Tabelle 17 zeigt beispielhaft die relative zeitliche Verteilung der Schaltfelder des untersuchten Anlagenkollektivs. Im Beispiel wurde ein maximaler Bewertungszyklus von zehn Jahren zu Grunde gelegt, der ausschließlich von fehlerfreien Schaltfeldern erreicht werden kann, welche die aussagekräftigsten Bewertungsergebnisse erreichen.

Die sich hieraus theoretisch ergebende Höhe des Nutzungsvorrats von 30 % aufgrund „veralteter“ Bewertungsdaten (vgl. Abschnitt 4.1) wurde als Auslöser für die erneute Zustandserfassung genutzt, wodurch sich die entsprechende Verteilung der Schaltfelder innerhalb des maximalen Zyklus ergibt. Während bei ca. 12 % der untersuchten Schaltfelder sofortige Maßnahmen zur Erhöhung der Aussagekraft notwendig sind, müssen ca. 70 % der Schaltfelder erst nach fünf oder mehr Jahren erneut untersucht werden. An dieser Stelle wirken sich die realitätsgerechten Eingangsdaten aus. Da der Nutzungsvorrat und die Unsicherheit des aktuellen Bewertungsergebnisses maßgeblich die Zeitspanne zur nächsten Zustandsbewertung bestimmen, bewirken nicht angewendete Bewertungsmethoden eine frühere, erneute Untersuchung des Schaltfelds. Im Beispiel betrifft dies z.B. jene 12 % der Schaltfelder, die bereits deutlich früher erneut bewertet werden müssen.

Es wurde gezeigt, dass die Gesamtsystematik geeignet ist, unterschiedliche Anlagentypen vergleichbar zu bewerten und auf diesen Bewertungsergebnissen aufbauend weitere Handlungen abzuleiten sowie eine gezielte Schwachstellenanalyse vorzunehmen [EPaw\_15a]. Auf der Grundlage des vorliegenden Anlagenkollektivs konnten keine Korrelationen zwischen den Herstellern sowie dem Baujahr der bewerteten Schaltfelder und den Bewertungsergebnissen der Schaltanlagen identifiziert werden. Dazu ist eine Datensammlung über ein größeres Anlagenkollektiv sowie einen längeren Zeitraum notwendig.

#### **4.2.2.3 Wesentliche Schlussfolgerungen aus den Bewertungsergebnissen**

Aus der Visualisierung der Zustandsindexe und den einzelnen Schaltfeldbewertungen werden bereits unsichere Bewertungsergebnisse, bei welchen das Bewertungsergebnis mit zusätzlichen Bewertungsmethoden konkretisiert werden sollte, sowie hohe Substanzverluste von Schaltfeldern unkompliziert identifiziert. Sie grenzen sich durch die geringsten Zustandsindexe zusätzlich von unauffälligen Bewertungsergebnissen ab.

Die Zustandsaussage wird durch die separate Begutachtung der Substanzverluste, auf welche die identifizierten Auffälligkeiten folgerichtig abgebildet werden, unterstützt. In Verbindung mit dem Ergebnisbericht, der die konkret identifizierten Auffälligkeiten beinhaltet, können zielgerichtete Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden, wodurch sowohl das Asset-Management als auch der Asset-Service unterstützt wird. Die Kombination beider Auswertungen ermöglicht eine umfassende, realitätsgerechte Zustandsbewertung der Schaltfelder.

Mit der entwickelten Gesamtsystematik werden realitätsgerechte, vergleichbare Bewertungsergebnisse von Schaltfeldern eines inhomogenen Anlagenkollektivs durch die Integration der Unsicherheit im Bewertungsergebnis erzeugt. Hierbei zeigt die Zustandsübersicht nach Zustandsindex und Unsicherheit die realitätsgerechten Relationen der Schaltfeldzustände zueinander, wodurch bereits Ausreißer identifiziert werden [EPaw\_15a].

Aus dieser Relation der Schaltfeldzustände werden die Dringlichkeit und die Reihenfolge der notwendigen Maßnahmen ermittelt. Die Aussagekraft der einzelnen Bewertungen ist direkt einsehbar, wodurch Fehlinterpretationen aufgrund einer schwachen Datengrundlage vermieden werden. Impulse für Handlungen im Sinne von weiteren Untersuchungen zur Erzeugung eines valideren Bewertungsergebnisses werden erzeugt. Generell können verschiedene Strategien zur Auswertung der Bewertungsergebnisse eines Anlagenkollektivs genutzt werden, da die Gesamtsystematik umfangreiche Anwendungsmöglichkeiten besitzt, die sowohl den Asset-Service als auch das Asset-Management unterstützen.

### **4.3 Grenzen der Gesamtsystematik**

Dieser Abschnitt thematisiert die Grenzen der Gesamtsystematik, welche aus den untersuchten Bewertungsmethoden, der Aggregationssystematik sowie der Übertragbarkeit resultieren.

In der Gesamtsystematik werden neben visuellen Inspektionen nicht-invasive Bewertungsmethoden verwendet, deren Detektionsfähigkeit begrenzt ist. Wie am Beispiel der unkonventionellen TE-Messung gezeigt (vgl. Abschnitt 2.3.3.1), kann ein Großteil der relevanten Fehler detektiert werden, wobei jedoch Fehler existieren, die durch diese Bewertungsmethoden nicht erfasst werden können. Eine weitere Restriktion ergibt sich durch die thermischen Bewertungsmethoden zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.3.3.2). Es wurde gezeigt, dass diese Bewertungsmethoden nur unter der Voraussetzung einer ausreichend hohen Strombelastung vor und während des Messens universell anwendbar sind. Zudem ist bei einer hohen Abweichung von den im Labor untersuchten Konstellationen von einer verminderten Aussagekraft der Bewertungsmethode auszugehen. Die Felduntersuchungen haben ergeben, dass diese Bewertungsmethode nicht grundsätzlich im Rahmen einer nicht-invasiven Zustandsbewertung anwendbar ist. Eine Vielzahl der untersuchten Anlagen war gering ausgelastet, so dass minimal-invasive Prüfschaltungen zur künstlichen Lasterhöhung, verbunden mit zusätzlichem organisatorischem Aufwand, nötig gewesen wären, die nicht immer umgesetzt werden können. In der vorliegenden Systematik wird die nicht-invasive Bewertung der Stromtragfähigkeit maßgeblich durch die thermischen Bewertungsmethoden bestimmt, so dass bei fehlender Anwendung eine erhöhte Unsicherheit des Bewertungsergebnisses eintritt.

Die Detektionsfähigkeit der nicht-invasiven Bewertungsmethoden ist begrenzt. Das zugehörige Vermögen, Fehler erkennen zu können, wird zwar im Bewertungsergebnis in die Unsicherheit integriert, trotzdem besteht die Möglichkeit, dass weitere als die identifizierten Substanzverluste existieren, welche durch die genutzte Messtechnik oder fehlerbehaftete Messungen nicht erfasst werden können. Dennoch ist die Aussagekraft eines Bewertungsergebnisses, welches mit der vorliegenden Gesamtsystematik auf Basis der integrierten Bewertungsmethoden ermittelt wurde, im Vergleich zu anderen Bewertungsansätzen, die z.B. auf Inspektionen basieren, erheblich höher (vgl. Abschnitte 3.2.2.7 und 4.2.2).

Die erhobenen Eingangsdaten der Bewertungsmethoden werden in den untersten Ebenen der Aggregationssystematik bewertet und hieraus die für die Anwendung der Evidenz-Theorie notwendigen Massezahlen zugeordnet, welche nach Abschnitt 3.2.2.4 bestimmt werden und die Höhe der Unsicherheit beeinflussen. Die Bestimmung basiert auf den eigenen Laboruntersuchungen mit der verwendeten Messtechnik, so dass die Grundgesamtheit der durchgeführten Laboruntersuchungen die Höhe der Massezahlen bestimmt. Hieraus können Ungenauigkeiten resultieren, da die genutzten Versuchsreihen der Laboruntersuchungen trotz des großen Umfangs einen geeigneten Ausschnitt aller prinzipiell möglichen Fehler bzw. Fehlergrößenordnungen repräsentieren. Wenngleich hieraus die absolute Höhe der Massezahlen beeinflusst wird, so sind die Relationen der Massezahlen zueinander, z.B. das Verhältnis der Massezahlen von akustischer und UHF-TE-Messungen, verlässlicher.

Während die Evidenz-Theorie innerhalb der Funktionen angewendet wird, erfolgt die übergeordnete Aggregation mit Gewichtungsfaktoren nach Abschnitt 3.2.2.6. Da die Ermittlung dieser Faktoren überwiegend heuristisch erfolgte, können sie subjektiv beeinflusst sein. Da die Faktoren statisch zur Erzeugung der Bewertungsergebnisse genutzt werden, ist dieser Einfluss geringfügig und beeinflusst die Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse nicht.

Zur Entwicklung der Aggregationssystematik wurde vorausgesetzt, dass die grundlegenden Funktionen der Schaltfelder innerhalb des Kollektivs identisch ausgeprägt sind und sich die Unterschiede auf die Art der Funktionserbringung beschränken, wodurch der funktionsorientierte Ansatz (vgl. Abschnitt 3.1) für den Aufbau der Aggregationssystematik verwendet wird. Wird eine Funktion nicht bewertet, so geht diese als vollkommen unsicher in das Bewertungsergebnis ein, wodurch die Funktionsweise der Aggregationssystematik nicht verändert wird, da die Verteilung der Gewichtungsfaktoren konstant bleibt. Fehlende Funktionen, z.B. das bauartbedingte Fehlen von Komponenten wie Überspannungsableitern etc., bewirken eine Beeinflussung der Funktionsweise. Da solche Funktionen physisch nicht vorhanden sind, müssen sie als nicht bewertbar eingestuft werden, weshalb sie nicht als unsicher angenommen werden können. Folglich dürfen sie nicht in der Aggregationssystematik berücksichtigt werden, wodurch sich sowohl die Anzahl der im Gesamtergebnis berücksichtigten Funktionen sowie die Verteilung der zugehörigen Gewichtungsfaktoren ändern. Die verbleibenden Funktionen haben hierdurch einen erhöhten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Je mehr Funktionen nicht vorhanden sind, desto größer ist der beschriebene Effekt.

Die Gesamtsystematik wurde zur technischen Zustandsbewertung gasisolierter 123-kV-Hochspannungsschaltanlagen konzipiert. Prinzipiell kann diese Systematik sowohl auf höhere als auch auf niedrigere Spannungsebenen übertragen werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sowohl die Anwendbarkeit von Bewertungsmethoden als auch die Bewertung und die Aussagekraft der Eingangsdaten von Bewertungsmethoden variieren, wodurch die Massezahlen, die hieraus resultierende Unsicherheit und ggf. Gewichtungsfaktoren andere Ausmaße annehmen.



Diese Einflüsse betreffen vorrangig die untersten Ebenen der Aggregationssystematik. Sind diese Ausmaße bekannt, so kann die Gesamtsystematik unkompliziert übertragen werden. Gegebenenfalls müssen weitere Bewertungsmethoden integriert werden. Da die Parameter der Aggregationssystematik hierdurch nicht verändert werden, bleibt die prinzipielle Funktionsweise unverändert (vgl. Abschnitt 4.1).

