

Die Ionenstrommessung als Diagnosemethode an HVDC-Systemen unter Verwendung empirischer und evidenztheoretischer Auswertungsverfahren

von der

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

der

Technischen Universität Dortmund

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Saskia Düsdieler, M.Sc.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau, Technische Universität Dortmund

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Gabriele Kern-Isberner, Technische Universität
Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 29. September 2025

Vorwort und Danksagung

Aus dem Interesse an Diagnosemethoden der Hochspannungstechnik und Ionenströmen an HVDC-Betriebsmitteln entstand zwischen 2020 und 2025 die vorliegende Dissertation am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik der TU Dortmund.

Daher gilt mein Dank dem Lehrstuhlinhaber, Herrn Professor Dr.-Ing. Frank Jenau, der mir die Möglichkeit gegeben hat, dieses Interesse in meiner Promotion zu verfolgen. Darüber hinaus bedanke ich mich sowohl für die fachlichen Diskussionen als auch für die Möglichkeiten zur persönlichen Weiterentwicklung.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Professor Dr. rer. nat. Gabriele Kern-Isberner für den regelmäßigen und intensiven Austausch zur evidenztheoretischen Modellierung und das Interesse an meiner Arbeit.

Außerdem danke ich den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Christian Wöhler und Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Pfof (Vorsitz).

Mein besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, mit denen ich sowohl fachliche Diskussionen führen als auch kollegial und freundschaftlich zusammenarbeiten konnte. Vor allem Herrn Tobias Kuhnke, Herrn Steffen Kreis und Herrn Karsten Schloßer danke ich für die Zusammenarbeit, aus der Veröffentlichungen und Beiträge zu dieser Dissertation und weiteren Forschungsfeldern entstanden sind. Auch Herrn Jannik Sobottka und Herrn Bastian Zimmer danke ich für die zahlreichen Fachdiskussionen und den Austausch von Ideen. Darüber hinaus danke ich ebenfalls den Technikern, Verwaltungsangestellten und allen Studierenden, die im Rahmen von studentischen Arbeiten an dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Außerdem danke ich auch Herrn Ralf Gäer für die wertvollen Anregungen, seinen persönlichen Einsatz für unsere gemeinsamen Forschungen und seine Offenheit für Forschungsideen. Auch Frau Alicja Skarbinska soll an dieser Stelle mein Dank für die Unterstützung in Projektdiskussionen gelten.

Abschließend danke ich Yessenia und Steffi für die Unterstützung, Aufmunterungen und die Freundschaften, die über das Studium weit hinausgingen. Besonders möchte ich auch Tom danken, der mich mit Vertrauen und Hingabe begleitet und unterstützt hat.

Dortmund, Mai 2025

Saskia Düsdieler

Übersicht

Der Ausbau des Energieübertragungsnetzes mit Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) erfordert zuverlässige Monitoring- und Diagnosesysteme, um einen stabilen Langzeitbetrieb und somit die gesetzlich geforderte Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Zu den systemkritischen Komponenten gehören u. a. gasisolierte Betriebsmittel, die entweder mit Schwefelhexafluorid oder einem alternativen Isoliergas betrieben werden. Da Diagnosen für Isoliergas-gefüllte Betriebsmittel entweder invasiv oder für Gleichspannung noch Gegenstand aktueller Forschungen sind, untersucht diese Arbeit die Eignung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode.

Dazu wird ein Konzept inkl. technischer Spezifikationen entwickelt und an einer Spitze-Platten-Anordnung, Koaxialanordnung und einem RC-Spannungsteiler (in SMD-Bauweise in Helixform) unter Laborluft angewandt. Anhand von Referenzdaten erfolgen Vergleiche mit Fehlerprüfungen, die typische Fehlerfälle der Aufbauten nachbilden. Weiterführend sind Messergebnisse mittels empirischen Modells in Anlehnung an Datenauswertungen basierend auf Teilentladungen ausgewertet. Daneben sind evidenztheoretische Modelle dargestellt, die zur Fehlerdetektion und Ursachenunterscheidung unter Berücksichtigung der Datenfusion mit einem Koronaskop geeignet sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ionenstrommessung auf elektrische Feldverzerrungen reagiert und somit auf typische Fehler in den gewählten Aufbauten hinweist. Der Informationsgehalt der Ionenstrommessung wird weiterführend durch die Datenfusion mit Informationen aus Koronaskop-Aufnahmen ergänzt. Darüber hinaus eignen sich beide Modelltypen zur Datenauswertung, zum Stellen einer Diagnose und Risikoermittlung bzgl. des Ausfalls der jeweiligen Anordnung. Somit ist die Ionenstrommessung als Alternative zur Teilentladungsmessung für isoliergasgefüllte HVDC-Systeme anwendbar. Besonders die einfache Handhabung der Ionenstrommessung und die Auswertung durch empirische und evidenztheoretische Modelle ermöglicht die Anwendung durch Fachpersonal ohne umfangreiches Expertenwissen. Ausblickend ist die Ionenstrommessung als Diagnosemethode auch automatisiert durchführbar und stellt damit ein Diagnosewerkzeug für HVDC-Anwendungen dar.

Abstract

The expansion of the energy transmission grid with high-voltage direct current transmission (HVDC) requires reliable monitoring and diagnostic systems to ensure stable long-term operation of the grid. Thus, the transmission system operators ensure the legally required security of supply. System-critical components include gas-insulated equipment that works with sulfur hexafluoride (SF_6) or an alternative gas insulation. As diagnostics for gas-insulated equipment are either invasive or still the subject of current research for HVDC equipment, this work investigates the suitability of the ion current measurement as a diagnostic method.

For this purpose, a concept including technical specifications of the ion current measurement is presented and qualified on a needle-to-plate setup, coaxial arrangement, and an RC voltage divider (of SMD design in helix form) with laboratory air. To receive a diagnosis regarding each setup's condition, fault tests simulate typical faults of the chosen arrangements, and the derived data leads to failure predictions in comparison to the reference condition of the setup or rather a rating of the arrangements' conditions. Continuing, measurement results of fault tests are analyzed using an empirical model based on a risk model focusing on partial discharges as condition markers. Besides, two evidence-theoretical models are presented that are suitable for fault detection and fault distinction, considering data fusion of the ion current measurement with a corona scope.

Thus, the ion current measurement is supplemented by data from the corona scope, leading to more extensive knowledge regarding the diagnosis and evaluation of the fault test. Both types of models show that the ion current measurement reacts to electric field distortions and thus indicates typical faults in the selected setups. This behavior matches with the literature. Additionally, both model types are suitable for data evaluation, diagnosis and risk assessment concerning the likelihood of a failure of each arrangement. Therefore, the ion current measurement is suitable as an alternative to partial discharge measurements for gas-insulated HVDC equipment. Especially, the simple handling of the ion current measurement, the non-invasive measurement equipment, and the evaluation using empirical and evidence-theoretical models allows the ion current measurement to be used by diagnosticians without extensive expert knowledge. Thus, the ion current measurement supplements the wide range of diagnostic tools for gas-insulated HVDC equipment.

Inhaltsverzeichnis

1	Stand von Wissenschaft und Technik	3
1.1	Kriterien für Diagnoseverfahren.....	3
1.1.1	Fehlerdetektion mit einer TE-Messung nach DIN EN 60270	4
1.1.2	Definitionen der Zustandsbewertung	5
1.2	Fehlerbilder für gasisolierte Systeme	6
1.2.1	Fehler in gasisolierten Leitungen (GIL) und Schaltanlagen (GIS)	8
1.2.2	Fehler in gasisolierten SMD-basierten RC-Spannungsteilern	9
1.3	Ionenstrom und Ionenstrommessung	11
1.4	Modellierungsgrundlagen von Ausfallrisiken	15
1.4.1	Grundlagen der empirischen Risikomodellierung der CIGRÉ.....	16
1.4.2	Grundlagen der Evidenztheorie.....	17
2	Die Ionenstrommessung als Diagnosemethode	21
2.1	Spezifikationen der Ionenstrommessung für Diagnosen.....	21
2.1.1	Erfüllung allgemeiner Kriterien.....	21
2.1.2	Technische Spezifikationen	22
2.2	Anwendung der Ionenstrommessung	24
2.2.1	Anwendungskonzept.....	24
2.2.2	Aufbau & Durchführung an einer GIL.....	27
2.2.3	Aufbau & Durchführung an einem RC-Spannungsteiler	31
2.2.4	Aufbau & Durchführung an einer Spitze-Platte-Anordnung.....	32
2.3	Charakteristische Größen der Ionenstrommessung: Kenngrößen des Abnutzungsvorrats	33
2.4	Charakteristische Größen des Abnutzungsvorrats zur evidenztheoretischen Modellbildung	36
3	Risikomodellierung auf Basis der Ionenstrommessung	39
3.1	Empirische Risikomodellierung.....	40

3.2	Evidenztheoretische Risikomodellierung.....	43
3.2.1	Das Fehlerdetektionsmodell.....	46
3.2.2	Das Fehlerursachenmodell.....	53
3.2.3	Diagnoseergebnisse für die Spitze-Platte-Anordnung.....	63
4	Die Ionenstrommessung zur Diagnose.....	71
4.1	Untersuchung der Anwendungskriterien.....	71
4.1.1	Diskussion der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats – Einfluss auf den Abnutzungsvorrat.....	76
4.1.2	Bewertung der technischen Spezifikationen.....	79
4.2	Einordnung der Ionenstrommessung neben der UHF-TE-Messung.....	82
4.3	Bewertung der Eignung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren für HVDC-Systeme.....	83
5	Reaktion der Ionenstrommessung auf typische Fehlerbilder.....	85
5.1	Ionenstrommessungen für typische Fehler einer GIL.....	85
5.1.1	Einfluss der Geometrie.....	85
5.1.2	Einfluss der Partikelmenge.....	88
5.1.3	Einfluss der Partikelposition.....	89
5.1.4	Einfluss des Abnutzungsvorrats angrenzender Feststoffkomponenten.....	91
5.2	Ionenstrommessungen für typische Fehler an einem SMD-basierten RC-Spannungsteiler.....	92
5.3	Einordnung der Reaktionen der Ionenstrommessung.....	95
6	Empirische Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder.....	99
6.1	Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder in GIL.....	99
6.2	Anwendbarkeit der empirischen Risikoermittlung.....	103
7	Evidenztheoretische Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder.....	105
7.1	Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder in GIL.....	105
7.2	Anwendbarkeit der evidenztheoretischen Risikoermittlung.....	111
7.3	Vergleich der Risikomodellierungen.....	114

Literaturverzeichnis.....	159
Publikationen: Zeitschriften- und Konferenzbeiträge & Patente	168
Studentische Arbeiten	170

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Das dargestellte Verzeichnis ist unterteilt in Abkürzungen im Volltext und Symbole, die in Formeln Anwendungen finden.

Abkürzungen

AC	Wechselstrom (engl.: <i>alternating current</i>)
Al	Aluminium
AKV	Ankopplungsvierpol
A-TED	Akustische TE-Diagnostik
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CS	Koronaskop (engl.: <i>corona scope</i>)
Cu	Kupfer
d. h.	das heißt
DAQ-Karte	Datenerfassungskarte (engl.: <i>data acquisition</i>)
DC	Gleichstrom (engl.: <i>direct current</i>)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DST	Dempster-Shafer-Theorie
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
FDM	Fehlerdetektionsmodell
Fe	Eisen
FP	Fehlerwahrscheinlichkeit (engl.: <i>failure probability</i>)
FUM	Fehlerursachenmodell
GIL	Gasisolierte Leitung
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
Gl.	Gleichung
GWP ₁₀₀	Globales Erderwärmungspotential (engl.: <i>Global Warming Potential</i>)bezogen auf 100 Jahre
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HVDC	Hochspannungsgleichstrom

ICM	Ionenstrommessung (engl.: <i>ion current measurement</i>)
IEC	International Electrotechnical Commission
inkl.	inklusive
k. A.	keine Angabe
KI	Künstliche Intelligenz
LAR	Methode der kleinsten absoluten Residuen (engl. <i>Least Absolute Residuals</i>)
n	Negatives Ereignis oder keine Veränderung
N ₂	Stickstoff (-molekül)
N-TED	Genormte TE-Messung
p	Positives Ereignis
PQ	Power Quality
r. F.	relative Feuchtigkeit
RC	Resistiv-Kapazitiv
S _{1,2}	Exemplarische Sensoren
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SF ₆ -G	SF ₆ -Gasanalyse
SMD	oberflächenmontiertes Bauteil (engl.: <i>surface-mounted device</i>)
sog.	sogenannt(e)
TE	Teilentladung
<i>TFP</i>	Absolute Fehlerwahrscheinlichkeit (engl.: <i>total failure probability</i>)
tba	wird noch bekannt gegeben (engl.: <i>to be announced</i>)
u. a.	unter anderem
UHF	Ultrahochfrequenz
UHF-TED	UHF-TE-Diagnostik
UV	ultraviolett
z. B.	zum Beispiel

Symbole

\oplus	Kombination
\subseteq	Teilmenge von
\cap	Schnittmenge von
\neg	Negation einer Menge
{...}	Klammern einer Menge
[...]	Zusammenfassung von Ereignissen
()	Positives und negatives Ereignis

(\neg)	Negation eines Ereignisses
(-)	Negative Polarität
(+)	Positive Polarität
A, A', A''	Mengen des Fehlerursachenmodells
A_j	Aspekte
AR	Ausfallrisiko
a, b, c	Exemplarische Elemente einer Menge
B	Menge des Fehlerursachenmodells
Bel	Glaubensfunktion
C_{DUT}	Kapazität des Testobjekts
C_G	Glättungskapazität
c, \bar{c}	Ereignis „nachvollziehbare Messung (Ionenstrommessung)“ & Negation
Con	Konfliktlast (engl.: <i>weight of conflict</i>)
cs_j, cs_j^{dist}	Massezahl der Ereignisse des Koronaskops (Fehlerdetektions- & Fehlerursachenmodell)
c_{konst}	Empirische Konstante
d_{CS}, \bar{d}_{CS}	Ereignis „Abweichung von der Referenzmessung (Koronaskop)“ & Negation
d_{ICM}, \bar{d}_{ICM}	Ereignis „Abweichung von der Referenzmessung (Ionenstrommessung)“ & Negation
\vec{D}	Dielektrische Flussdichte
E	Betrag der Feldstärke der Anordnung
E_a	Betrag der Abhebefeldstärke
E_c	Betrag der Einsetzfeldstärke
\vec{E}	Elektrische Feldstärke
\vec{E}_{Pk}	Elektrischer Feldvektor am Punkt P, wenn die k -te Elektrode auf Einheitspotential liegt und alle weiteren Elektroden auf Nullpotential
F_g	Betrag der Gewichtskraft
f, \bar{f}	Ereignis „Korrektur Fokus (Koronaskop)“ & Negation
f_{Abtast}	Abtastrate der DAQ-Karte
f_g	Grenzfrequenz des Operationsverstärkers
\vec{F}_a	Coulomb'sche Kraft zur Berechnung der Abhebefeldstärke
\vec{F}_g	Gewichtskraft
g	Ortsfaktor

I	Ionenstrom an der Erdelektrode
IP_i	Einflussfaktor (engl.: <i>impact parameter</i>)
$I_{gr}(A)$	Maß des unvollständigen Wissens der Menge A
I_{AlGr}	Ionenstrom der Messreihe "Aluminium-Granulat"
I_{Ref}	Ionenstrom der Referenzmessung
$I_{Referenz}$	Ionenstrom der Referenzmessung (Verifikation)
$I_{skaliert}$	Mit Schwaiger'schen Faktoren skaliertes Ionenstrom
I_C^+	Ereignis des Fehlerursachenmodells: gesteigener Ionenstrom (Ionenstrommessung)
I_C^e	Ereignis des Fehlerursachenmodells: Veränderung des Ionenstroms von quadratischer zu exponentieller Abhängigkeit (Ionenstrommessung)
i	Laufindex
icm_i, icm^{dist}	Massezahl der Ereignisse der Ionenstrommessung (Fehlerdetektions- & Fehlerursachenmodell)
i_k	Strom an der k -ten Elektrode
j	Laufindex
K	Korrekturfaktor
K_{norm}	Normierungskonstante
$K_1 \dots K_5$	Bewertungskriterien
k	Laufvariable im Shockley-Ramo-Theorem
k_{corr}	Korrekturfaktor im Fehlerdetektionsmodell
k_{corr}^{dist}	Korrekturfaktor im Fehlerursachenmodell
$\log(\dots)$	Logarithmus zur Basis 10
m	Basismaß
$m(A)$	Basismaß der Menge A
m'	TE-Impulszahl
m_1, m_2	Basismaße der Dempster'schen Kombinationsregel
$m_{CS}^{dist,(-)}(Y^{dist})$	Basismaß des Koronaskops des Fehlerursachenmodells bei negativer Polarität
$m_{CS}^{dist,(+)}(Y^{dist})$	Basismaß des Koronaskops des Fehlerursachenmodells bei positiver Polarität
$m_{ICM}^{dist}(X^{dist})$	Basismaß der Ionenstrommessung des Fehlerursachenmodells
N_A	Anzahl der Aspekte
N_I	Anzahl der Einflussparameter

n	Laufindex
Pl	Plausibilitätsfunktion
p^{IM}	Ionenstromleistung der Ionenstrommessung
p^{Ref}	Ionenstromleistung der Referenzmessung
p	Geometriefaktor zur Berechnung des Schwaiger'schen Faktors
$p_1 \dots p_3$	Parabelkoeffizienten
p_{grau}	Graustufenwert eines Pixels
PD^+	Ereignis des Fehlerursachenmodells: zusätzliche Entladung (Koronaskop)
PD^*	Ereignis des Fehlerursachenmodells: hellere Entladung (Koronaskop)
q	Oberflächenladung eines Partikels im elektrischen Feldraum
q_m	Scheinbare Ladung
$RMSE$	Quadratwurzel der mittleren Fehlerquadrate; Gütemaß der Regression (engl.: <i>Root Mean Square Error</i>)
$R_{1,2}$	Teilerwiderstände zur Spannungsmessung
R_{DUT}	Widerstand des Testobjekts
R_{Gas}	Widerstand des Isoliergases
R_{max}	Maximum des Risikowerts pro TE-Defekt
R_{min}	Minimum des Risikowerts pro TE-Defekt
R_{Technik}	Widerstand der Messtechnik
r_a	Außenleiterradius
r_i	Innenleiterradius
r_p	Partikelradius
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
s	Elektrodenabstand, bzw. Schlagweite
s'	Integrationsvariable
U	Angelegte Spannung
U_{DC}	Spannung zur Berechnung der Abhebefeldstärke
U_{DS}	Durchschlagspannung
U_{DS}^-	Verminderte Durchschlagspannung
U_{DS}^{IM}	Durchschlagspannung der Ionenstrommessung
U_{DS}^{Ref}	Durchschlagspannung der Referenzmessung
U_{max}^{Ref}	Maximale Prüfspannung der Referenzmessung
U_{Onset}	Einsetzspannung
U_{Onset}^{IM}	Einsetzspannung der Ionenstrommessung

$U_{\text{Onset}}^{\text{Ref}}$	Einsetzspannung der Referenzmessung
$U_{\text{Prüf}}$	Quellspannung (Messkreise)
U_o^{CS}	Ereignis des Fehlerursachenmodells: verringerte Einsetzspannung (Koronaskop)
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor
X, Y	Teilmengen des Wahrnehmungsrahmens
x, y, z	Variablen zur Beschreibung des kartesischen Koordinatensystems
X_i, Y_j	Teilmengen des Wahrnehmungsrahmens des Fehlerdetektionsmodells
$X_i^{\text{dist}}, Y_j^{\text{dist}}$	Teilmengen des Wahrnehmungsrahmens des Fehlerursachenmodells
Z	Impedanz der Teilentladungsmessung nach Norm
Z_k, Z_k^{dist}	Kombinierte Menge (Fehlerdetektions- & Fehlerursachenmodell)
Z_n	Kombinierte Teilmenge des Wahrnehmungsrahmens
Δt_i	Festgelegtes Zeitintervall
ΔU_0	Differenz zur Einsetzspannung
ΔU_{Onset}	Differenz der Einsetzspannungen zwischen Ionenstrom- und Referenzmessung
ΔP	Differenz der synthetischen Ionenstromleistung
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
ϵ_r	Dielektrizitätskonstante für umgebendes Medium (hier: Luft)
$\eta_{1,2}$	Schwaiger'sche Ausnutzungsfaktoren
$\varphi_{1,2}$	Potentiale zur Berechnung der Abhebefeldstärke
ρ	Materialdichte
σ	Standardabweichung
Ω	Wahrnehmungsrahmen
Ω_{Det}	Wahrnehmungsrahmen des Fehlerdetektionsmodell
Ω_{Dist}	Wahrnehmungsrahmen des Fehlerursachenmodells
\emptyset	Leere Menge

Gender Disclaimer

In dieser Dissertation sind Personenbezeichnungen – sofern nicht anders angegeben – auf alle Geschlechter gleichermaßen bezogen. Zur besseren Lesbarkeit wird das generische Maskulinum verwendet.

Einleitung und Ziel der Arbeit

Die Verwendung von Betriebsmitteln der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) nach dem Netzentwicklungsplan Strom 2037 [1] geht vor dem Hintergrund der Energiewende nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz [2] einher mit dem Austausch von Schwefelhexafluorid (SF_6) durch ein alternatives Isoliergas. Dieser Ersatz ist angestrebt, da SF_6 mit einem Global Warming Potential bezogen auf 100 Jahre (GWP_{100}) von 23.500 [3] unter die Restriktionen des Kyoto-Protokolls [4], bzw. der F-Gase-Verordnung der Europäischen Union [5] fällt. Zu den alternativen Isoliergasen gehören u. a. Novec 5110 (Perfluoriertes Keton), Novec 4710 (Perfluoriertes Nitril) und synthetische Luft [3]. Da Langzeiterfahrungen mit den Alternativen fehlen und die F-Gase-Verordnung [5] den Einsatz eines klimaneutralen Isoliergases verlangt, sind zuverlässige Diagnosemethoden zur Bewertung des Zustandes der Isoliergase erforderlich. Diese Methoden sollen nicht-invasiv sein, um Emissionen des Gases und Immissionen von Umgebungsluft und Feuchtigkeit während einer Diagnosemessung zu vermeiden. Da Hersteller größen-optimierte Betriebsmittel, wie z. B. gasisolierte Schaltanlagen (GIS) verkaufen, ist mit Ausfällen zu rechnen, da die Isoliersysteme durch im Normalbetrieb auftretende Fehlerfälle ausfallen. Daher sind Diagnosemessungen für die betroffenen Betriebsmittel notwendig, ohne das Isoliergas zu beeinträchtigen. Bislang basieren Diagnosemessungen für gasisolierte Betriebsmittel auf dem Auftreten von Teilentladungen (TE). Dazu präsentiert Referenz [6] einen empirischen Ansatz zur Interpretation von TE, um eine Diagnose und eine Ausfallwahrscheinlichkeit zu beziffern. Allerdings unterscheiden sich die zugrundeliegenden Mechanismen zur Entstehung von TE für Gleich- und Wechselstrom [7], weshalb Betriebsmittel für Hochspannungsgleichstrom (HVDC) nach der Leitfähigkeit und nicht nach kapazitiven Eigenschaften bei Wechselspannung ausgelegt sind [8]. Somit ist eine TE-Messung nach Norm [9] unter DC erschwert anwendbar [10]. Infolgedessen gibt es verschiedene Vorschläge in der Forschung zur TE-Messung und -Interpretation unter HVDC (vgl. [8], [10], [11]). Referenz [12] fordert z. B. ein Parametertracking und [10] schlägt eine Synchronisation zwischen auftretenden Entladungen und dem überlagerten DC-Ripple vor, während [13] die sog. NoDi-Diagramme präsentiert. Weiterführend schlägt [8] Tests auf TE für die Inbetriebnahme und Prototypentests vor. Allerdings zeigen [8], [14], dass eine Kombination von Parametern zur Interpretation der TE notwendig sind, wozu z. B. die TE-Amplitude als Zeitfunktion und die Impulswiederholrate zählen [11].

Da allerdings kein Beweis vorliegt, dass das Wissen über TE bei Wechselstrom (AC) auf Gleichstrom (DC) übertragbar ist [11], ist bislang offen, inwiefern die TE-Detektionsmethoden und -verfahren zur Interpretation einen Rückschluss auf den Zustand des Isoliergases zulassen.

Auch der Einsatz von Algorithmen, basierend auf künstlicher Intelligenz (KI), hat bislang bzgl. der Diagnostik für alternative Isoliergase unter HVDC keine Abhilfe geschaffen. Allerdings sind aus der Literatur evidenztheoretische Modelle für komplexe Betriebsmittel, z. B. Leistungstransformatoren [15] und GIS [16] bekannt, die unter der Berücksichtigung von unvollständigem Wissen eine Diagnose basierend auf verschiedenen Evidenzquellen ermöglichen. Somit erscheint eine solche Modellierung für eine Diagnose eines HVDC-Systems als sinnvoll, wenn eine reproduzierbare Messungen zur Beschreibung der Isoliergase vorhanden ist.

Dazu steht in dieser Arbeit die Ionenstrommessung (ICM) im Fokus, welche für standardisierte Messungen unterhalb von HGÜ-Freileitungen zur Bestimmung des Ionenstroms in Bodennähe Anwendung findet [17]. Da ein Ionenstrom infolge von Teilentladungen unter HVDC in Luft entsteht, welche dem alternativen Isoliergas synthetische Luft mit den dielektrischen Eigenschaften ähnlich ist [18], liegt die Erforschung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode als Alternative zur TE-Messung für gasisolierte HVDC-Systeme nahe. Daher ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

- I. Ist die Ionenstrommessung als Diagnosemethode eine Alternative zur TE-Messung für HVDC-Systeme?
- II. Wie reagiert die Ionenstrommessung auf Fehlerbilder in HVDC-Systemen?
- III. Was leistet eine empirische Auswertung von Diagnosemessungen in Hinblick auf den Abnutzungsvorrat des betrachteten Systems?
- IV. Welchen Mehrwert hat eine evidenztheoretische Auswertung von Diagnosemessungen im Vergleich zur empirischen Datenauswertung?

Zur Klärung der Forschungsfragen bildet der Stand des Wissens (Kapitel 1) die Grundlage zur Konzeptentwicklung (Kapitel 2), um die Ionenstrommessung für Diagnosen an gasisolierten HVDC-Systemen anzuwenden. Anschließend legen die Modellansätze den Grundstein zur Datenauswertung (Kapitel 3). Deshalb wird die Ionenstrommessung als Alternative zur TE-Messung diskutiert (Kapitel 4). Darauf aufbauend sind Studien zur Fehlererkennung an ausgewählten Systemen dargestellt, welche die Reaktion der Ionenstrommessung auf unterschiedliche Fehlerbilder darstellen (Kapitel 5). Den Abschluss bilden die empirischen, bzw. evidenztheoretischen Risikomodelle, welche auf die Messergebnisse Anwendung finden. Die berechneten Risiken, bzw. Ausfallwahrscheinlichkeiten der beiden Modellierungsansätze sind jeweils in Hinblick auf Aussagen bzgl. des Abnutzungsvorrats und Ausfallrisikos des jeweiligen HVDC-Systems auszuwerten (Kapitel 6 und 7). Die Zusammenfassung der Erkenntnisse bzgl. der Forschungsfragen sowie ein kurzer Ausblick folgen auf Kapitel 7.

1 Stand von Wissenschaft und Technik

Für HVDC-Betriebsmittel gelten verschiedene Standards, z. B. [19], um die Funktionalität während der gesamten Lebensdauer mittels Prüfungen sicherzustellen. Dazu gehören auch regelmäßige Typ-, Stück- und Revisionsprüfungen. Diese sind unverzichtbar, um zuverlässige Erkenntnisse zum Zustand der Betriebsmittel zu erhalten. [18] Da HVDC-Betriebsmittel allerdings verhältnismäßig neue Komponenten in den Übertragungsnetzen sind, sind Normen teilweise noch in der Abstimmungs- oder Entwurfsphase, wie z. B. IEC 62271-318 für HVDC gasisolierte Schaltanlagen [20]. Daher sind zu Diagnosezwecken an neuen gasisolierten Betriebsmitteln noch keine spezifischen Standards vorhanden. Kapitel 1.1 präsentiert deshalb allgemeine Kriterien für Diagnoseverfahren an SF₆-gefüllten Schaltanlagen. Weiterführend zeigt Kapitel 1.2 zu diagnostizierende Fehlerbilder auf, während Kapitel 1.3 die Ionenstrommessung vorstellt, welche im Rahmen dieser Arbeit als Diagnoseverfahren fungiert.

1.1 Kriterien für Diagnoseverfahren

Um die Eignung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren für gasisolierte HVDC-Systeme in der Anwendung zu bewerten, stellt Tabelle 1-1 die **Bewertungskriterien für Diagnoseverfahren an SF₆-gefüllten Schaltanlagen** nach [21] dar. Somit gibt Tabelle 1-1 eine Übersicht der Anforderungen der Diagnostiker an eine Diagnosemethode. Da diese für DC-Betriebsmittel aber auf unterschiedlichen physikalischen Mechanismen beruhen (vgl. Tabelle 1-2), ist ein qualitativer Vergleich nicht zielführend. Stattdessen zeigt [21] die in einer Diskussion zu nennenden Aspekte anhand der Bewertungskriterien auf, um eine Grundlage für Diagnostiker zur Anwendungsentscheidung zu liefern.

Tabelle 1-1: Auswahlkriterien (*) und Idealwert (kursiv) für geeignete Diagnoseverfahren zur Anwendung im Feld nach [21]

Kriterium & Idealwert	Inhalt
Anwendbarkeit (K_1) <i>Immer möglich</i>	<ul style="list-style-type: none"> Berücksichtigung Besonderheiten des kompakten Aufbaus Eignung für bauliche Anwendung
Aussagefähigkeit (K_2) <i>Sehr hoch</i>	<ul style="list-style-type: none"> Detektionsumfang möglicher Fehlerzustände Zuverlässigkeit Zeitpunkt der Detektion Aussagetiefe
Bewertungsaufwand (K_3) <i>Gering</i>	<ul style="list-style-type: none"> Zeitlich & technischer Aufwand bei Anwendung Inkl. Anschaffungskosten
Komplexität (K_4) <i>Gering</i>	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl Zwischenschritte von Messung bis Auswertung Ausbildungs-/ Trainingsgrad Diagnostiker Anfälligkeit für Mess-/ Beurteilungsfehler Reproduzierbarkeit der Diagnoseergebnisse* Berücksichtigung von Einflussfaktoren*
Negative betriebliche Auswirkungen (K_5) <i>Kaum</i>	<ul style="list-style-type: none"> Grad der Einschränkung des Betriebs

Beispiele für bekannte Diagnoseverfahren mit den zugehörigen Bewertungen nach [21], [22] sowohl für Labor- als auch Feldanwendungen sind in Tabelle 1-2 zusammengefasst: die akustische TE-Messung, die TE-Messung nach Norm [9], die UHF-Messung und die SF₆-Gasanalyse.

Tabelle 1-2: Beispiele bekannter Diagnoseverfahren zur Untersuchung der dielektrischen Festigkeit aus [21]

Verfahren	(K_1)	(K_2)	(K_3)	(K_4)	(K_5)
Akustische TE-Diagnostik	Immer möglich	Hoch	Hoch	Gering	Kaum
TE-Messung nach Norm [9]	Nur offline möglich	Sehr hoch	Gering	Hoch	Hoch
UHF-TE-Diagnostik	Bauliche Einschränkung	Sehr hoch	Gering	Hoch	Kaum
SF ₆ -Gasanalyse	Immer möglich	Hoch	Gering	Gering	Kaum

1.1.1 Fehlerdetektion mit einer TE-Messung nach DIN EN 60270

Das nach [9] standardisierte Verfahren der TE-Messung (vgl. Abbildung 1-1) ist für AC und DC geeignet, allerdings können Unterschiede bei gleicher Polarität zwischen den Messergebnissen für verschiedene Isoliergase aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Festigkeiten auftreten (vgl. [18], [23]). Auch die Kenngrößen zur Beschreibung sind bei DC und AC teilweise unterschiedlich. Für DC werden die folgenden Kenngrößen bestimmt: [9]

- Die „scheinbare Ladung jedes einzelnen TE-Impulses [...]“,
- Die „akkumulierte scheinbare Ladung einer TE-Impulsfolge [...]“,
- Die „TE-Impulszahl [m'] von TE-Impulsfolgen [...]“,

- Die „TE-Impulszahl [m'], die innerhalb von festgelegten Grenzen der scheinbaren Ladung q_m während eines festgelegten Zeitintervalls Δt_i bei konstanter Prüfspannung auftritt“.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass bei der Bestimmung der TE-Impulszahl [m'] Störimpulse nicht gezählt werden, was die Ermittlung der Kenngröße erschwert [18].

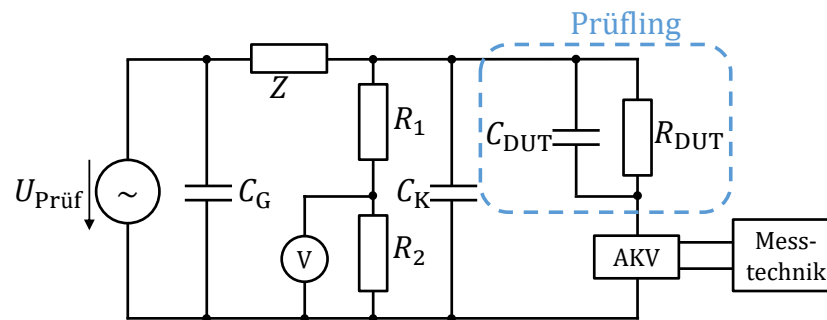


Abbildung 1-1: TE-Messkreis nach [9]

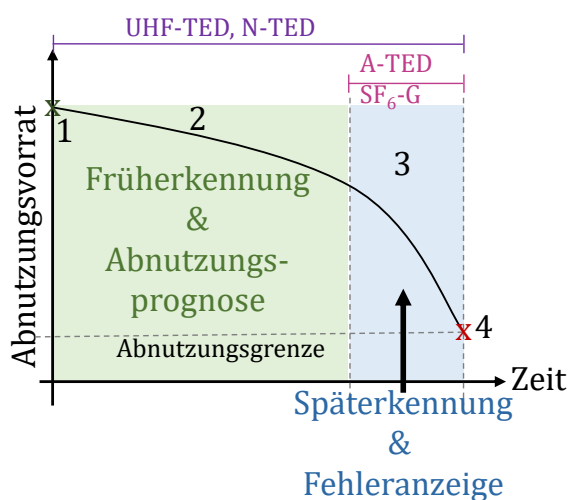
Alternativ wird bei der Inbetriebnahme gasisolierter Schaltanlagen vor Ort eine UHF-TE-Messung durchgeführt, um freibewegliche oder fixierte Partikel zu detektieren [18]. Allerdings erschwert das Einkoppeln von Störern die Messungen, sodass lediglich durch schmalbandige Messungen ein sehr hoher Signal-Rausch-Abstand erreicht wird [18]. Des Weiteren sind die UHF-Sensoren innerhalb statt außerhalb des gasisolierten Aufbaus anzubringen oder die Erdelektrode ist als UHF-Sensor auszuführen, um TE besser zu erkennen [24]. Nachteilig ist die spezifische Anpassung der Sensoren für gasisolierte Schaltanlagen [24], [25]. Außerdem ist eine UHF-Messung geeignet, um eine Schaltanlage vor der Inbetriebnahme vollständig zu prüfen [18]. Somit gehört die UHF-Messung sowohl zu den Methoden der Früh- als auch Späterkennung [21], was im Kapitel 1.1.2 näher erläutert wird.

1.1.2 Definitionen der Zustandsbewertung

Neben den genannten Kriterien erfolgt eine Einordnung der Verfahren in die **Früh- und Späterkennung** bzgl. des Erkennungszeitpunkts der Einschränkung, bzw. des Ausfalls der **Funktionsfähigkeit**, die die „Fähigkeit eines Objekts [...] zur Funktionserfüllung seines Zustandes“ [26] beschreibt. An der Funktionsfähigkeit des Objekts orientiert sich in dieser Arbeit die **Abnutzungsgrenze** als „vereinbarter oder festgelegter Mindestwert des Abnutzungsvorrates“ [26], wobei der **Abnutzungsvorrat** als „Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen [...]“ zugrunde liegt.¹ Somit ergeben sich für die Begriffe Früh- und Späterkennung die folgenden Definitionen: Die **Früherkennung** ist

¹ Alternativ kann der Zustand eines Objekts mithilfe der Begriffe „funktionsfähiger“ und „gefährlicher Zustand“ nach Norm [27] beschrieben werden [21].

den Bereichen 1 und 2 des Abnutzungsvorrats nach [21], [26] (vgl. Abbildung 1-2) zuzuordnen. D.h. eine Diagnosemethode detektiert, dass die geforderte Funktion [26] erfüllt ist, allerdings eine Abnutzung feststellbar ist. Basierend auf dem „Istzustand des Objekts“ [26] wird eine **Abnutzungsprognose** ermittelt, die noch vor dem Erreichen der kritischen Abnutzung des Isoliersystems (Abbildung 1-2, Bereich 3) gestellt wird und somit eine „Instandsetzung oder Schwachstellenbeseitigung“ nach [26] ermöglicht. Im Gegensatz dazu ist die **Späterkennung** den Bereichen 3 und 4 des Abnutzungsvorrats (s. Abbildung 1-2) zuzuordnen, wobei die Diagnosemethode einen **Fehler** anzeigt, der den „Zustand eines Objekts [widerspiegelt], in dem es unfähig ist, eine geforderte Funktion [...] zu erfüllen“ [26].



Legende:

- 1: Vorgesehenes Verhalten des Isoliersystems
- 2: Detektierbare Abweichung vom Ausgangszustand des Isoliersystems
- 3: Kritische Abnutzung des Isoliersystems
- 4: Fehler des Betriebsmittels durch Ausfall des Isoliersystems
- A-TED: Akustische TE-Diagnostik
- UHF-TED: UHF-TE-Diagnostik
- N-TED: genormte TE-Messung
- SF₆-G: SF₆-Gasanalyse

Abbildung 1-2: Abbaukurve und Beurteilungsstufen des Abnutzungsvorrats nach [21], [26] und Einordnung der Diagnosemethodenbeispiele

Um den Abnutzungsvorrat auf die gasisolierten Betriebsmittel anzuwenden, wird in dieser Arbeit der Fokus auf das Isoliergas(-gemisch) des HVDC-Systems mit der dielektrischen Festigkeit als Kenngröße gelegt. Somit steht die Detektion von Fehlerursachen im Vordergrund, die zu einer Beeinträchtigung der dielektrischen Festigkeit des Isoliergases führen.