Weiterhin können weitere als die in der vorliegenden Arbeit bewerteten Hersteller und Anlagentypen mit der Gesamtsystematik bewertet werden. Die Anwendbarkeit einzelner Bewertungsmethoden kann hierbei eine höhere Unsicherheit der Bewertungsergebnisse bewirken – analog zu den Bewertungsergebnissen des bewerteten Schaltfeldkollektivs. Ebenso kann andere als die in der vorliegenden Arbeit verwendete Messtechnik die Werte der Massezahlen und somit der Unsicherheit verändern.

Die Übertragbarkeit auf andere Betriebsmittel, wie z.B. gasisolierte Leitungen oder Freiluft-Hochspannungsschaltanlagen, kann die Funktionsweise der Gesamtsystematik verändern, da andere Bewertungsmethoden und gegebenenfalls andere Parameter und Gewichtungsfaktoren integriert werden müssen bzw. entfallen. Hierbei sind Variationen in der Bewertung und der Aussagekraft der in die vorliegende Gesamtsystematik integrierten Bewertungsmethoden zu beachten, so dass die Verwendung der in dieser Arbeit ermittelten Massezahlen zu überprüfen ist. Der in der vorliegenden Arbeit dargestellte Ansatz kann jedoch prinzipiell übertragen werden. Bei Hochspannungsschaltanlagen in Freiluftausführung können die Änderungen gegebenenfalls so gering sein, dass die Vergleichbarkeit mit den hier gezeigten Bewertungsergebnissen in bestimmten Grenzen erhalten bleibt.



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die realitätsgerechte Zustandsbewertung bildet die Grundlage aller optimierten Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien elektrischer Energieversorgungsnetze. Die Bestimmung des Betriebsmittelzustands wird aber bei GIS infolge der metallischen Kapselung, eines fehlenden systematischen Vorgehens oder einer unvollständigen Bewertungsgrundlage erheblich erschwert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde erstmalig eine vollständige Gesamtsystematik zur realitätsgerechten Zustandsbewertung von gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen als valide Basis für Instandhaltungsstrategien und -entscheidungen entwickelt. Sie kombiniert visuelle mit nicht-invasiven messtechnischen Bewertungsmethoden zur ganzheitlichen Bewertung der relevanten Bewertungskategorien Isolation, Stromtragfähigkeit und mechanische Funktion. Da die Detektionsfähigkeit und die Genauigkeit der angewendeten Bewertungsmethoden aufgrund der Anwendung im laufenden Betrieb begrenzt ist, musste die hieraus resultierende Unsicherheit berücksichtigt werden. Nach der Analyse verschiedener theoretischer Ansätze wurde zu diesem Zweck eine spezielle Aggregationssystematik entwickelt, die auf der Evidenz-Theorie basiert und die spezifische Aussagekraft der einzelnen Methoden im Bewertungsergebnis berücksichtigt. Im Gegensatz zu konventionellen Bewertungsschemata besteht neben dem Zustandsindex auch in dem Unsicherheitsbereich das Bewertungsergebnis. Die untere Grenze des Unsicherheitsbereichs bildet der ermittelte Nutzungsvorrat, die obere Grenze resultiert aus dem identifizierten Substanzverlust. Hierdurch bewirken nicht ermittelte Bewertungsparameter keine Eingriffe in die Funktionsweise der Systematik. Fehlende oder veraltete Beurteilungen resultieren aber in einer erhöhten Unsicherheit.

Die Aggregationssystematik erzeugt vergleichbare Bewertungsergebnisse, welche unabhängig vom betrachteten Anlagentyp sind. Die verschiedenen Fabrikate werden durch Anpassung der spezifischen Aussagekraft von anwendbaren Bewertungsmethoden berücksichtigt. So können die Bewertungsergebnisse von Schaltfeldern eines zu untersuchenden Kollektivs mittels Zustandsindex und Unsicherheit miteinander vergleichend analysiert werden, wodurch eine Zustandsübersicht des Anlagenkollektivs inklusive der spezifischen Aussagekraft der Bewertungen gebildet wird. Ausreißer, die auf einer schwachen Bewertungsgrundlage basieren, werden somit auch unkompliziert identifiziert. Tiefergehende Analysen werden durch detaillierte und umfangreiche Bewertungsberichte unterstützt, so dass optimale Instandhaltungsmaßnahmen einfach abgeleitet werden.

Die spezifische Aussagekraft ausgewählter Bewertungsmethoden wurde zur realitätsgerechten Verwendung in der Aggregationssystematik in mehr als 200 Versuchskonstellationen im Labor untersucht. Die Auswertungen dieser Untersuchungen zeigen, dass durch die Anwendung der nicht-invasiven Bewertungsmethoden akustische und UHF-Teilentladungsmessung im Mittel 80 % der relevanten Isolationsfehler während des Betriebs detektiert werden können. Die Thermografie eignet sich zur Detektion relevanter Stromtragfähigkeitsfehler. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde die spezifische Aussagekraft in Form der Detektionsfähigkeit relevanter Fehler bestimmt. Sie bestimmt neben der Bewertungsungenauigkeit die Höhe der in der Aggregationssystematik verwendeten Unsicherheit. Diese ist prinzipiell für schlechte Zustandsbewertungen kleiner als für gute Bewertungen, da die nicht-invasiven Bewertungsmethoden nicht alle Fehlerarten detektieren können. Zusätzlich variiert sie in Abhängigkeit der verwendeten Sensorart, deren Anwendbarkeit bauartbedingt vorgegeben wird. Um bei der Anwendung eine konstante Aussagekraft zu erreichen, ist eine ausreichende Bestückung des zu untersuchenden Schaltfelds mit Sensoren notwendig. Die UHF-Teilentladungsmessung erfordert hierzu die Nutzung aller möglichen Stellen zur Auskopplung von Teilentladungsimpulsen. Bei akustischen Sensoren muss unter Beachtung der Signaldämpfung je Gasraum mindestens ein Messpunkt verwendet werden. Wurde ein Isolationsfehler detektiert, so kann der zugehörige Fehlerort unkompliziert mit diesen Sensoren eingegrenzt werden. Die Messtechnik wurde an Schaltfeldern eines Anlagenkollektivs angewendet, wobei sie Auffälligkeiten realitätsgerecht identifizierte und ihre Praxistauglichkeit deutlich bestätigte. Durch die Anwendung der untersuchten Bewertungsmethoden können die Bewertungskategorien Isolation und Stromtragfähigkeit unabhängig vom Anlagentyp realitätsgerecht bewertet werden. Die anwendbare bzw. angewendete Bewertungsmethode bestimmt dabei die Aussagekraft des Bewertungsergebnisses.

Zur Verifizierung der Gesamtsystematik wurden in umfangreichen Felduntersuchungen insgesamt 67 Schaltfelder eines inhomogenen Kollektivs von GIS bewertet. Hierbei wurden realitätsgerechte Eingangsdaten unter Beachtung wirtschaftlicher Restriktionen ermittelt, d.h. nicht alle zur Verfügung stehenden Bewertungsmethoden konnten an allen Schaltfeldern angewendet werden.

Die systematische Vorgehensweise ermöglichte aber die Kombination von Ergebnissen verschiedenartiger Bewertungsmethoden unter Berücksichtigung der bauart- und aufwandsbedingten Anwendbarkeit von Bewertungsmethoden, Sensoren etc., so dass einheitliche, aussagekräftige und vergleichbare Bewertungsergebnisse entstanden.

Die Gesamtübersicht der Bewertungsergebnisse nach Zustandsindex und Unsicherheit zeigt die Relationen der Schaltfeldbewertungen zueinander und identifiziert Schwachstellen (Ausreißer). So wurden unsichere Bewertungsergebnisse, die auf einer schwachen Datengrundlage basierten, eindeutig identifiziert und Fehlinterpretationen aufgrund der geringen Aussagekraft vermieden. Hierbei wurde für 12 % der untersuchten Schaltfelder ein unverzüglicher Handlungsbedarf zur Konkretisierung des Bewertungsergebnisses ermittelt. Generell haben die Felduntersuchungen gezeigt, dass sich die Aussagekraft der Bewertungen bei der systematischen Untersuchung eines bestehenden, inhomogenen Anlagenkollektivs auf einem einheitlich hohen Niveau befindet. Insgesamt konnte die Gesamtsystematik ihre Anwendbarkeit und Praktikabilität in den Felduntersuchungen eindrucksvoll unter Beweis stellen.

Die universelle Erweiterbarkeit ermöglicht die Anpassung der Gesamtsystematik an den technischen Fortschritt sowie veränderte Rahmenbedingungen für Zustandsbewertungen, wobei die Vergleichbarkeit mit zuvor erhobenen Bewertungsergebnissen bestehen bleibt. Auf Grundlage der bestimmten Unsicherheit können die Intervalle zur nächsten Zustandsbewertung bestimmt werden. Wie in einem Beispiel gezeigt wurde, erfordern unsichere Bewertungen häufigere Zustandsbewertungen.

Generell erzeugen die Bewertungsergebnisse einen erheblichen Informationsgewinn, da neben dem ermittelten Zustand die Aussagekraft bewertet wird. Dem Asset-Management wird hierdurch eine valide Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt, auf Basis derer Wartungs- oder Erneuerungsintervalle analysiert und Instandhaltungsstrategien optimiert werden können. Zusätzlich erfolgt eine deutliche Unterstützung des Anlagenbetriebs, da die identifizierten Mängel in Form eines konkreten Berichts detailliert beschrieben werden. Somit bildet die entwickelte Gesamtsystematik ein vielseitiges Management-Werkzeug.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vielfältige Optionen zur Anwendung der entwickelten Gesamtsystematik in einem praxisorientierten Kontext aufgezeigt. Zur vollständigen Nutzung des sich hieraus ergebenden Potentials müssen kontinuierlich Zustandsdaten des gesamten GIS-Anlagenkollektivs erhoben werden. So wird die Systematik bereits weitläufig bei einem großen deutschen Verteilnetzbetreiber eingesetzt. Werden regelmäßig umfangreiche bzw. vollständige Daten des Kollektivs erhoben, können auf dieser Basis zusätzlich Erfahrungswerte zur kollektivbezogenen Auswertung der Bewertungsergebnisse ermittelt werden. Ein weiterer Anwendungsbereich besteht in der Nutzung umfangreicher Daten zur trendorientierten Zustandsprognose des Alterungsverhaltens von GIS auf Basis des aktuell bestimmten Anlagenzustands. Darüber hinaus besteht Potential zur Ausweitung des Ansatzes auf weitere Betriebsmittel, um innerhalb des Asset-Managements eine einheitliche, moderne Bewertungsstrategie zu verfolgen.



## 6 Summary

Since high-voltage (HV) gas-insulated substations (GIS) are used in electrical power supply systems for several decades, in Germany as well as in many other countries, the asset management of the operator is forced to evaluate the actual condition of the GIS and act within technical and economic constraints where necessary. In this context, a realistic condition assessment is crucial.

Realistic condition assessment is the basis of advanced and optimised maintenance strategies. With respect to their enclosure, realistic assessment of gas-insulated substations is very difficult. Especially the condition assessment of inner components is limited. Solely “soft facts” based on visual inspections cannot provide objective and credible data. They cannot represent a serious overall condition. Reliable “hard facts” emerged by measuring techniques are needed. Nevertheless condition assessment has to evaluate all relevant assessment categories for creating a solid basis for the asset-management.

Within the framework of the present dissertation a non-invasive system-approach for condition assessment of GIS is presented that initially integrates all kinds of valuation methods and takes their specific validity as well as their uncertainty into account. The new approach allows a realistic condition assessment of all common types of high-voltage GIS during operation and therefore comparing different specifications and manufacturers for the first time.

In contrast to conventional aggregation schemes the developed system approach reveals not exclusively a hard index as result. A range is pointed out which represents the specific validity and the uncertainty respectively, of the used valuation methods. Within that range the correct index is located. The narrower the range the higher is the validity – and the smaller the uncertainty respectively. It is bounded ahead by the loss of substance. Below the condition reserve is assigned.

Within the approach “soft facts” by visual inspections and “hard facts” by measuring techniques are combined which evaluate all assessment categories: insulation system, load current capacity and mechanical performance. Since the related valuation methods will be applied during operation, its validity is limited. Thus, the evaluation result of each single valuation method remains an uncertainty that consists of imprecision and ignorance. Hence, the ability to detect critical defects is especially observed by ignorance.

To process the corresponding assessment data several scientific methods were examined. In conclusion a special aggregation scheme was developed using the theory of evidence that also enables to handle missing data without changes of the aggregation scheme. Missing data by valuation methods which were not performed creates more uncertainty of the valuation result.

Finally, comparable valuation results of entire bays are generated by the system approach which observe its characteristics by the result's uncertainty. Regardless of the type of substation the same procedure is performed with respect to specific features. The calculated condition index and the uncertainty of the bay's valuation result take the specific applicable valuation methods, the validity and the loss of substance into account.

Several bays will be compared by assigning the condition index in relation to the uncertainty in an overview. That procedure allows recognition of outliers. Above, an overview of the bay conditions is given. Further investigation can be identified as a first maintenance task to avoid misinterpretation of results by weak input data. The need for action is displayed by the specific condition index. Next to this the extent of wear and identified imperfections are displayed separately in an extensive report for deducing precise maintenance tasks.

Laboratory and field tests were performed for determining the validity of valuation methods. Chosen valuation methods were investigated in more than 200 laboratory sets for determining their validity. The non-invasive valuation methods create added value. On average 80 % of imperfections of the insulation system can be detected by the acoustic and the UHF partial discharge detection during operation. The type of sensor affects the ability of detection. Next to the general applicability of the valuation method the type of applied measuring equipment is crucial. Because of the attenuation of partial discharge signals, each available coupling device should be used for UHF partial discharge detection. Acoustic sensors should be placed at each gas-filled compartment. Imperfections of the load current capacity system can be detected by thermography in line with reality.

Regarding the ability to detect relevant defects during the laboratory sets the validity of those valuation methods can be determined. Next to the imprecision it prevails the extent of uncertainty. Finally, the valuation method's uncertainty is determined which is in principle higher in the case of absence of defects because not every critical defect can be detected. If such an uncertain valuation method detects a defect, the uncertainty is pretty low and the result very reliable. Next to this the validity varies according to the applicable sensor dependent on the type of substation.

The investigated measuring techniques were applied in field testing where its practical suitability for use was obvious confirmed. Defects were detected in line with reality. Thus, the investigated valuation methods are able to assess the insulation system and the load current capacity independent on the type of substation. The type and the usage of applicable valuation methods affect the validity of the valuation result.

For its evaluation, the system approach was applied to 67 bays of operating GIS. Therefore, realistic input data was used and economical limitations were observed. Since those requirements were considered, the assessment was not solely realized by the technical point of view. Despite this, realistic, reliable and comparable valuation results were created.



Realistic loss of substance was detected and outlier by weak data were identified. Finally 12 % of the bays were based on unreliable data with the result that they are unsuitable for maintenance and renewal decisions and further investigations have to be performed immediately. Misinterpretation of those weak results was avoided. Several analysis methods to assess the condition of all bays and versatile applications were demonstrated. For instance, uncertainty can be used as a trigger for actions in a condition-based maintenance strategy to determine the time to the next condition assessment. Altogether, the system approach confirmed impressively its ability for practical use during field testing.

Because of the modular expandability the system approach can universally be adapted to the engineering progress if new or more certain valuation methods are evolved. Those changes cause more certain valuation results while the comparability to older results still remains.

Overall, the valuation results of the system approach create added value. Next to the loss of substance the validity is observed within the result which specifies the condition assessment significantly. The systematic approach achieves comparable results despite different types of substations. It generates a decision making basis for the asset-management regarding maintenance and renewal decisions that enables to optimise maintenance strategies. Above, the asset-service is supported by the detailed reports of defects which assists to deduce precise maintenance tasks. Hence, a manifold instrument with various practicing possibilities was created.



## 7 Literaturverzeichnis

- [Alb\_11] Albers, S., Klapper, D., Konradt, U. et al.:  
*Methodik der empirischen Forschung*  
Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH,  
Wiesbaden, Deutschland, 2007
- [Bal\_11] Balzer, G. und Schorn, C.:  
*Asset Management für Infrastrukturanlagen - Energie und Wasser*  
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2011
- [Bee\_15] Beerboom, D., Johae, C., Zdrallek, M. et al.:  
*Condition assessment of distribution grids using uncertainty theory*  
23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon,  
Frankreich, 2015
- [Bee\_12] Beerboom, D., Johae, C., Zdrallek, M. et al.:  
*Realitätsgerechte Zustandsbewertung von Verteilungsnetzen als Basis  
optimierter Asset-Strategie*  
ETG-Fachbericht 134: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda,  
Deutschland, 2012
- [Bei\_08] Beierle, C. und Kern-Isberner, G.:  
*Methoden wissensbasierter System: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*  
Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2008
- [Ber\_14] Bernhard, F.:  
*Handbuch der Technischen Temperaturmessung*  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2014
- [Blu\_10] Blumenroth, F.:  
*Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit Schraubenfedern in Anlagen  
der Elektroenergie-technik.*  
Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, Deutschland, 2010
- [Boe\_92] Boeck, W., Cooke, Dale et al.:  
*Diagnostic Methods for GIS Insulating Systems*  
CIGRÉ Working Group 15.03, Ref.: 15/23-01\_1992, Paris, Frankreich, 1992

- [Boe\_91] Boeck, W.:  
*Isolationssysteme metallgekapselter SF6-isolierter Schaltanlagen*  
ETG-Fachbericht 34: Gasisolierte Schaltanlagen im Mittel- und Hochspannungsnetz, Berlin, Deutschland, 1991
- [Boe\_99] Boeck, W., Albiez, M., Bengtsson, T. et al.:  
*Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method*  
CIGRÉ Working Group 15.03, Ref.: ELT\_183\_3, Paris, Frankreich, 1999
- [Böh\_05] Böhme, H.:  
*Mittelspannungstechnik, Schaltanlagen berechnen und entwerfen*  
Verlag Technik, Berlin, Deutschland, 2005
- [Bre\_04] Breuer, A.:  
*UHF-Teilentladungsmessung als Beitrag zur zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung von gasisolierten Schaltanlagen*  
Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Deutschland, 2004
- [Bua\_10] Buakaew, S.:  
*Reliability Centered Maintenance for Gas Insulated Switchgear Maintenance*  
Metropolitan Electricity Authority, Conference Proceedings CEPSI, Bangkok, Thailand, 2010
- [Che\_00] Cheung, C. N., Heil, F., Kobayashi, S. et al.:  
*Report on the Second International Survey on High Voltage Gas Insulated Substations (GIS) Service Experience*  
CIGRÉ Working Group 23.02, Ref.: 23-102\_1998, Paris; Frankreich, 2000
- [Dem\_67] Dempster, A. P.:  
*Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping*  
Annals of Mathematical Statistics, 1967
- [DIN\_12] Deutsches Institut für Normung e. V.:  
*DIN EN 62271-1 (VDE0671-1): Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, 2012

- [DIN\_11] Deutsches Institut für Normung e. V.:  
*DIN EN 62271-203 (VDE0671-203): Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 203: Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 52 kV*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, 2011
- [DIN\_05] Deutsches Institut für Normung e. V.:  
*DIN IEC 60480, VDE 0373-2: Richtlinie für die Prüfung von Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) nach Entnahme aus elektrischen Betriebsmitteln*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, 2005
- [DIN\_94] Deutsches Institut für Normung e. V.:  
*DIN EN 444 - Zerstörungsfreie Prüfung - Grundlagen für die Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen*  
Beuth Verlag, Berlin, Deutschland, 1994
- [DIN\_01] Deutsches Institut für Normung e. V.:  
*DIN EN 60270: Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, 2001
- [Dre\_04] Drescher, D.:  
*Rechnergestützte Bewertung von Betriebsmitteln für Instandhaltungsstrategien*  
Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Deutschland, 2004
- [Eis\_03] Eisenführ, F. und Weber, M.:  
*Rationales Entscheiden*  
Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 2003
- [Ele\_12] Elektropraktiker:  
*Mehr Energieeffizienz und Sicherheit in Schaltanlagen*  
Elektropraktiker Heft Nr. 6/2012, Berlin, Deutschland, 2012
- [Fei\_05] Feilhauer, W.:  
*Ein Verfahren zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel*  
Dissertation, Universität Dortmund, Deutschland, 2005
- [FGH\_01] Forschungsgemeinschaft für Elektr. Anlagen und Stromwirtschaft e.V.:  
*Technischer Bericht: Zustandsmodell für die Instandhaltungsplanung für einen 123-kV-Leistungsschalter*  
FGH, Mannheim-Rheinau, Deutschland, 2001

- [GSS\_14] Görz, G., Schneeberger, J. und Schmid, U.:  
*Handbuch der Künstlichen Intelligenz*  
Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, Deutschland, 2014
- [Gra\_09] Graber, L.:  
*Modellbasierte Bestimmung der SF6-Verlustrate in Gasisolierten Schaltanlagen*  
Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 2009
- [Gre\_01] Greim, H.:  
*BG-Information: SF6-Anlagen (BGI 753)*  
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, Deutschland, 2001
- [Gro\_04] Gross, D. und Söller, M.:  
*On-Line Teilentladungsmessungen an gasisolierten Schaltanlagen*  
ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004
- [Gün\_03] Günzler, H.:  
*IR-Spektroskopie*  
Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Deutschland, 2003
- [HHN\_97] Hajek, D. M. P. und Hoang Nguyen, P.:  
*CADIAG-2 and MYCIN-like systems*  
Artificial intelligence in medicine, 1997
- [HaR\_08] Handschin, E., Jürgens, I., Neumann C. und Rehtanz, C.:  
*Long Term Optimization for Risk Oriented Asset Management*  
16th Power Systems Computation Conference, PSCC 2008, Glasgow, Schottland, 2008
- [Han\_07] Handschin, E., Jürgens, I., Weller, J. et al.:  
*Novel Methods for the Condition Based Maintenance of Distribution Networks*  
IEEE Power Tech, Lausanne, Schweiz, 2007
- [HaL\_12] Hans, S und Lambrecht, N.:  
*Die Analyse des Auslöserstromes als Komponente einer computerunterstützten Instandhaltung von Hochspannungsleistungsschaltern*  
ETG-Fachbericht 134: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, Deutschland, 2012