1.2 Fehlerbilder für gasisolierte Systeme

Referenzen [6], [25], [28] zeigen, dass die häufigsten dielektrischen Isolationsversagen durch Partikel und Fremdkörper mit 20%, Feuchtigkeit mit 7% und Partikel auf Hochspannungspotential mit 5% Anteil an allen Isolationsversagen entstehen (vgl. Abbildung 1-3). Dabei führen frei bewegliche Partikel zu den kritischsten Defekten [29]. Zu den **Fehlerursachen** gehört die Partikelentstehung durch mechanischen Abrieb [25], Vibrationen²

² Die Vibrationen für HVDC-gasisolierte Betriebsmittel entstehen beispielsweise durch Schaltheftungen in der Nähe des Betriebsmittels [8].

[25], Verschmutzung durch Fertigung und Montage [25] sowie der Verschleiß von Kontakten durch Dauerbetrieb [25]. Darüber hinaus entsteht Wasser im Isoliererraum durch das Eindringen durch die Isolierungen im Langzeitbetrieb.

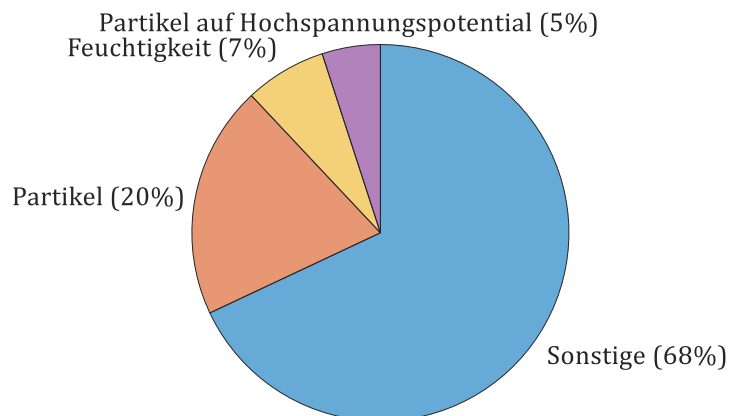


Abbildung 1-3: Häufige Ursachen für dielektrisches Isolationsversagen nach [6], [25], [28]

Um den Ausfällen durch die entstehenden Partikel entgegenzuwirken, werden **elektrostatische Partikelfallen** sowohl an der Hochspannungs- als auch an der Erdelektrode verbaut [11], wodurch den Schäden durch geladene Partikel vorgebeugt wird. Im Inneren der Fallen ist die elektrische Feldstärke so gering, dass die Partikel nicht mehr nach außen gelangen [11]. Untersuchungen zur Auslegung und zum optimierten Design für DC und AC sind in [11], [30], [31], [32] zu finden. Zwar sind Partikelfallen eine effiziente Methode zum Verhindern eines Ausfalls durch Partikel [11], allerdings stellen Partikelfallen einen Eingriff in den Aufbau des gasisolierten Betriebsmittels dar und Ausfälle durch Feuchtigkeit oder an Komponenten anhaftende Partikel werden nicht verhindert. Darüber hinaus stellen besonders bewegliche Partikel ein erhöhtes Risiko für Betriebsmittel dar [29], weshalb eine zusätzliche Isolierschicht an der äußeren Elektrode angebracht wird. Diese Schicht verhindert das Abheben der Partikel, indem sich die Partikel durch fehlenden Elektrodenkontakt bei Gleichspannung erst nach 13h aufladen können [11], [33].

Aus [29], [34], [35], [36], [37] ist bekannt, dass die **Orte und die Mobilität** der Partikel maßgeblichen Einfluss auf die dielektrische Festigkeit des Isoliersystems haben. Die Partikel können, abhängig von ihrer Beschaffenheit, zu TE unterschiedlicher Formen und Stärken sowie einem Durchschlag führen [18]. Zu den beeinflussenden Faktoren gehören bspw. Größe und Dichte, bzw. Masse und Form [8], [11] sowie Leitfähigkeit und Gasdruck, welche besonders bei DC zu berücksichtigen sind [11], [29]. Außerdem zeigt für DC die Durchschlagsspannung U_{DS} eine Abhängigkeit vom Länge-Durchmesser-Verhältnis des Partikels: Bei großem Verhältnis, z. B. bei einem Drahtstück, konzentriert sich das elektrische Feld am Partikel. Im Gegenzug dazu fällt bei

kleinem Verhältnis, z. B. bei kugelförmigen Partikeln, die Konzentration des elektrischen Feldes kleiner aus, sodass die Durchschlagspannung weniger stark als bei Partikeln mit großem Verhältnis absinkt [11]. Nicht beeinflussend ist im Gegensatz dazu die Polarität der Gleichspannung, da der Betrag der vom Partikel aufgenommenen Ladung bei beiden Polaritäten gleich ist [29].

Partikel beeinflussen die Entstehung von Ionenströmen, wenn es zu Feldüberhöhungen an den Spitzen des Partikels kommt [11], durch die die elektrische Festigkeit des Isoliergases überschritten wird. Diese Bedingung ist ebenfalls erfüllt, wenn das Partikel innerhalb des Isolierraums beweglich ist. Die Auswirkungen sind in Tabelle 1-3 dargestellt.

Tabelle 1-3: Übersicht TE-Aktivität beeinflussender Materialeigenschaften nach [29]

Eigenschaft	Auswirkung
Leitfähigkeit	Bildung leitfähiger Kanäle → lokale Erwärmung, TE / Durchschlag
Größe & Form	Feldverzerrung durch z. B. Spitzen der Partikel
Länge-Durchmesser-Verhältnis	Stärke der Feldverzerrung → Herabsenken der Durchschlagspannung
Dichte & Masse	Erreichen der Abhebefeldstärke bei geringer Masse → Hüpfen geladener Partikel → TE & Durchschlag
Chemische Eigenschaften	Oxidschicht bildendes Material (z. B. Aluminium & Aluminiumoxid)

1.2.1 Fehler in gasisolierten Leitungen (GIL) und Schaltanlagen (GIS)

Abbildung 1-4 zeigt schematisch die potentiellen (Ablagerungs-) Orte für frei bewegliche und ortsfeste Fremdpartikel, bzw. Tröpfchen durch Kondensatbildung im Isolierraum einer GIS oder GIL: Erdelektrode (1), Hochspannungselektrode (2 und 3), Isolator (4). Wenn diese Partikel im Feldraum auftreten, verzerren sie das elektrische Feld, verursachen **lokale Inhomogenitäten** und ionisieren somit das Isoliergas [29]. Folglich verursachen die Partikel **Teilentladungen** [18], [29], wobei frei bewegliche Teilchen größeres TE-Potential haben als ortsfeste Partikel [34], [35], [36]. Bei positiver Polarität sind besonders hüpfende Partikel und bei negativer Polarität sog. „firefly“-Partikel [8], [11] von Bedeutung, die vor dem Erreichen der Gegenelektrode aufgenommene Ladungen abgeben und größere TE unter den gleichen Bedingungen wie hüpfende Partikel erzeugen [8]. Folglich ist der Entladungsstrom bei negativer Polarität wesentlich größer als bei positiver Polarität [29], wobei sich für beide Polaritäten unterschiedliche Bewegungsmuster zeigen [29]. Außerdem werden Partikel durch hohe Feldstärken angezogen und verbleiben in Bereichen mit hoher Feldstärke, wo sie kontinuierlich Teilentladungen erzeugen und somit die Durchschlagsgefahr erhöhen [8].

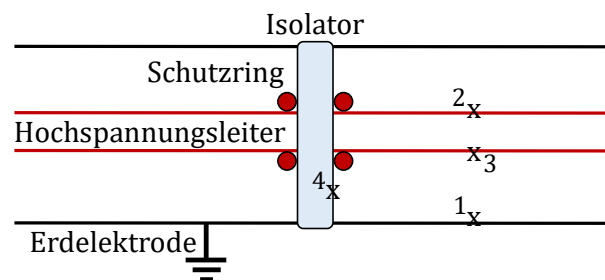


Abbildung 1-4: Schematische Darstellung der Partikelorte in einer GIL in Anlehnung an [8]

Neben geometrischen Einflussgrößen, wie z. B. Partikelradius und -länge [38], [39], [40] sowie Ausrichtung länglicher Partikel [37], sind Partikelgröße und -gewicht [40] maßgeblich entscheidend, da Metallpartikel vereinfacht aufgrund der Coulombkraft \vec{F}_a abheben [40], wenn

$$\vec{F}_a > \vec{F}_g \quad (1)$$

mit der Gewichtskraft \vec{F}_g erfüllt ist.³ Infolgedessen bewegt sich das Partikel in Richtung der Gegenelektrode, die es berührt, sodass es sich umlädt und die gleiche Ladung wie die Gegenelektrode annimmt. Im Weiteren wird das Partikel aufgrund der gleichen Ladung abgestoßen und gelangt durch die elektrische Kraft trotz Trägheits- und viskose Widerstandskräfte wieder zur ersten Elektrode, wo sich der Vorgang wiederholt, solange kein Durchschlag auftritt. [37] Dieses Bewegungsmuster ist von verschiedenen Bedingungen, wie z. B. der Ausrichtung und Form des Partikels, abhängig. Eine Übersicht für verschiedene Bewegungsmuster stellt [11] dar und die Berechnung der Abhebefeldstärke für die Ionenstrommessungen an unterschiedlichen HVDC-Systemen zeigt Anhang A.

1.2.2 Fehler in gasisolierten SMD-basierten RC-Spannungsteilern

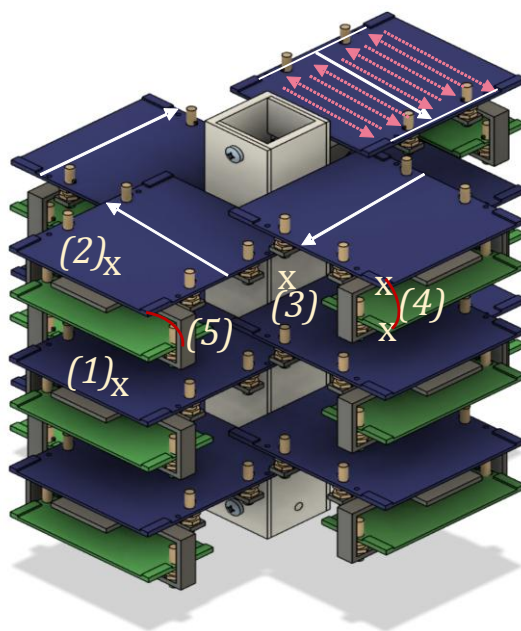
Aufgrund der Konstruktion des SMD-basierten RC-Spannungsteilers aus [Ve01] treten die beschriebenen Fehler (s. Kapitel 1.2) zusätzlich zu den folgenden **Fehlerursachen** auf (vgl. Abbildung 1-5):

- Partikel im Feldraum auf Elektrode mit niedrigerem (1) oder höherem Potential (2) (nicht aber auf Erd- / Hochspannungselektrode)
- Partikel an, bzw. auf Isolator material: Gehäuse und tragende Konstruktion des Teilers (3)

³ Andere Ansätze berücksichtigen die Viskosität des Isoliergases, vgl. [8], [11]. Zur Abschätzung der Abhebefeldstärke wird die Viskosität in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt. Außerdem wird die magnetische Kraft aufgrund der kleineren Größenordnung im Vergleich zur elektrostatischen Kraft wie in [29] vernachlässigt.

- Montagefehler bei, bzw. durch Komponenten, Platinen, Teilerstufen, Materialfehler, fehlende bzw. lockere Kabelverbindungen (4), leerlaufende Kabel (5), Dichtungssysteme gegen das Eindringen von Feuchtigkeit
- Fehler bei der Inbetriebnahme: fehlende Erdung, fehlerhafte Gasisolierung, fehlende Trocknung des Innenraums

Sowohl Montagefehler als auch Fehler bei der Inbetriebnahme führen zu einem sofortigen Ausfall des Spannungsteilers, da der Teiler aus [Ve01] in diesen Fällen für angelegte Spannungen unterhalb der Nennspannung durchschlägt und ein Betrieb nicht möglich ist (vgl. Kapitel 2.2.3 und Kapitel 5.2).



Legende:

- 1: Partikel auf niedrigerem Potential
- 2: Partikel auf höherem Potential
- 3: Partikel auf Tragkonstruktion des RC-Teilers
- 4: lockere Kabelverbindung
- 5: leerlaufende Kabelverbindung

Abbildung 1-5: Schematische Darstellung der Partikel im SMD-basierten RC-Spannungsteiler nach [Ve01]

Ohne den Ausfall des Spannungsteilers, z. B. durch einen konstruktionsbedingten Durchschlag im Isoliergas, beeinflussen TE die Lebensdauer der isolierenden Feststoffkomponenten (vgl. [18]). Bislang ist ein Monitoring zur Früherkennung möglicher Fehlerursachen an Spannungsteilern nicht etabliert. Auch das Monitoring zur Späterkennung von Fehlern, die Teilentladungen verursachen, aber keinen Totalausfall des Teilers herbeiführen, ist kein Standard. Da Teiler allerdings isoliergasgefüllt (SF_6 oder Stickstoff, N_2) sind und das Auftreten der häufigsten Fehler (fehlerhafte Montage und Inbetriebnahme) im Betrieb zu einem Ausfall mit erheblichem Aufwand durch Abschaltung, Gasabfüllen und Reparatur vor Ort führt, fehlen somit Daten zur Bewertung der Power Quality für den Zeitraum des Ausfalls, was wiederum die

Netzstabilität aufgrund fehlender Messdaten gefährdet. Daher ist eine Bewertung des Abnutzungsvorrats des Teilers sinnvoll, was zur Ionenstrommessung für Diagnosen führt.

1.3 Ionenstrom und Ionenstrommessung

Durch Ionenströme lässt sich das Umfeld von HGÜ-Freileitungen beschreiben [17]. Dabei entsteht der Ionenstrom, sobald die Einsetzfeldstärke am Leiterseil bzw. Leiterseilbündel überschritten wird. Infolgedessen entstehen Raumladungen, die im elektrischen Feld driften. Durch diesen Drift ist an der geerdeten k -ten Elektrode nach dem **Shockley-Ramo-Theorem** der Strom i_k mit folgendem Zusammenhang detektierbar (vgl. Abbildung 1-6):

$$i_k = q \vec{E}_{Pk} \vec{v}, \quad (2)$$

wobei q die Ladung, \vec{E}_{Pk} den elektrischen Feldvektor am Punkt P unter Berücksichtigung des Einheitspotentials an der k -ten Elektrode und des Nullpotentials an allen anderen Elektroden sowie \vec{v} den Geschwindigkeitsvektor des Teilchens beschreiben. [41]

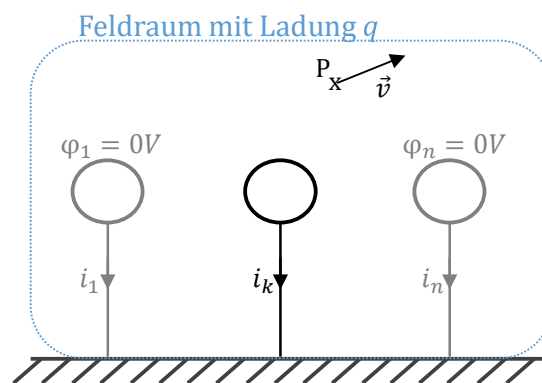


Abbildung 1-6: Veranschaulichung des Shockley-Ramo-Theorems in Anlehnung an [41]

Um den Strom i_k unterhalb einer HGÜ-Freileitung zu messen, bietet [17] eine Vorgehensweise, in der eine Wilson-Plate zum Einsatz kommt (vgl. Abbildung 1-7), die näherungsweise auf Erdpotential liegt. Um Feldverzerrungen zu vermeiden, besteht eine Wilson-Plate aus einem äußeren Guard-Band, einer Innenelektrode, einer Isolierung gegen den Erdboden sowie einer Messleitung für die auf der Innenelektrode auftreffenden Teilchen [17]. Der dadurch entstehende Strom i_k fließt über eine Messleitung ab und ergibt sich unter Berücksichtigung der Fläche der Innenelektrode der Wilson Plate zu:

$$i_k = \iint \vec{j} d\vec{A}. \quad (3)$$

Hierbei ist \vec{j} die Stromdichte [17], [42], welche unter Freileitungen z. B. durch die räumliche Verteilung und den Einfluss klimatischer Größen beeinflusst wird [17].

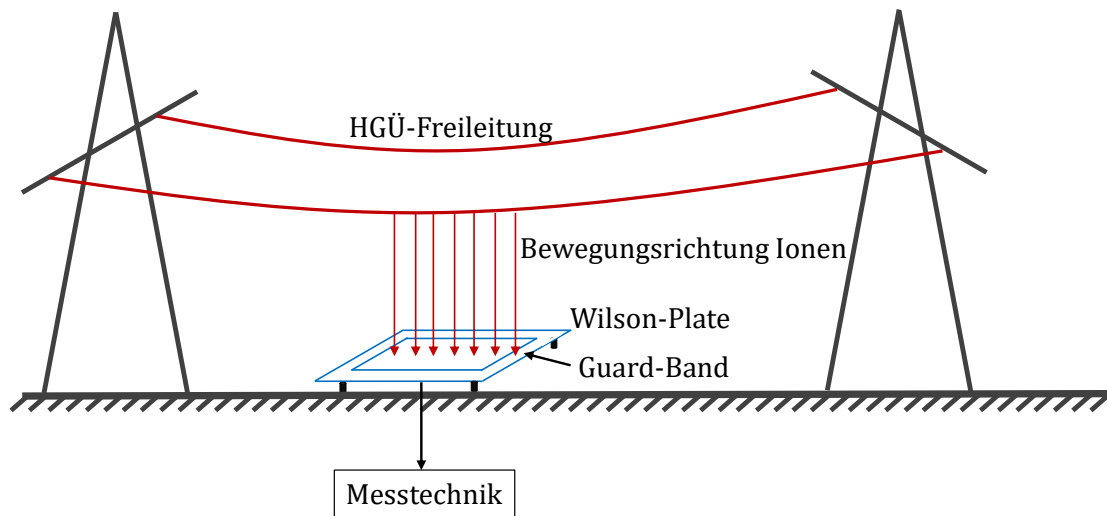


Abbildung 1-7: Messung eines Ionenstroms unter einer HGÜ-Freileitung nach [17]

Darüber hinaus wurde in [43] die Ionenstrommessung an einem gasgeschlossenen Koaxialaufbau genutzt, um die Druckabhängigkeit des Ionenstroms in Stickstoff zu untersuchen. Im Vergleich dazu wurde ebenfalls an einem Koaxialaufbau in der eigenen Publikation [Ve02] der Einfluss metallischer Fremdpartikel im Isolierraum auf den Ionenstrom untersucht, um eine empirische Risikoeinschätzung mithilfe von Parametern basierend auf den Ionenstrommessungen zu geben.

Wenn die Feldstärke der Anordnung die **Einsetzungfeldstärke** E_C überschreitet [41], d.h. das Isoliergas lokal überlastet ist, entstehen Teilentladungen, die zu einem Ionenstrom führen (vgl. Abbildung 1-8):

$$E \geq E_C. \quad (4)$$

Demnach existiert ein Ionenstrom ausschließlich, wenn Bedingung (4) erfüllt ist. Die Überlastung des Isoliergases entsteht beispielsweise durch die Geometrie von Fremdpartikeln im Feldraum. Für das Erreichen der Einsetzungfeldstärke ist die lokale Feldüberhöhung entscheidend, welche universell in allen Anordnungen erreichbar und durch das Erreichen der Abhebefeldstärke beeinflussbar ist. Allerdings entscheidet die Materialdichte über die Abhebefeldstärke (vgl. Kapitel 1.2.1), während die Partikelform E_C auch ohne Abheben beeinflusst. Dies liegt daran, dass bewegliche Partikel auch ohne das Erreichen der Abhebefeldstärke eine lokale Feldüberhöhung erzeugen, durch welche die Einsetzungfeldstärke erreicht wird. Daher ist Gl. (4) das notwendige Kriterium für das Auftreten des Ionenstroms, während die Erfüllung von Gl. (1) ein hinreichendes Kriterium zum Auftreten eines Ionenstroms darstellt.

Die durch die Überlastung des Isoliergases entstehenden Teilentladungen erzeugen im äußeren elektrischen Feld (DC) driftende Raumladungen (vgl. Streamer-Mechanismus, z. B. [18], [44]).

Diese Raumladungen erzeugen nach dem Shockley-Ramo-Theorem einen Strom an der Erdelektrode, der messbar ist. Aufgrund der Messwerterfassung sind besonders konstant driftende Raumladungen detektierbar (vgl. Kapitel 2.2.1), sodass Entladungsformen mit Gleichanteil, wie z.B. positive und negative Glimmentladungen, Streamer und Durchschläge [41], zum Ionenstrom beitragen. Allerdings finden Durchschläge in dieser Arbeit keine weitere Berücksichtigung im Ionenstrom, um die Messtechnik zum Schutz vor Überströmen abzuschalten.

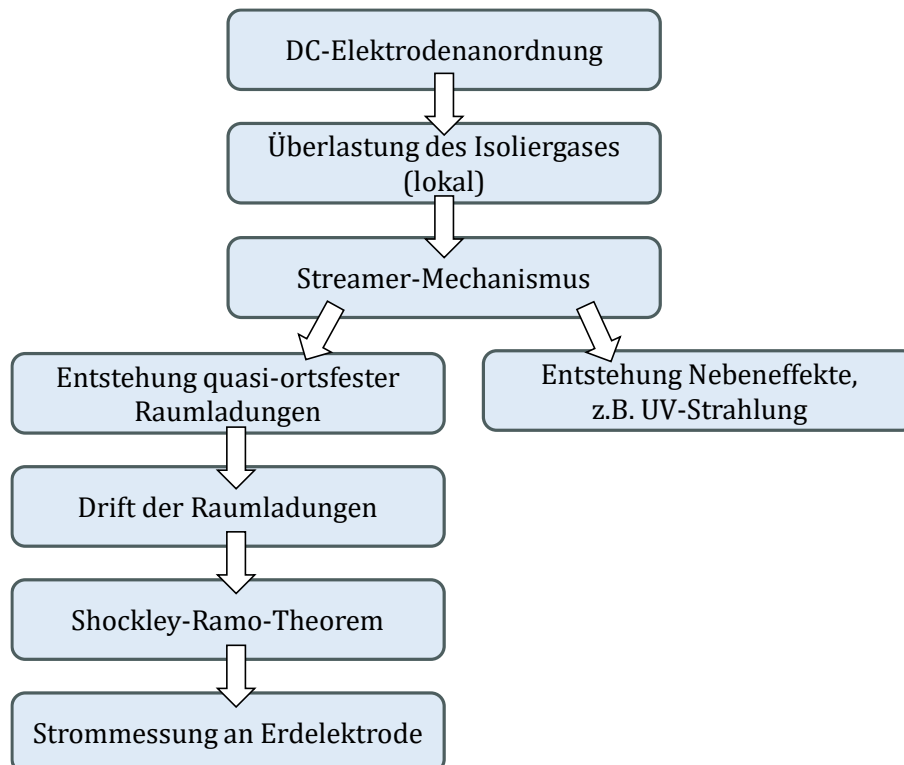


Abbildung 1-8: Entstehung des Ionenstroms unter Berücksichtigung des Entladungsmechanismus

Für Leiteranordnungen in Luft kann zur Berechnung von E_c der Ansatz nach Whitehead [45] oder Peek [46] nach [41] genutzt werden:

$$E_c = mE_0 \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r_c}} \right). \quad (5)$$

Dieser Ansatz erlaubt in Abhängigkeit der Geometrie einer Anordnung die Berechnung der Einsetzspannung. Hierbei sind m die Oberflächenrauigkeit des Innenleiters (zwischen null und eins), E_0 und K empirische Konstanten, r_c der Leiterradius und δ die relative Luftdichte mit der Temperatur t , dem Luftdruck p und den Normalwerten $t_0 = 20 \text{ °C}$ und $p_0 = 1013 \text{ mbar}$:

$$\delta = \left(\frac{273+t_0}{273+t} \right) \left(\frac{p}{p_0} \right). \quad (6)$$

Tabelle 1-4: Empirische Konstanten der Peek-Formel nach Whitehead [45]

Polarität	E_0 in kV/cm	K in $\sqrt{\text{cm}}$
Positiv	33,7	0,24
Negativ	31,0	0,308

So gilt beispielsweise für eine Koaxialanordnung [47]:

$$U_C = E_c \cdot r_i \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right). \quad (7)$$

Dabei ergibt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen angelegter Spannung U und dem Ionenstrom I an der Erdelektrode, wie in [8] abgebildet und in [48] für zweidimensionale Aufbauten hergeleitet, welcher sich messtechnisch nachweisen lässt. Dieser quadratische Zusammenhang gilt für den Arbeitspunkt einer angelegten Spannung oberhalb der Einsetzspannung bis zum Auftreten eines Durchschlags und beschränkt sich auf die rechtsseitige Parabelhälfte (vgl. [8]). Die Bereiche unterhalb der Einsetzspannung und für den Durchschlag finden im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Berücksichtigung, da für Spannungen unterhalb der Einsetzspannung eine unselbständige Gasentladung vorliegt (vgl. [18]) und Durchschläge mit einem starken Stromanstieg einhergehen [18]. Für Spannungen unterhalb der Einsetzspannung entsteht der Ionenstrom dagegen durch driftende Raumladungen, welche nicht zur selbständigen Gasentladung beitragen (vgl. [18]).

Bei der Datenauswertung ist zu berücksichtigen, dass keine Gauß'sche Normalverteilung der Ionenstrommesswerte für eine angelegte Spannung vorausgesetzt werden kann, weshalb die **Messunsicherheit** wie in [43] betrachtet und bestimmt wird. Dazu wird die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung zur Bestimmung der Unsicherheit der Messdaten Δy_{Meas} angewandt, in der die Unsicherheiten durch die Messgeräte $\Delta x_{1..n}$ (s. Kapitel 2.2.2) berücksichtigt werden. Allgemein berechnet sich die systematische Messunsicherheit zu: [49]

$$\Delta y_{\text{Meas}} = \frac{dy}{dx_1} \cdot \Delta x_1 + \dots + \frac{dy}{dx_n} \cdot \Delta x_n \quad (8)$$

Speziell für die durchgeführten Messungen ist die Messunsicherheit des Ionenstroms ΔI_{Meas} in Abhängigkeit der Verstärkung des verwendeten Verstärkers $V_{\text{amplifier}}$, der zugehörigen Unsicherheit $\Delta V_{\text{amplifier}}$ und der Messunsicherheit der Datenerfassungs-(DAQ)-Karte ΔU_{Meas} anzugeben [43]:

$$\Delta I_{\text{Meas}} = \frac{dI_{\text{Meas}}}{dV_{\text{amplifier}}} \cdot \Delta V_{\text{amplifier}} + \frac{dI_{\text{Meas}}}{dU_{\text{Meas}}} \cdot \Delta U_{\text{Meas}}. \quad (9)$$

Diese Grundlagen werden auf den arithmetischen Mittelwert mit der Standardabweichung nach [50] angewandt. Des Weiteren wird für den quadratischen Zusammenhang ein Parabelfitting⁴ mit quadratischer Regression angewandt.

1.4 Modellierungsgrundlagen von Ausfallrisiken

Der Abnutzungsvorrat eines Systems und damit die Bewertung der Funktionsfähigkeit wird allgemein mittels Zustands- und Risikomodellierung beschrieben. Ziel der Modellierung ist es, sowohl empirisch erfasste Informationen als auch Expertenwissen so zu verarbeiten, dass sinnvolle Merkmale extrahiert und intuitive Ergebnisse erzielt werden. Dabei bietet ein sog. Asset Health Index als Ergebnis fallspezifisch eine Übersicht über den Zustand eines Betriebsmittels, eine Handlungsempfehlung sowie einen Zeithorizont zur Umsetzung der Empfehlung [51]. Um ein auf Messdaten basierendes Risikomodell zu erstellen, mit dem der Zustand, bzw. Abnutzungsvorrat eines gasisolierten Systems beschrieben wird, bestehen verschiedene Ansätze in der Literatur: Zum Einen umfasst der Bereich der **Sensor fusion** verschiedene Algorithmen zur Verarbeitung von Daten mehrerer Sensoren sowie Expertenwissen [52], so auch z. B. die KI-basierte Datenauswertung mittels Evidenztheorie und Fuzzy Logik [52], [53], [54]. Diese Modellansätze sind besonders für Daten mit epistemischer Unsicherheit anzuwenden, d.h. wenn bei Daten Wissen fehlt und die Datenlage gering ist [52]. Zum Anderen präsentiert die CIGRÉ mit [6] eine **empirische Risikomodellierung** auf Basis einer AC-TE-Messung, die eine Berechnung der Fehler-, bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit darstellt. Somit ermöglichen beide Modellierungsansätze die Datenauswertung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren, deren Ziel die Beschreibung des Abnutzungsvorrats ist.

In der Literatur finden sich weitere Modellierungsgrundlagen, die im Wesentlichen wissensbasierte Systeme nach [55] beschreiben. Dazu gehört beispielhaft maschinelles Lernen [55]. Allerdings finden weitere Ansätze in dieser Arbeit keine Anwendung, da einerseits kein direkter physikalischer oder mathematischer Zusammenhang zwischen einem Ionenstrom und der Abnutzung eines Isoliergases bekannt ist. Andererseits liefert die Ionenstrommessung reproduzierbare Ergebnisse, allerdings können Fehlerursachen nicht ohne Hinzunahme weiterer Informationen den Messergebnissen zugeordnet werden, da die Ionenstrommessung auf Ereignisse, z. B. Feldüberhöhungen reagiert, nicht aber auf Materialien oder Partikelformen, wenn sie keine anderen Auswirkungen haben (vgl. Kapitel 4). Somit spielen Erfahrungswerte und Unsicherheiten bei der Interpretation hinsichtlich des Abnutzungsvorrats des Isoliergases

⁴ The MathWorks Inc., *Matlab® Mathematics*, Dokumentation zu R2024b.

eine wichtige Rolle, was in empirischen und evidenztheoretischen Modellen Berücksichtigung findet.

1.4.1 Grundlagen der empirischen Risikomodellierung der CIGRÉ

Referenz [56] zeigt für die Risikoermittlung an elektrischen Betriebsmitteln verschiedene Darstellungsweisen auf, wie z. B. ein Risikodiagramm oder eine Risikomatrix. Dabei wird jeweils ein Zusammenhang zwischen den Konsequenzen eines Ausfalls und der Ausfallwahrscheinlichkeit hergestellt. Dieser Zusammenhang wird im empirischen Risikomodell der CIGRÉ [6] genutzt, um eine **Ausfallwahrscheinlichkeit** basierend auf einer TE-Messung an einem Betriebsmittel zu berechnen. Zur Berechnung der dielektrischen Ausfallwahrscheinlichkeit eines Systems basierend auf TE-Messung berechnet [6] die absolute Fehlerwahrscheinlichkeit (engl.: *total failure probability*) TFP zu

$$TFP = 1 - (1 - (R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cdot FP)) \cdot c_{\text{konst}} \quad (10)$$

mit der Fehlerwahrscheinlichkeit (engl.: *failure probability*) FP

$$FP = \sum_{i=1}^{N_I} IP_i, \quad (11)$$

welche von den technischen Einflussfaktoren (engl.: *impact parameter*) IP_i

$$IP = 1/(N_A N_I) \sum_{j=1}^{N_A} A_j \quad (12)$$

abhängt. Weitere Symbole sind: Aspekte A_j , welche über die Anzahl der Aspekte N_A , die Anzahl der Einflussparameter N_I und Minimum und Maximum des Risikowerts pro TE verursachenden Defekt, R_{\min} und R_{\max} , mit IP_i zusammenhängen, und die empirische Konstante c , die basierend auf Erfahrungswerten gewählt wird. Da Erfahrungswerte für unterschiedliche Betriebsmittel und Fehlerarten für interpretierendes Fachpersonal unterschiedlich sind, ist eine Reproduzierbarkeit der Risikoermittlung nicht gewährleistet. Des Weiteren bestimmt bei der empirischen Modellierung die Art des TE verursachenden Defekts die Anzahl und Wertebereiche der Einflussparameter und Aspekte, d.h. die Art des Defekts muss anhand der Diagnosemessung eindeutig identifizierbar sein und lässt keine Unsicherheiten zu. Die Einflussparameter und Aspekte sind daher abhängig vom Defekt und die Bewertung für alle Aspekte im Hinblick auf die Konsequenzen für das betrachtete System erfolgt anhand von Expertenwissen. [6] Hierbei umfassen die den Fehler beeinflussenden Einflussparameter IP_i die Aspekte A_j , welche detailliert das Fehlerbild einer Fehlerursache anhand des Wertebereichs von 0...1 beschreiben. Zu den Einflussparametern gehören beispielsweise Eigenschaften der Fehlerursache, Orte, an denen die Fehlerursachen auftreten und die Spannungsabhängigkeit der detektierbaren Fehler. Zu diesen Einflussparametern gehören weiterführend Aspekte wie z.B.

zur Spannungsabhängigkeit die Aspekte Spannungslevel und das Vorliegen einer überlagerten Spannungsform.

1.4.2 Grundlagen der Evidenztheorie

Im Gegensatz zum empirischen Modellierungsansatz liefert eine evidenztheoretische Risikoermittlung ein reproduzierbares Ergebnis, welches Erfahrungen beim Eintreten von Ereignissen berücksichtigt und nicht von der Erfahrung des Durchführenden abhängt. So ergibt sich fallspezifisches Wissen (auch: Evidenz), das den akuten Problemfall beschreibt [55]. Die zugrundeliegende Evidenztheorie [53], [54] (auch: Dempster-Shafer-Theorie) erlaubt die **Darstellung unvollständigen Wissens** mithilfe der Glaubensfunktion (engl.: *belief function*) und verarbeitet das vorhandene Wissen mithilfe der Kombinationsregel, die in der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie nicht zulässig ist, da sich Wahrscheinlichkeiten allgemein nicht aus einzelnen Konjunkten berechnen lassen [55]. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Evidenztheorie die Berücksichtigung unvollständigen Wissens mittels Glaubensfunktion und Kombinationsregel, wodurch kognitive Hintergründe zum Generieren eines Ergebnisses berücksichtigt werden. Ein Veranschaulichungsbeispiel dazu ist in Anhang B dargestellt. Somit stellt die Evidenztheorie einen Grundstein für Datenfusionsalgorithmen dar [57].

Die folgenden Grundlagen der Evidenztheorie entstammen [55], wenn nicht anders angegeben. Der **Wahrnehmungsrahmen** Ω (engl.: *frame of discernment*) beinhaltet alle Ereignisse, die möglich sind oder sich gegenseitig ausschließen, weshalb alle Ereignisse eine Teilmenge von Ω sind, die sich aussagenlogisch ausdrücken lassen. Dazu ist ein **Basismaß** (engl.: *basic probability assignment*) als Funktion über alle möglichen Zustände innerhalb des Wahrnehmungsrahmens, der Potenzmenge 2^Ω ,

$$m: 2^\Omega \rightarrow [0,1] \quad (13)$$

definiert und repräsentiert eine Evidenz. Um sicherzustellen, dass dem unmöglichen Ereignis oder der leeren Menge kein Glauben geschenkt wird, gelten die folgenden beiden Bedingungen:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1. \quad (15)$$

Dabei stellt $m(A)$ das **Basismaß** (auch Massezahl genannt) dar, das genau der Menge A zugewiesen ist, und die Gesamtmasse des Glaubens 1 beträgt. [15], [53], [55] Darüber hinaus gibt es fokale Elemente für die Teilmenge $A \subseteq \Omega$, wenn $m(A) > 0$ erfüllt ist. Es ist zu berücksichtigen, dass die Evidenztheorie keine Vorschriften zur Bestimmung des Basismaßes vorgibt [15].