- [Her\_04] Hertrich, P.H.:  
*Röntgenaufnahme-technik: Grundlagen und Anwendungen*  
Publicis Publishing, 2004
- [Hin\_02] Hinterholzer, T.:  
*Der Durchschlag in SF6 unter Einfluss der Raumladungsstabilisierung*  
Dissertation, Technische Universität München, Deutschland, 2002
- [Hiy\_99] Hiyama, T. und Tomsovic, K.:  
*Current Status of Fuzzy System Applications in Power Systems*  
IEEE SMC '99 Conference Proceedings, Tokyo, Japan, 1999
- [Hod\_09] Hodapp, W.:  
*Betriebliche Instandhaltung*  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2009
- [HRS\_06] Hoeck, S. M., Riechert, U., Strehl, T. et al.:  
*Teilentladungsortung in gasisolierten Schaltanlagen im Frequenzbereich*  
ETG-Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 2006
- [Hoe\_04] Hoeck, S. M.:  
*Partial discharge (PD) locating in gas-insulated switchgear (GIS)*  
12th Workshop on High Voltage Engineering, Lübbenau/Spreewald, Deutschland, 2004
- [Hoe\_11] Hoeck, S. M. und Neuhold, M.:  
*Tuned Medium-Band UHF PD Measurement Method for GIS*  
XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Deutschland, 2011
- [HKH\_10] Hoeck, S. M., Koch, M. und Heindl, M.:  
*Propagation mechanisms of PD pulses for UHF and traditional electrical measurements*  
IEEE Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, 2010
- [Hub\_09] Huber, C.:  
*Betriebliche Instandhaltung*  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2009

- [Hüc\_95] Hücker, T.:  
*Computergestützte Teilentladungsdiagnostik unter Berücksichtigung praxisrelevanter Randbedingungen.*  
Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, 1995
- [KaR\_14] Kaliwoda, M., Keune, B., Tomin, N. und Rehtanz, C.:  
*Fault Detection, Identification and Localization in medium-voltage networks using Fuzzy-Logic*  
Proceedings of 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Kopenhagen, Dänemark, 2014
- [Kar\_91] Karrenbauer, H. und Schramm, H.-H.:  
*Thermische und mechanische Auslegung von GIS*  
ETG-Fachbericht 34: Gasisolierte Schaltanlagen im Mittel- und Hochspannungsnetz, Berlin, Deutschland, 1991
- [KKF\_08] Kopejtkova, D., Kudoke, M. und Furuta, H.:  
*Preliminary Results from Present Cigré Survey on High Voltage Equipment Reliability*  
CIGRÉ Working Group A3-06 Tutorial, Seoul, Südkorea, 2008
- [Kra\_02] Krampe, B. und Neumann, C.:  
*Betriebserfahrung mit der UHF-TE-Messung an gasisolierten metallgekapselten Schaltanlagen (GIS)*  
ETG-Fachbericht 87: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, Deutschland, 2002
- [Kro\_12] Krontiris, A.:  
*Fuzzy systems for condition assessment of equipment in electric power systems*  
Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Deutschland, 2012
- [KrB\_09] Krontiris, T. und Balzer, G.:  
*Fuzzy and neuro-fuzzy models for condition assessment of power equipement*  
Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, Südafrika, 2009
- [Kru\_89] Krump, R.:  
*Ein störsignalresistentes Verfahren zur computergestützten Teilentladungsdiagnostik in SF6-isolierten Schaltanlagen*  
Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, 1989



- [Küc\_09] Küchler, A.:  
*Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2009
- [Küp\_14] Küppers, S.:  
*Innovation bei Westnetz – moderne Zustandsbewertung am Beispiel von gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen*  
Präsentation, 9. RWE Netzwerktage, Wesel, Deutschland, 2014
- [Kur\_02] Kurte, R.:  
*Infrarot-spektrometrische Spurengasbestimmung in für elektrische Schaltanlagen verwendetem Schwefelhexafluorid*  
Dissertation, Universität Dortmund, Deutschland, 2002
- [KGL\_04] Kuschel, M., Glaubitz, P. und Laskowski, K.:  
*Diagnoseverfahren für Hochspannungsschaltanlagen und deren Einfluss auf Life Cycle Costs*  
VDE ETG-Fachbereich 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004
- [Kus\_80] Kusumote, S., Itoh, S., Tsuchiya, Y. et al.:  
*Diagnostic Technique of Gas Insulated Substation by Partial Discharge Detection*  
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, 1980
- [Lag\_07] Lagemann, C. und Zdrallek, M.:  
*Condition Assessment of MV Transformer Substations to optimize the Investment Strategy*  
19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Wien, Österreich, 2007
- [LRB\_04] Leu, C., Reichert, F. und Berger, F.:  
*Wechselwirkungen zwischen Antrieb und Löschesystem eines SF6-Blaskolbenschalters beim Schalten großer Ströme*  
ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004
- [LiQ\_12] Li, Q., Sheng, G., Liu, Y. et al.:  
*Research of the GIS Structure Influence on Propagation Characteristic of Partial Discharge Electromagnetic Waves*  
Przegląd Elektrotechniczny, 2012

- [Liu\_09] Liu, J., Yao, M., Huang, C. et al.:  
*Research of partial discharge localization method in GIS based on UHF technique*  
WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2009
- [Lun\_90] Lundgaard, L. E., Runde, M., und Skyberg, B.:  
*Acoustic Diagnostics of gas insulated substations; a theoretical and experimental basis*  
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, 1990
- [Lun\_00] Lundgaard, L. E., Skyberg, B., Schei, A. et al.:  
*Method and Instrumentation for Acoustic Diagnoses of GIS*  
CIGRÉ Paper 15-309, Ref.: 15-309\_2000, Paris, Frankreich, 2000
- [Lun\_92] Lundgaard, L. E.:  
*Partial Discharge - Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection - Fundamental Considerations*  
IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, 1992
- [Lun\_01] Lundgaard, L. E.:  
*Particles in GIS: Characterization from Acoustic Signatures*  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, 2001
- [Mar\_06] Markalous, S. M., Zieschang, R., Strehl, T. et al.:  
*Neue Ansätze zur laufzeit-basierten Ortung von Teilentladungen in Transformatoren*  
ETG-Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 2006
- [Mei\_00] Meijer, S., Gulski, E., Wester, P. et al.:  
*Advanced Partial Discharge Diagnostics as Early Warning System to Recognise Defects in Gas-Insulated Switchgear (GIS)*  
CIGRÉ Paper 15-308, Ref.: 15-308\_2000, Paris, Frankreich, 2000
- [Mol\_92] Moloni, T., Kopejtkova, D., Kobayashi, S. et al.:  
*Twenty Five Year Review of Experience with SF6 Gas Insulated Substations (GIS)*  
CIGRÉ Paper 23 -101, Paris, Frankreich, 1992
- [Nai\_08] Naidu, M. S.:  
*Gas Insulated Substations*  
I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., Neu Dehli, Indien, 2008

- [NTY\_00] Nakano, S., Tsubaki, T. und Yoshiyuki, Y.:  
*External Diagnosis of Power Transmission and Distribution Equipment Using X-Ray Image Processing*  
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, 2000
- [Nen\_15] Nenning, A.:  
*Prüfmöglichkeiten und Ergebnisinterpretation: Prüfung von Leistungsschaltern und Analyse der Messergebnisse*  
ew Spezial I/2015, Frankfurt am Main, Deutschland; 2015
- [Neu\_00] Neumann, C., Krampe, B., Feger, R. et al.:  
*PD measurements on GIS of different designs by non-conventional UHF sensors*  
CIGRÉ Paper 15-305, Ref.: 15-305\_2000, Paris, Frankreich; 2000
- [Neu\_06] Neumann, C.:  
*Monitoring und Diagnose als Werkzeug des Assetmanagements*  
ETG-Fachtagung 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 2006
- [NeU\_98] Neumann, U.:  
*Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieversorgungsnetze*  
VDI Verlag GmbH, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 21, Düsseldorf, Deutschland, 1998
- [Oer\_12] Oerter, C., Zdrallek, M., Pawlowski, E. et al.:  
*Zustandsbewertung von gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen im Kontext einer Gesamtsystematik für das Asset-Management*  
ETG-Fachbericht 134: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, Deutschland, 2012
- [Osz\_07] Osztermayer, J.:  
*Zustandsabhängiges, risikobasiertes Asset-Management in der Energieversorgung*  
Dissertation, Universität Stuttgart, Deutschland, 2007
- [PKJ\_04] Pack, S., Körbler, B. und Jauffer, S.:  
*Zustandsbewertung von Freiluft-Trennschaltern mit Hilfe von Thermovision*  
ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004

- [Par\_08] Parthier, R.:  
*Bewertung von Messergebnissen: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*  
Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Deutschland, 2008
- [Paw\_82] Pawlak, Z.:  
*Rough Sets*  
International Journal of Computer and Information Sciences, 1982
- [EPaw\_14] Pawlowski, E., Zdrallek, M., Tabke, T. et al.:  
*Messtechnische Unterstützung der nicht-invasiven Zustandsbewertung gasisolierter Hochspannungsschaltanlagen*  
ETG-Fachbericht 144: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, Deutschland, 2014
- [EPaw\_15] Pawlowski, E., Zdrallek, M., Marx, T. et al.:  
*System-approach for realistic condition assessment of high-voltage gas-insulated substations*  
23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, Frankreich, 2015
- [EPaw\_15a] Pawlowski, E., Zdrallek, M., Tabke, T. et al.:  
*Validation of a new condition assessment approach for gas-insulated substations (GIS)*  
The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Tschechien, 2015
- [Pol\_07] Polifke, W. und Kopitz, J.:  
*Wärmeübertragung, Grundlagen, analytische und numerische Methoden* Pearson Studium, München, Deutschland, 2007
- [PNS\_96] Porzel, R., Neudert, E. und Sturm, M.:  
*Diagnostik der Elektrischen Energietechnik*  
expert verlag GmbH, Renningen, Deutschland, 1996
- [Reb\_03] Rebolledo, M.:  
*Situationsbasierte Prozessüberwachung komplexer Systeme mit Rough-Sets*  
GMA-Kongress 2003, Baden-Baden, Deutschland, 2003

- [Rie\_06] Riechert, U., Durdic, A., Kudoke, M. et al.:  
*Monitoring and Diagnostics of Gas-Insulated Switchgear - Development Trends and Range of Applications*  
ETG-Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 2006
- [Run\_12] Runde, M., Sölver, C. E., Carvalho, A. et al.:  
*Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment - Part 5 - Gas Insulated Switchgear*  
CIGRÉ Working Group A3.06, 2012
- [Ryl\_10] Ryll, F. und Götze, J.:  
*Methoden und Werkzeuge zur Instandhaltung technischer Systeme*  
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2010
- [Saa\_90] Saaty, T. L.:  
*Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation*  
RWS Publishing, Pittsburgh, USA, 1990
- [Sch\_06] Schichler, U.:  
*Anwendung der akustischen TE-Messung für die Zustandsbewertung von gasisolierten Schaltanlagen*  
ETG-Fachbericht 104: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 2006
- [Sch\_04] Schichler, U. et al.:  
*Diagnoseverfahren zur Zustandsbewertung von gasisolierten Schaltanlagen als Bestandteil des Assetmanagements*  
VDE ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004
- [Sch\_13] Schichler, U., Koltunowicz, S., Dorier, F. et al.:  
*Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics*  
CIGRÉ Brochure 525, Paris, Frankreich, 2013
- [Sch\_11] Schlegel, S.:  
*Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschiene aus Reinkupfer in der Elektroenergie-technik unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur*  
Dissertation, Technische Universität Dresden, Deutschland, 2011