Daraus ergeben sich die **Glaubensfunktion** Bel (auch Glaubensgrad) und **Plausibilitätsfunktion** Pl (auch Plausibilitätsgrad) zu

$$Bel: 2^\Omega \rightarrow [0,1], \quad Bel(A) := \sum_{B \subseteq A} m(B), \quad (16)$$

$$Pl: 2^\Omega \rightarrow [0,1], \quad Pl(A) := \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B). \quad (17)$$

Die Glaubensfunktion gibt dementsprechend die Sicherheit an, mit der die Ereignisse der Teilmenge $B \subseteq A$ sich akkumulieren. Analog gilt dies für die Plausibilitätsfunktion, für die sich die Ereignisse $A \cap B \neq \emptyset$ aufsummieren, sodass sich für die Sicherheit der Ereignisse B ein Wertebereich zwischen der Plausibilitätsfunktion als oberer Grenze und der Glaubensfunktion als unterer Grenze ergibt. [54]

Die Definition der Glaubensfunktion ermöglicht auch die Darstellung vollkommen unvollständigen Wissens durch

$$Bel(A) = Bel(\neg A) = 0, \quad (18)$$

wobei das **Maß für die Unwissenheit** $Igr(A)$ der Abstand zwischen $Pl(A)$ und $Bel(A)$ ist (vgl. Abbildung 1-9): [52], [55]

$$Igr(A) = Pl(A) - Bel(A). \quad (19)$$

Da Glaubens- und Plausibilitätsfunktion nicht voneinander unabhängig sind, gilt [15]:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\neg A) \quad (20)$$

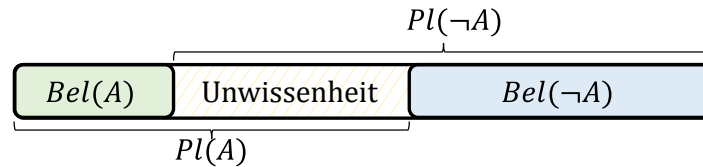


Abbildung 1-9: Darstellung von Glaubens- und Plausibilitätsgrad nach [15]

Um verschiedene Evidenzen (engl.: *pieces of evidence* oder *bodies of evidence*) zur Bewertung einer Hypothese zu kombinieren, ist die **Dempster'sche Kombinationsregel** unter der Annahme, dass die Quellen der verschiedenen Evidenzen unabhängig voneinander sind, wie folgt definiert: Mit den Glaubensfunktionen Bel_1 und Bel_2 über den gemeinsamen Wahrnehmungsrahmen Ω , die durch zwei Basismaße m_1, m_2 beschrieben werden, und dass für die normalisierende Konstante K_{norm}

$$K_{\text{norm}} = \left[\sum_{X \cap Y \neq \emptyset} m_1(X) m_2(Y) \right]^{-1} \neq 0 \quad (21)$$

gilt, ist die Kombinationsregel

$$m_1 \oplus m_2(A) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } A = \emptyset \\ \frac{\sum_{X \cap Y = A} m_1(X) m_2(Y)}{\sum_{X \cap Y \neq \emptyset} m_1(X) m_2(Y)}, & \text{wenn } \emptyset \neq A \subseteq \Omega \end{cases} \quad (22)$$

mit

$$Bel_1 \oplus Bel_2(A) = \sum_{B \subseteq A} m_1 \oplus m_2(B) \quad (23)$$

definiert, woraus aufgrund der Akkumulation nach Gl. (16) eine stärkere Sicherheit für die Ereignisse der Teilmenge B resultiert. Falls $\frac{1}{k_{\text{norm}}} = 0$ gilt, ist Gl. (23) nicht definiert und Bel_1 und Bel_2 sind unvereinbar. Darüber hinaus resultiert aus

$$m_1 \oplus m_2(A) = 0, \text{ wenn } A = \emptyset \quad (24)$$

ein Informationsverlust: Falls einer Kombination eine leere Menge \emptyset zugewiesen ist, d.h. $X \cap Y = \emptyset$, würde das Basismaß der leeren Mengen mit

$$\sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y) > 0 \quad (25)$$

berechnet. Dieser Fall beschreibt widersprüchliche fokale Elemente A_i und B_j . Um diesen „Ausschuss“ zu korrigieren, werden die Kombinationen mit leeren Mengen verworfen und der Anteil der übrigen Kombinationen wird mit dem **Korrekturfaktor** k_{corr} multipliziert: [53]

$$k_{\text{corr}} = \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y). \quad (26)$$

Mit dem Faktor

$$K = \frac{1}{1 - k_{\text{corr}}} \quad (27)$$

erfüllt $m_1 \oplus m_2(A)$ Gl. (15), wenn

$$m(A) = m_1 \oplus m_2(A) = \left(\sum_{X_i \cap Y_j = A} m_1(X_i)m_2(Y_j) \right) K \quad (28)$$

und unter der Bedingung, dass Bel_1 und Bel_2 kombinierbar sind, d.h. Gl. (21) ist erfüllt. Damit ist $m(A)$ wieder eine orthogonale Summe von m_1 und m_2 . [53]

Der Korrekturfaktor k_{corr} ist weitergehend ein Maß für den Konflikt zweier Glaubensfunktionen. Je mehr widersprüchliche Mengen X_i und Y_j vorliegen, d.h. es gilt $X_i \cap Y_j = \emptyset$, umso stärker akkumuliert der Glauben von A

$$m_1 \oplus m_2(A) = \sum_{X_i \cap Y_j = A} m_1(X_i)m_2(Y_j), \quad (29)$$

der mit dem Korrekturfaktor k_{corr} ausgeräumt wird. Damit beschreibt k_{corr} den Umfang eines Konflikts im Wertebereich größer oder gleich eins. Um allerdings Werte zwischen null und unendlich zu erhalten, definiert Shafer die Konfliktlast Con (engl.: *weight of conflict*): [53]

$$Con(Bel_1, Bel_2) = \log(K). \quad (30)$$

Diese spiegelt den Informationsverlust aus einer Kombination wider und ist im Kontext der Diagnosemessungen ein Maß für die Robustheit, bzw. Zuverlässigkeit der Kombination. Liegt kein Widerspruch der Glaubensgrade Bel_1 und Bel_2 vor, d.h. Gl. (21) ist erfüllt, so gilt

$$k_{\text{corr}} = 0 \text{ und } Con(Bel_1, Bel_2) := 0, \quad (31)$$

während für einen vollständigen Widerspruch, also eine nicht existierende Kombination von $Bel_1 \oplus Bel_2$,

$$k_{\text{corr}} = 1 \text{ und } Con(Bel_1, Bel_2) \rightarrow \infty \quad (32)$$

gilt. Folglich gilt, dass je niedriger der Konfliktfaktor ist, umso zuverlässiger ist das Kombinationsergebnis. Ein Veranschaulichungsbeispiel zum Konfliktfaktor ist in Anhang B dargestellt.

Bislang findet die Theorie in unterschiedlichen Feldern Anwendung, so auch zur Zustandsüberwachung von Maschinen [52], [58], [59], [60], zur Fehlersuche in elektrischen Netzen [61] sowie zum Monitoring von Transformatoren [15], [62], [63], [64] oder Leistungsschaltern [65], [66], [67]. Darüber hinaus wird die Evidenztheorie mit anderen Theorien, z. B. der Fuzzy-Theorie, kombiniert, um die Unzuverlässigkeit in diversen Szenarien, z. B. bei widersprüchlichen Ergebnissen [57], zu verbessern [52], [57], [68], [69]. Zu den Erweiterungen gehört z. B. der Ansatz des *Two-Layer Conflict Solving*, der auf menschlichen Entscheidungsprozessen basiert [52]. Auf eine Erweiterung wird in dieser Arbeit allerdings verzichtet, da der Fokus dieser Arbeit grundlegend auf der Anwendbarkeit der Ionenstrommessung und den zugehörigen Auswertungsmethoden liegt.

2 Die Ionenstrommessung als Diagnosemethode

Bevor die Ionenstrommessung für Diagnosen anwendbar ist, führt Kapitel 2.1 Kriterien zur Bewertung aus der Literatur ein und leitet technische Spezifikationen für die Ionenstrommessung her. Kapitel 2.2 präsentiert anschließend ein Gesamtkonzept zur Anwendung im Labor. Anschließend folgen Darstellungen zu unterschiedlichen Laboraufbauten und den spezifischen Durchführungen für Fehlermessungen dieser Arbeit.

2.1 Spezifikationen der Ionenstrommessung für Diagnosen

2.1.1 Erfüllung allgemeiner Kriterien

Zur Bewertung von Diagnosemethoden führt [21] die in Kapitel 1.1 dargestellten Bewertungskriterien ein. Zur Bewertung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren für HVDC-Systeme im Labor werden auf dieser Basis folgende Definitionen eingeführt:

Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit bewertet die praktische Handhabbarkeit der Diagnosemethode unter Berücksichtigung der konstruktiven Eigenschaften gasisolierter Systeme. Zur Anwendbarkeit gehören Kriterien, die für Netzbetreiber und Labore als Anwender von Interesse sind, z. B. Invasivität, Platzbedarf und Anschlussmöglichkeit sowie Zeitaufwand der Diagnosemessung.

Aussagefähigkeit

Die Aussagefähigkeit beschreibt das Spannungsfeld zwischen Detektionsumfang und Detektionstiefe, bzw. Stadium der Erkennung vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeit.

Bewertungsaufwand

Der Bewertungsaufwand berücksichtigt den technischen Aufwand (die Umsetzung des Messkonzepts inkl. Messequipment) und den zeitlichen Aufwand zur Durchführung und zur automatisierten Datenauswertung. Die Anschaffungskosten werden in der vorliegenden Arbeit untergeordnet berücksichtigt.⁵

Komplexität

Die Komplexität wird anhand der Zwischenschritte zur Konzeptumsetzung inkl. Auswertung bemessen, wobei Wissens- und Erfahrungsschatz des Diagnostikers Berücksichtigung finden. Außerdem geht auch die Unsicherheit des Diagnoseergebnisses mit in die Bewertung ein.

⁵ Besonders fehlende Vergleichsmöglichkeiten für diese Methode mit anderen Messmethoden und sich am aktuellen Marktgeschehen orientierende Preise verhindern einen sinnvollen Vergleich.

Negative betriebliche Auswirkungen

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Anwendung im Offline-Betrieb liegt, wird die negative betriebliche Auswirkung im Sinne des Abschaltens vorausgesetzt und nicht weiter berücksichtigt. Ausblickend erfolgt allerdings die Erörterung zur Anwendung der Ionenstrommessung im Online-Betrieb, wobei die zugrundeliegenden technischen Spezifikationen der Ionenstrommessung für Diagnosen Berücksichtigung finden.

Die dargestellten Kriterien bilden die Grundlage zur Bewertung der Ionenstrommessung. Besonders die Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit sind durch die im Folgenden zu definierenden technischen Spezifikationen beeinflussbar. Dies ist bei den Definitionen der Spezifikationen zu berücksichtigen.

2.1.2 Technische Spezifikationen

In Anlehnung an bekannte Diagnoseverfahren im Offline-Betrieb, wie z. B. die TE-Messung nach Norm [9] oder die UHF-Messung nach Erkenntnissen der CIGRÉ Working Group D1.25 [70], sind im Folgenden die technischen Spezifikationen zur Anwendung der Ionenstrommessung für Diagnosen erarbeitet. Dazu zeigt Abbildung 2-1 das Ersatzschaltbild zur Durchführung einer Ionenstrommessung, welches sich im Wesentlichen von Abbildung 1-1 durch die Quellspannung (Gleichspannung), den fehlenden Ankopplungsvierpol, AKV, und die fehlende Koppelkapazität C_K unterscheidet. Diese entfällt, da der Fokus bei einer Ionenstrommessung auf dem Gleichanteil durch driftende Raumladungen liegt.⁶ Die **Messtechnik** besteht bei der Ionenstrommessung nach [17] aus einem Transimpedanzverstärker und wird in der folgenden Arbeit durch eine DAQ-Karte ergänzt, um den Ionenstrom wie in [17] automatisiert zu erfassen. Da es sich beim Ionenstrom um den Gleichanteil des Entladungsstroms handelt, der durch das Isoliergas driftet, ist eine Grenzfrequenz f_g des Operationsverstärkers im unteren zweistelligen Bereich erforderlich. Dementsprechend wird eine **Abtastrate** f_{Abtast} der DAQ-Karte nach dem Abtasttheorem festgelegt, sodass

$$2f_g \leq f_{\text{Abtast}} \quad (33)$$

gilt [71].

⁶ Eine Koppelkapazität stellt bei einer TE-Messung die Ladung zur Verfügung [9].

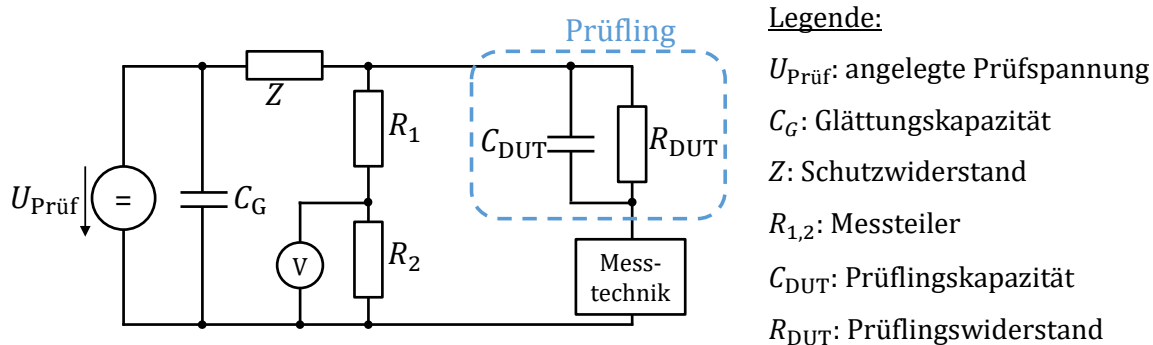


Abbildung 2-1: Ersatzschaltbild der Ionenstrommessung für Diagnosen nach Vorbild der TE-Messung nach Norm [9]

Das Ersatzschaltbild vereinfacht sich, falls die Gleichspannungsquelle eine geringe Welligkeit von max. 3% nach [8] aufweist, sodass die Glättungskapazität entfällt. Außerdem entfällt bei sicherem Betrieb, d.h. kein Durchschlag tritt auf, die Impedanz Z ebenfalls, die dem Schutz der Spannungsquelle dient und im Entladungs-, bzw. Durchschlagsfall eine Entkopplung des TE-Kreises von der Spannungsquelle sicherstellt [18]. Diese Vereinfachung nähert sich der Ionenstrommessung unter Freileitungen nach [17] an, da das Netz ebenfalls nicht vom Auftreten des Ionenstroms entkoppelt ist. Somit vereinfacht sich das Ersatzschaltbild unter den genannten Bedingungen wie in [43] zu der Schaltung in Abbildung 2-2.

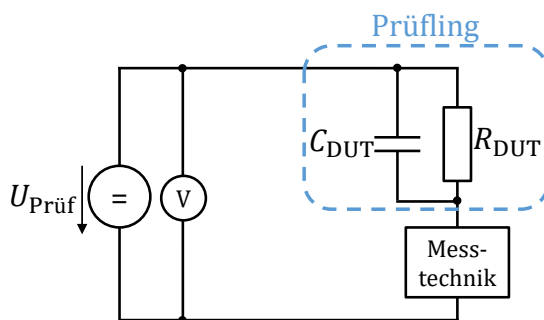


Abbildung 2-2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der Ionenstrommessung im sicheren Betrieb und geglätteter Gleichspannung

Für die **Prüfspannung** gilt, dass die Minimalspannung unterhalb der Einsetzspannung liegen muss, um diese zu erfassen, bzw. messtechnisch zu bestimmen. Dagegen liegt die maximale Prüfspannung bei 90% der für das gewählte System ermittelten Durchschlagspannung⁷. Während der Ionenstrommessung wird die Prüfspannung stufenweise erhöht, wobei eine Haltezeit der angelegten Spannung im μs -Bereich vor der Erfassung des Ionenstroms sicherzustellen ist, um den Einfluss möglicher Einschwingvorgänge durch die

⁷ Auf den Unterschied der verschiedenen Durchschlagspannungen, die statistischem Einfluss unterliegen [18], wird hier nicht weiter eingegangen. Die geeignete Wahl der Durchschlagspannung obliegt dem durchführenden Diagnostiker. Einen Hinweis liefert stets das Datenblatt des jeweiligen Betriebsmittels. Weitere Informationen zur Durchschlagspannung sind Kapitel 2.3 zu entnehmen.

Spannungsüberhöhung zu vermeiden (vgl. [29]). Pro Spannungsstufe sind mehrere Werte für den Ionenstrom zur **statistischen Sicherheit** zu ermitteln und aus diesen Werten ist der Mittelwert zu bilden, um zeitliche Einflüsse, z. B. durch einen Verschiebungsstrom, herauszurechnen⁸ [17]. Des Weiteren gilt für die Prüfspannung, dass eine geringe Restwelligkeit vorliegen muss, um einen gleichmäßigen Drift der Ladungsträger zu gewährleisten (vgl. [17]). In [43] wird eine Prüfspannung mit einer Restwelligkeit von 0,001 % für Laborversuche genutzt, die unterhalb der Empfehlung von 3 % für TE-Messungen für HVDC-GIS in [8] angeführt wird.

Tabelle 2-1: Übersicht technischer Spezifikationen zur Durchführung der Ionenstrommessung in der vorliegenden Arbeit

Technische Parameter	Einstellung
Prüfspannung & Welligkeit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gleichspannung ▪ Minimalspannung: unterhalb der Einsatzspannung ▪ Maximalspannung: max. 90 % der Durchschlagspannung ▪ Welligkeit < 3 % nach [8]
Haltezeit	µs-Bereich nach Berechnung in [8]
Abtastrate	Min. 2-fache Grenzfrequenz des Filters nach Abtasttheorem [71]
Grenzfrequenz Filter	10 Hz

2.2 Anwendung der Ionenstrommessung

Um die Ionenstrommessung mit den in Kapitel 2.1 beschriebenen technischen Parametern anzuwenden, bildet das Anwendungskonzept einen Leitfaden zur Durchführung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren. Anschließend sind die verschiedenen Aufbauten, Koaxial-, Spitze-Platte-Anordnung und RC-Spannungsteiler dargestellt und es ist gezeigt, wie die Ionenstrommessung an diesen Systemen jeweils durchgeführt wird.

2.2.1 Anwendungskonzept

Um eine Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren an einem gasisolierten HVDC-System durchzuführen, sind die in Abbildung 2-3 dargestellten Schritte notwendig. Diese berücksichtigen sowohl die Vorbereitung des Prüflings, d. h. eine Sicherstellung des Offline-Betriebs des Prüflings sowie die Inbetriebnahme der Messtechnik, Festlegung der maximalen Prüfspannung, sodass die Spannungsbelastung den Prüfling nicht (permanent) beschädigt, und die Durchführung der Referenz- und Ionenstrommessung. Für die einzelnen Schritte sind folgende Punkte zu beachten:

⁸ Alternative Methoden zum Herausrechnen des Verschiebungsstroms sind in [17] aufgeführt.

- Bevor eine Ionenstrommessung durchgeführt wird, ist der **Prüfling** gemäß der Sicherheitsregeln [72] freizuschalten und ein Anschluss der Messtechnik im Erdungspfad des Prüflings zu ermöglichen.
- Beim **Kalibrieren der Messtechnik** ist der gesamte Messbereich des zu erwartenden, bzw. des messbaren Ionenstroms zu berücksichtigen. Dazu wird nach [17] ein Strom an der Erdelektrode injiziert und mithilfe der gewählten Messtechnik entsprechend erfasst.
- Zur **Festlegung der minimalen Prüfspannung** wird die Einsetzspannung bestimmt. Dafür wird entweder in der Durchführung die Spannung soweit gesteigert, bis ein Strom oberhalb des Grundrauschpegels unter der Berücksichtigung von Gl. (9) detektierbar ist, oder es wird auf Basis theoretischer Berechnungen wie Gl. (5)-(7), Datenblättern, bzw. Betriebserfahrungen die minimale Prüfspannung unterhalb der Einsetzspannung festgelegt.
- Für die **Festlegung der maximalen Prüfspannung**, die oberhalb der Einsetzspannung liegt, sind Kenntnisse über die dielektrische Festigkeit des Prüflings zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme erforderlich (vgl. Abbildung 1-2, Punkt 1). Beispielsweise kann die maximale Prüfspannung einem Datenblatt entnommen werden. Falls die Gefahr einer permanenten Beschädigung durch TE oder Durchschlag besteht, sind Vorversuche zur sicheren Durchführung der Ionenstrommessung durchzuführen. Beispielsweise kann eine Stehspannungsprüfung nach Norm [19] durchgeführt werden. Neben der dielektrischen Festigkeit sind die Stromtragfähigkeit und thermische Belastbarkeit nicht zu vernachlässigen, um eine Beschädigung zu verhindern.
- Die **Referenzmessung** für einen Prüfling ist zu einem Zeitpunkt vor der Diagnosemessung durchzuführen und dient als Grundlage zur Beurteilung der Veränderung des Abnutzungsvorrats sowie der Erstellung einer Abnutzungsprognose. Bei Spannungssteigerung sind während der Messung Wartezeiten zu berücksichtigen, um die Übergangszeit zwischen kapazitiven zu resistiven Feldbedingungen abzuwarten (vgl. [8]).
- Die **Ionenstrommessung** wird zeitlich nach der Referenzmessung durchgeführt und der Strom wird über der angelegten Gleichspannung in Anlehnung an [17] auf Grundlage von Gl. (3) ermittelt.
- Die Daten der Referenzmessung liegen der **Datenauswertung** zugrunde, sodass eine Bewertung des Abnutzungsvorrats und eine Abnutzungsprognose ermittelbar sind (vgl. Kapitel 2.2.4)

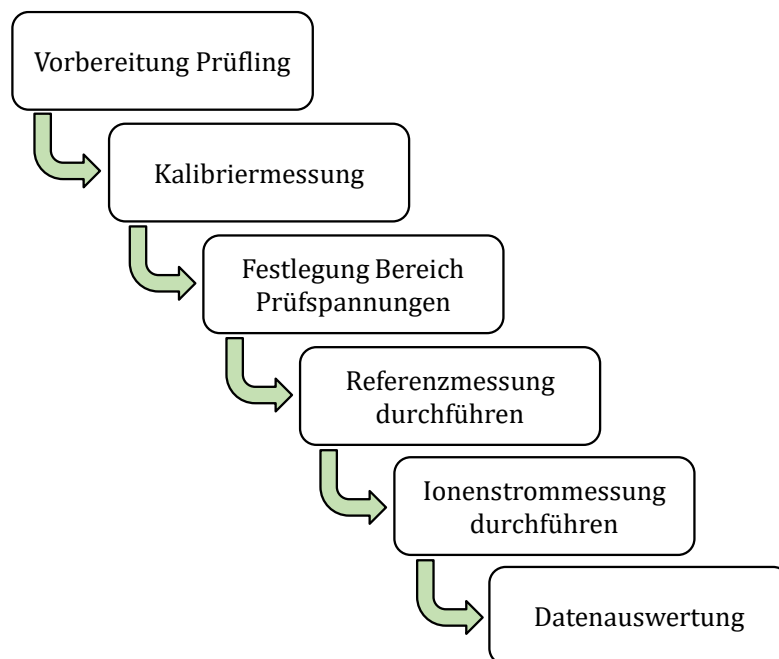


Abbildung 2-3: Ablaufdiagramm zur Durchführung der Ionenstrommessung zu Diagnosezwecken bei DC im Labor

Des Weiteren sind bei den Ionenstrommessungen sowohl systematische als auch zufällige Einflussfaktoren (vgl. Tabelle 2-2) zu berücksichtigen und, wenn möglich, zu verhindern oder aus den Messdaten herauszurechnen. Die folgenden Aufbauten folgen daher dem bislang dargestellten Messablauf und berücksichtigen die Einflussfaktoren bei der Datenauswertung.

Tabelle 2-2: Einflussfaktoren auf die Ionenstrommessung

Einflussfaktor	Beispiele
Variabilität der Versuchsbedingungen	Messspannung [41], [43], [73], [74], [75], Polarität [74], [75], [76], Abstand der Elektrode zum Ionenstromsensor [73], [74], [77], [78], Elektrodenbeschaffenheit (Rauigkeit) [75], [79], Volumen (GIS) [80], Symmetrie der Anordnung [75] Klimatische Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Umgebungsdruck [43], Wind [81]) [75], Verunreinigungen (s. Kapitel 4.3 und 5.2)
Zufällige Fehler	Statistische Variation der Ionenströme [73], Rauschen der Messgeräte [82]
Systematische Fehler	Kalibrierungsfehler [83], ungenaue Geräte [83], Fehler durch langen Betrieb der Messgeräte [17], Verschiebungsstrom durch zeitabhängige Feld- / Ladungsänderungen [17], Feldverzerrungen [17]
Nachweisgrenze	Niedrigste Konzentration / Menge der zu messenden Zielgröße [84]
Menschliches Versagen	Falsches Ablesen, falsche Interpretation von Daten
Natürliche Variabilität	Gasentladungen [18], [85]

2.2.2 Aufbau & Durchführung an einer GIL

Referenz [Ve02] zeigt den Aufbau und die Durchführung eines Teilstücks einer gasisolierten Leitung. Der Aufbau steht in der Klimakammer [86], um das Klima sowohl innerhalb als auch außerhalb der GIL konstant auf 20°C und 40% r. F. zu halten und ist entsprechend mit einer Hochspannungsdurchführung an die Hochspannungsquelle⁹ angeschlossen. Das zugehörige Ersatzschaltbild basiert auf Abbildung 2-1 und vereinfacht sich (vgl. Abbildung 2-5), da die verwendete Quelle laut Datenblatt¹⁰ eine Restwelligkeit der angelegten Spannung von 0,001% bereitstellt, sodass die Glättungskapazität entfällt. Darüber hinaus entfällt aufgrund der Voruntersuchungen zur Spannungsfestigkeit der Schutzwiderstand für die Quelle. Somit ergibt sich der Versuchsaufbau wie in Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 mit Foto und zugehöriger Skizze des Koaxialaufbaus. Die Messtechnik besteht hierbei wie in [43] aus einem Transimpedanzverstärker¹¹ und einer DAQ-Karte¹².

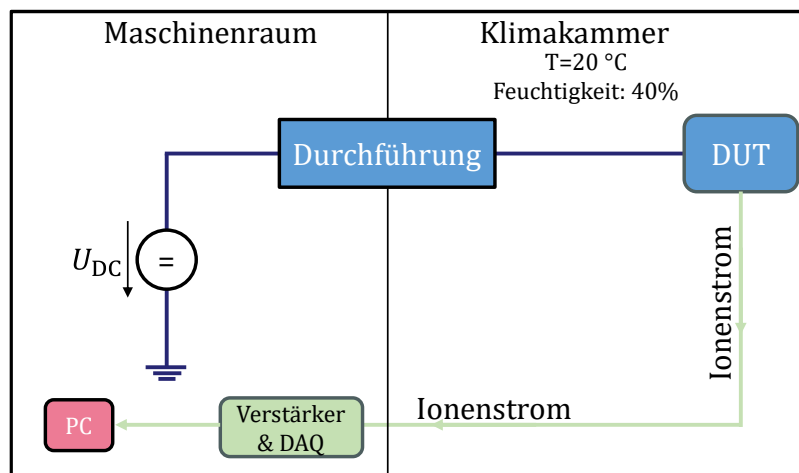


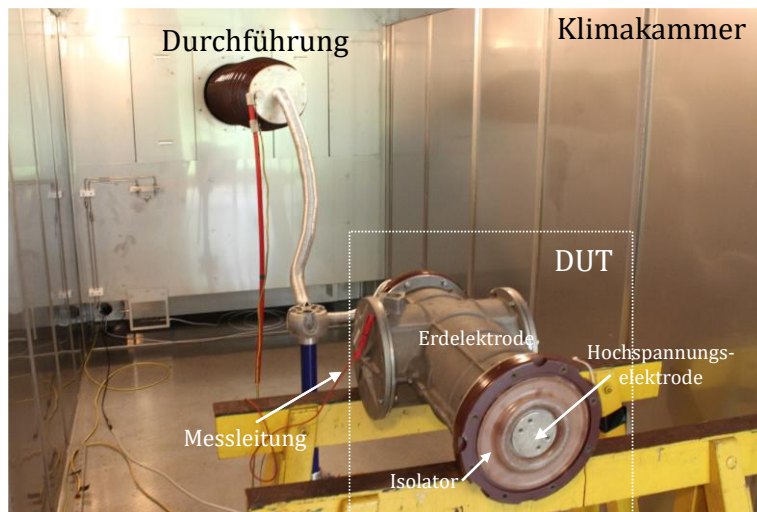
Abbildung 2-4: Übersicht Aufbau Klimakammer

⁹ Heinzinger PNChp 100000-6ump. Datenblatt: Heinzinger power Supplies, Betriebsanleitung Heinzinger PNC-/ PNChp-Series. Online verfügbar unter: <https://www.heinzinger.com/de/produkte/pnc-serie> (letzter Zugriff: 21.01.2025 12:13 Uhr).

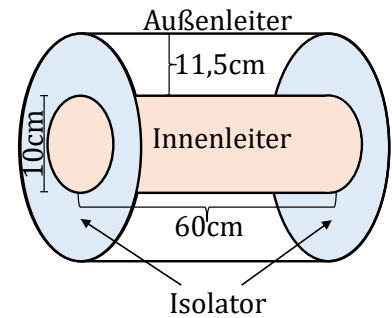
¹⁰ Datenblatt: s. o.

¹¹ Femto DLPCA-200. Datenblatt: Femto Messtechnik GmbH, Datenblatt DE-DLPCA-200, 2019. Online verfügbar unter: <https://www.femto.de/images/pdf-dokumente/de-dlPCA-200.pdf> (letzter Zugriff: 19.03.2025).

¹² NI USB 6341. Datenblatt: National Instruments, NI 6341 Device Specifications, X Series Data Acquisition: 500 kS/s, 16AI, 24DIO, 2AO, 2023. Online verfügbar unter: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6341-specs/page/specs.html> (letzter Zugriff: 19.03.2025).



a) Foto des Aufbaus im Prüfraum der Klimakammer



b) Skizze des GIL-Teilstücks

Abbildung 2-5: Koaxialaufbau

Mit den Maßen des Innenleiterradius von $r_1 = 5 \text{ cm}$ und der Schlagweite von $s = 11,5 \text{ cm}$ bei einer Länge von 60 cm lässt sich der Schwaiger'sche Ausnutzungsfaktor nach [18], [29] mit dem Geometriefaktor p zu

$$\eta = \frac{1}{p-1} \text{ mit } p = \frac{r_1+s}{r_1} \quad (34)$$

zu $64,07 \%$ berechnen. Damit ist der Homogenitätsgrad ausreichend klein, um bei auftretenden Entladungen keinen direkten Durchschlag wie in einem Plattenkondensator zu provozieren (vgl. [18]), während aber das elektrische Feld an der Erdelektrode, abhängig vom Material, ausreichend groß ist, um für ausgewählte Partikel die Abhebefeldstärke zu überschreiten. Da das Erreichen der Abhebefeldstärke in HVDC-Betriebsmitteln im Feld vorkommt (vgl. [8]), ist der Aufbau geeignet, um Partikelkontamination wie in Kapitel 1.2 nachzubilden.

Die minimale Prüfspannung wird unterhalb der Nennspannung unter Berücksichtigung der dielektrischen Festigkeit des Isoliergases Luft und der Abhebefeldstärken der verschiedenen Partikelformen festgelegt (vgl. Kapitel 4.3). Als Orientierungswert für die Referenzmessung dienen dabei Gl. (5)-(7), mit denen die Einsetzspannung am Koaxialleiter mittels Peek-Formel zu berechnen ist (vgl. Kapitel 1.3). Die Oberflächenrauigkeit wird dafür mit $0,2$ definiert, um die Abnutzung des Innenleiters (mit sichtbaren Oberflächenfehlern) zu berücksichtigen. Für positive Polarität liegt sie in einer idealen Anordnung bei $31,07 \text{ kV}$, für negative Polarität beträgt sie $-29,36 \text{ kV}$. Da die Koaxialanordnung allerdings nicht ideal ist, sondern über einen Abstand von je 5 cm zu den Isolatoren einen inhomogenen Verlauf aufweist (vgl. [43]), liegt die tatsächliche Einsetzspannung in Versuchen niedriger. Allerdings liegt die Durchschlagspannung mit $36,5 \text{ kV}$ der gereinigten Anordnung oberhalb der theoretisch berechneten

Einsetzspannungen für beide Polaritäten (im Betrag) und es sind Messungen oberhalb der Einsetzspannung ohne einen Durchschlag durchführbar.

Die maximale Prüfspannung ist abhängig von Verschmutzungsart und Ablagerungsort und wird mittels vereinfachter Durchschlagversuche ermittelt, in denen die Spannung in 0,5kV-Schritten bei Umgebungsbedingungen von 20 °C und 40 %r. F. gesteigert wird, bis ein Durchschlag auftritt.¹³ Zusätzlich sind 3 kV als Sicherheitsabstand für die Messungen zu berücksichtigen. Zur Durchführung der Verschmutzungstests ist die Vorgehensweise nach Kapitel 2.2 gewählt, wobei nach der Referenzmessung die Verschmutzung appliziert wird und vor der Durchführung einer weiteren Messung der Aufbau gründlich mit Isopropanol (90 %) gereinigt wird. Eine Übersicht der Verschmutzungsmaterialien und -formen liefert Tabelle 2-3, während Abbildung 2-6 Fotos der gewählten Verschmutzungsmaterialien inkl. Größenordnungen liefert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass abhängig von der Entstehung verschiedene Formen, Größen und Materialien in HVDC-Equipment auftreten. Deshalb bilden die puderförmigen Partikel eine Kontamination durch Vibrationen und den einhergehenden Abrieb ab, während Granulate und Späne Verunreinigungen während Fertigung und Montage nachbilden.

Tabelle 2-3: Übersicht der Verschmutzungsmaterialien und -arten der GIL-Versuche

Material vs. Form	Puder	Granulat	Späne
Aluminium	x	x*	xo*
Kupfer	x	x	
Eisen			x

Legende für den Ablagerungsort:
 x: Erdelektrode
 o: Isolator
 *: Hochspannungselektrode



a) Aluminium: Puder (<100 µm), Granulat (0,5...1,5) mm, Späne

¹³ Zum Schutz der Messtechnik ist diese im Vorversuch nicht anzuschließen und der Prüfling direkt zu erden.



b) Kupfer: Puder ($<38\ \mu\text{m}$), Granulat (1,6...1,8) mm



c) Eisen: Puder ($<30\ \mu\text{m}$), Granulat (0,9...1,2) mm, Späne

Abbildung 2-6: Fotos der dargestellten Verschmutzungsmaterialien auf Millimeterpapier (jeweils v.l.n.r. unter Angabe der Durchmesser)

Bei der Durchführung von Verschmutzungstests ist vorab die Abhebefeldstärke zu bestimmen, um zu ermitteln, ob die Verschmutzungspartikel potentiell abheben. Die Berechnung erfolgt nach Ausführungen in Kapitel 1.2.1 und wird für die maximale Prüfspannung von 33,5 kV mit der elektrischen Feldstärke an der Erdelektrode (ohne Verschmutzung) verglichen, welche mithilfe des COMSOL-Modells in Anhang A aufgrund der Mesh-Genauigkeit und der zugrundeliegenden Physik abgeschätzt wird. Nach [43] ist das elektrische Feld allerdings entlang des Innenleiters nur über die effektive Leiterlänge von 50 cm im stationären Zustand gleichmäßig verteilt, sodass das Berechnungsmodell für die Abhebefeldstärke lediglich in diesem Bereich anwendbar ist. Daher sind Partikel im beschriebenen Aufbau mit einem Abstand von min. 5 cm zu den Isolatoren zu platzieren. Anwendung finden besonders Partikel, die aufgrund ihrer geringen Masse abheben können, wie z. B. Granulate und Puder (s. Tabelle 2-4). Dabei ist aufgrund der unterschiedlichen Dichten und Partikelgrößen zu beachten, dass z. B. die Aluminiumpartikel abheben können, während die Kupferpartikel zu schwer sind. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Partikelgeometrie aufgrund der Feldverzerrung ein Vielfaches der elektrischen Feldstärke an ebendiesem Partikel verursacht (vgl. Anhang A), weshalb für Kupferpulver ein Abheben basierend auf der Abschätzung mit dem Modell nicht ausschließbar ist. Folglich sind für die GIL nicht nur Kontaminationen an der Erdelektrode mithilfe der Ionenstrommessung zu detektieren, sondern auch die Durchschlagfestigkeit

verringerte Verschmutzungen durch das Abheben der Partikel (vgl. Kapitel 1.2.1). Analog sind die in Kapitel 1.2.2 dargestellten Fehlerbilder für den RC-Spannungsteiler zu detektieren.

Tabelle 2-4: Übersicht der Abhebefeldstärken für Aluminium- und Kupferpartikel und Differenz zur simulierten Feldstärke an Erdelektrode (Referenz) bei maximaler Prüfspannung von 33,5 kV

Material & Dichte	Form	Mittlerer Partikelradius	Mittlere Abhebefeldstärke in kV/cm	Differenz in kV/cm
Aluminium (2,7 g/cm ³ [87])	Puder	25 µm	1,25	2,25
	Granulat	0,5 mm	5,61	1,76
Kupfer (8,96 g/cm ³ [88])	Puder	15 µm	1,74	-2,11
	Granulat	0,85 mm	13,07	-9,57

2.2.3 Aufbau & Durchführung an einem RC-Spannungsteiler

Die eigene Veröffentlichung [Ve01], bzw. das angemeldete Patent [Ve03] präsentiert einen mittels 3D-Druck gefertigten SMD-basierten RC-Spannungsteiler, an dem Untersuchungen der Ionenstrommessung für Diagnosen durchgeführt werden. Abbildung 1-5 zeigt die Konstruktion und die Einzelkomponenten des Spannungsteilers: Kapazitäts- und Widerstandsplatinen und das gedruckte Gerüst. Durch die Auslegung und Anordnung der Platinen wird die Spannung entlang der jeweiligen Platinen sowie in Helixrichtung gegen Erdpotential abgebaut. Die Nennspannung beträgt 17,1 kV und der maximale TE-Pegel bis 20,6 kV beträgt 250 fC.

Mit der dargestellten Platinenkonfiguration fällt über jedes RC-Platinenpaar die gleiche Spannung ab. Dabei wird die Spannung nicht nur in Richtung des Teilerfußes, sondern auch radial um das gedruckte Gerüst abgebaut (vgl. Abbildung 1-5). Der Homogenitätsgrad des Teilers ist näherungsweise homogen zwischen den einzelnen Platinenstufen, ist allerdings durch den helixförmigen Spannungsabbau nicht ideal. Daher ist beim Auftreten von Entladungen zwischen zwei Ebenen mit einem Überschlag zwischen den Platinen zu rechnen, wenn keine zusätzliche Fehlerursache einen Überschlag oder Durchschlag an einer anderen Stelle des Teilers herbeiführt.

Der Aufbau zur Diagnosemessung für den dargestellten Teiler erfolgt nach Abbildung 2-7. Analog erfolgt der Aufbau für einen Teiler im Feld. Hier ist zu berücksichtigen, dass der Teiler vom Netz getrennt wird und mit einer definierten Hochspannung beaufschlagt wird. Außerdem ist die Messtechnik zwischen Teilerfuß und Erdung des Teilers anzubringen sowie der Hochspannungsarm separat zu erden¹⁴.

¹⁴ Alternativ wird der Teiler über die zugehörige Unterspannungseinheit geerdet, auf die in dieser Arbeit verzichtet wird, da mit dem Teiler keine Spannungsmessung durchgeführt wird.

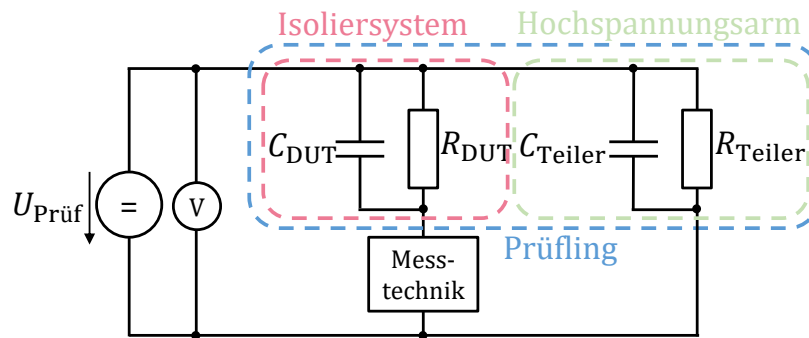


Abbildung 2-7: Laboraufbau mit Spannungsteiler

Analog zu Kapitel 2.2.2 werden Verschmutzungstests nach Tabelle 2-5 durchgeführt. Dabei sind ebenfalls unterschiedliche Materialien und Orte berücksichtigt und zwischen den Tests erfolgt eine Reinigung des Teilers. Darüber hinaus werden die Fehlerbilder (5) - (7) ebenfalls getestet: lockere Kabelverbindung, leerlaufendes Kabel auf Hochspannungspotential, fehlende Erdung. Des Weiteren findet das Koronaskop (CS) ebenfalls Anwendung, um Daten für die evidenztheoretische Modellierung (s. Kapitel 3.2) zu erhalten. Die Grundlage für diese Art der Modellierung bilden allerdings die Messergebnisse an der Spitze-Platte-Anordnung.

Tabelle 2-5: Übersicht der Verschmutzungs- und Fehlertests der Spannungsteiler-Versuche

Material vs. Form	Puder	Granulat	Späne	Legende für Ablagerungsort:	
				x: Erdelektrode	o: Isolator
Aluminium	x	x	x	*: Hochspannungselektrode	
Weitere	Lockere Kabelverbindung, leerlaufendes Kabel (auf Hochspannungspotential), fehlende Erdverbindung				

2.2.4 Aufbau & Durchführung an einer Spitze-Platte-Anordnung

Die eigene Veröffentlichung [Ve04] zeigt den Aufbau und die Durchführung der Ionenstrommessung für positive und negative Polarität an der Spitze-Platte-Anordnung, während Abbildung 2-8 den Aufbau darstellt. Als Modellierungsgrundlage finden die Verschmutzungsparameter von je 0,1g Aluminiumpulver, -span und -granulat Anwendung. Darüber hinaus wird neben der in Kapitel 2.2 dargestellten Ionenstrommessung parallel das Koronaskop mit einer Systemkamera verwendet, um zu einem Ionenstrom führende Koronaentladungen zu detektieren und zu fotografieren. Dies dient der evidenztheoretischen Modellierung in Kapitel 3.2. Um die Risikomodellierungen auf Basis der Messdaten durchzuführen, aus denen Rückschlüsse auf den Abnutzungsvorrat zu ziehen sind, ist die Beschreibung der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats wichtig.

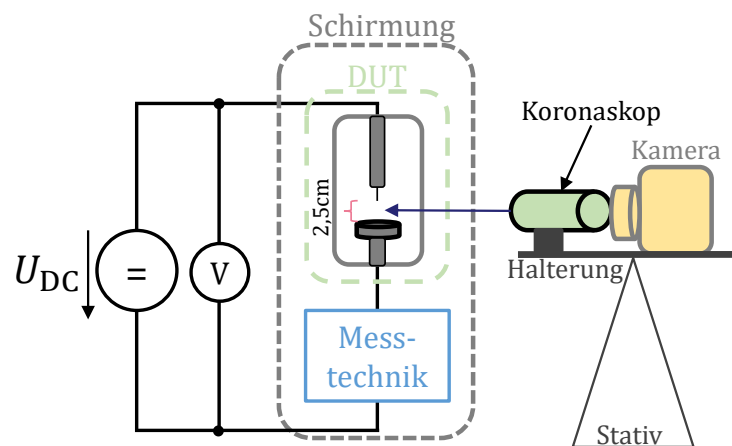


Abbildung 2-8: Spitze-Platte-Anordnung zur Ionenstrommessung

2.3 Charakteristische Größen der Ionenstrommessung: Kenngrößen des Abnutzungsvorrats

Der Abnutzungsvorrat ist in dieser Arbeit auf die Funktionserfüllung der dielektrischen Festigkeit des Isoliergases begrenzt. Daher beschreiben die Kenngrößen des Abnutzungsvorrats (auch: Zustandsindikatoren, „condition indicators“ [51]) das dielektrische Versagen des Isoliergases. Zu diesen Kenngrößen gehören sowohl qualitative als auch quantitative Informationen, die mit dem Abnutzungsvorrat in Verbindung stehen (vgl. [51]). Daher werden in dieser Arbeit die Durchschlag- und Einsetzspannung sowie der spannungsabhängige Verlauf des Ionenstroms berücksichtigt. Zur Beschreibung der Abweichungen einer vorliegenden Ionenstrommessung zur Referenzmessung sind nachfolgend die relevanten Kenngrößen aufgeführt und Abbildung 2-9 stellt die Zusammenhänge dar.

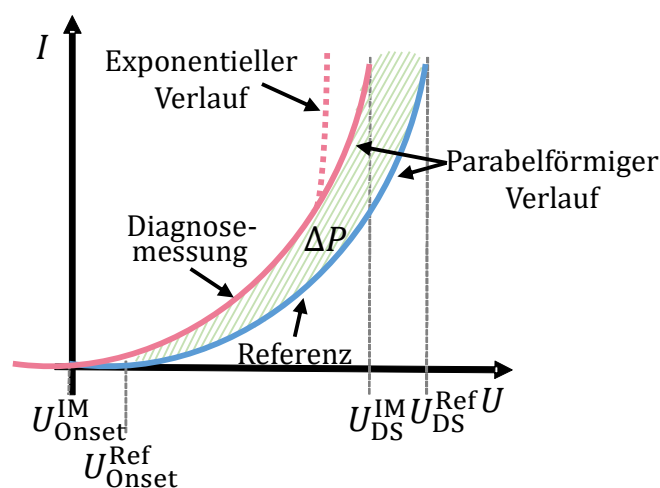


Abbildung 2-9: Kenngrößen zur Beschreibung des Abnutzungsvorrats an einer generischen Ionenstromkurve

Zunächst basiert die **verminderte Durchschlagspannung** auf der Ermittlung der maximalen Prüfspannung (vgl. Kapitel 2.2) oder einem Abbruch der Ionenstrommessung unterhalb der maximalen Prüfspannung der Referenzmessung U_{\max}^{Ref} . Die Differenz zwischen den Durchschlagspannungen der beiden Messungen, bzw. die Differenz aus maximaler Prüfspannung der Referenzmessung und Durchschlagspannung der Ionenstrommessung führt entsprechend auf die verminderte Durchschlagspannung ΔU_{DS}^- :

$$\Delta U_{\text{DS}}^- = U_{\text{DS}}^{\text{Ref}} - U_{\text{DS}}^{\text{IM}}, \text{ bzw.} \quad (35)$$

$$\Delta U_{\text{DS}}^- = U_{\max}^{\text{Ref}} - U_{\text{DS}}^{\text{IM}}. \quad (36)$$

Ist ΔU_{DS}^- negativ, null oder liegt außerhalb des Messbereichs, so ist die Durchschlagspannung der Ionenstrommessung nicht vermindert und die Durchschlagspannung liefert keinen Hinweis auf eine Verringerung des Abnutzungsvorrats. Im Gegensatz dazu liegt bei positivem Wert eine Abnutzung vor. Zu berücksichtigen ist zudem die statistische Unsicherheit der Durchschlagspannung, deren Beurteilung im Ermessen des Diagnostikers liegt: Während die 10%-Durchschlagspannung eine höhere Sicherheit im Vergleich zur 90%-Durchschlagspannung bietet, ist für die Kenngrößen zur Berechnung der verminderten Durchschlagspannung ΔU_{DS}^- – wenn möglich – die gleiche Wahrscheinlichkeit zu betrachten. Allerdings sind Kenntnisse zum Aufbau vorausgesetzt, um die geeignete Durchschlagspannung auszuwählen. Darüber hinaus beschreibt die Durchschlagspannung die Obergrenze des messbaren Bereichs für den Ionenstrom. Daher bietet die verminderte Durchschlagspannung eine Aussage über die Veränderung des Messbereichs bis zur physikalischen Obergrenze. Diese verändert sich z. B. durch geometrische Veränderungen wie Spitzen im Feldraum, welche Entladungen und Durchschläge provozieren. Folglich beschreibt die verminderte Durchschlagspannung den Abnutzungsvorrat, bzw. dessen Änderungen auf Basis der veränderten Entladungsvorgänge.

Des Weiteren wird die **Differenz der virtuellen Einsetzspannungen** ΔU_{Onset} beider Messungen betrachtet. Die virtuelle Einsetzspannung einer einzelnen Messung, $U_{\text{Onset}}^{\text{Ref}}$ und $U_{\text{Onset}}^{\text{IM}}$, ist als Spannungswert des Extremums der zugehörigen Parabel durch die gemessenen Mittelwerte definiert. Die Differenz ergibt sich damit zu

$$\Delta U_{\text{Onset}} = U_{\text{Onset}}^{\text{Ref}} - U_{\text{Onset}}^{\text{IM}} \quad (37)$$

und die Interpretation erfolgt analog zur verminderten Durchschlagspannung. Die physikalische Einsetzspannung kann von der virtuellen Einsetzspannung abweichen, da das Curve-Fitting der Messwerte¹⁵ abhängig vom gewählten Spannungsbereich ist, während die physikalische Einsetzspannung von der Messunsicherheit und dem Anstieg der Mittelwerte abhängt. Da als

¹⁵ The MathWorks Inc., *Matlab® Mathematics*, Dokumentation zu R2024b.

Bewertungsgrundlage die Differenz zwischen den virtuellen Einsatzspannungen der Referenz- und Ionenstrommessung mit der gleichen Berechnung des Curve-Fittings zugrunde liegen, ist davon auszugehen, dass die Differenz den gleichen Betrag wie zwischen den physikalischen Einsatzspannungen vorweist.

Außerdem ist die Einsatzspannung u. a. abhängig von der Geometrie der Elektrodenanordnung. Somit deutet eine Veränderung der Einsatzspannung auf eine Veränderung der Geometrie analog zur Durchschlagspannung hin. Auch eine Beeinträchtigung der dielektrischen Festigkeit durch z. B. schwebende oder hüpfende Partikel spiegelt sich in der Einsatzspannung wider. Somit stellt ΔU_{Onset} eine Kenngröße des Abnutzungsvorrats dar, die Rückschlüsse auf die dielektrische Festigkeit des Isoliergases beeinflussende Faktoren ermöglicht.

Außerdem wird der parabelförmige Verlauf über die **Differenz der synthetischen Ionenstromleistung** ΔP beschrieben. Diese Größe umfasst den parabelförmigen Verlauf einer Ionenstromkurve und ist wie folgt definiert:

$$\Delta P = P^{\text{IM}} - P^{\text{Ref}}, \quad (38)$$

wobei sich die Ionenstromleistung einer Messung aus dem Integral des gemessenen Ionenstroms über der angelegten Spannung ergibt:

$$P = \int_{U_{\text{Onset}}}^{U_{\text{max}}} IdU'. \quad (39)$$

Die Ionenstromleistung liefert keine physikalischen Zusammenhänge zur umgesetzten Leistung während einer Messung, ermöglicht aber eine für den Betrachter graphische, vereinfachte Erkennung einer Abnutzung durch gestiegene Mittelwerte des Ionenstroms. Dabei umfasst die Leistung alle Informationen, die den rechtsseitig parabelförmigen Verlauf des Ionenstroms beschreiben, welcher sich durch Änderungen der Entladungen im Aufbau verändert. Die gesamtheitliche Betrachtung des Ionenstromverlaufs über die synthetische Leistung ist besonders für die Risikoermittlung in Kapitel 3.1 von Bedeutung, da die Anzahl an Kenngrößen die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit beeinflusst, aber nicht zwangsweise zu einem zuverlässigeren Ergebnis führt. So werden die in [Ve02] dargestellten Koeffizienten in die Ionenstromleistung ohne einen Informationsverlust überführt. Daher gilt für den Wertebereich, dass für $\Delta P \geq 0 \text{ W}$ eine Abnutzung erkennbar ist, während für $\Delta P < 0 \text{ W}$ keine Abnutzung, bzw. eine verminderte Abnutzung, vorliegt.¹⁶ Außerdem ist bei der Bestimmung zu berücksichtigen, dass die gleichen Spannungsintervalle bei beiden Messungen zugrunde liegen. Weichen die Spannungsintervalle der jeweiligen Messungen voneinander ab, ist das größtmögliche, gemeinsame Spannungsintervall zur Berechnung der Leistung zu betrachten. Darüber hinaus

¹⁶ Die Einordnung der Werte für ΔP erfolgt anhand der historisch aufgetretenen Werte des betrachteten Aufbaus für ΔP .

bietet ΔP aufgrund der Definition, bzw. Datenerfassung der Ionenstrommessung keinen Rückschluss auf die Entladungsform, bzw. das Entladungsstadium oder den Entstehungsort. Sowohl für die Einsetzspannung als auch für die Ionenstromleistung ist jeweils ein parabelförmiger Verlauf vorausgesetzt. Bei anderen Verläufen, z. B. für einen linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung oder Rauschen, sind die Definitionen nicht anwendbar, da sie keinen Rückschluss auf den Abnutzungsvorrat des Isoliergases geben und somit aus dem Fokus dieser Arbeit fallen. Diese Messergebnisse sind durch Kenntnisse des Messaufbaus und Prüfkörpers gesondert zu betrachten. Ursächlich können z. B. floatende Elektroden oder fehlerhaft angeschlossene Messtechnik sein. Eine Berücksichtigung dieser Messergebnisse erfolgt in den evidenztheoretischen Modellen, welche ebenfalls Kenngrößen zur Ermittlung der Ereignisse erfordern (s. Kapitel 3.2).

2.4 Charakteristische Größen des Abnutzungsvorrats zur evidenztheoretischen Modellbildung

Die evidenztheoretischen Modelle beinhalten Ereignisse, welche die Evidenzquellen darstellen. Außerdem ist die Anwendbarkeit der beiden evidenztheoretischen Modelle durch das Ausschließen zufällig auftretender Durchschläge, bzw. der statistischen Beschreibung der Durchschlagsspannung (vgl. [18]) erleichtert. Da die Durchschlagsspannung nicht als eigenes Ereignis in die Modelle geht, auch wenn sie im klassischen Sinne der Teilentladungsdiagnostik zu berücksichtigen ist (vgl. [18]), geht sie in die Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse für das Fehlerdetektionsmodell ein.¹⁷

Das Fehlerursachenmodell dagegen erfordert (s. Kapitel 3.2.2) eine Bewertung des **gestiegenen Ionenstroms** (Ereignis: I_C^+) hinsichtlich des Auftretens eines Fehlers, bzw. einer Fehlerursache. Dafür wird statt der synthetischen Ionenstromleistung die Tendenz des Mittelwerts betrachtet. Liegen die Messergebnisse, d. h. die Mittelwerte mit zugehöriger Unsicherheit außerhalb des Referenzbereichs, ist eine Abweichung zu erkennen, die sich in den Ereignissen des Wahrnehmungsrahmens des Fehlerursachenmodells widerspiegelt. Dementsprechend besteht eine Analogie zwischen dem evidenztheoretischen Ereignis I_C^+ und der definierten Kenngröße ΔP : Beide Größen ermöglichen eine Einschätzung bzgl. der Veränderung des Ionenstroms zwischen Diagnose- und Referenzmessung, was zur Bestimmung der Massezahlen relevant ist. Außerdem ist zu unterscheiden, ob der Ionenstrom eine quadratische Abhängigkeit von der angelegten Spannung aufweist, oder ob partiell ein exponentieller Zusammenhang vorliegt,

¹⁷ In das Fehlerursachenmodell fließt die Durchschlagsspannung nicht ein, da sie keine Evidenz zur Unterscheidung der Fehlerursachen liefert.

welcher einem Durchschlag vorangeht. Diese Änderung des Verlaufs ist in der Modellierung als Ereignis zu berücksichtigen.

Allerdings sind Aufnahmen mittels Koronaskop für die evidenztheoretische Risikomodellierung als zweite Evidenzquelle zur Bewertung des Abnutzungsvorrats notwendig, da eine einzige Evidenzquelle nicht zur Kombination geeignet ist. Deshalb werden die Kenngrößen **zusätzliche Entladung** (Ereignis: PD^+) und **hellere Entladung** (Ereignis: PD^*) eingeführt, um mit dem Koronaskop, bzw. dem Ionenstrom eine Auswertung mittels evidenztheoretischer Modellierungen durchzuführen. *Zusätzliche Entladungen* beschreiben zusätzlich sichtbare Entladungen mit dem Koronaskop im Vergleich zu Referenzaufnahmen. So sind beispielsweise lokale Feldüberhöhungen, die TE verursachen, mittels Koronaskop detektierbar. Somit erlaubt PD^+ Rückschlüsse auf die lokale Minderung der dielektrischen Festigkeit, bzw. den Abnutzungsvorrat des Isoliergases. Dagegen ermöglicht PD^* die Beschreibung der optischen Darstellung einer Entladung mittels Koronaskop. Diese Ermittlung zeichnet sich besonders durch den Kontrast zur Umgebung¹⁸ und die Form der Entladung aus, was durch den Anwender allerdings anhand der Aufnahmen zu erkennen ist. Dabei berücksichtigt PD^* die Polaritätsabhängigkeit der Ergebnisse. Zwar ist die Photonenzahl der Entladung nicht direkt bestimmbar, da das Aufnahmesystem aus Koronaskop und Systemkamera durch die jeweiligen Übertragungsfunktionen die Aufnahme beeinflussen, aber die Feststellung der veränderten Helligkeit im Vergleich zu Referenzaufnahmen ist für den Diagnostiker ohne umfangreiche Erfahrung möglich. Die Auswertung der Aufnahmen ist in Anhang C beschrieben.

Zusammenfassend bilden die *zusätzliche* und *hellere Entladung* jeweils ein Ereignis, welches in den Wahrnehmungsrahmen des Fehlerursachenmodells eingeht. Dabei bilden die Kenngrößen auf Basis der physikalischen Zusammenhänge entlang der Wirkungskette von der Entstehung einer Teilentladung bis hin zur Ionenstrommessung und Fotografie mithilfe eines Koronaskops eine Grundlage zur Risikomodellierung.

¹⁸ In der Fotografie beeinflussen die Blende, Belichtungszeit und der ISO-Wert die Helligkeit einer Aufnahme (vgl. [89], [90]). Um eine Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Umgebungen, besonders variierende Helligkeiten, zu berücksichtigen, ist stets der Kontrast zwischen fokussiertem Objekt und Umgebung, bzw. Hintergrund zu berücksichtigen.

3 Risikomodellierung auf Basis der Ionenstrommessung

Vergleichend werden in diesem Abschnitt die beiden Modellierungsansätze aus Kapitel 1.4 auf die Ionenstrommessung zur Diagnose zugeschnitten. Abhängig vom Modellansatz sind unterschiedliche Aussagen auf Basis der Diagnosemessung möglich (vgl. Abbildung 3-1): Das empirische Modell liefert bei bekannter Fehlerart eine absolute Ausfallwahrscheinlichkeit für das Isoliergas (und somit ein System). Dagegen liefern die evidenztheoretischen Modelle entweder eine Aussage, ob ein Fehler vorliegt oder geben eine Fehlerursache aus. Die Veranschaulichung und Funktionsweise der beiden evidenztheoretischen Modelle erfolgt abschließend anhand eines Spitze-Platte-Aufbaus, während Kapitel 4 weiterführende Ergebnisse für die Koaxialanordnung für beide Modellierungsansätze darstellt.

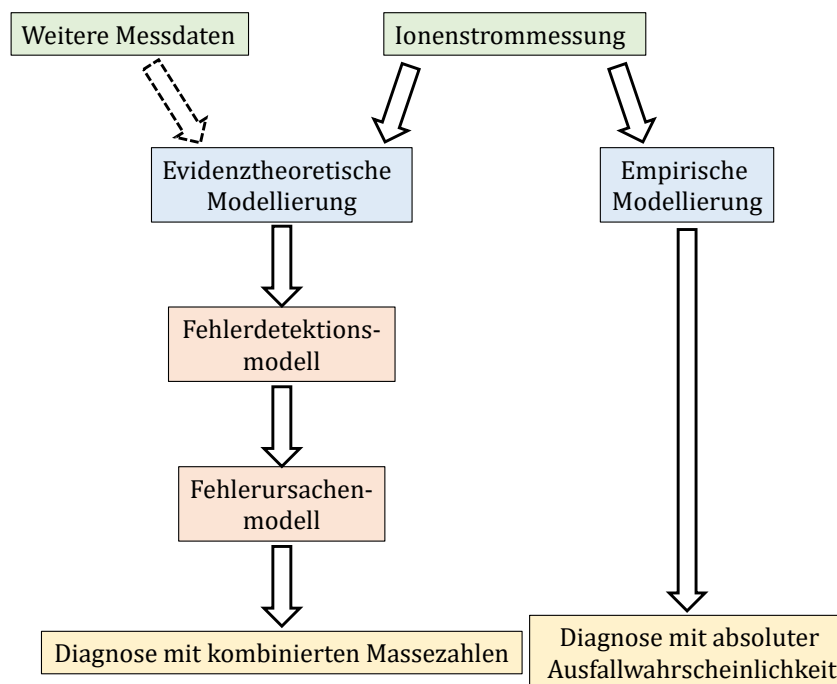


Abbildung 3-1: Übersicht der Risikomodelle mit Resultaten

Grundlegend für die Modellierungsansätze wird ein direkter Zusammenhang zwischen Ausfallwahrscheinlichkeit und Auswirkung des Fehlers angenommen, der aus Gründen der Vereinfachung nicht durch weitere risikobehaftete Einflussfaktoren beeinflusst wird. Die Auswirkung des Fehlers bestimmt allerdings die Unterscheidung des Fehlers in geringfügige und gravierende Fehler (vgl. Abbildung 3-2), wobei ein gravierender Fehler vorliegt, sobald eine Funktion des Systems nicht erfüllt ist. Das Eintreten eines gravierenden Fehlers führt daher direkt zu einem mittleren bis hohen Ausfallrisiko, während ein geringfügiger Fehler ein geringes oder mittleres Risiko zur Folge hat. Für die Risikomodelle dieser Arbeit sind als Grenzwerte für

die Ausfallwahrscheinlichkeit jeweils 33% (Obergrenze des geringen Risikos) und 67% (Untergrenze des mittleren Risikos) festgelegt.

Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf der Funktion der elektrischen Isolierung des HVDC-Systems durch das Isoliergas Luft. Für diesen Anwendungsfall präsentiert Referenz [6] ein empirisches Risikomodell basierend auf Teilentladungsmessungen, welches als Grundlage zur Entwicklung eines empirischen Risikomodells auf Basis der Ionenstrommessung dient.

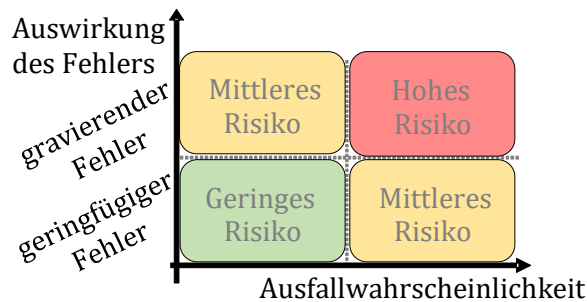


Abbildung 3-2: Vereinfachte Risikomatrix nach [6] zur Anwendung in beiden Risikomodellen

3.1 Empirische Risikomodellierung

Da die in [6] vorgegebenen Einflussparameter einer AC-TE-Messung sich maßgeblich von denen einer Ionenstrommessung aufgrund der unterschiedlichen Spannungsarten und detektierten Diagnosesignale unterscheiden, zeigt Tabelle 3-1 in Analogie zu [6] die Einflussparameter und Aspekte, die in der eigenen Veröffentlichung [Ve02] für die Ionenstrommessung an einer GIL unter Gleichspannung veröffentlicht sind. Diese basieren auf den charakteristischen parabelförmigen U - I -Kennlinien für Leiteranordnungen zwischen Einsetz- und Durchschlagspannung (vgl. [41], [43]) und die empirischen Kenngrößen basieren auf den Unterschieden zwischen einer Diagnosemessung und der zugehörigen Referenzmessung (vgl. Kapitel 2.2.4). Die Definitionen und Interpretationen der Kenngrößen sind in Kapitel 2.2.4 gegeben und gehen in die Zuordnung der Aspektwerte zu den Kenngrößen ein¹⁹. Zusammen mit Gl. (10)-(12) ist die **Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtaufbaus TFP** zu berechnen, um Rückschlüsse auf das Ausfallrisiko und damit den Abnutzungsvorrat zu ermöglichen. Diese Bewertung ist die Basis für eine Handlungsempfehlung zum Erhalt, bzw. zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Isoliergases, bzw. Aufbaus in Anlehnung an [51].

¹⁹ Die Abstufung der Aspektwerte ist in dieser Arbeit in Anlehnung an [6] gewählt.

Tabelle 3-1: Einflussparameter und Aspekte zur Risikomodellierung basierend auf der Ionenstrommessung für eine GIL

Einflussparameter und Aspekte	Wertebereiche
Ort (IP_1) ▪ Auf Komponenten (A_1)	▪ Ja / unbekannt = 1; nein = 0
Mittelwerte und Trends (IP_2) ▪ Synthetische Ionenstromleistung (A_1)	▪ Eindeutiger Anstieg = 1; Leichter Anstieg = 0,4 Mittlerer Anstieg = 0,6; Starker Anstieg = 0,8 Negativ / keine Veränderung = 0
Angelegte Spannung (IP_3) ▪ Differenz der virtuellen Einsatzspannung (A_1) ▪ Verminderte Durchschlagspannung (A_2)	▪ Negativ / keine Veränderung = 0 Leichter Anstieg = 0,4; Mittlerer Anstieg = 0,6 Starker Anstieg = 0,8; Eindeutiger Anstieg = 1 ▪ Negativ / keine Veränderung = 0 Leichter Anstieg = 0,4; Mittlerer Anstieg = 0,6 Starker Anstieg = 0,8; Eindeutiger Anstieg = 1
$N_I = 3, R_{\min} = 0, R_{\max} = 1, c = 1$	

Die Modellierung für die Ionenstrommessung setzt voraus, dass die Fehlerursache den Abnutzungsvorrat des Isoliergases Luft vermindert. Somit kommen im Rahmen dieser Arbeit „Partikel“ und „sonstige Ursachen“ als Fehlerursache infrage. Dementsprechend ist das Modell auf diese beiden Ursachen mit den zugehörigen Einflussparametern und Aspekten ausgelegt.

Im Vergleich zu [6] zeigt das Modell weniger Aspekte, da die Ionenstrommessung die in Kapitel 2.3 definierten Kenngrößen liefert, die das Fehlerbild einer Verschmutzung des Isoliergases durch Partikel beschreiben. Da das Isoliergas in Form der Einsatz- und Durchschlagspannung sowie durch den Ionenstrom durch die Partikel, besonders durch Geometrie und Material nach dem Shockley-Ramo-Theorem (vgl. [41]), beeinflusst wird, werden keine weiteren Kenngrößen zur Beschreibung des Abnutzungsvorrats definiert.

Die Grenzwerte für die verschiedenen Aspekte sind in der eigenen Veröffentlichung [Ve02] in Anlehnung an [6] definiert. Um zu überprüfen, ob besser geeignete Grenzwerte zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit durch die synthetische Ionenstromleistung zu finden sind, ermittelt eine Parameterstudie die Parameterwerte des Aspekts $A_1 |_{IP_2}$ zwischen null und eins. Da Erfahrungen, bzw. Literatur zur synthetischen Ionenstromleistung fehlen, ist die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit, TFP , als Ausgangsgröße zu betrachten, welche mit der Beschreibung des Abnutzungsvorrats und einer zugehörigen Handlungsempfehlung zusammenhängt (s. Tabelle 3-2)²⁰.

²⁰ Es sei darauf hingewiesen, dass ein Zeithorizont für Handlungen zwar in [51] für einen Asset Health Index gefordert ist, aber hier aufgrund einer geringen Datenbasis für verschiedene HVDC-Systeme unter Verwendung der Ionenstrommessung nicht möglich ist.

Tabelle 3-2: Zuordnung der absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit zu Abnutzungsvorrat und Handlungsempfehlung

TFP in %	Bewertung des Abnutzungsvorrats	Handlungsempfehlung
0...33	Keine Abnutzung	Kein Eingriff erforderlich
34...67	Kritische Abnutzung	Eingriff mit Zeitversatz erforderlich
68...100	Hohe Abnutzung	Sofortiger Eingriff erforderlich

Damit ergeben sich vier zu unterscheidende Parametertriplets für die Parameterstudie (vgl. Tabelle 3-3): Für „kein Eingriff erforderlich“ dürfen die Einsetz- und Durchschlagspannung jeweils keinen Hinweis auf eine Abnutzung des Abnutzungsvorrats liefern, d. h. $A_1, A_2 | IP_3 = 0$, wobei der zulässige Maximalwert für Aspekt $A_1 | IP_2$ für $TFP = 0,33$ gesucht ist. Analog ist $A_1 | IP_2$ für $TFP = 0,67$ zu bestimmen, wenn die Durchschlag- und Einsetzspannung eindeutig auf eine Abnutzung hinweisen ($A_1, A_2 | IP_3 = 1$), ein Eingriff allerdings zeitversetzt erforderlich ist. Abschließend sind auch die beiden Aspekt-Triplets zu bestimmen, falls entweder die Durchschlag- oder die Einsetzspannung eine hohe Abnutzung anzeigen und $TFP = 0,67$ ergibt. Tabelle 3-3 zeigt die Ergebnisse für $A_1 | IP_2$, welche Trivialwerte darstellt, die keinen Mehrwert für die Diagnosemethode liefern, da die Abstufung zu gering ist und die Handlungsempfehlungen in der Praxis lediglich die Einsetz- und Durchschlagspannung berücksichtigen. Somit sind die in Tabelle 3-1 dargestellten Aspekte mit zugehörigen Grenzwerten nicht auf Basis der Parameterstudie anzupassen, was dazu führt, dass der Anwender Erfahrungen in der Anwendung der Ionenstrommessung zur Diagnose benötigt, um die definierten Abstufungen anzugeben.

Tabelle 3-3: Grenzwerte der Aspekte für Ablagerungen auf Komponenten

TFP in %	$A_1, A_2 IP_3$	$A_1 IP_2$	$A_1 IP_1$
33	0	0	1
	1	- (keine Lösung)	
67	0	1	
	1	0	

Analog ist das dargestellte Modell für weitere Aufbauten, z. B. den RC-Spannungsteiler anwendbar. Die Anpassung der Aspekte erfolgt nicht für andere Aufbauten, da der Fokus auf der Bewertung der Funktionsweise des Isoliergases liegt und die typischen Fehlerbilder am RC-Spannungsteiler (vgl. Kapitel 1.2.2) das Isoliergas im Vergleich zum fehlerfreien Zustand ebenfalls überlasten.

Die Einschätzung der Aspekte geht allerdings mit unvollständigem Wissen einher, was die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie nicht berücksichtigt (vgl. [21]). Daher ist die verallgemeinerte Form der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie, die Evidenztheorie, (vgl. [21]) zur Risikomodellierung anzuwenden.

3.2 Evidenztheoretische Risikomodellierung

Für eine evidenztheoretische Auswertung der Ionenstrommessung zum Erhalt einer Diagnose, wie in der eigenen Veröffentlichung [Ve04] beschrieben, werden verschiedene Abstraktionsebenen angeführt, die entsprechend auf die Teilmengen zur Bestimmung der Massezahlen und somit die Kombinationsergebnisse der Evidenzen (vgl. Kapitel 1.4.2) Auswirkung haben. Um zwei verschiedene, aufeinander aufbauende Modelle zu erstellen, liegen die Messdaten einer Spitze-Platte-Anordnung zugrunde (vgl. Kapitel 2.2.4): Zuerst wird ein **Fehlerdetektionsmodell** vorgestellt, das Evidenzen der Ionenstrommessung sowie eines Koronaskops berücksichtigt, um die Aussage zu treffen, ob ein Fehler im beobachteten System auftritt. Damit ist das Diagnoseergebnis eine Ja-Nein-Aussage. Anschließend ist ein **Fehlerursachenmodell** dargestellt, welches in der logischen Reihenfolge nach Anwendung des Fehlerdetektionsmodells beim Finden eines Fehlers nutzbar ist. Damit ist ausgeschlossen, dass eine falsche Interpretation des Modellergebnisses aufgrund eines nicht eingetretenen Fehlers getroffen wird.

Um die Vorgehensweise zur Anwendung der evidenztheoretischen Modelle auf Messergebnisse zu Diagnosezwecken aufzuzeigen, zeigt Abbildung 3-3 ein Ablaufdiagramm für beide Modelle. Die Evidenzquellen, Ionenstrommessung (ICM) und Koronaskop (CS), bilden mit ihren Messdaten die Grundlage zur evidenztheoretischen Modellierung, indem die Messergebnisse der jeweiligen Quellen in Hinblick auf die Fragestellung des jeweiligen Modells zu bewerten sind. Dabei ist zunächst das Fehlerdetektionsmodell anzuwenden und weiterführend für detektierte Fehler das Fehlerursachenmodell. Um die Diagnose zu erhalten, ist die Kombination der Evidenzen mittels Kombinationsregel essenziell. Dafür sind für beide Modelle jeweils die Massezahlen einzuschätzen, die die Deutlichkeit der Evidenzen wiedergeben. Diese Einschätzung der Massezahlen basiert auf den Messergebnissen und Expertenwissen, z.B. zum Ionenstrom und Streamer-Mechanismus und ist mithilfe von Tabelle B 2 für beide Modelle einzeln anzugeben. Veranschaulichungsbeispiele dazu sind zum jeweiligen Modell in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 ausgeführt.

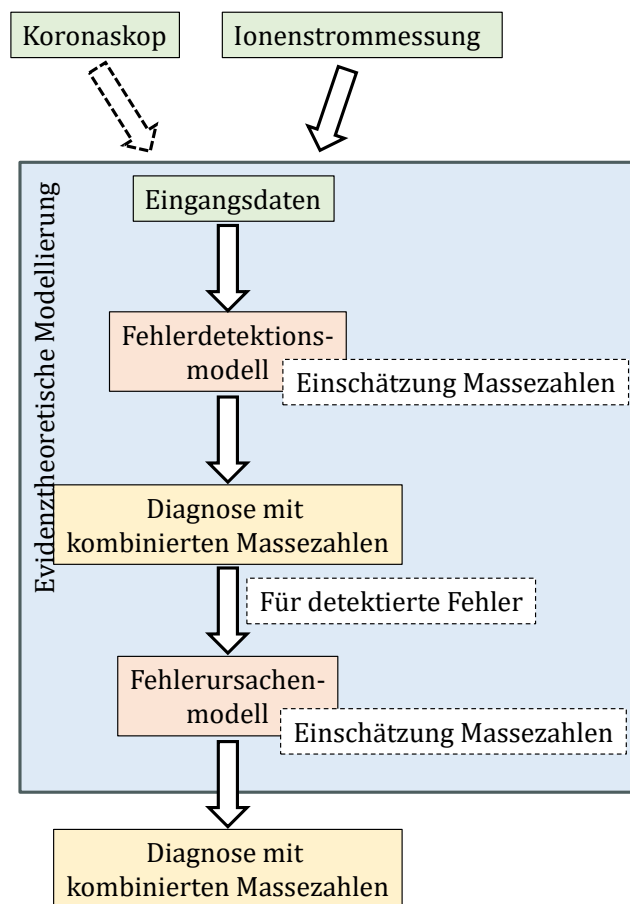


Abbildung 3-3: Ablaufdiagramm zur Anwendung der evidenztheoretischen Modelle

Als Folge der Berechnungen liefern beide Modelle als Ergebnis einen Glaubensgrad, bzw. eine relative Sicherheit, die zu einer aufbauspezifischen Handlungsempfehlung führt (s. Kapitel 3.2.3). Diese basiert direkt auf den zwei unabhängig voneinander generierten Evidenzen: Aufnahmen mittels Koronaskop und Systemkamera, welche außerhalb des Faraday'schen Käfigs betrieben sind, und Ionenstrommessung, welche innerhalb des Faraday'schen Käfigs mittels Messtechnik erfasst wird. Da die beiden Evidenzquellen aus unterschiedlichen Versorgungsnetzen Leistung beziehen, ist eine Unabhängigkeit gewährleistet. Darüber hinaus ist der Wirkmechanismus bei beiden Messmethoden unterschiedlich (vgl. Abbildung 1-8 und Abbildung 3-4): Während die Ionenstrommessung durch Teilentladungen erzeugte Ladungsträger, bzw. geladene Partikel im Feldraum detektiert, stellt das Koronaskop die ultraviolette (UV-)Strahlung durch die Teilentladungen dar. Daraus ergeben sich jeweils Ereignisse für beide Messmethoden, die für jede betrachtete Methode voneinander unabhängig sind. Dies zeigt sich an den jeweiligen Teilmengen des Wahrnehmungsrahmens für die jeweiligen Messmethoden, bzw. Evidenzquellen, die gemeinsame Ereignisse haben, weil die

Ergebnisse der einen Evidenzquelle für die jeweils andere Evidenzquelle nicht von Bedeutung sind. Dies ist der formelle Beleg für die Modellierung der Unabhängigkeit der Evidenzquellen.