- [Sco\_14] Schonert, S.:  
*Thermische Untersuchungen an gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen (GIS) zur Beurteilung von Übergangswiderständen*  
Master-Thesis, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, 2014
- [Swa\_11] Schwab, A. J.:  
*Hochspannungsmesstechnik: Messgeräte und Messverfahren*  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland, 2011
- [Scw\_07] Schwarz, R.:  
*Teilentladungsdetektion an SF6 gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen*  
Präsentation GIS Anwenderforum, Technische Universität Graz, 2007
- [Sha\_76] Shafer, G.:  
*A mathematical theory of evidence*  
Princeton University Press, London, Großbritannien, 1976
- [Sho\_76] Shortliffe, E.H.:  
*Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*  
Elsevier North Holland, Amsterdam New York, 1976
- [Sie\_09] Siemens AG:  
*GIS Condition Assessments with Thermography*  
Siemens AG, Erlangen, Deutschland, 2009
- [Spi\_93] Spies, M.:  
*Unsicheres Wissen. Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken*  
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1993
- [Spß\_09] Spieß, L.:  
*Moderne Röntgenbeugung*  
Vieweg Teubner Verlag, 2009
- [Spt\_14] Spitzenberg, K.:  
*Schaltzeitmessung an beidseitig geerdeten Leistungsschaltern: Sichere Lösung für die Schaltzeitmessung*  
ew 8/2014, Frankfurt am Main, Deutschland, 2014
- [Spr\_08] Spreckelsen, C. und Spitzer, K.:  
*Wissensbasen und Expertensysteme in der Medizin*  
Vieweg Teubner [ GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Deutschland, 2008

- [Sti\_04] Stirl, T.:  
*Online-Monitoring von kapazitiv gesteuerten Durchführungen an Leistungstransformatoren*  
ETG-Fachbericht 97: Diagnostik dielektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004
- [Stü\_02] Stürmer, J.:  
*Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien in Verteilungsnetzen*  
Dissertation, Universität Dortmund, Deutschland, 2001
- [Suw\_04] Suwanasri, T., Schnettler, A., Fricke, D. et al.:  
*Untersuchung zur Zustandsüberwachung an Hochspannungs-Leistungsschaltern*  
ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, Deutschland, 2004
- [Tak\_86] Takahashi, Y.:  
*Diagnostic Methods for Gas-Insulated Substations*  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, 1986
- [Tan\_12] Tang, J., Liu, F., Zhang, X. et al.:  
*Partial Discharge Recognition through an Analysis of SF6 Decomposition Products Part 1: Decomposition Characteristics of SF6 under Four Different Partial Discharges*  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, 2012
- [Ten\_06] Tenbohlen, S., Hoeck, S. M., Denissov, D. et al.:  
*Electromagnetic (UHF) PD Diagnosis of GIS, Cable Accessories and Oil-paper Insulated Power Transformers for Improved PD Detection and Localization*  
CIGRÉ D1-104, Ref.: D1-104\_2006, Paris, Frankreich, 2006
- [Thi\_88] Thiel, R.:  
*Computergestützte Fehlerdiagnose in teilentladungsbelasteten SF6-isolierten Schaltanlagen*  
Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, 1988
- [Val\_12] Valtin, G.:  
*Partial Discharge Measurement at service-aged switchgears for quality assurance and condition assessment*  
University of Applied Sciences Leipzig, Doble-Lemke GmbH, 2012

- [VEU\_06] Verordnung (EU):  
*Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*, 2006
- [Böc\_04] von Böckh, P.:  
*Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis*  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2004
- [Wag\_11] Wagner, W.:  
*Wärmeübertragung*  
Vogel Buchverlag, Würzburg, Deutschland, 2011
- [Wan\_00] Wang, J., Qiu, Y., Wu, X. et al.:  
*Propagation characteristics of UHF electromagnetic waves induced by partial discharge in GIS*  
Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, 2000
- [Wei\_13] Weidong, D., Wenwu, Z., Xiang, R. et al.:  
*Decomposition Characteristics of SF6 under Partial Discharges with Point-to-plane Electrode Defect*  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, 2013
- [Weiß\_10] Weißbach, W.:  
*Werkstoffkunde*  
Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2010
- [Wel\_09] Weller, J.:  
*Automatisiertes Verfahren zur systematischen Zustandsbewertung von Hochspannungsbetriebsmitteln und -netzen*  
Dissertation, Technischen Universität Dortmund, Deutschland, 2009
- [Wem\_07] Wember, M.:  
*Untersuchung und Bewertung von TE-belastetem SF6 unter Anwendung der Ionenbeweglichkeitsspektrometrie*  
Dissertation, Universität Dortmund, Deutschland, 2007
- [Yao\_98] Yao, Y.Y. und Lingras, P.J.:  
*Interpretations of belief functions in the theory of rough sets*  
Information Sciences, Vol.104, 1998



- [Zad\_65] Zadeh, L. A.:  
*Fuzzy sets*  
Information and control, Vol. 8, 1965
- [Zen\_14] Zeng, F., Tang, J., Fan, Q., Pan, J. et al.:  
*Decomposition Characteristics of SF6 under Thermal Fault for Temperatures below 400 °C*  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 21, 2014
- [Zur\_15] Zurmühlen, J.:  
*Dynamische Widerstandsmessung*  
Seminar, Haus der Technik: Diagnoseverfahren an Schaltanlagen und Transformatoren, Wesel, Deutschland, 2015



## 8 Anhang

### 8.1 Formelzeichen und Abkürzungen

#### Formelzeichen und Symbole

$\emptyset$	Leere Menge
$1 - \alpha$	Vertrauensniveau
$A, \bar{A}$	Ereignis, Gegenereignis
$A_F, B_F$	Mengen
$A_L$	Querschnittsfläche des Innenleiters
$A_M, B_M$	Elemente einer Bedingung
$A_n$	Alternative, Ereignis
$A_r$	Abweichung zum richtigen Wert
$A_R$	Menge der weiteren Attribute von Elementen
$A_S$	Systematische Abweichung
$A_{S,b}$	Bekannte systematische Abweichung
$A_{S,u}$	Unbekannte systematische Abweichung
$\underline{A}_R(X), \bar{A}_R(X)$	Untere Annäherung und obere Annäherung der Menge $X$
$\underline{A}_{i,j}(X), \bar{A}_{i,j}(X)$	Untere Annäherung und obere Annäherung der Menge $X$ in Bezug auf die Bewertungsmethode $j$ innerhalb der Ebene $i$
$ \underline{A}_R(X) $	Anzahl der in der unteren Annäherung der Menge $X$ enthaltenen Elemente
$ \underline{A}_{i,j}(F) $	Anzahl der in der unteren Annäherung der Menge $F$ enthaltenen Elemente in Bezug auf die Bewertungsmethode $j$ innerhalb der Ebene $i$
$ \bar{A}_R(X) $	Anzahl der in der oberen Annäherung der Menge $X$ enthaltenen Elemente
$ \bar{A}_{i,j}(F) $	Anzahl der in der oberen Annäherung der Menge $F$ enthaltenen Elemente in Bezug auf die Bewertungsmethode $j$ innerhalb der Ebene $i$
$ \bar{A}_{6,k}(F) $	Anzahl der in der kombinierten oberen Annäherung der Menge $F$ mehrerer Bewertungsmethoden enthaltenen Elemente
$B$	Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung
$B_B$	Bewertungsergebnis von Bewertungskriterien
$B_m$	Bedingung von Fuzzy-Logik bzw. „MYCIN“
$B_{\text{norm}}$	Normiertes Bewertungsergebnis der Eingangsdatenbewertung

$B_U$	Bewertungsergebnis von Unterkategorien
$Bel(A)$	Glaubensgrad „degree of belief“
$Bel_{i,j}(A)$	Glaubensgrad „degree of belief“ in Bezug auf das Element $j$ der Ebene $i$
$BG(B)$	Bewertungsungenauigkeit
$BND_{A_R}(X)$	Grenzregion der Teilmengen der Rough-Set-Theorie
$c_0$	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$C_h$	Hohlraumkapazität
$C_p$	Prüflingskapazität
$C_s, C_0$	Teilkapazitäten
$CF$	Sicherheitsfaktor
$CF(B_m)$	Sicherheitsfaktor einer Bedingung
$CF(B_m \rightarrow K)$	Sicherheitsfaktor einer Regel
$CF(K)$	Sicherheitsfaktor einer Schlussfolgerung
$d_{rel}$	Relative Detektierbarkeit
$d_{rel, akustisch}$	Relative Detektierbarkeit der akustischen Teilentladungsmessung
$d_{rel, UHF}$	Relative Detektierbarkeit der UHF-Teilentladungsmessung
$ D $	Anzahl detektierter Fehler
$e_z$	Faktor zur Aufteilung der Unsicherheit
$F$	Menge der relevanten Fehler
$ F $	Anzahl der relevanten Fehler
$G_B$	Gewichtungsfaktor von Bewertungskriterien
$G_U$	Gewichtungsfaktor von Unterkategorien
$\Theta$	Betrachtungsrahmen der Evidenz-Theorie
$i$	Ebene der Gesamtsystematik
$I$	Stromstärke
$j$	Zähler der Elemente innerhalb der Ebene $i$
$k$	Anzahl der Wiederholung einer Messreihe
$K$	Konklusion bzw. Schlussfolgerung, die einer Bedingung folgt
$L$	Länge eines betrachteten Leiterelements
$\mu$	Charakteristische Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Menge
$m$	Basismaß bzw. Massezahl

$m_{i,t_0}(A)$	Zeitlich angepasste Massezahl
$m_{i,m}(A)$	Zeitlich unangepasste Massezahl
$m_{i,j}(A)$	Massezahl des Elements $j$ innerhalb der Ebene $i$
$M$	Messergebnis
$MB$	Grad der Zustimmung „measure of belief“ („MYCIN“)
$MD$	Grad der Ablehnung „measure of disbelieve“ („MYCIN“)
$n$	Anzahl der betrachteten Elemente
$p(A), p(\bar{A})$	Eintrittswahrscheinlichkeiten für $A$ und $\bar{A}$
$Pl(A)$	Plausibilitätsgrad „degree of plausibility“
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand
$Q$	Elektrische Ladung
$Q_s$	Scheinbare Ladung
$\dot{Q}_K$	Wärmestrom durch Konvektion
$\dot{Q}_L$	Wärmestrom durch Wärmeleitung
$\dot{Q}_S$	Wärmestrom durch Strahlung
$\dot{Q}_V$	Verlustwärmestrom
$R$	Elektrischer Widerstand
$R_i$	Risiko
$s$	Empirische Standardabweichung
$s_{\bar{x}}$	Empirische Standardabweichung des Mittelwerts
$t$	t-Faktor
$t_0$	Zeitpunkt der Zustandsbewertung
$t_n$	Eingangsdatenalter in Jahren
$\Delta t$	Laufzeitunterschied
$T$	Teilmengen des Betrachtungsrahmens $\Theta$ der Evidenz-Theorie
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$T_B$	Betrachtungsrahmen des Universums der der Evidenz-Theorie in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses $B$ mit $T_B = \{A_B, \bar{A}_B, U_B\}$
$u(x)$	Standardunsicherheit
$\Delta u$	Spannungseinbruch an den Prüflingsklemmen
$\Delta u_h$	Spannungseinbruch am Hohlraum