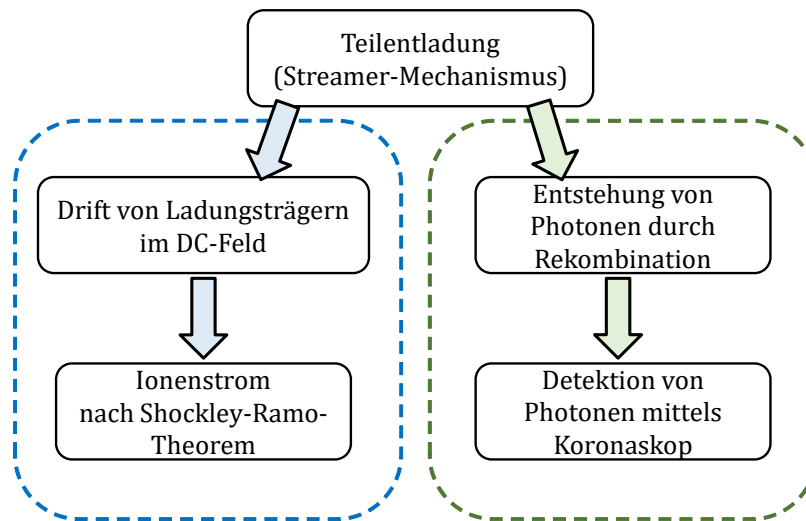


Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen Teilentladungen, Ionenströmen und Koronaskop-Aufnahmen

Der Wahrnehmungsrahmen umfasst jeweils alle relevanten Merkmale, bzw. atomare Ereignisse, welche beliebig, auch mit zugehöriger Negation, kombinierbar sind. Dies umfasst sowohl technisch sinnvolle als auch technisch nicht sinnvolle Kombinationen an Ereignissen, z.B. das Auftreten einer Abweichung von der Referenz ohne plausible Messdaten im Fehlerdetektionsmodell (vgl. Kapitel 3.2.1). Folglich umfassen die fokalen Elemente der jeweiligen Modelle die zu den Szenarien zugehörigen technisch sinnvollen Kombinationen an Ereignissen, um eine Diagnose, bzw. Fehlerdetektion oder Fehlerursachenunterscheidung zu modellieren. Die Merkmale, bzw. zugrunde liegenden atomaren Ereignisse basieren auf den charakteristischen Kenngrößen der jeweiligen Evidenzquelle (vgl. Kapitel 2.3 und 2.4) und spiegeln somit den Abnutzungsvorrat wider. Für das Fehlerdetektionsmodell stehen dabei Merkmale im Vordergrund, welche auf das Auftreten eines Fehlers hinweisen, während im Fehlerursachenmodell die Merkmale auf verschiedene Partikel als Fehlerursache deuten.

Folgende Schreibweise stellt anhand eines generischen Beispiels die Ereignisse dar: Ein (atomares) Ereignis $a \in \Omega$ ist eingetreten, wenn keine weitere Kennzeichnung erfolgt. Negierte Ereignisse dagegen zeichnen ein Makron aus (\bar{a}). Ereignisse, welche nicht in der jeweils anderen Methode Berücksichtigung finden und somit sowohl mit als auch ohne Negation innerhalb einer Menge auftreten können, sind mit einem Überpunkt (\acute{a}) dargestellt. Darüber hinaus fasst die Schreibweise $[a]$ zur besseren Übersicht Ereignisse zu Teilmengen zusammen und fokussiert auf die für die jeweilige Teilmenge entscheidenden Ereignisse. Dem Beispiel folgend gilt daher mit den Ereignissen $a, b \in \Omega$:

$$[a] = \{a\bar{b}\} \quad (40)$$

Die Ereignisse sind in beiden Modellen eindeutig den Wahrnehmungsrahmen zugeordnet und sind nicht auf das jeweils andere Modell anzuwenden. Damit sind die Modelle mathematisch unabhängig voneinander. Aufgrund der unterschiedlichen Ziele der beiden Modelle unterscheiden sich die Wahrnehmungsrahmen der beiden entsprechend voneinander: Während der Wahrnehmungsrahmen des Fehlerursachenmodells auf die Beschreibung der physikalischen Phänomene und deren Indizien bei den jeweiligen Evidenzquellen angelegt ist, berücksichtigt der Wahrnehmungsrahmen des Fehlerdetektionsmodells nur die Messmethodik und die Plausibilität der Messergebnisse.

3.2.1 Das Fehlerdetektionsmodell

Grundlegend für das Modell zur Fehlerdetektion sind die folgenden drei Diagnoseergebnisse, bzw. Szenarien:

1. Kein detektierbarer Fehler
2. Ein detektierbarer Fehler
3. Keine Detektion möglich

Diese sind mithilfe des Wahrnehmungsrahmens Ω_{Det} modelliert. Dieser enthält alle Kombinationen der atomaren Ereignisse der beiden Messmethoden, Ionenstrommessung und Koronaskop. Dazu gehören die atomaren Ereignisse

- c : nachvollziehbare Messung (Ionenstrommessung)
- d_{ICM} : Abweichung von der Referenzmessung (Ionenstrommessung)
- f : korrekter Fokus (Koronaskop)
- d_{CS} : Abweichung von der Referenzmessung (Koronaskop)

mit ihrer jeweiligen Negation. Abhängig vom Szenario treten verschiedene Ereignisse für die jeweilige Messmethode ein, wie Tabelle 3-4 zeigt: Die Szenarien beinhalten die physikalischen Messergebnisse, die mit den (evidenztheoretischen) Ereignissen zu verknüpfen sind. Ereignisse, die keine technische Relevanz haben, z. B. eine Abweichung von der Referenzmessung beim Koronaskop, während der Fokus nicht korrekt ist, wodurch die Messdaten unbrauchbar sind, sind ebenfalls mit und ohne Negation zu berücksichtigen.

Tabelle 3-4: Szenarien und Teilereignisse im Fehlerdetektionsmodell

Nr.	Beschreibung	Teilereignis ICM	Teilereignis CS
1	Die Messergebnisse sind nachvollziehbar, bzw. der Fokus ist richtig eingestellt, aber die Ergebnisse weichen nicht von den Referenzergebnissen ab.	$[c\bar{d}_{ICM}]$	$[f\bar{d}_{CS}]$
2	Die Messergebnisse sind nachvollziehbar, bzw. der Fokus ist richtig eingestellt, aber die Ergebnisse weichen von den Referenzergebnissen ab.	$[cd_{ICM}]$	$[fd_{CS}]$
3	Die Messergebnisse sind nicht nachvollziehbar, bzw. der Fokus ist nicht richtig eingestellt.	$[\bar{c}]$	$[\bar{f}]$

Um die Teilmengen $X_{1,2,3}, Y_{1,2,3}$ der jeweiligen Evidenzquellen zu erhalten, sind die Ereignisse zu Tabelle 3-4 für die beiden Evidenzquellen unabhängig voneinander zu modellieren. Dabei ist zwar der Fokus auf die jeweilige Menge $[c\bar{d}_{ICM}], [f\bar{d}_{CS}], \dots, [\bar{f}]$ zu legen, aber die jeweils andere Evidenzquelle ergänzt die Teilmenge unabhängig vom jeweiligen Szenario, wie Tabelle 3-5 zeigt.

Tabelle 3-5: Fokale Mengen des Fehlerdetektionsmodells

ICM	X_1	$[c\bar{d}_{ICM}] = \{c\bar{d}_{ICM}f\bar{d}_{CS}\}$
	X_2	$[cd_{ICM}] = \{cd_{ICM}f\bar{d}_{CS}\}$
	X_3	$[\bar{c}] = \{c\bar{d}_{ICM}f\bar{d}_{CS}\}$
CS	Y_1	$[f\bar{d}_{CS}] = \{c\bar{d}_{ICM}f\bar{d}_{CS}\}$
	Y_2	$[fd_{CS}] = \{cd_{ICM}f\bar{d}_{CS}\}$
	Y_3	$[\bar{f}] = \{c\bar{d}_{ICM}f\bar{d}_{CS}\}$

Die Evidenzen der beiden Messmethoden kombiniert Tabelle 3-6 mittels Kombinationsregel nach Gl. (22). Nur die Mengen $X_{1,2,3}, Y_{1,2,3}$ sind fokale Elemente der Basismaße m_{ICM} , bzw. m_{CS} , die die Evidenzen der Messungen modellieren:

$$m_{ICM}(X) = \begin{cases} icm_1, & \text{wenn } X = X_1 \\ icm_2, & \text{wenn } X = X_2 \\ icm_3, & \text{wenn } X = X_3 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \text{ und} \quad (41)$$

$$m_{CS}(Y) = \begin{cases} cs_1, & \text{wenn } Y = Y_1 \\ cs_2, & \text{wenn } Y = Y_2 \\ cs_3, & \text{wenn } Y = Y_3 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (42)$$

Somit ergeben sich neun verschiedene Kombinationen mit zugehöriger Schnittmenge $Z_{1,\dots,9}$, die zum kombinierten Basismaß $m_{ICM} \oplus m_{CS}$ gehören. Der höchste Wert des Basismaßes zeigt damit an, welches Szenario plausiblerweise eingetreten ist: Je näher der Wert an eins liegt, umso

stärker weist das Maß auf das zugehörige Szenario hin. Außerdem zeigt sich die Unabhängigkeit der Evidenzquellen dadurch, dass die Massezahl jeweils unabhängig von der anderen Evidenzquelle modelliert ist. So ist beispielsweise $m_{\text{ICM}}(X)$ unabhängig von den Ereignissen f und d_{CS} aufgrund der Mengen $X_{1,2,3}$. Analog gilt dies für $m_{\text{CS}}(Y)$.

Tabelle 3-6: Kombination der Evidenzen (Ionenstrommessung & Koronaskop)

		ICM			
		Massezahlen	icm_1	icm_2	icm_3
\mathcal{CS}	cs_1	$m_{\text{ICM}} \oplus m_{\text{CS}}(X_i \cap Y_j)$ $= m_{\text{ICM}}(X_i) \cdot m_{\text{CS}}(Y_j) = icm_i \cdot cs_j$			
	cs_2				
	cs_3				
Mit: $Z_1 = [c\bar{d}_{\text{ICM}}f\bar{d}_{\text{CS}}]$, $Z_2 = [c\bar{d}_{\text{ICM}}fd_{\text{CS}}]$, $Z_3 = [c\bar{d}_{\text{ICM}}\bar{f}]$, $Z_4 = [cd_{\text{ICM}}f\bar{d}_{\text{CS}}]$, $Z_5 = [cd_{\text{ICM}}fd_{\text{CS}}]$, $Z_6 = [cd_{\text{ICM}}\bar{f}]$, $Z_7 = [\bar{c}f\bar{d}_{\text{CS}}]$, $Z_8 = [\bar{c}fd_{\text{CS}}]$, $Z_9 = [\bar{c}\bar{f}]$					

Die Schnittmengen $Z_n = X_i \cap Y_j$ zur Berechnung des Glaubensmaßes $m_{\text{ICM}} \oplus m_{\text{CS}}(X_i \cap Y_j)$ ergeben sich wie in Tabelle 3-6. Da keine der Schnittmengen Z_n eine leere Menge ist, ist die Bedingung

$$Z_n = X_i \cap Y_j = \emptyset \quad (43)$$

zur Berechnung des Korrekturfaktors k_{corr} nach Gl. (26) nicht erfüllt und dieser ergibt sich somit zu

$$k_{\text{corr}} = \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y) = 0. \quad (44)$$

Dementsprechend führt die Kombination für ein beliebiges Szenario mit Menge $A \subseteq \Omega$ und $K_{\text{Norm}} = 1$ nach Gl. (22) und (23) zu

$$\begin{aligned} Bel_{\text{ICM}} \oplus Bel_{\text{CS}}(A) &= \sum_{B \subseteq A} m_{\text{ICM}} \oplus m_{\text{CS}}(B) \\ &= \sum_{B \subseteq A} \sum_{X \cap Y = B} m_{\text{ICM}}(X)m_{\text{CS}}(Y). \end{aligned} \quad (45)$$

Folglich ist die Konfliktlast definitionsgemäß nach Gl. (30) und (31)

$$Con(Bel_1, Bel_2) = \log(K) = \log(1) = 0. \quad (46)$$

Dies bedeutet, dass keine Informationen der beiden Evidenzquellen in der Kombination verloren gehen, was die Aussagekraft des Modells betont.

Um ein Statement durch das Modell zu erhalten, ist das Ablaufdiagramm in Abbildung 3-5 anzuwenden. Dabei ist unbekannt, ob ein Fehler in der Anordnung vorliegt. Demnach erhält der Anwender aus den Evidenzquellen Messdaten, die mithilfe von Expertenwissen zunächst einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen sind. In diesem Schritt sind die atomaren Ereignisse c, f , bzw. die zugehörige Negation für die jeweilige Evidenzquelle unter Zuhilfenahme von Abbildung 3-6 festzuhalten. Bei der Plausibilitätsprüfung sind für die Ionenstrommessung der Verlauf im Vergleich zur Referenz zu bewerten. Dabei gehen die Einsetz- und Durchschlagsspannung sowie

der Verlauf in die Bewertung ein. Beim Koronaskop ist zu berücksichtigen, ob der Fokus für die Diagnosemessung im Vergleich zur Referenz korrekt eingestellt ist. Weiterführend sind die Abweichungen von den Referenzdaten zu betrachten (vgl. Abbildung 3-7): Während bei der Ionenstrommessung signifikante Abweichungen durch Betrachtung des Ionenstroms mit Messunsicherheitsintervall zu erkennen sind, treten beim Koronaskop die Abweichungen optisch unter Berücksichtigung des Kontrasts zur Umgebung auf (vgl. Kapitel 2.4). Die Bewertung der Abweichungen ist anhand der atomaren Ereignisse d_{ICM} , d_{CS} für die jeweilige Evidenzquelle festzuhalten.

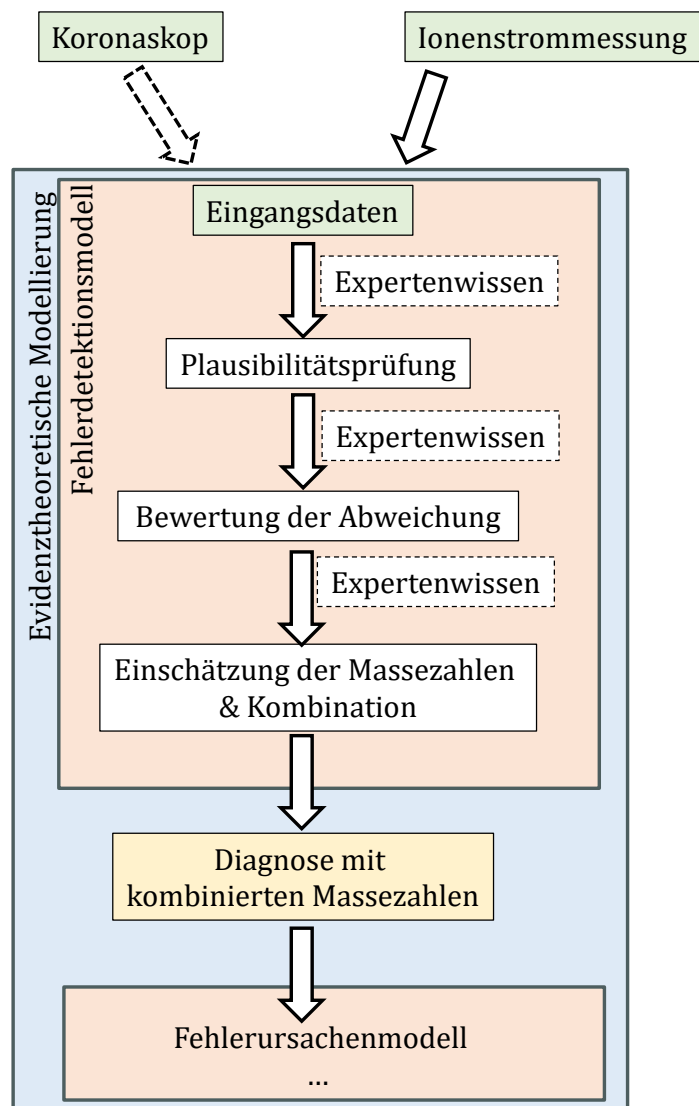


Abbildung 3-5: Ablaufdiagramm zur Anwendung des Fehlerdetektionsmodells

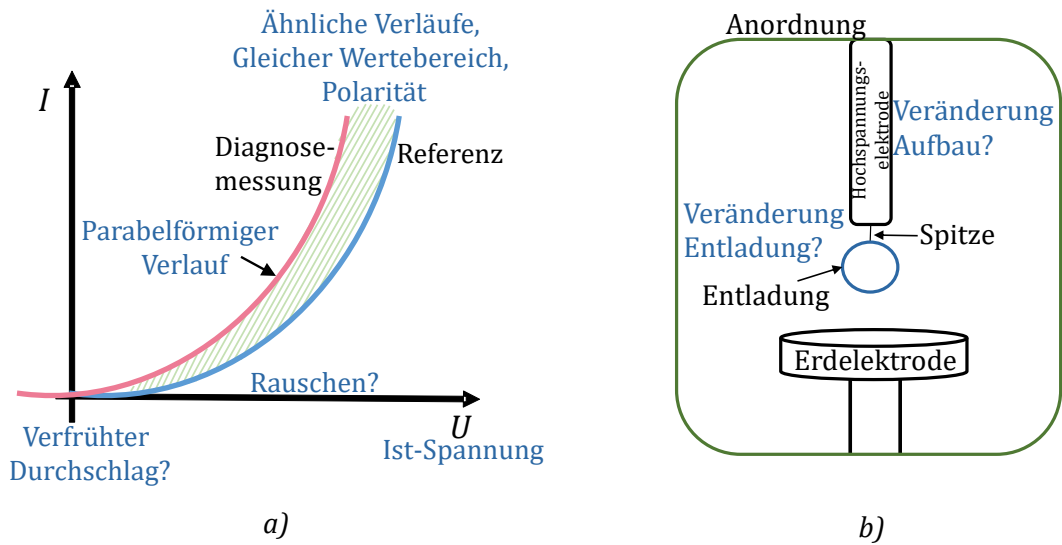


Abbildung 3-6: Inhalte der Plausibilitätsprüfung der Evidenzquellen a) einer schematischen Ionenstrommessung b) schematischer Koronaskop-Aufnahmen für eine Spitze-Platte-Anordnung

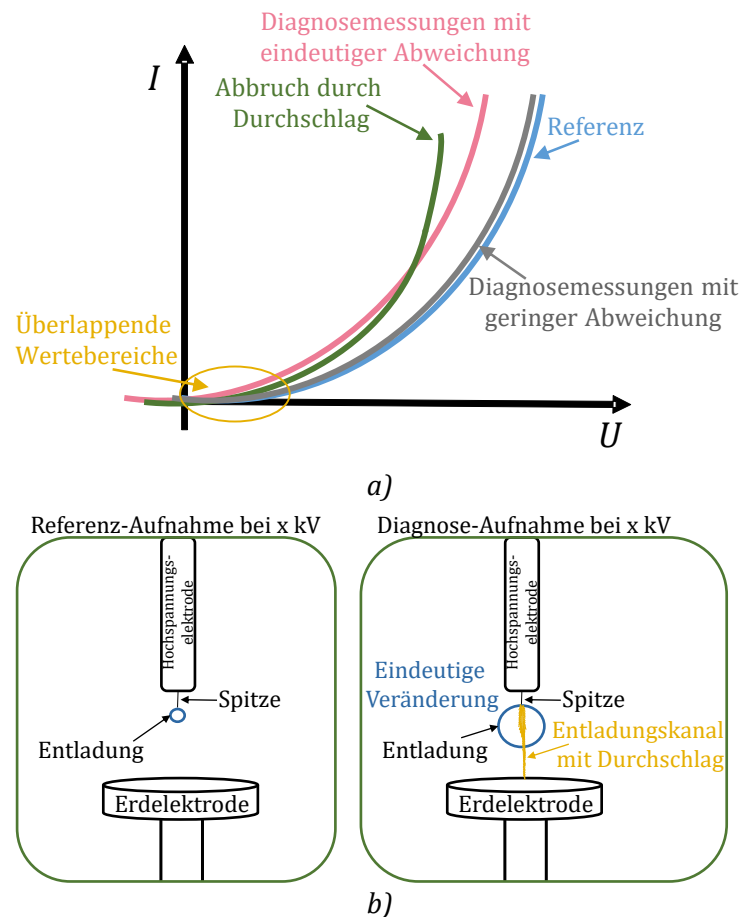


Abbildung 3-7: Veranschaulichung der Abweichungen der Evidenzquellen für a) die Ionenstrommessung und b) die Koronaskop-Aufnahmen

Technisch sinnvoll treten die Ereignisse der Plausibilität und Abweichungen zusammen in Kombination auf, wie die fokalen Mengen $X_{1,2,3}, Y_{1,2,3}$ darstellen. Die Einschätzung der

Massezahlen für die jeweilige Evidenzquelle erfolgt anhand der festgestellten atomaren Ergebnisse, Tabelle 3-4 und Tabelle B 2: Diese bestimmt der Diagnostiker zwischen null (unsicher) und eins (absolut sicher) für jede Diagnosemessung unter der Berücksichtigung der Frage, ob und inwiefern das Szenario zu den eingetretenen atomaren Ereignissen, bzw. fokalen Mengen (vgl. Tabelle 3-4) eingetreten ist. Somit geben die Massezahlen die Deutlichkeit der Evidenzen jeweils für jede Evidenzquelle an. Zur Orientierung zur Wahl der Massezahlen ist in Anhang B der Wertebereich aufgeschlüsselt, um Abstufungen zwischen den Massezahlen und damit der Deutlichkeit der Evidenzen abzubilden.

Bei der Einschätzung der Massezahlen ist zuerst die i -te Massezahl festzulegen, welche mit größter Sicherheit auf Basis der Evidenz das Eintreten des i -ten Szenarios widerspiegelt. Es ist zu berücksichtigen, dass Messungen nicht ideal sind und somit stets Restunsicherheiten für die anderen Szenarien bestehen. Dies ist bei der Bestimmung der Massezahlen nach Gl. (15) zu berücksichtigen. So ist beispielsweise die Massezahl für Szenario 3 mit größer als null anzugeben, um die Messunsicherheit der Messungen einzubinden. Für Szenario 1 und 2 ist besonders entscheidend, ob beispielsweise signifikante Unterschiede zwischen der Referenz- und Diagnosemessung der Ionenstrommessung vorliegen. Dies führt zu den Ereignissen d_{CS} und d_{ICM} , die die Durchschlagspannung der Messung und den signifikant abweichenden Ionenstrom zwischen den Messungen berücksichtigen. Für die Ergebnisse der Ionenstrommessung sind die dargestellten Verläufe über der angelegten Spannung im Vergleich zur Referenzmessung zu betrachten. Für die Aufnahmen mittels Koronaskop ist die Änderung der Entladung durch den Kontrast zur Umgebung im Vergleich zur Referenzaufnahme zu berücksichtigen. Für die Ereignisse c, f sind Plausibilitätsprüfungen und Messunsicherheiten der Messungen anzusetzen. Die Massezahlen erlauben somit einen Rückschluss auf die elektrische Festigkeit des Isoliergases, bzw. eine Änderung des Abnutzungsvorrats. Treten abweichende Ereignisse von der Referenz auf, deutet dies auf eine Veränderung des Abnutzungsvorrats hin, die durch eine (lokale) Überbelastung des Isoliergases verursacht wird. Eine solche lokale Überlastung begründet sich auf einer lokalen Feldverzerrung, welche lokal zu Entladungen führt. Damit sind die Massezahlen ein Maß für das Eintreten der jeweiligen Szenarien, die auf der Überlastung, bzw. Abnutzung des Abnutzungsvorrats beruhen.

Die Anwendung der Massezahlen und Teilmengen ist anhand folgenden fiktiven Beispiels erläutert. Gegeben sind die plausiblen Messergebnisse für den Ionenstrom, welche eindeutig nicht von der Referenzmessung abweichen. Diese Ergebnisse bewertet der Anwender auf Basis der Plausibilität, der Messunsicherheiten und der nicht-signifikanten Abweichungen zwischen den Ionenstrommessungen, dass Szenario 1 mit der größten Sicherheit vorliegt. Daraus ergeben sich für die Ionenstrommessung mithilfe von Anhang B $icm_1 = 0,95$ und $icm_2 = icm_3 = 0,025$.

Dabei beschreibt icm_1 , dass bei der Überlappung der Messergebnisse der Diagnosemessung und der Referenzmessung eine 95 %-ige Sicherheit besteht, dass dieses Szenario eingetreten ist. Daher sind nach Gl. (15) $icm_2 = icm_3 \neq 0$ und beschreiben die Restsicherheit, dass die Diagnosemessung irreführend ist.

Im Gegensatz dazu beschreiben die Massezahlen beispielhaft für ein weiteres fiktives Beispiel die Evidenzen anders: Weicht die Diagnosemessung signifikant von der Referenzmessung ab und die Durchschlagspannung beider Messungen ist geringer als in der Referenzmessung, so ist das Ergebnis plausibel und die Unterscheidung der Ergebnisse zwischen Referenz- und Diagnosemessung trivial. Damit weisen die Ergebnisse auf Szenario 2 hin und die Massezahlen ergeben sich mithilfe von Anhang B beispielhaft unter der Fragestellung, welches Szenario am sichersten vorliegt, zu $icm_1 = 0,34$, $icm_2 = 0,65$ und $icm_3 = 0,01$. Dabei wird icm_2 aufgrund der eingetretenen Ereignisse für Szenario 2 als erstes mit einer mittleren Sicherheit gewählt und icm_1 für Szenario 1 nach Gl. (15) unter der Randbedingung, dass eine falsche Messdatenerfassung (Szenario 3) nie ausgeschlossen werden kann ($icm_3 > 0$, s.o.). Analog ist die Vorgehensweise bei den Aufnahmen des Koronaskops. Hier sind für das Beispiel zum zweiten Szenario die Werte $cs_1 = 0,25$, $cs_2 = 0,7$ und $cs_3 = 0,05$ gewählt. Mit diesen Werten führt die Kombination im zweiten Szenario zu folgendem Ergebnis:

$$\begin{aligned}
 m(Z_1) &= 0,34 \cdot 0,25 = 0,085, \\
 m(Z_2) &= 0,34 \cdot 0,7 = 0,238, \\
 m(Z_3) &= 0,34 \cdot 0,05 = 0,017, \\
 m(Z_4) &= 0,65 \cdot 0,25 = 0,1625, \\
 m(Z_5) &= 0,65 \cdot 0,7 = 0,455, \\
 m(Z_6) &= 0,65 \cdot 0,05 = 0,0325, \\
 m(Z_7) &= 0,01 \cdot 0,25 = 0,0025, \\
 m(Z_8) &= 0,01 \cdot 0,7 = 0,007 \text{ und} \\
 m(Z_9) &= 0,01 \cdot 0,05 = 0,0005.
 \end{aligned} \tag{47}$$

Der höchste Wert tritt für $Z_5 = [cd_{ICM}f d_{CS}]$ auf und spiegelt wider, dass beide Evidenzquellen auf das zweite Szenario, korrekte Datenerfassungen und Abweichungen von der Referenz bei beiden Quellen, hinweisen. Die Kombination führt dazu, dass, auch wenn beide Evidenzquellen deutlich auf korrekte Datenerfassungen und Abweichungen von der Referenz deuten, das Ergebnis stärker hervorgehoben wird. Dies ist besonders für weniger eindeutige Evidenzen von Bedeutung, weil die Kombination unabhängiger Messungen mit geringer Sicherheit, die auf dasselbe Szenario hinweisen, die Sicherheit der Diagnose nach Gl. (23) aufgrund der Summierung verstärkt. Darüber hinaus bildet die Kombination die Grundlage zur Berechnung

der Glaubensfunktion für Teilereignisse, wie z. B. den Glauben, dass Messungen korrekt durchgeführt worden sind (Ereignisse $[cf]$): Mit Gl. (23) ergibt die Kombination

$$\begin{aligned}
 Bel_{ICM} \oplus Bel_{CS}([cf]) &= \sum_{B \subseteq [cf]} m_{ICM} \oplus m_{CS}([cf]) \\
 &= m_{ICM} \oplus m_{CS}([c\bar{d}_{ICM}f\bar{d}_{CS}]) + m_{ICM} \oplus m_{CS}([c\bar{d}_{ICM}fd_{CS}]) \\
 &\quad + m_{ICM} \oplus m_{CS}([cd_{ICM}f\bar{d}_{CS}]) + m_{ICM} \oplus m_{CS}([cd_{ICM}fd_{CS}]) \\
 &= m(Z_1) + m(Z_2) + m(Z_4) + m(Z_5) = 0,94.
 \end{aligned} \tag{48}$$

Das Ergebnis von 0,94 zeigt, dass die Sicherheit korrekter Messungen nahe eins ist.

Um über die Fehlerdetektion hinaus die Fehlerursache zu bestimmen, stellt Kapitel 3.2.2 das Fehlerursachenmodell vor, in dem das Hintergrundwissen aus den Messungen und der Entstehung von Entladungen über eine Plausibilitätsprüfung hinaus einfließt.

3.2.2 Das Fehlerursachenmodell

Das Modell zur Fehlerursachensuche identifiziert die Fehler

1. Aluminiumspan,
2. Aluminiumgranulate,
3. Aluminiumpuder sowie
4. Keine der genannten Fehler (keine Identifikation)

auf Basis der physikalischen Ereignisse, die als atomare Ereignisse in allen Kombinationen (inkl. Negation) Teil des Wahrnehmungsrahmens Ω_{Dist} sind. Ausgeschlossen sind in diesem Modell kombinierte Verschmutzungen der einzelnen Partikelarten oder sonstigen Fehlerursachen nach Kapitel 1.2. Außerdem ist die Versuchsanordnung, bzw. Elektronenkonfiguration mit der Polarität bekannt. Daher sind die atomaren Ereignisse

- U_o^{CS} : die gesunkene Einsetzspannung (Koronaskop),
- PD^+ : eine zusätzliche Entladung (Koronaskop),
- PD^* : eine hellere oder optisch größere Entladung (Koronaskop)
- I_C^e : eine Änderung der Ionenstromkurve von quadratischer zu exponentieller Abhängigkeit zur angelegten Spannung (Ionenstrommessung) und
- I_C^+ : der gestiegene Ionenstrom (Ionenstrommessung)

von Bedeutung.

Um die Diagnosemessungen mit dem Modell zu verbinden, stellt Tabelle 3-7 den direkten Zusammenhang zwischen den Szenarien und den Ereignissen her. Dabei gehen sowohl Änderungen (Zu- und Abnahmen) als auch keine Änderungen der physikalischen Ereignisse als atomare Ereignisse in die Modellbildung ein. Im letzteren Fall ist das zugehörige atomare

Ereignis mit einer Negation zu berücksichtigen. Es ist darauf hingewiesen, dass die Durchschlagspannung nicht zur Unterscheidung der Fehlerursachen beiträgt und daher nicht als atomares Ereignis im Fehlerursachenmodell zu berücksichtigen ist. Allerdings ist sie Teil der Plausibilitätsprüfung auf Grundlage der Messergebnisse im Fehlerdetektionsmodell (vgl. Kapitel 3.2.1, Abbildung 3-5). Des Weiteren ist darauf hingewiesen, dass PD^* aufgrund des Polaritätseffekts (vgl. [18], [44]) polaritätsabhängig ist. Für Späne ist eine Unterscheidung für PD^* grenzwertig, weil das Rauschen der Koronaskop-Aufnahmen und fehlende Literaturdaten zu Kontrasten für diesen Fehlerfall eine Bewertung trotz Expertenwissens erschweren. Somit geht PD^* in die Modellierung ein, während für Granulat / Puder PD^* für negative Polarität und \overline{PD}^* für positive Polarität gilt (vgl. Tabelle 3-7). Zwar trägt die Unterscheidung der Polarität nicht dazu bei, verschiedene Fehlerbilder zu unterscheiden, weil für Späne PD^* nicht eindeutig polaritätsabhängig bestimmbar ist. Allerdings ermöglicht die polaritätsabhängige Fallunterscheidung die korrekte Zuordnung der Messergebnisse zu den atomaren Ereignissen für beide Polaritäten im Fehlerursachenmodell. Auf dieser Grundlage ist das Fehlerursachenmodell theoretisch ohne das Fehlerdetektionsmodell anwendbar. Technisch ist es allerdings sinnvoll, eine Fehlerursache erst nach der Detektion eines Fehlers durchzuführen.

Tabelle 3-7: Verbindung zwischen Diagnosemessungen und Fehlerursachenbestimmung

	Fehlerursache	U_o^{CS}	PD^+	PD^*	I_C^e	I_C^+
ICM	Span				p	p
	Granulat				n	p
	Puder (+)				n	p
	Puder (-)				n	n
CS	Span	p	p	p, n		
	Granulat (+)	n	n	n		
	Granulat (-)	n	n	p		
	Puder (+)	n	n	n		
	Puder (-)	n	n	p		
Legende: p: positives atomares Ereignis; n: negatives atomares Ereignis / keine Veränderung; (+): positive Polarität; (-): negative Polarität						

Als Ergebnis aus der Verbindung zwischen den Diagnosemessungen und Fehlerursachen stellt Tabelle 3-8 die Charakterisierung des Fehlerursachenmodells durch die fokalen Mengen, bzw. die Charakterisierung der Späne, Granulate, Puder oder keiner Identifikation im Modell dar. Für die Ionenstrommessung sind die Mengen X_i^{dist} zu betrachten, während Y_i^{dist} die Ereignisse für das Koronaskop beschreibt. Hier zeigt sich wie im Fehlerdetektionsmodell die Unabhängigkeit der Evidenzquellen dadurch, dass die Ereignisse der jeweils anderen Evidenzquelle mit (·) in die jeweiligen Teilmenge eingehen. Die Mengen für Granulat und Puder berücksichtigen die

Polaritätsabhängigkeit durch eine Fallunterscheidung von Y_2^{dist} und Y_3^{dist} nach Tabelle 3-7. Außerdem beschreiben $X_4^{\text{dist}}, Y_4^{\text{dist}}$ eine Fehlerursache, die nicht näher spezifiziert ist, d.h. dass weitere Fehlerursachen wie beispielsweise Feuchtigkeit im Isoliergas oder ein Druckverlust des Aufbaus zu Ereignissen der Mengen $X_4^{\text{dist}}, Y_4^{\text{dist}}$ führen. Somit ist eine unbekannte Fehlerursache durch fokale Mengen repräsentiert und ermöglicht dem Diagnostiker die Anwendung des Fehlerursachenmodells und damit eine Aussage zur Fehlerursache, um weiterführende Maßnahmen am Aufbau einzuleiten.

Tabelle 3-8: Fokale Mengen des Fehlerursachenmodells

Evidenzquelle	$X_i^{\text{dist}}, Y_j^{\text{dist}}$	Fokale Mengen
Ionenstrom- messung	X_1^{dist}	$[I_C^e I_C^+] = \{\dot{U}_o^{\text{CS}} \dot{P}D^+ \dot{P}D^* I_C^e I_C^+\}$
	X_2^{dist}	$[\bar{I}_C^e I_C^+] = \{\dot{U}_o^{\text{CS}} \dot{P}D^+ \dot{P}D^* \bar{I}_C^e I_C^+\}$
	$X_3^{\text{dist},(+)}$	$[\bar{I}_C^e I_C^+] = \{\dot{U}_o^{\text{CS}} \dot{P}D^+ \dot{P}D^* \bar{I}_C^e I_C^+\} = X_2^{\text{dist}}$
	$X_3^{\text{dist},(-)}$	$[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] = \{\dot{U}_o^{\text{CS}} \dot{P}D^+ \dot{P}D^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$
	X_4^{dist}	$[I_C^e \bar{I}_C^+] = \{\dot{U}_o^{\text{CS}} \dot{P}D^+ \dot{P}D^* I_C^e \bar{I}_C^+\}$
Koronaskop	Y_1^{dist}	$[U_o^{\text{CS}} PD^+] = \{U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e I_C^+\}$
	$Y_2^{\text{dist},(+)}$	$[\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ \bar{P}D^*] = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ \bar{P}D^* I_C^e I_C^+\}$
	$Y_2^{\text{dist},(-)}$	$[\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ PD^*] = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ PD^* I_C^e I_C^+\}$
	$Y_3^{\text{dist},(+)}$	$[\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ \bar{P}D^*] = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ \bar{P}D^* I_C^e I_C^+\} = Y_2^{\text{dist},(+)}$
	$Y_3^{\text{dist},(-)}$	$[\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ PD^*] = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ PD^* I_C^e I_C^+\} = Y_2^{\text{dist},(-)}$
	Y_4^{dist}	$[U_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+] = \{U_o^{\text{CS}} \bar{P}D^+ PD^* I_C^e I_C^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e I_C^+\}$
Legende: (+): positive Polarität; (-): negative Polarität Indizes: 1: Span; 2: Granulat; 3: Pulver; 4: keine Identifikation		

Die Evidenzen werden durch die folgenden Basismaße modelliert:

$$m_{\text{ICM}}^{\text{dist},(+)}(X^{\text{dist}}) = \begin{cases} icm_1^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_1^{\text{dist}} \\ icm_2^{\text{dist}} = icm_3^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_2^{\text{dist}} = X_3^{\text{dist},(+)} \text{ oder} \\ icm_4^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_4^{\text{dist}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (49)$$

$$m_{\text{ICM}}^{\text{dist},(-)}(X^{\text{dist}}) = \begin{cases} icm_1^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_1^{\text{dist}} \\ icm_2^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_2^{\text{dist}} \\ icm_3^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_3^{\text{dist},(-)} \text{ und} \\ icm_4^{\text{dist}}, & \text{wenn } X^{\text{dist}} = X_4^{\text{dist}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (50)$$

$$m_{\text{CS}}^{\text{dist},(+)}(Y^{\text{dist}}) = \begin{cases} cs_1^{\text{dist}}, & \text{wenn } Y^{\text{dist}} = Y_1^{\text{dist}} \\ cs_2^{\text{dist}} = cs_3^{\text{dist}}, & \text{wenn } Y^{\text{dist}} = Y_2^{\text{dist},(+)} = Y_3^{\text{dist},(+)} \text{ oder} \\ cs_4^{\text{dist}}, & \text{wenn } Y^{\text{dist}} = Y_4^{\text{dist}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (51)$$

$$m_{CS}^{\text{dist},(-)}(Y^{\text{dist}}) = \begin{cases} c_{S_1}^{\text{dist}}, & \text{wenn } Y^{\text{dist}} = Y_1^{\text{dist}} \\ c_{S_2}^{\text{dist}} = c_{S_3}^{\text{dist}}, & \text{wenn } Y^{\text{dist}} = Y_2^{\text{dist},(-)} = Y_3^{\text{dist},(-)} \\ c_{S_4}^{\text{dist}}, & \text{wenn } Y^{\text{dist}} = Y_4^{\text{dist}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (52)$$

Die Anwendung der Kombinationsregel nach Gl. (22) berücksichtigt die Polarität der Versuchsanordnung mit

$$m_{ICM}^{\text{dist},(+)} \oplus m_{CS}^{\text{dist},(+)}(Z^{\text{dist}}) \quad (53)$$

für positive Polarität und

$$m_{ICM}^{\text{dist},(-)} \oplus m_{CS}^{\text{dist},(-)}(Z^{\text{dist}}) \quad (54)$$

für negative Polarität. Die fokalen Elemente $X_{1,2,3,4}^{\text{dist},(+)/(-)}$ und $Y_{1,2,3,4}^{\text{dist},(+)/(-)}$ der Basismaße $m_{ICM}^{\text{dist},(+)/(-)}$, bzw. $m_{CS}^{\text{dist},(+)/(-)}$ modellieren die Evidenzen der Messungen für $Z^{\text{dist}} \subseteq \Omega$ in Hinblick auf die Fehlerursachen. Dies führt zu den 16 verschiedenen Schnittmengen in Tabelle 3-9, welche zum kombinierten Basismaß von $m_{ICM}^{\text{dist}} \oplus m_{CS}^{\text{dist},(+)}(Z^{\text{dist}})$ für positive und $m_{ICM}^{\text{dist}} \oplus m_{CS}^{\text{dist},(-)}(Z^{\text{dist}})$ für negative Polarität gehören. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Schnittmengen aus Tabelle 3-10, welche die Fehlerursachen Span, Granulat, Puder und keine Identifikation widerspiegeln.

Tabelle 3-9: Schnittmengen des Fehlerursachenmodells

$Z_n^{\text{dist}} = X_i^{\text{dist},(+)/(-)} \cap Y_j^{\text{dist},(+)(-)}$	Schnittmengen
$[I_C^e I_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_1^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e I_C^+\}$
(+): $[I_C^e I_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^*]$ (-): $[I_C^e I_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^*]$	$Z_2^{\text{dist},(+)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^* I_C^e I_C^+\} = Z_3^{\text{dist},(+)}$ $Z_2^{\text{dist},(-)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* I_C^e I_C^+\} = Z_3^{\text{dist},(-)}$
$[I_C^e I_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_4^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* I_C^e I_C^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e I_C^+\}$
$[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_5^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$
(+): $[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^*]$ (-): $[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^*]$	$Z_6^{\text{dist},(+)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\} = Z_7^{\text{dist},(+)}$ $= Z_{10}^{\text{dist},(+)} = Z_{11}^{\text{dist},(+)}$ $Z_6^{\text{dist},(-)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\} = Z_7^{\text{dist},(-)}$
$[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_8^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$
$[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_9^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$
(-): $[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^*]$	$Z_{10}^{\text{dist},(-)} = Z_{11}^{\text{dist},(-)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$
(+): $[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+]$ (-): $[\bar{I}_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_{12}^{\text{dist},(+)} = \{U_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$ $Z_{12}^{\text{dist},(-)} = \{U_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* \bar{I}_C^e \bar{I}_C^+\}$
$[I_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_{13}^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e \bar{I}_C^+\}$
(+): $[I_C^e \bar{I}_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^*]$ (-): $[I_C^e \bar{I}_C^+] \cap [\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^*]$	$Z_{14}^{\text{dist},(+)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ \bar{P}\bar{D}^* I_C^e \bar{I}_C^+\} = Z_{15}^{\text{dist},(+)}$ $Z_{14}^{\text{dist},(-)} = \{\bar{U}_o^{\text{CS}} \bar{P}\bar{D}^+ PD^* I_C^e \bar{I}_C^+\} = Z_{15}^{\text{dist},(-)}$
$[I_C^e \bar{I}_C^+] \cap [U_o^{\text{CS}} PD^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+]$	$Z_{16}^{\text{dist}} = \{U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e \bar{I}_C^+, \bar{U}_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e \bar{I}_C^+\}$

Legende: (+): positive Polarität; (-): negative Polarität

Tabelle 3-10: Zuordnung der Fehlerursachen zu Schnittmengen des Fehlerursachenmodells

Fehlerursache	Schnittmenge	Kombinierte Massezahlen
Span	Z_1^{dist}	$icm_1^{\text{dist}} \cdot cs_1^{\text{dist}}$
Granulat	(+): $Z_6^{\text{dist},(+)}$	(+): $icm_2^{\text{dist}} \cdot cs_2^{\text{dist}} = icm_3^{\text{dist}} \cdot cs_3^{\text{dist}}$
	(-): $Z_6^{\text{dist},(-)}$	(-): $icm_2^{\text{dist}} \cdot cs_2^{\text{dist}} = icm_2^{\text{dist}} \cdot cs_3^{\text{dist}}$
Puder	(+): $Z_6^{\text{dist},(+)} = Z_{11}^{\text{dist},(+)}$	(+): $icm_2^{\text{dist}} \cdot cs_2^{\text{dist}} = icm_3^{\text{dist}} \cdot cs_3^{\text{dist}}$
	(-): $Z_{11}^{\text{dist},(-)}$	(-): $icm_3^{\text{dist}} \cdot cs_2^{\text{dist}} = icm_3^{\text{dist}} \cdot cs_3^{\text{dist}}$
Keine Identifikation	Z_{16}^{dist}	$icm_4^{\text{dist}} \cdot cs_4^{\text{dist}}$

Legende: (+): positive Polarität; (-): negative Polarität; grau: entfallen aufgrund gleicher fokaler Mengen für Puder und Granulat in Kombination

Analog zum Fehlerdetektionsmodell gibt es durch die Kombination keine leeren Mengen, d.h. der Konfliktfaktor ist $Con = \log(1) = 0$ und es gehen aus beiden Evidenzquellen ebenfalls keine Informationen verloren: Die Schnittmenge Z^{dist} beinhaltet keine leere Menge, weil

$$Z_n^{\text{dist}} = X_i^{\text{dist}} \cap Y_j^{\text{dist}} \neq \emptyset \quad (55)$$

gilt. Der Korrekturfaktor $k_{\text{corr}}^{\text{dist}}$ nach Gl. (26) ergibt sich somit zu

$$k_{\text{corr}}^{\text{dist}} = \sum_{X^{\text{dist}} \cap Y^{\text{dist}} = \emptyset} m_{\text{ICM}}^{\text{dist}}(X^{\text{dist}}) m_{\text{CS}}^{\text{dist}}(Y^{\text{dist}}) = 0. \quad (56)$$

Folglich ist die Konfliktlast definitionsgemäß nach Gl. (30) und (31)

$$\text{Con}(Bel_1, Bel_2) = \log\left(\frac{1}{1-k_{\text{corr}}^{\text{dist}}}\right) = \log(1) = 0. \quad (57)$$

Um die Evidenzen zu modellieren, zeigt Abbildung 3-8, wie das Fehlerursachenmodell anzuwenden ist. Zunächst ist die Abweichung von der Referenz zu beschreiben, z. B. ob der Ionenstrom im Vergleich zur Referenz angestiegen ist (Ereignis I_C^+) oder ob eine zusätzliche Entladung auf den Koronaskop-Aufnahmen zu erkennen ist (Ereignis PD^+). Die dieser Bewertung zugrunde liegende Wirkungskette zwischen der Entstehung der Entladungen, der Beeinträchtigung, bzw. der Abnutzung des Isoliergases und den Effekten der Entladungen auf die Messmethoden ist folgend erläutert. Diese Zusammenhänge bilden die Grundlage für die Bestimmung der Ereignisse, welche exakt durch die fokalen Mengen der jeweiligen Evidenzquelle (s. Tabelle 3-8) repräsentiert werden. Der Diagnostiker bestimmt daraufhin mithilfe von Tabelle B 2 die Massezahlen für alle Teilmengen, welche die Sicherheit widerspiegeln, mit der die jeweiligen Ereignisse eingetreten sind. Analog zum Fehlerdetektionsmodell ist in diesem Prozess stets die Abweichung, bzw. Veränderung zur Referenzmessung zu beziffern: Für die Ionenstrommessung sind jeweils die charakteristischen Kenngrößen des Abnutzungsvorrats (inkl. Messunsicherheiten) zu den jeweiligen Ereignissen zu bestimmen und als Bewertungsgrundlage zu nutzen. Für das Koronaskop hingegen sind die Vergleichsfotos analog zum Fehlerdetektionsmodell zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.2.1).

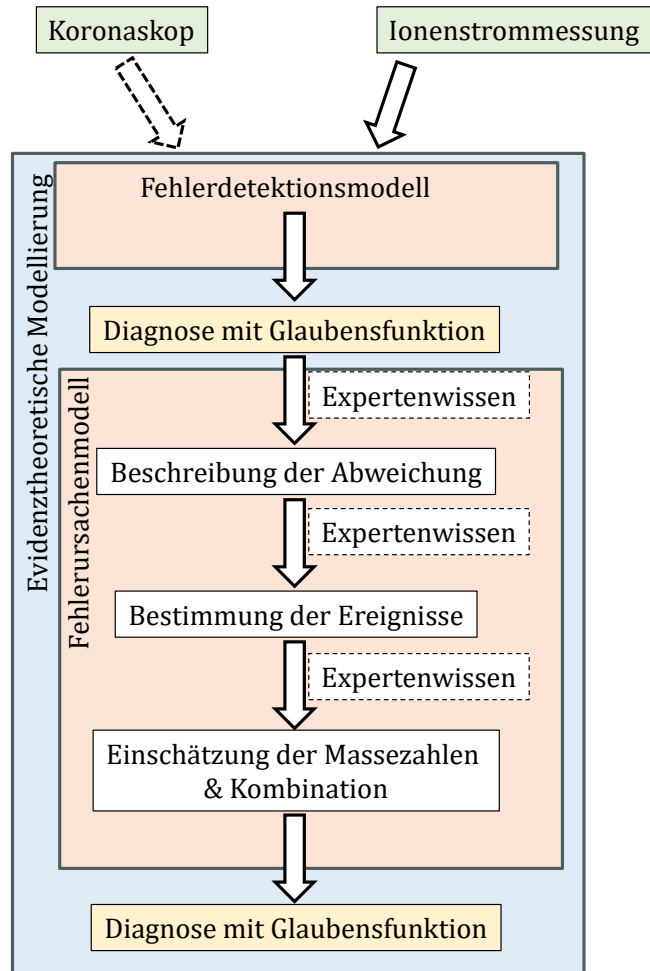


Abbildung 3-8: Ablaufdiagramm zur Anwendung des Fehlerursachenmodells

Die folgenden Thesen, welche auf Grundlagenwissen zur selbständigen Gasentladung aus [18] und [44] sowie den Messergebnissen der Spitze-Platte-Anordnung in Kapitel 3.2.3 basieren, sind eine Hilfestellung zur Bestimmung der Ereignisse und Einschätzung der Massezahlen. Die Massezahlen beschreiben dabei die Deutlichkeit der Evidenzen, ohne dass die Fehlerursache vorher bekannt ist.

Durchschlagspannung

Eine sinkende Durchschlagspannung weist bei beiden Messmethoden auf eine geringere Schlagweite oder gestiegene elektrische Feldstärke bei gleicher angelegter Spannung hin. Daher ist die Durchschlagspannung ein Hinweis für eine Verschmutzung zwischen den Elektroden oder eine Änderung der Elektrodenbeschaffenheit, die Teilentladungen und damit eine Streamerbildung begünstigt. Daraus folgt, dass die maximale Prüfspannung für die Ionenstrommessung kleiner wird und dass das Koronaskop einen Entladungskanal optisch darstellt. Die Durchschlagspannung trägt nicht zur Unterscheidung der Fehlerursachen bei, da alle Fehlerursachen zu einem Durchschlag, bzw. einer verminderten Durchschlagsfestigkeit der

Anordnung führen können und die stochastischen Eigenschaften keinen Rückschluss auf eine bestimmte Geometrie der Fehlerursache ermöglichen. Deshalb geht die Durchschlagspannung nur als Hinweis in die Plausibilitätsprüfung und Einschätzung der Massezahlen des Fehlerdetektionsmodells ein. Allerdings äußert sich die Durchschlagspannung sowohl in der Ionenstrommessung (als verfrühter Abbruch der Messung) als auch dem Koronaskop mit einem sichtbaren Entladungskanal.

Ionenstrom

Bzgl. des Ionenstroms ist zu erwarten, dass dieser durch die gesteigerte Leitfähigkeit des Gases gemäß Gl. (2) ansteigt (I_C^+). Im Falle eines Spans im Feldraum verändert sich außerdem die Abhängigkeit des Ionenstroms von der angelegten Spannung: Während der Verlauf grundsätzlich eine quadratische Abhängigkeit für $U_{\text{Onset}} < U < U_{\text{DS}}$ zeigt (vgl. Kapitel 1.3), ändert sich der Verlauf im Wertebereich der Durchschlagspannung zu einem exponentiellen Stromverlauf (I_C^e). Da sich die Änderung des Stromverlaufs über der angelegten Spannung ändert, zeigt der Ionenstrom eine Änderung der Entladung an, welche eindeutig für Späne, nicht aber für Granulate und Puder, auftritt. Außerdem ist bei positiver Polarität für Granulat und Puder ein Anstieg des Ionenstroms zu erwarten (s.o.), während für Puder bei negativer Polarität zwar dieser Anstieg physikalisch zu erwarten ist, aber technisch aufgrund der Filterfrequenz der Messtechnik nicht zu detektieren ist (vgl. Kapitel 2.2.1).

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse bzgl. des Eintretens der Ereignisse sollen die Massezahlen die Evidenzen angemessen beschreiben. Für das schematische Beispiel in Abbildung 3-9, bei dem die Ursache nicht bekannt ist, beschreiben die Massezahlen mithilfe von Tabelle B 2 die Evidenzen mit $icm_1^{\text{dist}} = 0,91$ und $icm_2^{\text{dist}} = icm_4^{\text{dist}} = 0,045$.

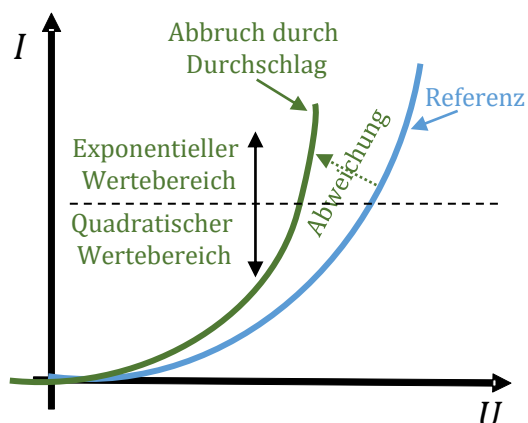


Abbildung 3-9: Schematisches Messergebnis einer Ionenstrommessung

Einsetzspannung

Die Einsetzspannung mit dem Ereignis U_o^{CS} fällt unter den gleichen Bedingungen wie beim Durchschlag ab und zusätzlich, wenn eine Verschmutzung die Schlagweite verringert, sodass eine verstärkte Feldverzerrung an der Hochspannungselektrode auftritt. Allerdings steigt die Einsetzspannung an, wenn eine Verschmutzung die elektrische Feldstärke an der Hochspannungselektrode vermindert, wobei die mittlere elektrische Feldstärke ansteigt. Am Koronaskop sind die Entladungen im Vergleich zur Referenz für die Einsetzspannung mit U_o^{CS} heller (gesunkene Einsetzspannung) oder dunkler, bzw. erloschen (gestiegene Einsetzspannung). Für Spannungen oberhalb der Einsetzspannung am Koronaskop variiert die Helligkeit der Entladungen (PD^*) aufgrund lokaler Feldverzerrungen.

Hellere oder optisch größere Entladung

Beim Auftreten von Verschmutzungen im elektrischen Feld kommt es zu Verzerrungen des elektrischen Feldes, die bei gleicher Spannung positiver Polarität im Vergleich zur Referenz dafür sorgen, dass Entladungen optisch dunkler sind (\overline{PD}^*). Damit deuten hellere Entladungen bei gleicher Spannung positiver Polarität im Vergleich zu einer Referenzmessung auf die Abwesenheit eines Fehlers hin. Bei negativer Polarität zeigt der Vergleich eine optisch hellere Entladung durch eine Fehlerursache (PD^*), da Entladungen durch lokale Feldverzerrungen durch Fehlerursachen stärker ausfallen, wobei ein Durchschlag für größere Spannungen als in der Referenzmessung zu erwarten ist. Dieser Effekt wird besonders beim Vergleich der Messungen verschiedener Polaritäten deutlich (vgl. Polaritätseffekt [18], [44]). Allerdings ist anzumerken, dass die Unterscheidung mit hellerer oder dunklerer Entladung grenzwertig sein kann, z. B. bei Spänen, welche zusätzliche Entladungen erzeugen und somit die Einschätzung von heller / dunkler beeinträchtigen.

Zusätzliche Entladung

Zusätzliche Entladungen mit PD^+ treten durch weitere Feldverzerrungen wie durch Unregelmäßigkeiten der Spitze-Platte-Anordnung oder Spitzen oder Späne auf. Dazu entstehen weitere mit dem Koronaskop sichtbare Entladungen, z. B. in anderen Bereichen wie der Erdelektrode statt der Hochspannungselektrode, und der Ionenstrom steigt gemäß Gl. (2) an. Für einen beispielhaften Span beschreiben bei Erkennen einer zusätzlichen Entladung entsprechend die Massezahlen mit $cs_1^{dist} = 0,97$ und $cs_2^{dist} = c_4^{dist} = 0,015$ die Evidenzen.

Beispiel zur Bestimmung der Massezahlen

Entsprechend der genannten Zusammenhänge für die Evidenzen beider Messungen werden die Massezahlen anhand der Glaubensfunktion, bzw. Sicherheit des Kombinationsergebnisses ermittelt. Beispielhaft ist das Partikel „Span“ als Fehlerursache bei positiver Polarität

aufgegriffen: Ohne die Fehlerursache zu kennen, sind die Abweichungen anhand der Messdaten zu beschreiben und die Ereignisse zu bestimmen, ohne dass die Fehlerursache bekannt ist. Für das Koronaskop liegen die schematischen Daten nach Abbildung 3-10 vor, die eine steigende Einsatzspannung und eine zusätzliche Entladung, aber dunklere Entladungen zeigen. Die zugehörigen Ereignisse und Massezahlen zeigt Tabelle 3-11.

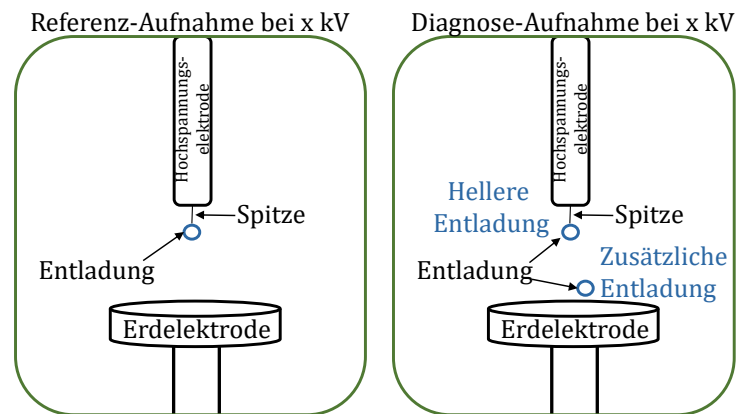


Abbildung 3-10: Schematische Aufnahme eines Koronaskops

Tabelle 3-11: Ereignisse und Massezahlen eines fiktiven Beispiels

Evidenzquelle	Ereignisse	Massezahlen
ICM	I_C^+, I_C^e	$icm_1^{\text{dist}} = 0,91$ $icm_2^{\text{dist}} = icm_3^{\text{dist}} = 0,045$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,045$
CS	$U_0^{\text{CS}}, PD^+, \overline{PD}^*$	$cs_1^{\text{dist}} = 0,94,$ $cs_2^{\text{dist}} = cs_3^{\text{dist}} = 0,03$ $c_4^{\text{dist}} = 0,03$
<p><u>Hinweis:</u> Da nach Gl. (49) und (51) $X_2^{\text{dist}} = X_3^{\text{dist},(+)}$ und $Y_2^{\text{dist},(+) = Y_3^{\text{dist},(+)}$ gilt, gibt es im betrachteten Fall drei Massezahlen, die in Gl. (15) zu berücksichtigen sind. Die zur Kombination entfallende Massezahl ist in grau gekennzeichnet.</p>		

Da die Einschätzung für das Koronaskop sehr sicher ist, liegt die höchste Massezahl für $Y_1^{\text{dist}} = \{U_0^{\text{CS}} PD^+ \overline{PD}^* I_C^e I_C^+\}$ nach Tabelle 3-7 vor und das Koronaskop weist somit auf den Span als Fehlerursache hin. Allerdings nimmt die Massezahl cs_1 ab, wenn die Sicherheit zur Interpretation der Messergebnisse abnimmt. Dagegen nehmen $cs_2^{\text{dist}}, c_4^{\text{dist}}$ entsprechend Gl. (15) zu.²¹

²¹ Nach Gl. (49)-(51) beziehen sich Massezahlen polaritätsabhängig für Granulat und Puder auf die gleichen Mengen. Folglich sind bei der Bestimmung der Massezahlen statt vier unterschiedlicher Werte drei zu betrachten (vgl. Tabelle 3-11).

Analog, aber unabhängig von den Koronaskopergebnissen, sind die Ergebnisse für die Ionenstrommessung zu Abbildung 3-9 zu betrachten: Gegeben ist eine Diagnosemessung bei positiver Polarität, bei der der Ionenstrom signifikant von der Referenzmessung (nach oben) abweicht. Darüber hinaus ist der Verlauf partiell quadratisch von der angelegten Spannung abhängig, während bis zur gesunkenen Durchschlagsspannung ein exponentieller Verlauf vorliegt. Dementsprechend liegen die Ereignisse $X_1^{\text{dist}} = [I_C^e I_C^+]$ vor.

Mit den Massezahlen für beide Evidenzquellen führt die Kombination mit $m(Z^{\text{dist}}) = m_{\text{ICM}}^{\text{dist}} \oplus m_{\text{CS}}^{\text{dist}}(Z^{\text{dist}})$ zu

$$\begin{aligned}
 \mathbf{m}(Z_1^{\text{dist}}) &= \mathbf{0,91} \cdot \mathbf{0,94} = \mathbf{0,8554}, \\
 m(Z_2^{\text{dist},(+)} = Z_3^{\text{dist},(+)} = Z_4^{\text{dist}}) &= m(Z_4^{\text{dist}}) = 0,91 \cdot 0,03 = 0,0273, \\
 m(Z_5^{\text{dist}}) = m(Z_9^{\text{dist}}) = m(Z_{13}^{\text{dist}}) &= 0,94 \cdot 0,045 = 0,0423, \\
 \mathbf{m}(Z_6^{\text{dist},(+)} = Z_7^{\text{dist},(+)} = Z_{10}^{\text{dist},(+)} = Z_{11}^{\text{dist},(+)} = Z_8^{\text{dist}}) &= m(Z_8^{\text{dist}}) = m(Z_{12}^{\text{dist},(+)} \\
 = m(Z_{14}^{\text{dist},(+)} = Z_{15}^{\text{dist},(+)} = Z_{16}^{\text{dist}}) &= \mathbf{0,045} \cdot \mathbf{0,03} = \mathbf{0,00135}.
 \end{aligned} \tag{58}$$

So ergibt sich der Maximalwert mit einer relativen Sicherheit von 85,54% für Z_1^{dist} , was nach Tabelle 3-7 zu einem Span als Fehlerursache führt. Des Weiteren sind Granulat und Puder mit $Z_6^{\text{dist},(+)} = Z_{11}^{\text{dist},(+)}$ nicht zu differenzieren, sodass die relative Sicherheit von 0,135% auf beide Fehlerursachen hinweist. Analog zu diesem fiktiven Beispiel ist folgend nach dem Ablaufdiagramm in Abbildung 3-3 die Anwendung beider evidenztheoretischer Modelle an den Ergebnissen einer Spitze-Platte-Anordnung dargestellt.

3.2.3 Diagnoseergebnisse für die Spitze-Platte-Anordnung

Im Folgenden sind die Messergebnisse der beiden Evidenzquellen dargestellt. Abbildung 3-11 zeigt zunächst die **Ionenstrom-Messergebnisse** (vgl. eigene Veröffentlichung [Ve04]). Dabei ist ersichtlich, dass zwar alle Messreihen signifikant von der Referenzmessung abweichen, aber die Ergebnisse für das Aluminiumpuder und das -granulat nicht voneinander signifikant abweichen. Im Gegensatz dazu zeigt die Messreihe mit Aluminiumspänen eine deutliche Abweichung sowohl in der Durchschlagsspannung von der Referenz und den anderen beiden Diagnosemessungen (ca. 13kV statt 15kV, bzw. 16kV bei Granulat, bzw. Puder; in der Referenzmessung $U_{DS} > 20\text{ kV}$) als auch im Verlauf des Ionenstroms. Folglich sind alle Diagnosemessungen plausibel, da sie keine Auffälligkeiten in Hinblick auf fehlerhafte Messtechnik oder eine abgeschaltete Spannungsquelle zeigen.

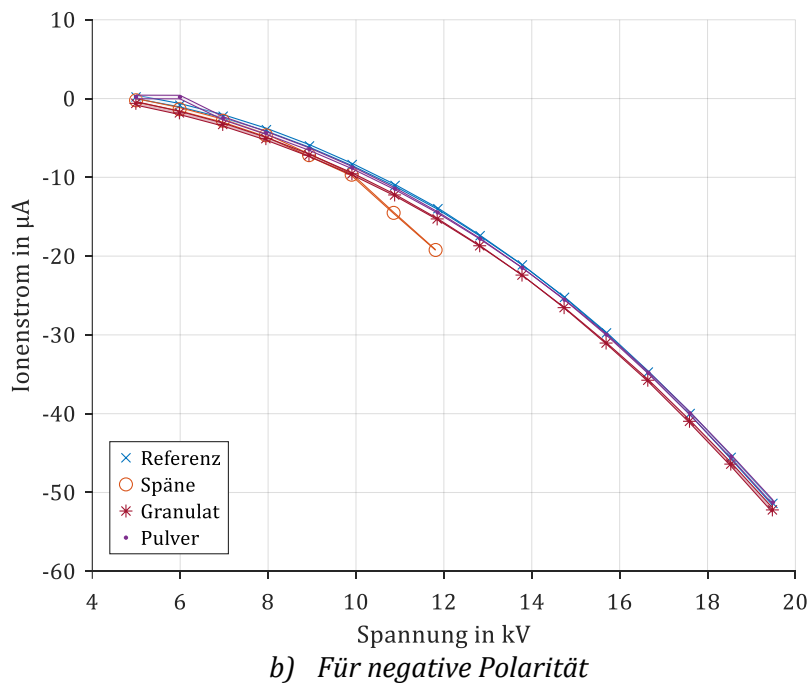
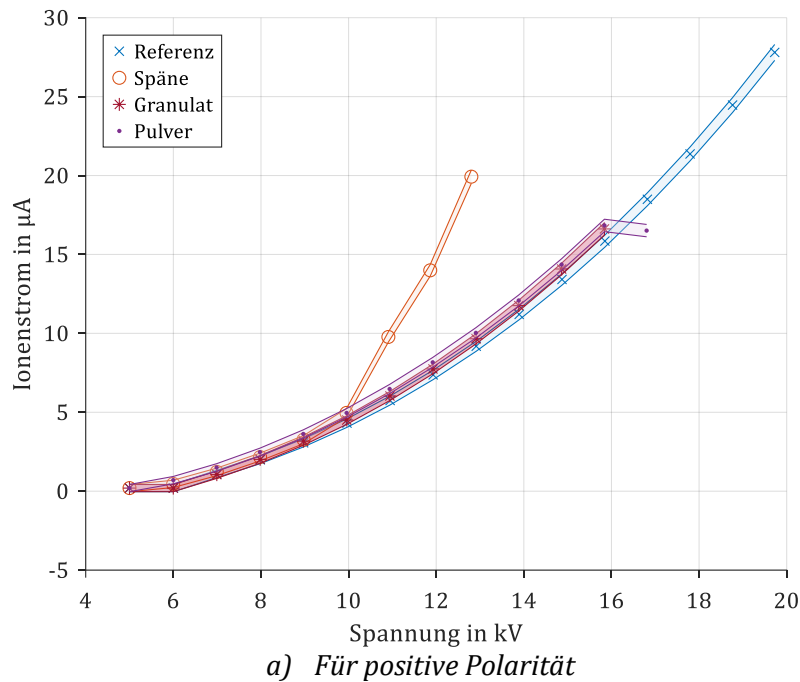


Abbildung 3-11: Messergebnisse der Ionenstrommessung

Weiterführend sind als weitere Evidenzen die **Aufnahmen des Koronaskops** exemplarisch für die maximale Prüfspannung von 20 kV (Referenz), bzw. 14 kV (Aluminiumspäne) in Abbildung 3-12 dargestellt, während weitere für die Diagnoseermittlung relevante Aufnahmen in Anhang D präsentiert sind. Es ist zu erkennen, dass die Einsatzspannung bei Aluminiumspänen optisch nicht von der Referenz abweicht, die Durchschlagspannung mit 14 kV allerdings deutlich unterhalb der Durchschlagspannung der Referenz mit über 20 kV liegt, während die

Entladungen für 11kV zwar einen geringeren Kontrast zum Hintergrund als bei 15kV der Referenz zeigen, allerdings zwei statt eines elektrischen Hotspots zu erkennen sind. Da die Entladungen in den Diagnoseaufnahmen erkennbar sind, ist der Fokus des Koronaskops korrekt eingestellt.

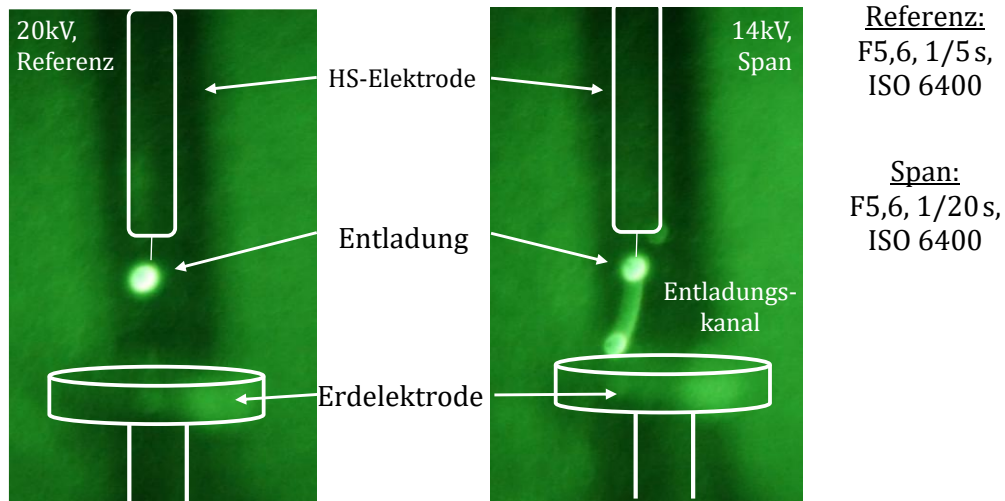


Abbildung 3-12: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für positive Polarität

Aus den dargestellten Ergebnissen sind für beide Modelle die Ereignisse in Tabelle 3-12 festzustellen. Auf dieser Grundlage ist mithilfe von Tabelle B 2 zu bewerten, wie deutlich die Evidenzen auftreten, was zu den Massezahlen in Tabelle 3-13 für das Fehlerdetektionsmodell für die einzelnen Messreihen Span, Granulat und Puder führt.

Tabelle 3-12: Ereignisse der Messreihen beider Polaritäten für beide Modelle

Messung		U_o^{CS}	PD^+	PD^*	I_c^e	I_c^+
Ionenstrom- messung	Span (+), (-)				p	p
	Puder (+)				n	p
	Puder (-)				n	n
	Granulat (+), (-)				n	p
	Für Span & Granulat & Puder (+): c, d_{ICM}					
Für Puder (-): c, \bar{d}_{ICM}						
Koronaskop	Span (+), (-)	p	p	n		
	Puder (+)	n	n	n		
	Puder (-)	p	n	p		
	Granulat (+)	n	n	n		
	Granulat (-)			p		
Für alle Messreihen: f, d_{CS}						
Legende: p: positives Ereignis; n: negatives Ereignis / keine Veränderung; (+) / (-): positive / negative Polarität; Grau hinterlegt: Angabe zur Vollständigkeit						

Tabelle 3-13: Massezahlen pro Messreihe für das Fehlerdetektionsmodell

Polarität	Messmethode	Span	Granulat	Puder
positiv	Ionenstrommessung	$icm_1 = 0,09$ $icm_2 = 0,9$ $icm_3 = 0,01$	$icm_1 = 0,34$ $icm_2 = 0,65$ $icm_3 = 0,01$	$icm_1 = 0,19$ $icm_2 = 0,8$ $icm_3 = 0,01$
	Koronaskop	$cs_1 = 0,04$ $cs_2 = 0,95$ $cs_3 = 0,01$	$cs_1 = 0,35$ $cs_2 = 0,6$ $cs_3 = 0,05$	$cs_1 = 0,15$ $cs_2 = 0,8$ $cs_3 = 0,05$
negativ	Ionenstrommessung	$icm_1 = 0,14$ $icm_2 = 0,85$ $icm_3 = 0,01$	$icm_1 = 0,14$ $icm_2 = 0,85$ $icm_3 = 0,01$	$icm_1 = 0,95$ $icm_2 = 0,04$ $icm_3 = 0,01$
	Koronaskop	$cs_1 = 0,01$ $cs_2 = 0,98$ $cs_3 = 0,01$	$cs_1 = 0,34$ $cs_2 = 0,65$ $cs_3 = 0,01$	$cs_1 = 0,84$ $cs_2 = 0,15$ $cs_3 = 0,01$
Für alle Messreihen: $K_{Norm} = 1$, bzw. $k_{corr} = 0$				

Die Massezahlen zeigen für das Fehlerdetektionsmodell, dass beim Span die Evidenzen (für beide Polaritäten und Evidenzquellen) auf Szenario 2 mit $Z_5 = X_2 \cap Y_2$, eine Abweichung von der Referenz beider Evidenzquellen, hinweisen. Für die Messreihen Granulat und Puder weisen die Evidenzen für positive Polarität allerdings weniger deutlich auf Szenario 2 hin, was sich an den niedrigeren Massezahlen für beide Evidenzquellen zeigt. Bei Puder bei negativer Polarität hingegen deuten die Evidenzen deutlich auf Szenario 1 mit $Z_1 = X_1 \cap Y_1$, keine Abweichung von der Referenz, weshalb die Ereignisse des Fehlerursachenmodells hier nur zur Vollständigkeit angegeben sind. Aus den Massezahlen in Tabelle 3-13 ergeben sich nach Gl. (22) die kombinierten Massezahlen für keinen detektierbaren Fehler mit $m(Z_1)$, für einen detektierbaren Fehler mit $m(Z_5)$ und für keine Detektion mit $m(Z_9)$ in Tabelle 3-14. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Fehlerursachen beider Polaritäten mit der Ausnahme Puder bei negativer Polarität durch das Fehlerdetektionsmodell erkannt werden.

Tabelle 3-14: Modellergebnisse für das Fehlerdetektionsmodell

Messung	$m(Z_1)$	$m(Z_5)$	$m(Z_9)$
Span (+)	0,0036	0,855	0,0001
Span (-)	0,0014	0,833	0,0001
Granulat (+)	0,119	0,39	0,0005
Granulat (-)	0,0476	0,5525	0,0001
Puder (+)	0,0285	0,64	0,0005
Puder (-)	0,665	0,0116	0,0001
Legende: (+) / (-): positive / negative Polarität			

Auf dieser Basis definiert Tabelle 3-18 allgemeine Handlungsempfehlungen für das Fehlerdetektionsmodell, da die Glaubensfunktionen des Fehlerdetektionsmodells auf einen bestimmten Abnutzungsvorrat (normal, kritisch, oder widersprüchliche Evidenzen) hindeuten (vgl. Tabelle 3-15). Zusammen mit den maximalen Kombinationsergebnissen stellt Tabelle 3-16

die Handlungsempfehlungen für die konkreten Messreihen nach dem Fehlerdetektionsmodell vor, wobei deutlich ist, dass bei positiver Polarität bei allen Messreihen ein sofortiger Eingriff notwendig ist, während bei negativer Polarität der Span und Granulat ein Handeln erfordern. Dagegen ist bei Puder (negativer Polarität) kein Eingreifen erforderlich, da das Puder die elektrische Festigkeit des Isoliergases im Vergleich zur Referenz im betrachteten Messbereich nicht beeinträchtigt. Somit liegt für Puder bei negativer Polarität kein signifikanter Fehler vor, was auf einen weiter auszuführenden Wahrnehmungsrahmen führt. Dies wird auch durch den Grenzwert von $m(Z_{2-4,6-8}) \geq 0,33$ bestätigt: Die Glaubensfunktion aller widersprüchlichen Evidenzen spiegelt sich durch $m(Z_{2-4,6-8})$ mit

$$\begin{aligned}
 Bel_{ICM} \oplus Bel_{CS}([\text{widersprüchliche Evidenzen}]) &= \sum_{B \subseteq A} m_{ICM} \oplus m_{CS}(A) \\
 = m_{ICM} \oplus m_{CS}(A) &= m(Z_2) + m(Z_3) + m(Z_4) + m(Z_6) + m(Z_7) + m(Z_8) \quad (59) \\
 \text{mit } A &= \neg Z_1 \cap \neg Z_5 \cap \neg Z_9,
 \end{aligned}$$

wider. Erreicht die Glaubensfunktion den Wert 0,33, ist davon auszugehen, dass der Wahrnehmungsrahmen für den betrachteten Anwendungsfall zu optimieren ist. Zur Vollständigkeit sind die Ergebnisse für Puder bei negativer Polarität im Fehlerursachenmodell trotzdem aufgeführt, da das Fehlerursachenmodell mathematisch unabhängig vom Fehlerursachenmodell anwendbar ist.