---

$U$	Unsicherheit der Evidenz-Theorie
$\Delta U$	Unsicherheitsintervall
$U_d$	Durchschlagspannung
$ U_{i,j} $	Anzahl der im Universum $U_{i,j}$ enthaltenen Elemente
$U_R$	Universum der Rough-Set-Theorie
$UW(B)$	Höhe der Unwissenheit
$v$	Vertrauensintervall
$V$	Versuchsreihe
$V_d$	Verhältnis der relativen Detektierbarkeiten der akustischer und UHF-Teilentladungsmessung
$\bar{\vartheta}_L$	Mittlere Leitertemperatur
$\bar{\vartheta}_{SF6}$	Mittlere SF <sub>6</sub> -Gastemperatur
$\bar{\vartheta}_U$	Mittlere Umgebungstemperatur
$x$	Elemente der Menge $X$
$\bar{x}$	Empirischer Mittelwert
$x_M$	Gemessener Wert
$x_r$	Richtiger Wert
$x_w$	Wahrer Wert
$X$	Beliebige Teilmenge
$X_1$	Abstand von Sensor 1 zum Fehlerort
$X_2$	Abstand von Sensor 2 zum Fehlerort
$X_{12}$	Abstand zwischen den Sensoren 1 und 2
$X^R$	Äquivalenzklasse
$y$	Interessierende Größe
$Z_B$	Zustandsindex der konventionellen Bewertungssystematik
$Z_{1,co}$	Chancenorientierter Zustandsindex des entwickelten Modells
$Z_{1,t}$	Trendorientierter Zustandsindex innerhalb des entwickelten Modells
$Z_{1,z}$	Zustandsindex innerhalb des entwickelten Modells

**Abkürzungen**

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
Bspw.	Beispielsweise
CF <sub>4</sub>	Tetrafluormethan
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Reseaux Électriques</i>
Ggf.	Gegebenenfalls
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
HF	Flusssäure
I.d.R.	In der Regel
IR	Infrarot
K.A.	Keine Angabe möglich
$\varphi, Q, n$	TE-Darstellungsform, welche Phasenlage, Entladungshöhe und Häufigkeit der Teilentladungsimpulse abbildet
PRPDA	<i>Phase Resolved Partial Discharge Analysis</i>
RFID	<i>Radio-frequency identification</i>
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SOF <sub>2</sub>	Thionylfluorid
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Sulfurylfluorid
TE	Teilentladung
TEM	Transversal-elektromagnetisch
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
Z.B.	Zum Beispiel

## 8.2 Struktur und Massezahlen der Gesamtsystematik

Dieser Teil des Anhangs zeigt in Tabelle 18 den Aufbau der entwickelten Gesamtsystematik zur Zustandsbewertung eines Schaltfelds in tabellarischer Form. Die in Abschnitt 3.1 eingeführte Struktur wird hier vollständig dargestellt. Zusätzlich sind die Maximalwerte der verwendeten Massezahlen spezifisch je Bewertungsmethode dargestellt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Ihre Höhe variiert in Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses sowie der zugehörigen Randbedingungen wie z.B. der Sensorart etc.

Tabelle 18: Struktur und Massezahlen der Gesamtsystematik

Schaltfeldfunktion	Hauptkomponente	Baugruppe	Parameter	Bewertungsmethode	$m_{6j}(A)$ (max.) <sup>*</sup>	$m_{6j}(\bar{A})$ (max.) <sup>*</sup>			
Spannung halten	Innere Gasräume inkl. Feststoffe	-	Teilentladungsfreiheit	Akustische TE-Messung	0,9	0,64			
				UHF-TE-Messung	0,9	0,79			
				Konventionelle TE-Messung	0,9	0,9			
	SF <sub>6</sub> -Gas (Isoliergas)	-	SF <sub>6</sub> -Gasqualität	Gasanalysator (SF <sub>6</sub> -Gasanalyse)	0,8	0,8			
				Vol.-% + Röhrrchen (SF <sub>6</sub> -Gasanalyse)	0,9	0,9			
				Dichtheit	Visuelle Inspektion	0,99			
				Leckrate	0,9	0,9			
				Lecksuche	0,9	0,7			
		Sättigungsgrad	Ermittlung des Sättigungsgrads des Filters	0,9	0,45				
Strom führen	-	-	Kontakterwärmung	Thermographie	0,8	0,6			
				RFID-Thermoobservation	0,8	0,6			
				Spannungsfallmessung	0,45	0,9			
Fehlerstrom ausschalten / Strom und Spannung schalten	Federspeicherantrieb	Gesamt	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99				
				Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99		
				Funktion der mechanischen Schaltstellungsanzeige	0,999	0,99			
		Auslöser	-	Mindestbetätigungsspannung	Spannungsmessung der Auslösespannung	0,9	0,9		
					Widerstand der Spule	Widerstandsanalyse der Auslösespule	0,9	0,9	
					Kurvenform der Strom-Zeit-Messung des Auslösestroms	Strom-Zeit-Analyse des Auslösestroms	0,9	0,9	
		Antriebsstrang	-	Energieübertragung	Weg-Zeit-Analyse	0,9	0,9		
					Energiespeicher	Energieaufladung	Strom-Zeit-Analyse des Motorstroms	0,9	0,9
					Aufzugsmotor	-	Aufzugzeit	Zeitmessung zwischen Ansteuerung und Absteuerung	0,9
Energieübertragung	Strom-Zeit-Analyse des Motorstroms	0,9	0,9						

<sup>\*</sup>Maximal mögliche Massezahl in Abhängigkeit der Bewertung, Nebenbedingungen etc.



Tabelle 18: Struktur und Massezahlen der Gesamtsystematik (Fortsetzung)

Schaltfeldfunktion	Hauptkomponente	Baugruppe	Parameter	Bewertungsmethode	$m_{6j}(A)$ (max.)*	$m_{6j}(\bar{A})$ (max.)*	
Fehlerstrom ausschalten / Strom und Spannung schalten	Hydraulikantrieb	Gesamt	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99		
			Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99	
				Funktion mech. Schaltstellungsanzeige	0,999	0,99	
			Innere Hydraulikleckage	Leckageanalyse	0,9	0,9	
		Auslöser	Mindestbetätigungsspannung	Spannungsmessung der Auslösespannung	0,9	0,9	
			Widerstand der Spule	Widerstandsanalyse der Auslösespule	0,9	0,9	
			Bewegung des Auslösers	Strom-Zeit-Analyse des Auslösestroms	0,9	0,9	
		Antriebsstrang	Energieübertragung	Weg-Zeit-Analyse	0,9	0,9	
		Energiespeicher	N <sub>2</sub> -Füllmenge	Messung Vorspanndruck Öl-Seite	0,8	0,9	
				Direkte Druckmessung am Hydrospeicher	0,9	0,9	
		Pumpenmotor	Aufzugzeit	Zeitmessung zwischen Ansteuerung und Absteuerung	0,9	0,9	
			Energieübertragung	Strom-Zeit-Analyse des Motorstroms	0,9	0,9	
		Hydraulik-Öl	Hydraulikölmenge	Visuelle Inspektion	0,99	0,99	
			Hydraulikölqualität	Visuelle Inspektion	0,8	0,8	
		Druckschalter	Druckschaltpunkte	Messung der Druckschaltpunkte	0,9	0,9	
		Schaltkammer	Kontaktsystem	Kontaktgleichlauf EIN	Digitale Schaltzeitenmessung	0,8	0,8
					Dynamische Schaltzeitenmessung	0,9	0,9
				Kontaktgleichlauf AUS	Digitale Schaltzeitenmessung	0,7	0,7
					Dynamische Schaltzeitenmessung	0,9	0,9
				Länge des Abbrandkontakts	Dynamische Schaltzeitenmessung	0,9	0,9
				Vermessung des Kontakts	0,99	0,99	
		Löschsystem	SF <sub>6</sub> -Gasqualität	Gasanalysator (SF <sub>6</sub> -Gasanalyse)	0,8	0,8	
				Vol.-% + Röhrchen	0,9	0,9	
Strom oder Spannung schalten	Elektrischer Antrieb	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99		
			Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99	
				Funktion mech. Schaltstellungsanzeige	0,999	0,99	
			Bewegung des Antriebs	Strom-Zeit-Analyse des Motorstroms	0,9	0,9	
Aktiveile erden	Elektrischer Antrieb	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99		
			Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99	
				Funktion mech. Schaltstellungsanzeige	0,999	0,99	
			Bewegung des Antriebs	Strom-Zeit-Analyse des Motorstroms	0,9	0,9	
Kabel entladen	Elektrischer Antrieb	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,999		
			Unversehrtheit des Energiespeichers	Visuelle Inspektion	0,999		
			Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99	
				Funktion mech. Schaltstellungsanzeige	0,999	0,99	
			Bewegung des Antriebs	Strom-Zeit-Analyse des Motorstroms	0,9	0,9	

\*Maximal mögliche Massezahl in Abhängigkeit der Bewertung, Nebenbedingungen etc.

Tabelle 18: Struktur und Massezahlen der Gesamtsystematik (Fortsetzung)

Hauptfunktion	Hauptkomponente	Baugruppe	Parameter	Bewertungsmethode	$m_{6j}(A)$ (max.)*	$m_{6j}(\bar{A})$ (max.)*
Über- span- nung abbauen	-	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99	0,7
Strom messen	-	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99	0,7
Span- nung messen	-	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99	0,7
Steuerung und Überwachung sicherstellen	Funktions- kontrollen	Dichte- wächter / Druck- schalter	Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99
		Manometer	Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99
		Schaltfehler- schutzgerät	Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99
		Meldungen	Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99
		Verriegelungen	Generelle Funktion	Funktionskontrolle	0,999	0,99
	Visuelle Inspektion	-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99	
Netzan- schluss her- stellen		-	Äußere Unversehrtheit	Visuelle Inspektion	0,99	0,7

\*Maximal mögliche Massezahl in Abhängigkeit der Bewertung, Nebenbedingungen etc.

### 8.3 Gewichtungsfaktoren der Gesamtsystematik

Dieser Teil des Anhangs zeigt in Tabelle 19 die Gewichtungsfaktoren, welche in den Ebenen 3 bis 5 verwendet werden. Diese Gewichtungsfaktoren basieren auf heuristischen Ansätzen. Expertenwissen wurde zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren integriert. Der zugehörige Anwendungsbereich sowie die Aggregation mit Gewichtungsfaktoren werden in Abschnitt 3.2.2.6 dargestellt.