Tabelle 3-15: Allgemeine Handlungsempfehlungen für Kombinationsergebnisse des Fehlerdetektionsmodells

Kombination	Abnutzungsvorrat	Handlungsempfehlung
$m(Z_1) \geq 0,67$	Normal	keine
$m(Z_5) \geq 0,33$	Kritisch	Eingriff an Anordnung notwendig
$m(Z_9) \geq 0,33$	Widersprüchliche Evidenzen	Eingriff an Messtechnik notwendig (beide Evidenzquellen)
$m(Z_{2-4,6-8}) \geq 0,33$		Eingriff an Messtechnik notwendig (eine Evidenzquelle)

Tabelle 3-16: Handlungsempfehlungen des Fehlerdetektionsmodells für alle Messreihen

Messreihe	Span	Granulat	Puder
Positive Polarität	$m(Z_5)$	$m(Z_5)$	$m(Z_5)$
Empfehlung	Sofortiger Eingriff		
Negative Polarität	$m(Z_5)$	$m(Z_5)$	$m(Z_1)$
Empfehlung	Sofortiger Eingriff	Keine Handlung	

Im weiteren Verlauf sind die Massezahlen für das Fehlerursachenmodell zu bestimmen: Mithilfe von Expertenwissen sind die Ereignisse in Tabelle 3-12 anzugeben und den fokalen Mengen der beiden Evidenzquellen jeweils zuzuordnen. Um die Evidenzen abschließend zu modellieren, sind weiterführend die Massezahlen für die Messungen mit ihren Ereignissen und den zugeordneten Teilmengen wie in Tabelle 3-17 anzugeben.

Tabelle 3-17: Massezahlen pro Messreihe für das Modell zur Fehlerursachensuche

Polarität	Messmethode	Span	Granulat	Puder
positiv	Ionenstrommessung	$icm_1^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $icm_2^{\text{dist}} = 0,09$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,01$	$icm_1^{\text{dist}} = 0,05$ $icm_2^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,05$	$icm_1^{\text{dist}} = 0,05$ $icm_2^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,05$
	Koronaskop	$cs_1^{\text{dist}} = \mathbf{0,95}$ $cs_2^{\text{dist}} = 0,045$ $cs_4^{\text{dist}} = 0,005$	$cs_1^{\text{dist}} = 0,05$ $cs_2^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $cs_4^{\text{dist}} = 0,05$	$cs_1^{\text{dist}} = 0,05$ $cs_2^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $cs_4^{\text{dist}} = 0,05$
negativ	Ionenstrommessung	$icm_1^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $icm_2^{\text{dist}} = 0,07$ $icm_3^{\text{dist}} = 0,02$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,01$	$icm_1^{\text{dist}} = 0,025$ $icm_2^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $icm_3^{\text{dist}} = 0,05$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,025$	$icm_1^{\text{dist}} = 0,01$ $icm_2^{\text{dist}} = 0,05$ $icm_3^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $icm_4^{\text{dist}} = 0,04$
	Koronaskop	$cs_1^{\text{dist}} = \mathbf{0,95}$ $cs_2^{\text{dist}} = 0,045$ $cs_4^{\text{dist}} = 0,005$	$cs_1^{\text{dist}} = 0,05$ $cs_2^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$ $cs_4^{\text{dist}} = 0,05$	$cs_1^{\text{dist}} = 0,05$ $cs_2^{\text{dist}} = 0,05$ $cs_4^{\text{dist}} = \mathbf{0,9}$
Für alle Messreihen: $K_{\text{Norm}} = 1$, bzw. $k_{\text{corr}}^{\text{dist}} = 0$				

Das Kombinationsergebnis des Fehlerursachenmodells fasst Tabelle 3-18 zusammen und zeigt, dass es die Fehlerursachen Span, Granulat und Puder (+) jeweils identifiziert. Für die Partikel Granulat und Puder entsprechen die kombinierten Massezahlen aufgrund der gleichen Schnittmengen $Z_6^{\text{dist}} = Z_{11}^{\text{dist},(+)}$ bei positiver Polarität nach Tabelle 3-10 der relativen Sicherheit für Granulat oder Puder. Daher sind die beiden Ursachen für positive Polarität auf Basis des gewählten Wahrnehmungsrahmens nicht zu unterscheiden, aber es ist zu schlussfolgern, dass entweder Granulat oder Puder im Aufbau die Fehlerursache darstellt. Mit einer relativen Sicherheit von 0,81 bei beiden Messreihen erkennt das Fehlerursachenmodell die Ursachen, auch wenn eine Unterscheidung zwischen Granulat und Puder nicht möglich ist. Somit erkennt das Fehlerursachenmodell die tatsächlichen Ursachen über das Fehlerdetektionsmodell hinaus und eine Verbesserung zur eindeutigen Bestimmung der Fehlerursache ist entweder durch eine Verfeinerung des Wahrnehmungsrahmens Ω_{Dist} oder erhöhtes Expertenwissen möglich. Dies betrifft besonders die Messreihe Puder bei negativer Polarität, welche durch die Evidenzen des Koronaskops nicht detektierbar ist.

Tabelle 3-18: Modellergebnisse für das Fehlerursachenmodell

Messung	$m_{ICM} \oplus m_{CS}(A)$			
	[Span]	[Granulat]	[Puder]	[keine Identifikation]
<i>Span (+)</i>	0,855	0,00405		0,00005
<i>Span (-)</i>	0,855	0,00315	0,0009	0,00005
<i>Granulat (+)</i>	0,0025	0,81		0,0025
<i>Granulat (-)</i>	0,00125	0,81	0,045	0,00125
<i>Puder (+)</i>	0,0025	0,81		0,0025
<i>Puder (-)</i>	0,0005	0,025	0,045	0,036
Legende: (+): positive Polarität; (-): negative Polarität; fett markiert: höchstes Kombinationsergebnis grau hinterlegt: zur Vollständigkeit angegeben				

Die Darstellung der Ergebnisse für die Spitze-Platte-Anordnung und die Modellierung basieren auf den Erkenntnissen zur Ionenstrommessung. Inwiefern die Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren anwendbar ist, wird im folgenden Kapitel gezeigt. Darüber hinaus sind die Ionenstrommessergebnisse für den Koaxial- und Spannungsteiler-Aufbau dargestellt.

4 Die Ionenstrommessung zur Diagnose

Um die Ionenstrommessung als alternative Diagnosemethode für HVDC-Systeme zu bewerten, werden nachfolgend die in Kapitel 1.1 nach [21] dargestellten Anwendungskriterien für die Diagnosemethode diskutiert. Dabei bilden die in Kapitel 2.1.1 spezifizierten Kriterien die Grundlage, welche Tabelle 4-1 mit den zugehörigen Bewertungen zusammenfasst. Die Einordnung der Ionenstrommessung neben der UHF-Messung stellt Kapitel 4.2 als Vergleich dar, welcher den Nutzen der Ionenstrommessung für Diagnosen hervorhebt.

Die Bewertung der Anwendungskriterien basiert auf der nachstehenden Diskussion, welche besonderen Fokus auf Kriterium K_1 , **Anwendbarkeit**, und Kriterium K_2 , **Aussagefähigkeit**, legt. Besonders die *Aussagefähigkeit* berücksichtigt die grundlegenden diagnostischen Aspekte bei der Anwendung einer Diagnosemethode nach [18] zusätzlich zu [21]: Fehlerort und -art, Beeinträchtigung der Funktion, Differenzierung mehrerer Fehler und Auswirkung auf die Lebensdauer des betrachteten Testobjekts.

Tabelle 4-1: Übersicht – Ionenstrommessung zur Diagnose nach allgemeinen Kriterien aus [21]

Kriterium	Inhalt
Anwendbarkeit <i>Immer möglich</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nicht-invasiv & universell einsetzbar bei zugänglicher Erdung; analog zu standardisierter TE-Messung ▪ Keine Gasemissionen & -verunreinigungen durch Eingriff ▪ Geringer Platzbedarf ▪ Kosten von Geräten abhängig (Genauigkeit vs. Platzbedarf) ▪ Geringer Zeitaufwand, beeinflusst durch Auswertungsmethode (nicht bzw. teil-automatisiert) ▪ Datenumfang abhängig von Auswertungsmethode
Aussagefähigkeit <i>Mittel...Hoch</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Für Spannungen oberhalb der Einsetzspannung in inhomogenen Anordnungen ▪ Entladungen mit DC-Anteil (Glimmentladungen & Streamer) ▪ Fokus: Einfluss auf elektrische Festigkeit des Isoliergases
Bewertungsaufwand <i>Gering...Mittel</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abhängig vom Auswertungsmodell: <ul style="list-style-type: none"> ○ Empirisches Modell → mittel ○ Evidenztheoretische Modelle → gering
Komplexität <i>Mittel</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundsätzlich mittel aufgrund des Wissensumfangs
Negative betriebliche Auswirkungen <i>Keine Aussage möglich</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laboranwendung: keine Aussage möglich

4.1 Untersuchung der Anwendungskriterien

Zunächst ist die **Anwendbarkeit der Ionenstrommessung, K_1** , zu betrachten. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren für HVDC-Systeme mit

Gasisolierung anwendbar ist, ohne dass in das System aktiv einzugreifen ist. Somit entstehen keine Emissionen durch den aktiven Eingriff eines in Betrieb befindlichen Betriebsmittels und es gelangen keine Verunreinigungen, wie z. B. Feuchtigkeit, durch die Diagnosemessung in das System, wie es z. B. bei einer Gasprobenanalyse der Fall ist. Die Nicht-Invasivität ist somit für gasisolierte Anlagen besonders von Vorteil, wenn die Ionenstrommessung an mit synthetischer Luft gefüllten Betriebsmitteln Anwendung findet. Denn Verunreinigungen sind an diesen Anlagen besonders zu vermeiden, weil synthetische Luft grundsätzlich bei gleichen atmosphärischen Bedingungen eine geringere elektrische Festigkeit als SF₆ hat (vgl. [18]). Für die Anwendung an SF₆-gefüllten Betriebsmitteln ist die Ionenstrommessung aufgrund der Nicht-Invasivität ebenfalls von Interesse, weil das Verhindern von Emissionen aufgrund des hohen Global Warming Potential, GWP₁₀₀, von SF₆ mit 23.500 [3] notwendig ist (vgl. [4], [5]).

Folglich ist die Methode universell an gasisolierten HVDC-Betriebsmitteln einsetzbar, solange ein Zugang zur Erdelektrode besteht und die Messtechnik wie in [17] in den Erdungspfad eingebunden werden kann. Dabei ist besonders auf einen niederohmigen Anschluss der Messtechnik zu achten, da die Erdung des Systems über die Messtechnik erfolgt. Ist der Erdungswiderstand insgesamt zu groß, verfälscht die Potentialdifferenz über der Messtechnik das Messergebnis, da die elektrische Feldstärke im Elektrodenzwischenraum abnimmt und eine zusätzliche Spannungsmessung über den Gasraum notwendig macht. Daher gilt für den Erdungs- und Messtechnikwiderstand R_{Technik} im Vergleich zum Gaswiderstand R_{Gas} : $R_{\text{Technik}} \ll R_{\text{Gas}}$. Die weiteren technischen Spezifikationen (vgl. Kapitel 2.1.2) fließen ebenfalls in die Anwendbarkeit ein: Da das zugrundeliegende Messprinzip an die standardisierte TE-Messung aus [9] und die Ionenstrommessungen aus [17] angelehnt ist, ist die Anwendbarkeit bzgl. der technischen Umsetzung und Durchführung genauso wie bei einer TE-Messung und Ionenstrommessung unter einer HGÜ-Freileitung sichergestellt. Eine Anpassung einzelner Parameter, wie z. B. der Abtastrate zur Datenerfassung unterliegt Einzelfallentscheidungen des Diagnostikers. Allerdings bietet das Anwendungskonzept einen Leitfaden zur Durchführung der Diagnosemessungen und stellt somit sicher, dass die Ionenstrommessung als Diagnosemessung für HVDC-Systeme funktioniert.

Darüber hinaus ist der Platzbedarf für die Messtechnik, besonders im Vergleich zur Größe eines HVDC-Betriebsmittels mit mehreren Metern Höhe aufgrund der Isolationskoordination (vgl. [19]) gering, da lediglich ein Verstärker mit DAQ-Karte notwendig ist, um den Ionenstrom zu erfassen. Dabei bietet die Nicht-Invasivität der Messmethode den weiteren Vorteil, dass die Positionierung der Messtechnik variabel ist, solange sie im Erdungspfad des betrachteten Systems angehängt ist. Bei der Wahl der Geräte ist allerdings nicht nur auf die Größe, sondern auch auf die Genauigkeit, Größenordnung der erfassbaren Messgröße und

Rauschunterdrückung zu achten, was im spezifischen Anwendungsfall zu betrachten ist. Somit sind die Kosten ebenfalls fallspezifisch.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei bestehender Durchschlagsgefahr die Messtechnik entsprechend geschützt ist. Ursächlich dafür ist die Notwendigkeit, dass ein Entladungsstrom oberhalb der Einsetzspannung nach Gl. (4) zu provozieren ist, da sonst kein Ionenstrom erkennbar ist. Aufgrund der Inhomogenität einer realen Anordnung (vgl. Kapitel 2.2.2) ist die Ionenstrommessung bis zum Auftreten eines Durchschlags anwendbar. Besonders wichtig ist, dass in beiden Messungen die jeweils angelegten Spannungen einen gemeinsamen Wertebereich haben. Aus diesen Randparametern sind Prüfbedingungen vor Beginn festzulegen (vgl. Kapitel 2.2). Bei bekannten Werten für die Durchschlagspannung (ggf. für verschiedene Wahrscheinlichkeiten) ist die Vorbereitung der Ionenstrommessung erleichtert. Um diese Werte zu erhalten, ist allerdings eine hohe Kenntnis des jeweiligen Prüfaufbaus notwendig. Für Aufbauten im Feld ist dabei besonders auf die Kenntnisse von Herstellern – falls vorliegend – zurückzugreifen. Ansonsten weist die Ionenstrommessung auf einen bevorstehenden Durchschlag durch einen exponentiell steigenden Strom hin (vgl. Kapitel 3.2.2), was die Messung nach oben begrenzt. Somit ist die Ionenstrommessung trotz des unvollständigen Wissens, bzw. der statistischen Unsicherheit eines Durchschlags durchführbar.

Als Konsequenz aus dem unvollständigen Wissen über einen Durchschlag ist im empirischen Risikomodell der entsprechende Aspektwert negativ abzuschätzen, sodass die Ausfallwahrscheinlichkeit steigt (vgl. Gl. (10)-(12)). Da diese Abschätzung ein verfrühtes Eingreifen zur Folge hat (vgl. Tabelle 3-2), ist die Anwendbarkeit der Ionenstrommessung weiterhin gewährleistet. Bei Anwendung der evidenztheoretischen Modelle ist fehlendes Wissen zur Durchschlagspannung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2, 7.2) und ermöglicht somit ebenfalls die Anwendung sowie Auswertung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren.

Außerdem fundiert die Interpretation der Ionenstrommessung für Diagnosen auf den Kenngrößen des Abnutzungsvorrats (s. Kapitel 2.3). Besonders das Zusammenführen der Ergebnisse der Kenngrößen sowohl im empirischen als auch in den evidenztheoretischen Modellen liefert eine Bewertung des Abnutzungsvorrats. Grundlage hierfür sind die physikalischen Zusammenhänge der Kenngrößen zum Ionenstrom (vgl. Kapitel 2.3) und deren Veränderung durch eine Änderung des Abnutzungsvorrats, z. B. durch Partikel im Feldraum. Somit bilden die Kenngrößen die Grundlage zur Interpretation der Messergebnisse und zur Anwendung der Ionenstrommessung.

Im Weiteren ist der Zeitaufwand für eine Messung zu betrachten: Dieser ist aufgrund der Nicht-Invasivität gering und die Durchführung und Auswertung sind teilweise automatisiert. Je nach Auswertungsverfahren (empirisch oder evidenztheoretisch) ist der Grad der automatisierten

Auswertung höher und somit der Zeitaufwand geringer. So ist die Anwendbarkeit mittels empirischer Auswertung zeitaufwendiger als bei den evidenztheoretischen Modellen. Somit sind beide Modellierungsarten geeignet, um die Ionenstrommessung anzuwenden.

Im weiteren Verlauf ist **Kriterium K₂, die Aussagefähigkeit**, zu betrachten und anhand der erzielten Messergebnisse zu bewerten. Dabei ist der den Ionenstrom verursachenden Streamer-Mechanismus zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 1.3): Die Feldüberhöhung nach Erreichen der Einsetzspannung im Isoliergas einer inhomogenen Leiteranordnung nach [41] erzeugt nach dem Abfließen von Elektronen Raumladungen (Ionen) (vgl. [17]), die im elektrostatischen Feld aufgrund der Coulomb-Kraft driften. Nach dem Shockley-Ramo-Theorem, Gl. (2), verursachen die Raumladungen einen Ionenstrom, der maßgeblich aufgrund der konstanten Beschleunigung (vgl. Anhang A) einen Gleichstrom bildet. Somit sind Ereignisse, die Positive Bursts, bzw. Trichel-Entladungen verursachen, nicht detektierbar, da sie einen Entladungsstrom mit Frequenzanteilen im Isoliergas erzeugen, die oberhalb der Filterfrequenz von 10 Hz, bzw. 5 Hz nach Gl. (33) liegen. Dagegen sind allerdings Glimmentladungen erfassbar, die ansonsten lediglich mithilfe einer Entladungsstrommessung detektierbar sind [7]. Somit sind mittels Ionenstrommessung Glimmentladungen detektierbar, welche bei DC häufig auftreten (vgl. [7]). Dieses Merkmal der Ionenstrommessung stellt für DC einen wesentlichen Vorteil gegenüber der TE-Messung dar.

Außerdem tritt in realen Anordnungen aufgrund der nicht idealen Feldverteilung nach der Glimmentladung die Streamerbildung als folgendes Entladungsstadium auf, welches ebenfalls detektierbar ist, bevor ein Durchschlag eintritt (vgl. [41] und Abbildung 4-1). Somit ist eine Fehlerkennung mittels Ionenstrommessung vor der vollständigen Abnutzung des Isoliergases möglich und die Ionenstrommessung gehört somit zu den Diagnosemethoden der Früherkennung.

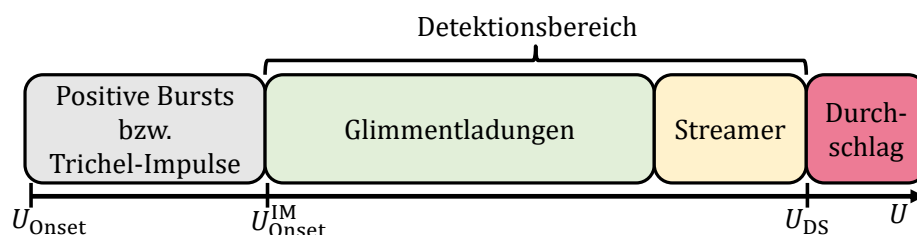


Abbildung 4-1: Detektionsbereich der Ionenstrommessung bezogen auf Entladungsphänomene

Wie die Messergebnisse in Kapitel 5 an mehreren Aufbauten zeigen, reagiert der Ionenstrom entsprechend Gl. (2) nicht auf unterschiedliche Materialien, sondern auf den Einfluss der Partikel auf die Feldverzerrung und die Schlagweite. Somit fokussiert die Aussagefähigkeit der Ionenstrommessung auf die tatsächliche Auswirkung durch ein Partikel auf den

Abnutzungsvorrat des Isoliergases anstelle der ursächlichen Partikelparameter, wie z. B. Material und Partikelart. Außerdem reagiert die Ionenstrommessung ebenfalls auf die Partikelmenge, bzw. -masse (vgl. Abbildung 5-3) aufgrund der lokalen Feldverzerrungen, die an den Partikeln auftreten. Damit zeigt die Ionenstrommessung einen Detektionsumfang, der die Abnutzung des Isoliergases auf Grundlage von Raumladungen, Feldverzerrungen und der Driftgeschwindigkeit nach Gl. (2) widerspiegelt. Bezüglich der Detektionstiefe ist eine Betrachtung der jeweiligen Auswertungsmethoden notwendig. Während das empirische Risikomodel die dargestellten Fehler als Partikel identifiziert, unterscheidet das Fehlerursachenmodell Ablagerungsorte und Partikelarten aufgrund der Berücksichtigung weiterer Informationen durch das Koronaskop (vgl. Kapitel 6 und 7). Somit eignet sich die Ionenstrommessung mit beiden Auswertungsmethoden sowohl einzeln als auch in kombinierter Anwendung mit weiteren Sensoren als Diagnosemethode.

Darüber hinaus ist der **Bewertungsaufwand, K_3** , mit den in Kapitel 3 vorgestellten Modellen mittel (empirisches Modell) bis gering (evidenztheoretisches Modell). Beim empirischen Modell ist zu berücksichtigen, dass eine Auswertung nicht automatisiert abläuft und der Diagnostiker eine Bewertung der vorliegenden Messdaten abgibt, bevor das Ergebnis feststeht. Dieser Aufwand entfällt bei den evidenztheoretischen Modellen, wo der Diagnostiker weniger Expertenwissen benötigt, aber Ereignisse, bzw. Szenarien anhand der Messergebnisse einschätzt, bevor ein Diagnoseergebnis feststeht. Zusätzlich zum Zeitaufwand der Interpretation hängt der Zeitaufwand der Messdurchführungen vom gewählten Spannungsbereich (vgl. Kapitel 2.2.1) und der Wahl des Auswertungsmodells ab. Abbildung 4-2 stellt die unterschiedlichen Anteile des gesamten Zeitaufwands in Bezug auf die durchgeführte Ionenstrommessung dar. Während bei beiden Auswertungen die Ionenstrommessung als Zeitbasis gleichermaßen ins Gewicht fällt, sind für die evidenztheoretischen Modelle Aufnahmen mittels Koronaskop anzufertigen, was für das empirische Modell entfällt. Allerdings basiert für diese Modellart die Interpretation der Messdaten auf den Erfahrungen des Diagnostikers, wohingegen die Interpretation der Glaubensfunktionen der evidenztheoretischen Modelle zum Erhalt eines Ausfallrisikos zeitaufwendiger als bei der empirischen Risikoermittlung ist. Um dies abzufangen, stellt Kapitel 3 Handlungsempfehlungen für das jeweilige Modell dar. Somit ist der Bewertungsaufwand mit beiden Auswertungsmethoden für die Ionenstrommessung in der Anwendung geeignet.

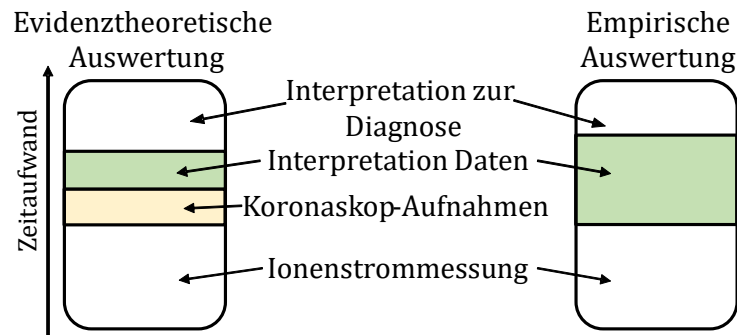


Abbildung 4-2: Bewertungsaufwand durch die empirische und evidenztheoretische Datenauswertung

Bei der Anwendung der Ionenstrommessung ist die **Komplexität, K_5** , durch das Konzept (s. Kapitel 2.2) und das jeweilige Auswertungsmodell (s. Kapitel 3) festgelegt. Grundsätzlich gilt unabhängig von der Auswertung, dass sowohl das Verständnis der physikalischen Entstehung des Ionenstroms als auch Kenntnisse zum Testobjekt notwendig sind, welche zu kombinieren sind, um eine zuverlässige Aussage zu erzielen. Somit ist die Komplexität in Anlehnung an [21] grundsätzlich als mittel einzustufen, wodurch sich die Ionenstrommessung in der Anwendung eignet.

Das Anwendungskriterium **K_5 , negative betriebliche Auswirkungen**, wird zu einer Einordnung hier nicht weiter angewandt, da die Ionenstrommessung für Diagnosen im Offline- statt Online-Betrieb Anwendung findet.

Zwischenfazit

Mit den dargestellten Kriterien und der Bewertung der Ionenstrommessung anhand ebendieser ist ersichtlich, dass die Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren für HVDC eine Alternative zur TE-Messung darstellt. In allen genannten Kriterien $K_1...K_5$ erfüllt die Ionenstrommessung die Erwartungen an eine Diagnosemethode für gasisolierte Betriebsmittel. Da die Grundlage für die Anwendung die Kenngrößen des Abnutzungsvorrats sind, folgt im weiteren Verlauf eine Diskussion, inwiefern die Kenngrößen die Bewertung des Abnutzungsvorrats beeinflussen.

4.1.1 Diskussion der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats – Einfluss auf den Abnutzungsvorrat

Um den Einfluss der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats auf ebendiesen zu diskutieren, sind Kriterien wie Aussagekraft, Unsicherheit, Erweiterungs-, bzw. Verbesserungspotential und die Einbindung physikalischer Grundlagen auf sie anzuwenden. Die Zusammenfassung der Diskussionsergebnisse zeigt Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Bewertung der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats

Kenngröße	Bewertung
Verminderte Durchschlagspannung ΔU_{DS}^-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausschlusskriterium für elektrische Festigkeit des Isoliergases & Bewertung des Abnutzungsvorrats auf Basis der physikalischen Veränderung des Ionenstroms im Durchschlagfall ▪ Unvollständiges Wissen zur Referenz-Durchschlagspannung mittels Modellierung abgefangen ▪ Veränderung des Messbereichs angezeigt & Schutz der Messtechnik sowie Feststoffisolatoren ▪ Statistische Schwankungen der Durchschlagspannung berücksichtigt
Differenz der virtuellen Einsatzspannung ΔU_{Onset}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teil der Plausibilitätsprüfung des Ionenstromverlaufs ▪ Reproduzierbares Ergebnis durch Regression
Differenz der synthetischen Ionenstromleistung ΔP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenführung der Parabelkoeffizienten zu einer Kenngröße ▪ Einfluss von 33% auf Berechnung der absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit im empirischen Modell ▪ Vereinfachte Einschätzung für Modellierung durch ΔP statt durch Koeffizientenvergleich ▪ Keine Aussage zur tatsächlich aufgenommenen Leistung
Zusätzliche, bzw. hellere Entladung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfluss von Aufnahmeparametern spezifisch für Aufbau einzustellen, z. B. SNR, Umgebungsbedingungen, Blende, Belichtungszeit, ISO-Wert ▪ Bewertungsgrundlage: Kontrast der Entladung zur Umgebung für reproduzierbares Ergebnis ▪ Einsetzbar an Aufbauten mit Sichtfenster ohne UV-Filter

Als erstes ist die **verminderte Durchschlagspannung ΔU_{DS}^-** zu betrachten, welche ähnlich einem k.o-Kriterium Änderungen des Abnutzungsvorrats anzeigt: Da ein Durchschlag (unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit) bei einer Überlastung des Isoliergases auftritt und somit die elektrische Festigkeit des Gases im Elektrodenzwischenraum zusammenbricht (vgl. [18]), was einen gravierenden Fehler zur Folge hat, ist ΔU_{DS}^- für eine Bewertung des Abnutzungsvorrats notwendig zu betrachten. Zwar unterliegt das Auftreten von Durchschlägen statistischen Schwankungen (vgl. [18]), dennoch ist der sichere Betrieb eines Systems für das 1,2-fache der Nennspannung (für HVDC) sicherzustellen (vgl. [19]). Analog gilt diese Aussage ausblickend für andere Isoliermedien, wie z. B. Feststoffisolatoren für Stützer in GIS, bzw. GIL oder für Tragkonstruktionen in RC-Spannungsteilern. Folglich liefert ΔU_{DS}^- für Betriebsmittel als ganzheitliche Isoliersysteme mit Isoliergasen und Feststoffen ebenfalls einen Indikator für die Funktionsfähigkeit, bzw. den Abnutzungsvorrat.

Falls für die Ionenstrommessung kein Referenzwert von ΔU_{DS}^- vorliegt, bewertet der Diagnostiker ΔU_{DS}^- in Hinblick auf den Ausfall des Systems. Diese Subjektivität fangen allerdings beide Risikomodellierungen ab, da sie robust sind (vgl. Kapitel 6 und 7). Somit ist ΔU_{DS}^- neben Systemen mit vollständigen Informationen auch für Betriebsmittel im Bestand anwendbar,

wenn keine Referenzdaten zur Durchschlagspannung vorhanden sind. Folglich fängt die Robustheit der beiden Modelle beide genannten Extremfälle in der Anwendung ab, sodass der Anwender eine Bewertung des Abnutzungsvorrats erhält.

Des Weiteren eignet sich ΔU_{DS}^- , bzw. die zugrunde liegende Durchschlagspannung der jeweiligen Messreihe, zur Begrenzung des messtechnischen Bereichs, um die Messtechnik und ggf. Feststoffisolatoren des Systems zu schützen. Zusätzlich berücksichtigt ΔU_{DS}^- die physikalischen Veränderungen des Stroms im Durchschlagsfall: Während für auftretende Teilentladungen der Ionenstrom einen charakteristischen parabelförmigen Verlauf zwischen Einsetz- und Durchschlagspannung aufweist (vgl. Kapitel 1.3), zeigt der Verlauf für einen Durchschlag einen exponentiellen Verlauf (vgl. [18]) und bildet somit den Zusammenbruch der elektrischen Festigkeit des Isoliergases und damit die vollständige Erschöpfung des Abnutzungsvorrats des Isoliergases ab.

Neben ΔU_{DS}^- begrenzt die Einsetzspannung, welche die Grundlage für die Berechnung der **Differenz der virtuellen Einsetzspannung ΔU_{Onset}** bildet, den Messbereich nach unten. Besonders die Reproduzierbarkeit zur Bestimmung der einzelnen Einsetzspannungen ist im Vergleich zu [43] dadurch verbessert, dass ein Regressionsalgorithmus auf die Messdaten Anwendung findet (vgl. Kapitel 2.3) und somit der Ursprung der berechneten Parabel als Einsetzspannung gilt. Besonders vor dem Hintergrund, dass bislang keine standardisierte Definition der Einsetzspannung einer Ionenstrommessung unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten existiert, stellt die Vorgehensweise die Reproduzierbarkeit der Berechnung sicher. Somit ist die Bewertung des Abnutzungsvorrats auf Grundlage von ΔU_{Onset} ebenfalls reproduzierbar.

Außerdem stellt das Erreichen der Einsetzspannung und damit die Berücksichtigung von ΔU_{Onset} ein notwendiges Kriterium zur Interpretation der Ionenstrommessung unter Partikeleinfluss dar, weil ohne das Erreichen der Einsetzspannung nach Bedingung (4) kein Ionenstrom im betrachteten Definitionsbereich vorliegt. Daher ist ΔU_{Onset} ein Teil der Plausibilitätsprüfung. Folglich fließt ΔU_{Onset} in die Bewertung des Abnutzungsvorrats ein.

Basierend auf den parabelförmigen Verläufen des Ionenstroms für den definierten Messbereich bietet die **Differenz der synthetischen Ionenstromleistungen ΔP** eine Zusammenfassung der einzelnen Koeffizienten der Regression. Somit ist kein spezifisches Wissen für die einzelnen Koeffizienten zur Interpretation notwendig, sondern das Verständnis der synthetischen Leistung, um eine Fehler- und Risikoeinschätzung zu ermitteln. Damit gewährleistet ΔP die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und bildet die Grundlage für die Einschätzung des Abnutzungsvorrats durch die Risikomodelle.

Des Weiteren erlaubt ΔP den Vergleich der umgesetzten Leistung für die betrachteten Messungen. So ist sichergestellt, dass stochastisch auftretende Ereignisse und Schwankungen zwischen der Diagnose- und Referenzmessung die Ergebnisse nicht verfälschen. Infolgedessen bildet ΔP eine entscheidende Kenngröße zur Beschreibung des Abnutzungsvorrats, weil durch den Ionenstrom und ein gemeinsames Spannungsintervall alle Informationen zur Änderung des Abnutzungsvorrats in einer Größe zusammengefasst sind. Dies bedeutet, dass weiterführend Diagnosemessungen bei gleichem betrachteten Spannungsintervall vergleichbar sind und den Abnutzungsvorrat ebenfalls für Langzeitbetrachtungen beschreiben.

Neben den diskutierten Kenngrößen des Abnutzungsvorrats haben die technischen Spezifikationen der Ionenstrommessung einen maßgeblichen Einfluss auf die Durchführung und somit auch die Ergebnisse der Messungen und Diagnosen. Dabei steht besonders die Belastbarkeit der Messergebnisse im Fokus.

4.1.2 Bewertung der technischen Spezifikationen

Um die technischen Spezifikationen zu bewerten, zeigen Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 jeweils einen Vergleich der gemessenen Ionenstrom- und Spannungsbeträge mit Literaturdaten aus [91] für die Spitze-Platte-Anordnung und Literaturdaten aus [43] für die GIL bei negativer Polarität. Beide Vergleiche plausibilisieren die Messungen der beiden Anordnungen und die Abweichungen sind auf die unterschiedlichen Messaufbauten zurückzuführen.

Für die Spitze-Platte-Anordnung zeigt die Ionenstromkurve dieser Arbeit eine Einsetzspannung von 5 kV, allerdings ist die Schlagweite geringer und der Verlauf näherungsweise quadratisch abhängig vom angelegten Spannungsbetrag. Die Abweichungen entstehen durch die Schlagweite und die Form der Spitze: Während in [91] eine Spitze mit Durchmesser von 2 mm Verwendung findet, ist die Spitze in der vorliegenden Arbeit mit 0,72 mm kleiner, sodass die Einsetzspannung erwartungsgemäß kleiner ausfällt (vgl. [18], [44]). Außerdem verursachen die kleinere Schlagweite und die höhere Feldstärke sowohl in der gesamten Anordnung als auch lokal an der Spitze einen höheren Ionenstrom nach Gl. (2) unter Berücksichtigung von $U = \int \vec{E} d\vec{s}$.

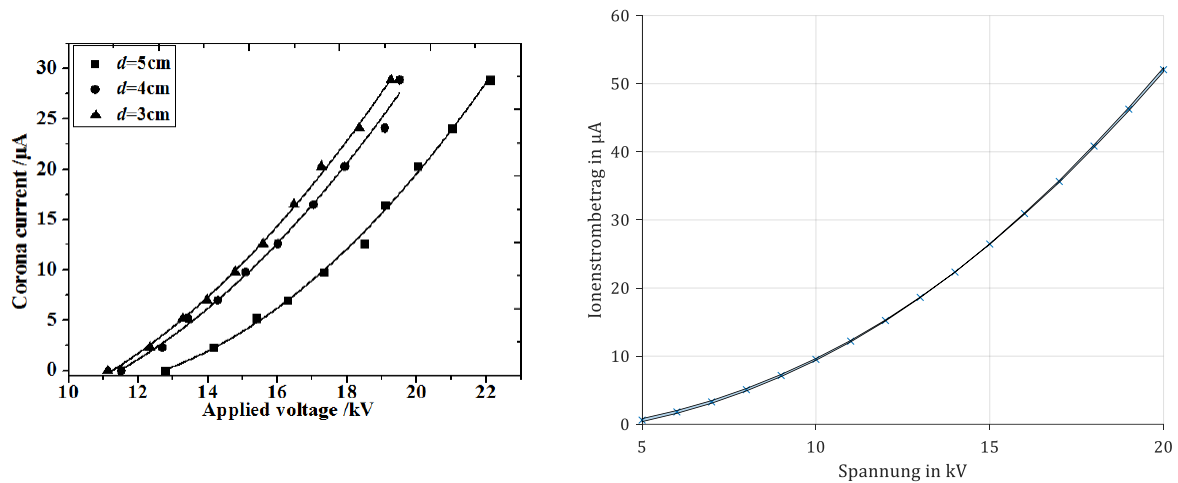


Abbildung 4-3: Verifikation der Messergebnisse an der Spitze-Platte-Anordnung; links: Beträge für Ströme und Spannungen aus [91]; rechts: Referenzmessung negativer Polarität ($s = 2,5\text{ cm}$)

Analog zeigt Abbildung 4-4 die Messdaten an der GIL, welche signifikant voneinander abweichen. Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Geometrien und Versuchsbedingungen (vgl. Tabelle 4-3) zurückzuführen: Zum ersten verursachen die unterschiedlichen Radien der Innenleiter unterschiedliche Homogenitätsgrade der Anordnungen, was sich in den Schwaiger-Faktoren nach Gl. (34) zu $\eta_1/\eta_2 = 27,02$ widerspiegelt. Diese zeigen, dass für die Anordnung in [43] eine stark inhomogene Anordnung Anwendung findet, während in der vorliegenden Arbeit eine schwach inhomogene Anordnung nach [18] vorliegt. Infolgedessen ist die Schlagweite geringer und bei gleicher Spannung in beiden Arbeiten liegt gemäß $U = \int \vec{E} d\vec{s}$ eine höhere Feldstärke in der Anordnung der vorliegenden Arbeit vor. Deshalb ist die Einsetzspannung nach Gl. (7) der vorliegenden Arbeit geringer, da sich bewegende Ladungsträger eine größere Feldstärke erfahren und sich näher an der Erdelektrode befinden. Nach dem Shockley-Ramo-Theorem steigt entsprechend der Ionenstrom, während in [43] Bedingung (5) noch nicht erfüllt ist, da die Spannung zu gering ist. Zum zweiten ist das elektrisch belastete Volumen der Anordnung in [43] größer, d.h. es treten mehr Raumladungen auf, sodass nach dem Shockley-Ramo-Theorem der Ionenstrom größer ist als in der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus weichen sowohl die Isoliergase (Luft statt N_2) als auch die Versuchsbedingungen um 2°C und 5% r. F. voneinander ab, was näherungsweise zu einer Übereinstimmung führt (vgl. [18], [76]). Folglich zeigen die Messergebnisse dieser Arbeit für negative Polarität einen plausiblen Verlauf.

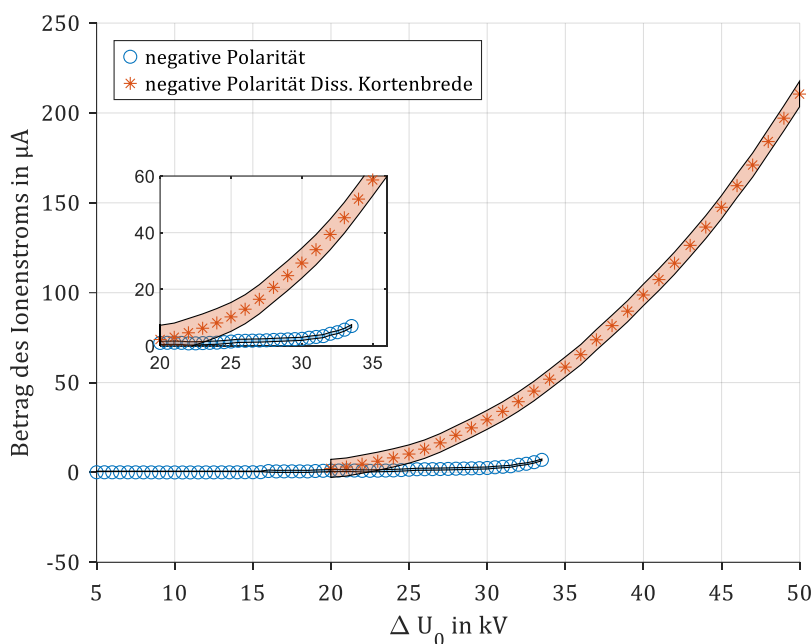


Abbildung 4-4: Referenzdaten der Ionenstrommessungen (Koaxialaufbau, 22 °C, 50 % r. F.) aus der vorliegenden Arbeit (Laborluft) und [43] (Stickstoff)

Tabelle 4-3: Vergleichsdaten der Koaxialanordnungen zur Plausibilisierung der Ionenströme

Kenngröße	Vorliegende Arbeit	Aus [43]
Innenleiterradius	5 cm	1 mm
Schlagweite in cm	6,5	11,45
Physikalische Einsatzspannung in kV	12 (beide Polaritäten)	20 (beide Polaritäten)
Oberflächenrauigkeit m	0,1	k. A., aus Daten: $\approx 0,9$
Umgebungsbedingungen	22 °C, 55 % r. F.	20 °C, 50 % r. F.
Theoretische Einsatzspannung in kV nach Gl. (5)-(7)	+46,36 -43,82	+8,97 -9,9
Geometriefaktor nach Gl. (34)	2,3	230
Schwaiger'scher Ausnutzungsfaktor	$\eta_1 = 64,03 \%$	$\eta_2 = 2,37 \%$
Verhältnis der Schwaiger-Faktoren	$\eta_1/\eta_2 = 27,02$	

Basierend auf den Plausibilisierungen der beiden Anordnungen ist zu folgern, dass die technischen Spezifikationen zur Erfassung der Ionenströme geeignet sind und somit die Grundlage zur Durchführung der Ionenstrommessung für Diagnosen bilden. Da der zugrunde liegende Entladungsmechanismus bei allen schwach bis stark inhomogenen Aufbauten gleich ist, sind die technischen Spezifikationen folglich universell an HVDC-Systemen einsetzbar. Dies gilt auch beispielsweise für komplexe Aufbauten wie den RC-Spannungsteiler. Auch die Vereinfachung des Ersatzschaltbilds ist damit zulässig, solange die Sicherheit des Aufbaus gewährleistet ist und die technischen Spezifikationen, wie z. B. Restwelligkeit der Prüfspannung, Haltezeit der Spannung, Abtastrate und Anzahl der Stichproben, nach Angaben aus der Literatur

Anwendung finden. Allerdings ist weiterhin zu diskutieren, inwiefern die Ionenstrommessung neben dem etablierten Verfahren der UHF-TE-Messung für HVDC-Betriebsmittel Bestand hat.

4.2 Einordnung der Ionenstrommessung neben der UHF-TE-Messung

Zur abschließenden Bewertung der Ionenstrommessung für Diagnosen zeigt Tabelle 4-4 den Vergleich der Ionenstrommessung zum Idealprofil einer Diagnosemethode und der Bewertung der UHF-Messung nach [21]. Zur Auswertung stellt Tabelle 4-5 den paarweisen Vergleich nach [92] der Ionenstrommessung zur Diagnose mit der UHF-Methode aus [21] dar. Auf den Vergleich zur standardisierten TE-Messung (vgl. Kapitel 1.1.1) wird hier verzichtet, da diese für DC zwar in Norm [9] enthalten ist, allerdings die Auswertungsverfahren noch nicht standardisiert sind (vgl. [10]).

Tabelle 4-4: Vergleich der Ionenstrommessung für Diagnosen zum Idealprofil für Diagnosemethoden und UHF-Messung nach [21]

Kriterien	Idealprofil	Ionenstrommessung	UHF-Messung
Anwendbarkeit	Immer möglich		Möglich
Aussagefähigkeit	Sehr hoch	Mittel...Hoch	Sehr hoch
Bewertungsaufwand	Gering	Gering...Mittel	Gering
Komplexität	Gering	Mittel	Hoch
Negative betriebliche Auswirkungen	Keine Aussage möglich		

Tabelle 4-5: Vergleich der Ionenstrommessung und UHF-Methode nach [21]

Kriterium	(K_1)		(K_2)		(K_3)		(K_4)		$(K_5)^*$	
Ionenstrommessung	Nicht-invasiv	+1	mittel	-1	Mittel... Gering	0	mittel	+1	Sehr hoch	-1
UHF-TE-Diagnostik	Bauliche Einschränkungen	-1	Sehr hoch	+1	Gering	0	hoch	-1	kaum	+1
Bewertung	Ionenstrommessung: 1; UHF-TE-Diagnostik: -1									
Legende	Vergleichsgewinner: +1; Vergleichsverlierer: -1; Unentschieden: 0 (K_1) , ..., (K_5) : Anwendbarkeit, Aussagefähigkeit, Bewertungsaufwand, Komplexität, betriebliche Auswirkungen *: Die negativen betrieblichen Auswirkungen sind nur zur Vollständigkeit aufgeführt, werden aber bei der abschließenden Verwertung nicht berücksichtigt, da die Ionenstrommessung ein Offline-Verfahren ist, wohingegen die UHF-Messung ein Online-Verfahren darstellt.									

Unter der Bedingung, dass ein Vergleich der Ionenstrommessung als Offline-Verfahren (vgl. Kapitel 2.2) mit der UHF-Messung als Online-Verfahren (vgl. [7], [24]) stattfindet, ist die Ionenstrommessung unter den gegebenen Daten bei gleicher Gewichtung der Kriterien besser als Diagnosemessung geeignet, weil die Ionenstrommessung mit K_1 und K_4 mehr positive

Eigenschaften als die UHF-Messung mit K_2 aufweist. Liegt der Fokus allerdings auf der Aussagefähigkeit mit möglichst großem Detailwissen einer Verschmutzung, basierend auf den Teilentladungsimpulsformen und -folgen, ist die UHF-Diagnosemessung nach [7] vorzuziehen. Besonders die Lokalisation eines Fehlers ist mit der UHF-Messung möglich [10], [24], wenn die räumliche Nähe der Sensoren ausreichend groß ist (vgl. [24]). Wenn allerdings der Fokus auf dem Auftreten eines Fehlers liegt oder ein Fehler Glimmentladungen verursacht, die mit der UHF-Messung nicht detektierbar sind [7], ist die Ionenstrommessung geeigneter, da sie diese aufgrund des Gleichanteils im Strom an der Erdelektrode erfasst. Damit ist die Grundlage geschaffen, die Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren an weiteren Messaufbauten anzuwenden. Außerdem ist bei der Anwendbarkeit zu berücksichtigen, dass die UHF-Messung einen UHF-Sensor in unmittelbarer Nähe des Aufbaus, bzw. innerhalb des gasisolierten Aufbaus benötigt, um zuverlässig TE zu detektieren [24], wohingegen die Ionenstrommessung über die Erdelektrode, bzw. das Gehäuse erfolgt. Ob eine Kombination beider Messungen über ein für die UHF-Messung als Sensor fungierendes Gehäuse erfolgen kann (vgl. [24]), ist in ausblickenden Untersuchungen zu klären. Solange besteht die Ionenstrommessung als unabhängige Diagnosemethode für HVDC-Systeme.

4.3 Bewertung der Eignung der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren für HVDC-Systeme

Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich die Ionenstrommessung in Hinblick auf Forschungsfrage I. bewerten: Sowohl die allgemeinen Kriterien für Diagnosemethoden als auch die Bewertung der Kenngrößen zur Beschreibung des Abnutzungsvorrats sowie die technischen Spezifikationen qualifizieren die Ionenstrommessung für Diagnosen. Dabei stellt sie auf Grundlage des Anwendungskonzeptes ein Detektionsverfahren für Glimmentladungen dar, ohne einen hohen Erfahrungsschatz wie bei der TE-Messung vorauszusetzen. Außerdem entfällt der Eingriff in die gasisolierten Systeme und die Methode basiert auf kostengünstiger Messtechnik, um Fehler zu detektieren, bzw. eine Diagnose anhand eines charakteristischen Fehlerbildes zu erstellen. Auch der Vergleich zur UHF-TE-Messung (vgl. Kapitel 4.2) zeigt, dass die Ionenstrommessung für HVDC-Systeme von Nutzen ist. Daher stellt sich Forschungsfrage II., wie die Ionenstrommessung auf typische Fehlerbilder reagiert, sodass der Anwender eine Diagnose erhält.

5 Reaktion der Ionenstrommessung auf typische Fehlerbilder

Mit dem vorangegangenen Nachweis der Eignung der Ionenstrommessung für Diagnosen beantworten die nachfolgenden Kapitel Forschungsfrage II., wie die Ionenstrommessung auf Fehlerbilder reagiert. Dazu zeigt Kapitel 5.1 den Einfluss von Partikelgeometrie, -masse, Position des Partikels und Abnutzungsvorrats angrenzender Feststoffisolierungen auf die Ionenstrommessung an einer GIL. Kapitel 5.2 zeigt weiterführend den Einfluss der komplexen Geometrie des RC-Spannungsteilers auf die Ionenstrommessung.

5.1 Ionenstrommessungen für typische Fehler einer GIL

Mehrere Studien zeigen, dass durch bewegliche Partikel die dielektrische Festigkeit eines Isoliergases um bis zu 10 % verringert ist [34], [35], [36]. Deshalb untersucht das folgende Kapitel, inwiefern die Geometrie beweglicher Partikel den Ionenstrom beeinflusst, sodass Rückschlüsse auf den Abnutzungsvorrat des Isoliergases möglich sind.

5.1.1 Einfluss der Geometrie

Die Untersuchungen der Geometrie beweglicher (metallischer) Partikel auf den Ionenstrom an einer GIL sind in der eigenen Publikation [Ve02] veröffentlicht. Abbildung 5-1 stellt die Ergebnisse der unterschiedlichen Messreihen dar, wobei die Mittelwerte innerhalb der als schattierten Fläche abgebildeten Messunsicherheit der Versuche nach Gl. (9)²² liegen. Hierbei unterscheiden sich die beweglichen Partikel in abhebende und an der Erdelektrode verbleibende Partikel. Die Kurvenverläufe zeigen grundsätzlich einen näherungsweise parabelförmigen Verlauf für die angelegte Spannung und unterscheiden sich unter Berücksichtigung der Messunsicherheit mit steigender Spannung zunehmend signifikant voneinander, was nach Aussagen des Kapitels 1.3 plausibel ist.

²² Die Messunsicherheit ist kleiner als die Standardabweichung oder das t-Quantil der Student'schen t-Verteilung für Vertrauensbereiche von 95 % und 98 %.

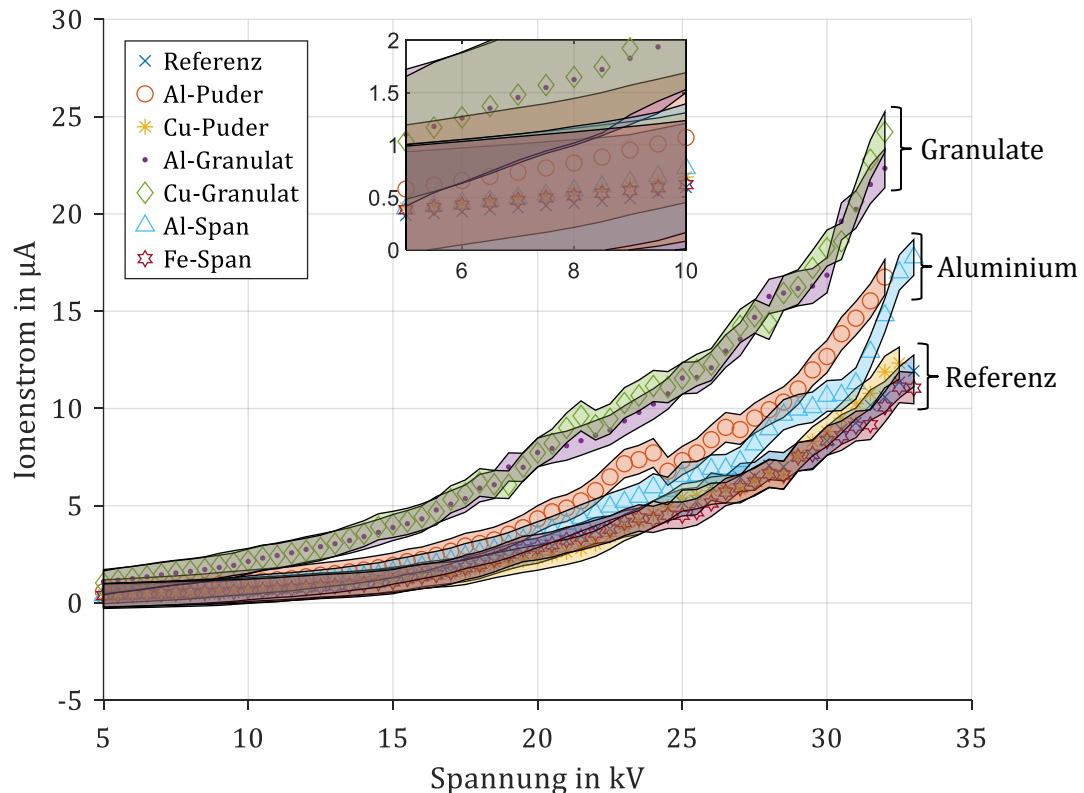


Abbildung 5-1: Ionenstrom unter Einfluss mobiler Partikel bei positiver Polarität

Es zeigt sich, dass sich der Ionenstrom signifikant für alle Aluminiumpartikel und Granulate von der Referenzmessung unterscheidet. Aus den materialunabhängigen Verläufen folgt die Materialunabhängigkeit der Ionenstrommessung als Diagnosmethode. Die Materialunabhängigkeit lässt sich auch anhand des Shockley-Ramo-Theorems bestätigen: Die den Ionenstrom beeinflussenden Größen Ladung q , elektrische Feldstärke \vec{E}_{Pk} und Geschwindigkeit \vec{v} sind ebenfalls materialunabhängig. Somit ist die Materialunabhängigkeit plausibel.

Folglich entstehen die signifikanten Abweichungen durch die Feldverzerrungen durch die Geometrie der Granulate sowie der Aluminiumspäne mit ausgeprägten Spitzen, welche aufgrund ihrer Größe und der einhergehenden Masse nicht abheben (vgl. Abbildung 2-6). Des Weiteren tritt für Eisenspäne aufgrund der Abrundungen (vgl. Abbildung 2-6) keine lokale Feldüberhöhung wie bei Aluminiumspänen auf, weshalb der Ionenstrom mit der Referenzmessung näherungsweise übereinstimmt. Die Granulate erzielen bei den Untersuchungen die größte Feldverzerrung und damit den größten Ionenstrom aufgrund ihrer Geometrie, die eine stärkere Krümmung aufweist als puderförmiges Metall (vgl. Abbildung 2-6 und Anhang D). Folglich zeigen die Messergebnisse der genannten Reihen, dass die

Einsetzungsfeldstärke E_C als notwendiges Kriterium zur Detektion eines Ionenstroms nach Gl. (4) erfüllt ist.

Für die puderförmigen Partikel beeinflusst das Abheben aufgrund des Erreichens, bzw. Überschreitens der Abhebefeldstärke nach Gl. (1) (vgl. Kapitel 1.2, Kapitel 2.2) die Messergebnisse: Während Kupfer aufgrund der höheren Dichte als Aluminium (vgl. Kapitel 2.2) keine Abweichung von der Referenz erzeugt, hebt das Aluminiumpulver ab und „hüpft“ aufgrund der Polarität in der GIL (vgl. Abbildung 5-2, [33]). Folglich erzeugt das Aluminiumpulver eine lokale Feldüberhöhung im Elektrodenzwischenraum, bzw. an der Hochspannungselektrode statt der Erdelektrode. Dies begünstigt das Auftreten von Entladungen und somit das Auftreten eines erhöhten Ionenstroms (vgl. [34], [35], [36]). Außerdem ist das Aluminium elektrostatisch geladen und bringt somit eine sich bewegende Ladung in den Feldraum ein, welche nach Gl. (2) einen höheren Strom an der Erdelektrode verursacht. Dagegen beeinflussen Partikelbewegungen mit unterschiedlichen Beschleunigungen den gemessenen Ionenstrom nicht, da die Datenerfassung auf eine Grenzfrequenz von 10 Hz begrenzt ist (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Bewegungseffekte, wie z. B. Hüpfen des Puders, führen nach dem Shockley-Ramo-Theorem zu einem Wechselstrom mit Offset, da geladene Partikel im Feldraum in verschiedene Richtungen (zur Erd- oder zur Hochspannungselektrode) unterschiedliche Beschleunigungen erfahren (vgl. Kapitel 1.2, Kapitel 1.3, Anhang A). Dies führt dazu, dass durch den Gleichanteil der Ionenstrom ansteigt, während aufgrund der Grenzfrequenz der Wechselanteil nicht in den Messdaten zu erkennen ist. Der Vergleich des Ionenstroms zwischen Pulver und Granulat zeigt, dass durch das Pulver der Ionenstrom im Vergleich zum Granulat geringer ausfällt. Die Ursache hierfür ist, dass die Granulate an der Erdelektrode lokale Feldverzerrungen verursachen und dementsprechend nach dem Shockley-Ramo-Theorem der Ionenstrom größer ist als bei „hüpfenden“ Partikeln mit kleinerer lokaler Feldverzerrung aufgrund der Körnung. Damit zeigen die Messergebnisse, dass der Effekt der lokalen Feldverzerrung stärker als die Abhebefeldstärke in den Ionenstrom eingeht.

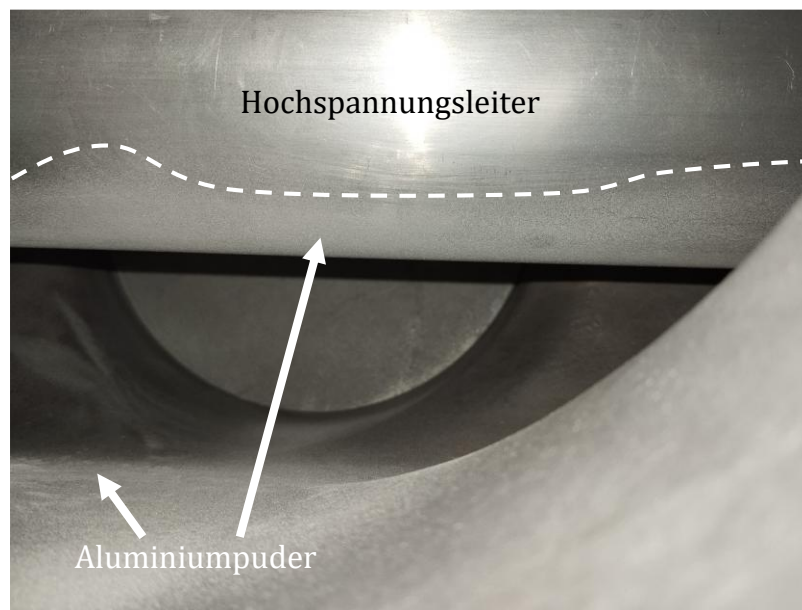


Abbildung 5-2: Ablagerungsorte des Aluminiumpuders nach der Ionenstrommessung (Messung mit Isolator-Austausch)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Ionenstrom auf die Geometrie durch lokale Feldverzerrungen reagiert. Ist die Geometrie von Partikeln unterschiedlich, fällt der Ionenstrom ebenfalls unterschiedlich groß aus. Das Material der Partikel beeinflusst den Ionenstrom nicht, sodass lediglich lokale Feldüberhöhungen eine Veränderung des Ionenstroms gegenüber der Referenz bewirken. Welchen Einfluss dabei die Menge an Partikeln, bzw. Partikelmasse hat, untersucht das nachfolgende Kapitel.

5.1.2 Einfluss der Partikelmenge

Abbildung 5-3 zeigt Messreihen für unterschiedliche Granulatmengen, bzw. -massen. Es ist ersichtlich, dass der Ionenstrom abhängig von der Partikelmenge in Form der Anzahl der Partikel ist. So ist der Ionenstrom für zwei Aluminiumgranulate (bzw. 6,7 mg) geringer als für fünf (bzw. 21,7 mg) und mehr als 100 (bzw. 2 g) Aluminiumgranulate. Während die Masse zwar um Faktor 92 von 21,7 mg auf 2 g ansteigt, steigt der Ionenstrom allerdings im Mittel um Faktor 1,4 an. Dies ist nach dem Shockley-Ramo-Theorem auf die lokale Feldverzerrung durch die einzelnen Partikel zurückzuführen. So erzeugen mehr Körner mehrere lokale Feldverzerrungen und infolgedessen Feldüberhöhungen, die zu einem mit steigender Partikelanzahl nicht linear höheren Ionenstrom führt (vgl. Gl. (2)). Dieser Zusammenhang stimmt mit den Beobachtungen aus [38], [39], [93] überein, dass mit steigender Partikelanzahl und -masse TE zunehmen, die eine Voraussetzung zur Detektion eines Ionenstroms sind (vgl. Bedingung (5)). Weiterführend ist zu untersuchen, inwiefern die Partikelposition innerhalb des Feldraums den Ionenstrom beeinflusst.

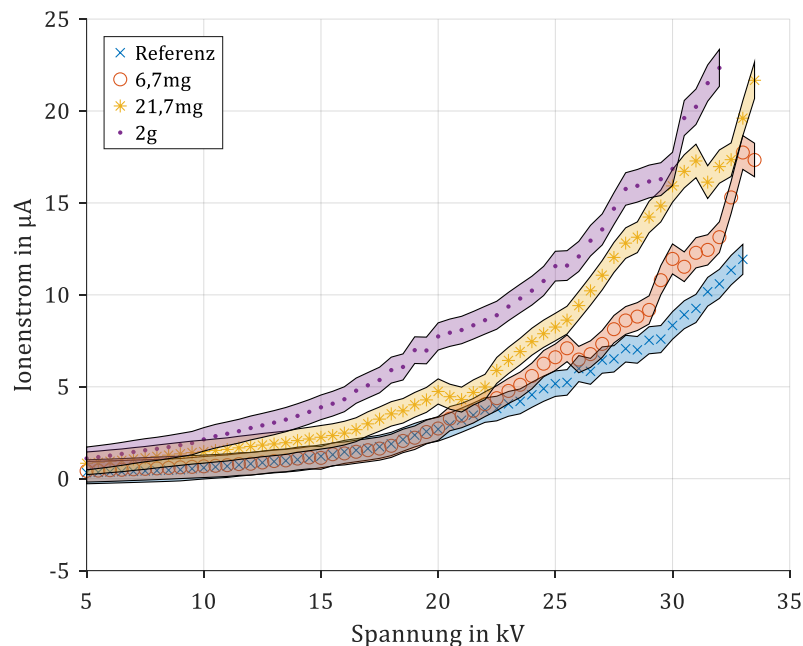
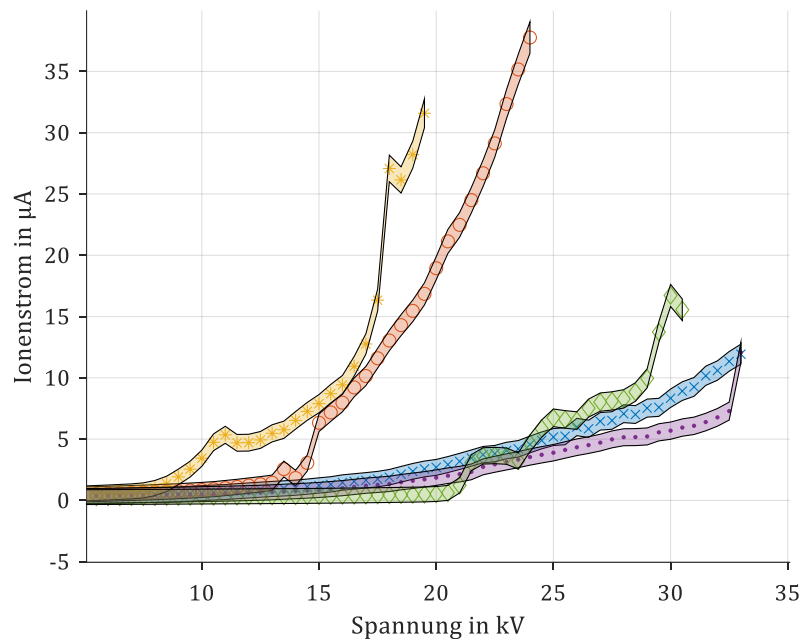


Abbildung 5-3: Ionenstrom unter Einfluss unterschiedlicher Granulatmassen

5.1.3 Einfluss der Partikelposition

Abbildung 5-4 zeigt Aluminiumgranulate und -späne an unterschiedlichen Ablagerungsorten. Es ist zu erkennen, dass der Ionenstrom durch Granulate und Späne auf dem Hochspannungsleiter im Vergleich zur Referenzmessung ansteigt, wobei Späne aufgrund der größeren Feldverzerrung an den Spitzen der Späne einen größeren Ionenstrom als vereinzelte Granulate erzeugen. Allerdings steigt der Ionenstrom durch Späne auf dem Isolator der GIL sowohl mit als auch ohne Kontakt zum Hochspannungspotential aufgrund der verringerten Schlagweite an der Isolatoroberfläche an, wobei die Durchschlagsspannung auf 20 kV (mit Hochspannungskontakt) und 24,5 kV (ohne Hochspannungskontakt) herabsinkt, was mit den Ergebnissen aus [35] übereinstimmt. Auch die Einsetzspannung von ca. 8,5 kV (mit Hochspannungskontakt) und 13 kV (ohne Hochspannungskontakt) ist im Vergleich zur Referenz ($U_{\text{Onset}} > 10$ kV) deutlich gesunken. Diese Beobachtungen stimmen mit [35] überein. Demnach führen Partikel auf Isolatoren zu TE aufgrund der Feldverzerrung und angesammelten Oberflächenladungen, die maßgeblich die dielektrische Festigkeit des Isolators beeinträchtigt, wodurch die Durchschlagsspannung aufgrund lokaler Feldüberhöhungen signifikant sinkt. Infolgedessen ist ein erhöhter Ionenstrom im angrenzenden Isoliergas zu erwarten.



Legende:

x: Referenz

o: Span auf Isolator

• : Granulat mit HV-Kontakt

*: Span auf Isolator mit HV-Kontakt

♦: Span mit HV-Kontakt

Abbildung 5-4: Ionenstrom unter Einfluss fixierter Partikel

Diese Erkenntnisse spiegeln sich ebenfalls in Abbildung 5-5 für den Ionenstrom für **fixierte Partikel** bei negativer Polarität wieder: Die Einsetzspannung sinkt im Vergleich zur Referenz um bis zu 7,5 kV für floatende Partikel, wohingegen die Durchschlagspannung bei einem Span ohne Hochspannungskontakt mit 23 kV deutlich geringer ausfällt als in der Referenzmessung, für die die Durchschlagspannung nicht im abgebildeten Bereich liegt. Für den Span mit Elektrodenkontakt dagegen ist keine Aussage zur Durchschlagspannung möglich, allerdings zeigt der Trend der Ionenstrommessung einen deutlichen Anstieg im Vergleich zur Referenzmessung.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass besonders Partikel auf Isolatoren zu einem erhöhten Ionenstrom und ggf. Abbruch der Messung aufgrund einer gesunkenen Durchschlagspannung führen. Dies gilt für beide Polaritäten und Partikel unterschiedlicher Geometrien, wobei die Feldüberhöhung durch die Position des Partikels das Isoliergas stärker belastet als die Geometrie des Partikels an sich. Daraus ergibt sich die Frage, welche Bedeutung die vom Isoliergas umgebenen Feststoffisolatoren bei der Ionenstrommessung zur Diagnose haben.

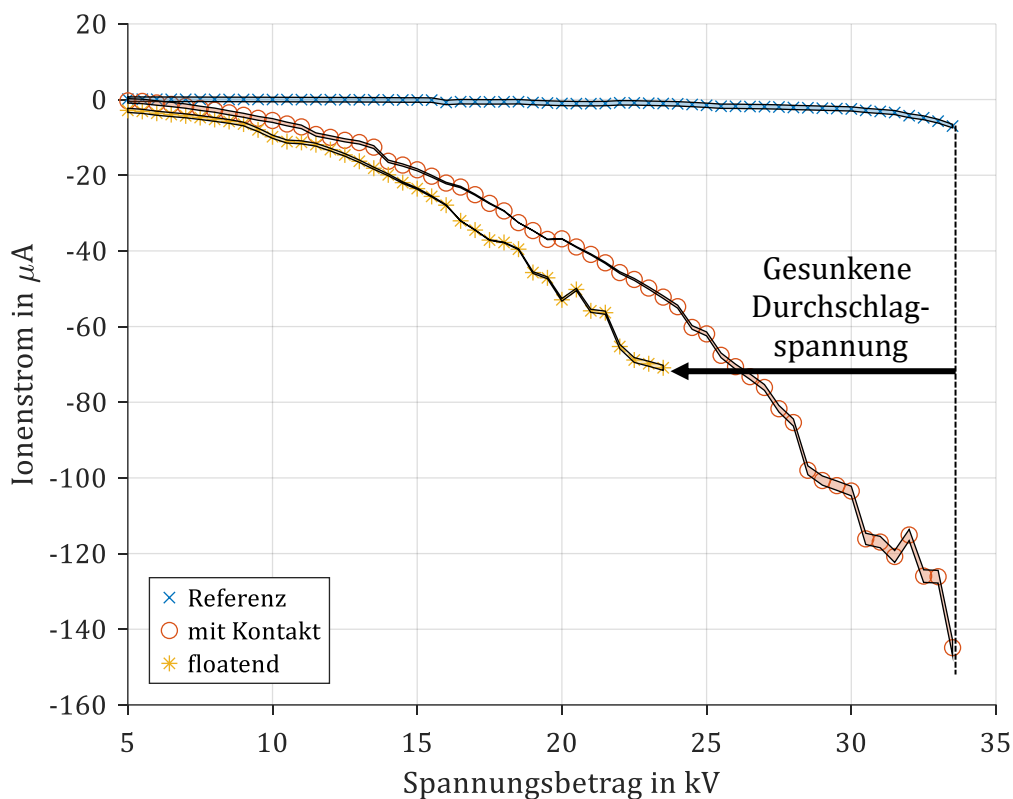


Abbildung 5-5: Ionenstrom unter Einfluss unterschiedlicher Spanpositionen

5.1.4 Einfluss des Abnutzungsvorrats angrenzender Feststoffkomponenten

Um den Einfluss der von Luft umgebenden Feststoffkomponenten zu untersuchen, werden die Messreihen mit Partikeln an der GIL wiederholt. Dabei findet aufgrund der vollständigen Abnutzung eines der GIL-Isolatoren ein anderer, ebenfalls gebrauchter Isolator als 1:1-Ersatz Verwendung. Infolgedessen zeigt Abbildung 5-6 die Ergebnisse für die folgenden Messreihen bei positiver Polarität: Referenzmessung, Aluminiumspan, Aluminiumpuder, Aluminiumgranulat. Die Abweichung zwischen den Messungen mit den verschiedenen Isolatoren sind auf die Entladungen durch den gealterten (ursprünglichen) Isolator, bzw. die fehlenden Entladungen durch den Ersatzisolator zurückzuführen. Dies gilt insbesondere für die Referenz- und Verschmutzungsmessungen, welche einen deutlichen Ionenstrom zeigen, wohingegen in der Messung mit ausgetauschtem Isolator der Strom in der Referenzmessung um bis zu $11,39 \mu\text{A}$ im Mittelwert geringer ausfällt, was auf einen größeren Abnutzungsvorrat des Gesamtsystems GIL hinweist. Die unterschiedlichen Abnutzungsvorräte der Anordnung berücksichtigen hierbei nicht nur das Isoliergas, sondern schließen die in Luft auftretenden TE durch die verminderten Abnutzungsvorräte der Isolatoren ein. Darüber hinaus weichen die Messungen mit Aluminiumspänen besonders aufgrund der Ausrichtung der Späne im elektrischen Feld ab. Während in der Messung mit ausgetauschtem Isolator die Späne mit der Spitze in den Feldraum

hineinragen, ragen sie in der ursprünglichen Messung mit Spänen nicht in den Feldraum hinein, sondern liegen jeweils flach auf der Erdelektrode auf. Dadurch ist die Feldverzerrung und somit der Ionenstrom in der Messung mit ausgetauschtem Isolator größer und die Feldverzerrungen provozieren den Durchschlag der Anordnung für kleinere Spannungen als in der ursprünglichen Messung. Dies äußert sich in der größeren Steigung der Ionenstromkurve in der Messung mit ausgetauschtem Isolator.

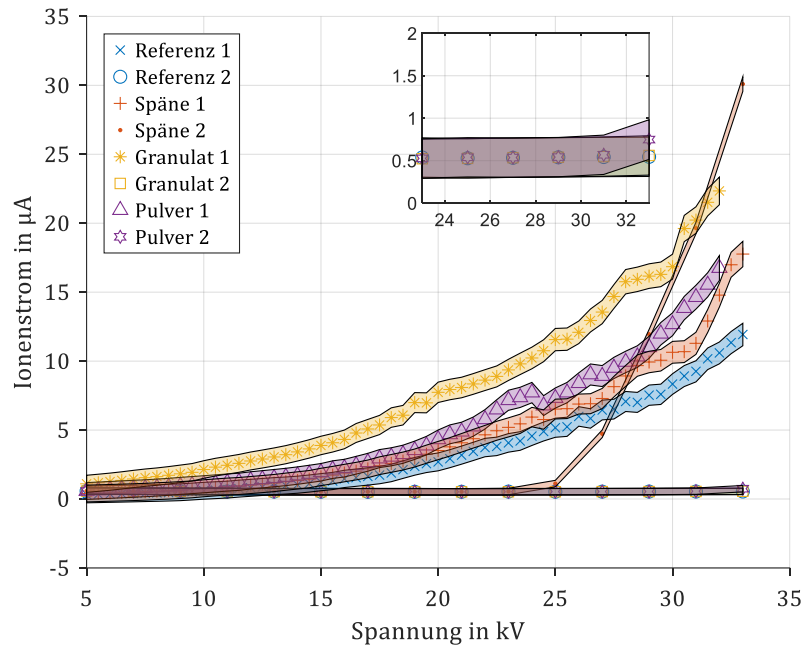


Abbildung 5-6: Einfluss des Abnutzungsvorrats der GIL für die Ionenstrommessung bei positiver Polarität; 1: Messungen mit Originalisolator; 2: Messungen mit Austausch-Isolator

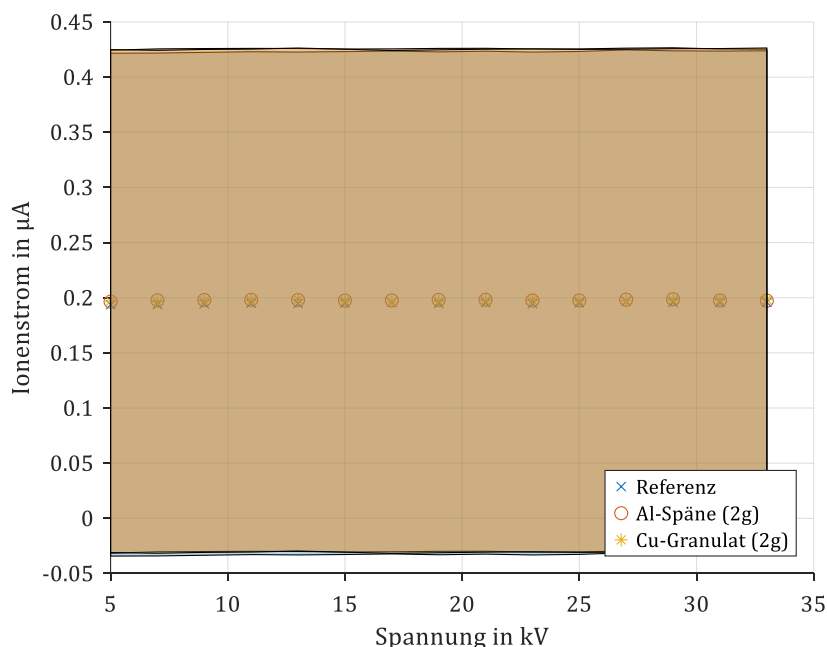
Zusammenfassend zeigt daher die Messung mit ausgetauschtem Isolator die Sensitivität der Ionenstrommessung für Entladungen an Grenzflächen zum Isoliergas auf. Somit berücksichtigt die Ionenstrommessung neben der elektrischen Festigkeit des Isoliergases die der angrenzenden Feststoffisolatoren. Folglich liefern die Messergebnisse der Ionenstrommessung die Grundlage für Rückschlüsse sowohl auf den Abnutzungsvorrat des Isoliergases als auch den Abnutzungsvorrat der angrenzenden Feststoffkomponenten, welche Feldverzerrungen, bzw. Entladungen im Isoliergas hervorrufen. Diese Erkenntnis ist besonders für Diagnosen an komplexen Aufbauten wie einem RC-Spannungsteiler von Interesse.

5.2 Ionenstrommessungen für typische Fehler an einem SMD-basierten RC-Spannungsteiler

Die Fehlerbilder des Spannungsteilers (s. Kapitel 1.2.2) beeinflussen den Ionenstrom, wie Abbildung 5-7 für positive Polarität zeigt. Während Granulate und Späne (Abbildung 5-7 a))

einen Ionenstrom im Rauschintervall zwischen $[-0,03 \mu\text{A}, 0,4 \mu\text{A}]$ für Spannungen zwischen $[5 \text{kV}, 39 \text{kV}]$ erzeugen, zeigt der Ionenstrom bei fehlender Erdung (Abbildung 5-7 b)) einen näherungsweise linearen Verlauf. Diese