Tabelle 19: Gewichtungsfaktoren der Gesamtsystematik

Schaltfeldfunktion	Hauptkomponente	Gewichtungsfaktor $G_{3,j}$	Baugruppe	Gewichtungsfaktor $G_{4,j}$	Parameter	Gewichtungsfaktor $G_{5,j}$
Spannung halten	Innere Gasräume inkl. Feststoffe	0,75	-	1,00	Teilentladungsfreiheit	1,00
	SF6-Gas (Isoliergas)	0,25	-	1,00	SF6-Gasqualität	0,72
					Dichtheit	0,22
					Sättigungsgrad	0,06
Strom führen	Statisches Kontaktsystem	1,00	-	1,00	Kontakterwärmung	1,00
Fehlerstrom ausschalten / Strom und Spannung schalten	Federspeicherantrieb	0,83	Gesamt	0,61	Äußere Unversehrtheit	0,13
					Generelle Funktion	0,88
			Auslöser	0,19	Mindestbetätigungsspannung	0,20
					Widerstand der Spule	0,07
					Kurvenform der Strom-Zeit-Messung des Auslösestroms	0,73
			Antriebsstrang	0,13	Energieübertragung	1,00
			Energiespeicher	0,03	Energieaufladung	1,00
			Aufzugsmotor	0,03	Aufzugzeit	0,50
					Energieübertragung	0,50
	Hydraulikantrieb	0,83	Gesamt	0,48	Äußere Unversehrtheit	0,13
					Generelle Funktion	0,81
					Innere Hydraulikleckage	0,06
			Auslöser	0,17	Mindestbetätigungsspannung	0,20
					Widerstand der Spule	0,07
					Bewegung des Auslösers	0,73
			Antriebsstrang	0,13	Energieübertragung	1,00
			Energiespeicher	0,09	N <sub>2</sub> -Füllmenge	1,00
			Pumpenmotor	0,04	Aufzugzeit	0,5
					Energieübertragung	0,5
			Hydrauliköl	0,04	Hydraulikölmenge	0,83
				Hydraulikölqualität	0,17	
		Druckschalter	0,04	Druckschaltpunkte	1	

Tabelle 19: Gewichtungsfaktoren der Gesamtsystematik (Fortsetzung)

Schaltfeldfunktion	Hauptkomponente	Gewichtungsfaktor $G_{3,j}$	Baugruppe	Gewichtungsfaktor $G_{4,j}$	Parameter	Gewichtungsfaktor $G_{5,j}$
Fehlerstrom ausschalten / Strom und Spannung schalten	Schaltkammer	0,17	Kontaktsystem	0,75	Kontaktgleichlauf EIN	0,20
					Kontaktgleichlauf AUS	0,70
					Länge des Abbrandkontakts	0,10
			Löschsystem	0,25	SF <sub>6</sub> -Gasqualität	1,00
Strom oder Spannung schalten	Elektrischer Antrieb	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	0,06
					Generelle Funktion	0,63
					Bewegung des Antriebs	0,31
Aktivteile erden	Elektrischer Antrieb	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	0,06
					Generelle Funktion	0,63
					Bewegung des Antriebs	0,31
Kabel entladen	Elektrischer Antrieb	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	0,05
					Unversehrtheit des Energiespeichers	0,05
					Generelle Funktion	0,58
					Bewegung des Antriebs	0,32
Überspannung abbauen	-	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	1,00
Strom messen	-	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	1,00
Spannung messen	-	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	1,00
Steuerung und Überwachung sicherstellen	Funktionskontrollen	0,9	Dichtewächter / Druckschalter	0,39	Generelle Funktion	1,00
			Manometer	0,03	Generelle Funktion	1,00
			Schaltfehler-schutzgerät	0,06	Generelle Funktion	1,00
			Meldungen	0,26	Generelle Funktion	1,00
			Verriegelungen	0,23	Generelle Funktion	1,00
	Visuelle Inspektion	0,1	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	1,00
Netzanschluss herstellen	-	1,00	-	1,00	Äußere Unversehrtheit	1,00

## 8.4 Aggregierte Detektierbarkeit der unkonventionellen TE-Messung

Dieser Teil des Anhangs enthält eine Aufstellung der untersuchten Konstellationen der akustischen und UHF-Teilentladungsmessung zur Ermittlung der zugehörigen Detektionsfähigkeit. Hierzu werden die Messergebnisse analysiert, tabellarisch erfasst und anhand des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses kategorisiert. Tabelle 20 zeigt die zugehörige Legende für Tabelle 21, welche die Aufstellung der Detektierbarkeit in Abhängigkeit der verschiedenen Sensorarten sowie deren Positionen enthält.

**Tabelle 20: Legende zur Übersicht der Detektierbarkeit der unkonventionellen TE-Messung**

Sensorpositionen:	I-IV 1-6	Akustische TE-Messung UHF-TE-Messung
UHF-Sensorart:	UHF 1 UHF R 1,2,4,6 3 5	Hersteller 1 Hersteller 2 Sensor für Schottisolator Fenstersensor Interner Sensor
Detektierbarkeit:	0	Nicht detektierbar*
	1	Schwache Detektierbarkeit*
	2	Mittlere Detektierbarkeit*
	3	Gute Detektierbarkeit*
	Ja	Fehlerart allgemein detektierbar
	Nein	Fehlerart allgemein nicht detektierbar
*Einteilung durch Signal-zu-Rausch-Verhältnis		









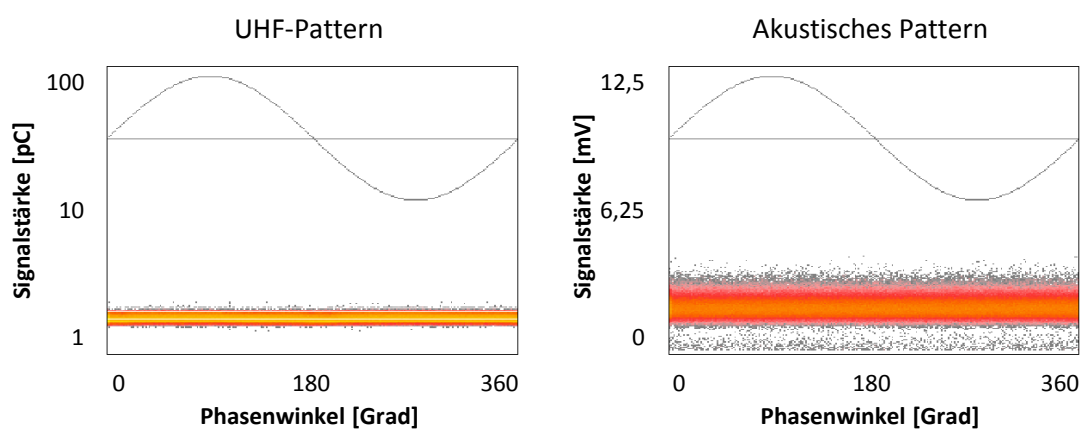


## 8.5 Beispielpattern der unkonventionellen TE-Messung

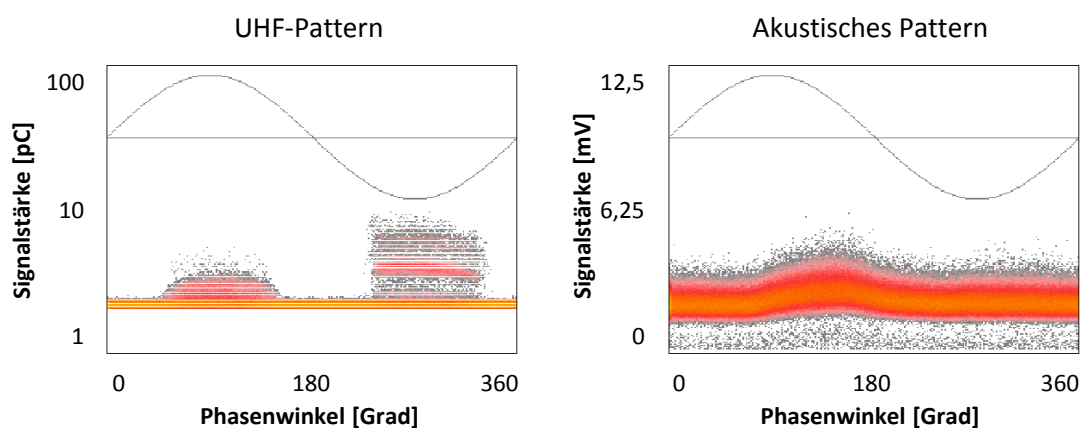
In diesem Teil des Anhangs werden beispielhaft aufgezeichnete Pattern ausgewählter Fehlerarten der unkonventionellen Verfahren zur Teilentladungsmessung dargestellt. Grundsätzlich sind die Darstellungen nach Einzelfehlern und Fehlerkombinationen, bei denen gleichzeitig mehrere Fehlstellen installiert werden, kategorisiert.

### Einzelfehler:

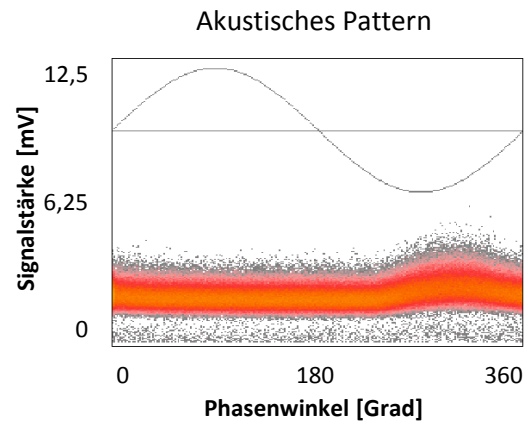
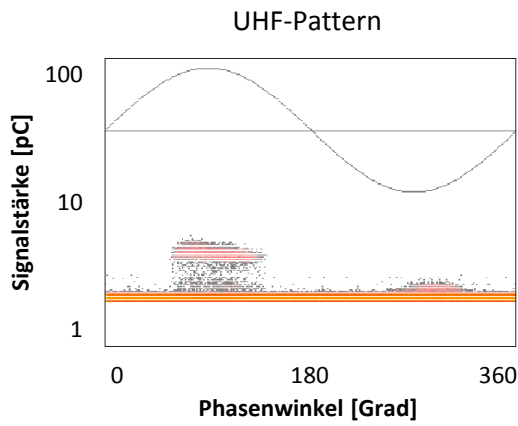
Messung ohne Fehler (Grundrauschen):



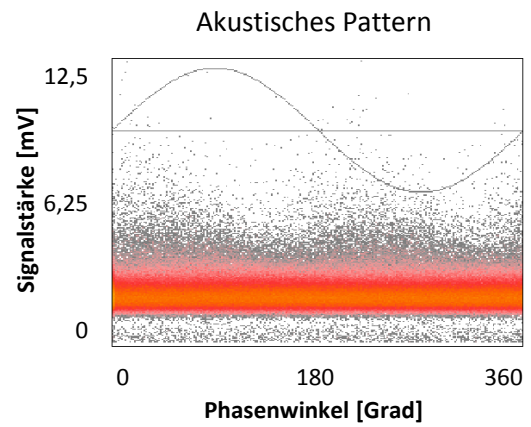
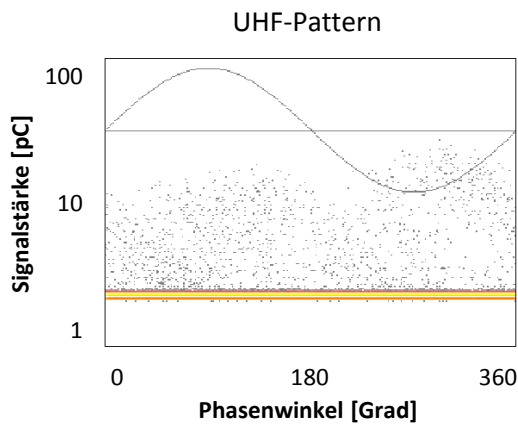
Spitze auf Hochspannungspotential:



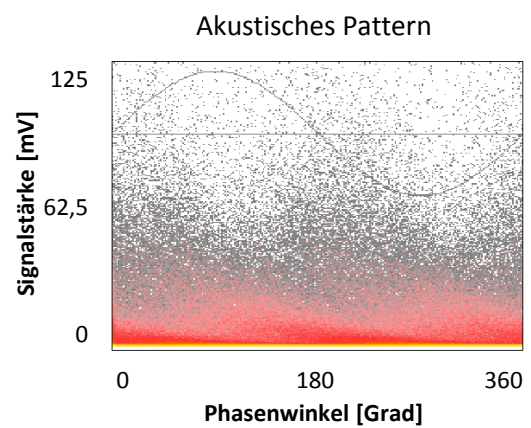
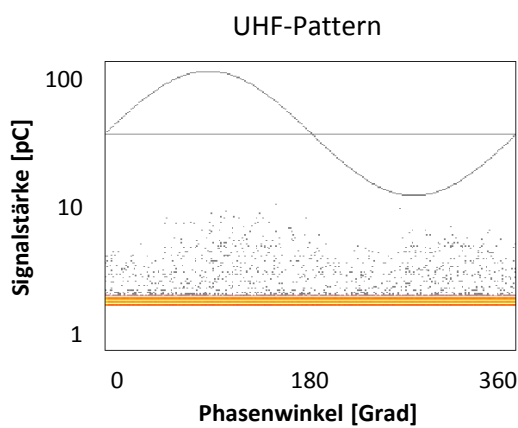
Spitze auf Erdpotential:



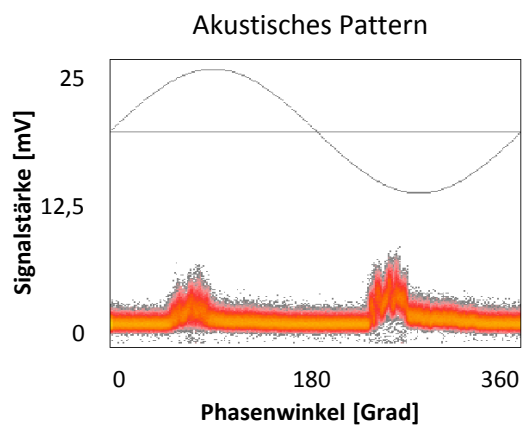
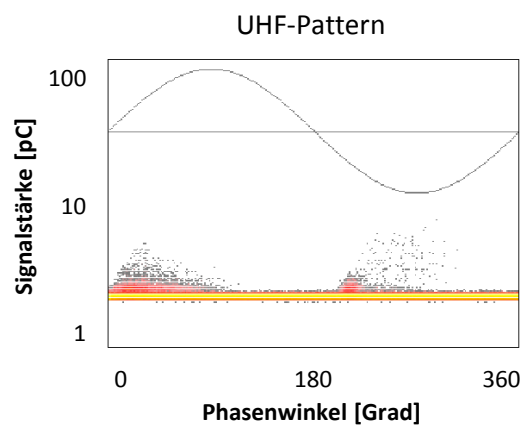
Freie Partikel auf Hochspannungspotential:



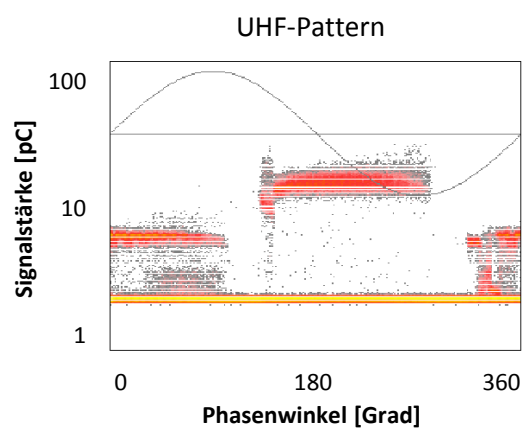
Freie Partikel auf Erdpotential:



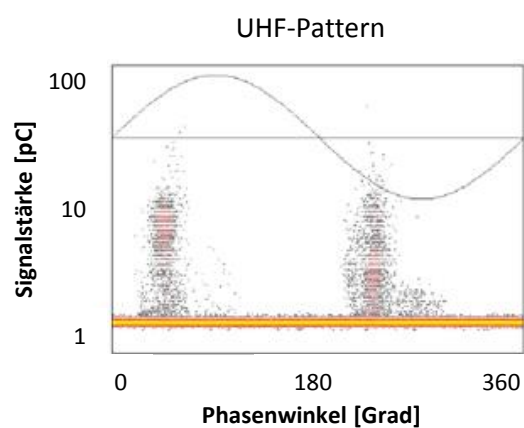
Partikel auf Isolator:



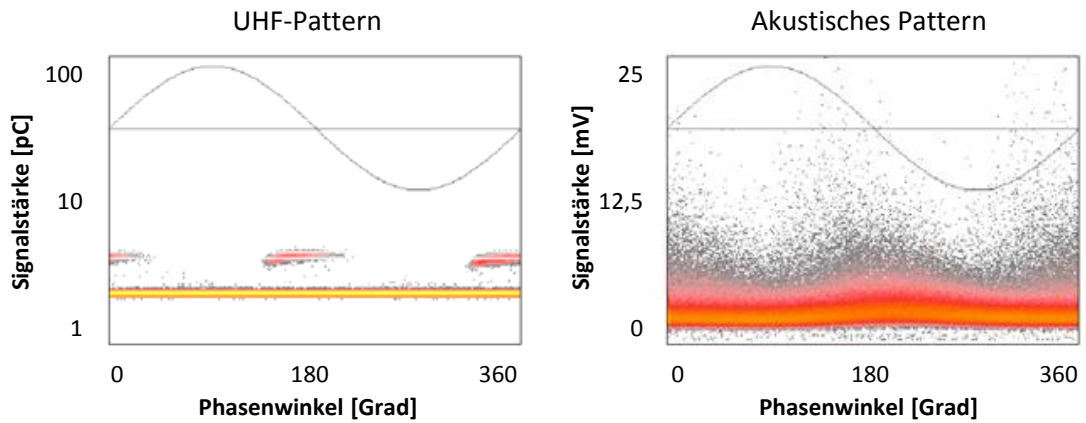
Fehlstelle im Isolator (Gaseinschluss):



Ablösung (Gas):

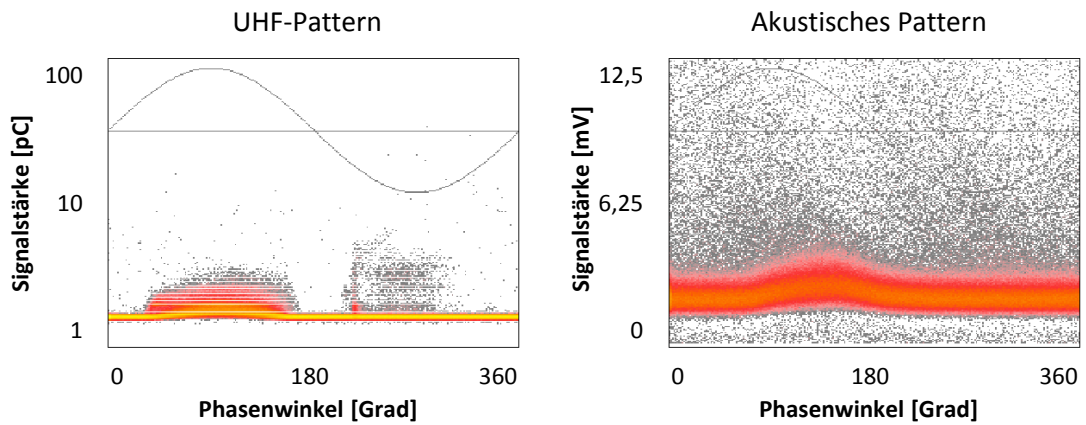


Ablösung (Metall auf freiem Potential):

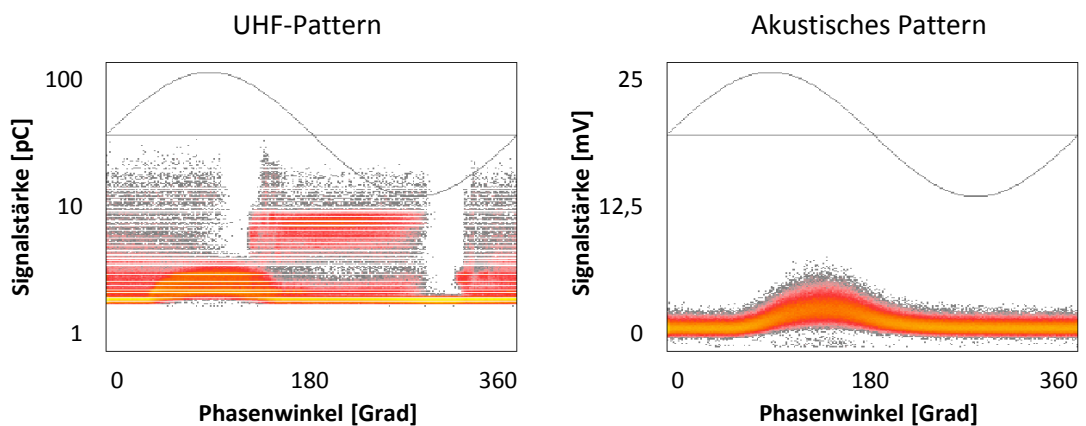


Fehlerkombinationen:

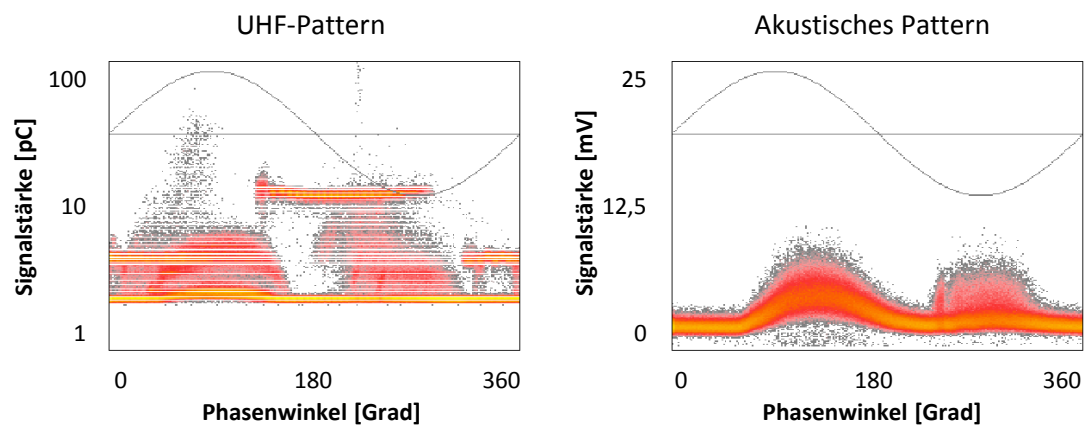
Spitze auf Hochspannungspotential und freie Partikel:



Gaseinschlüsse und Spitze auf Hochspannungspotential:



Partikel auf Isolator, Gaseinschluss und Spitze auf Hochspannungspotential:



Gaseinschluss, freie Partikel und Partikel auf Isolator:

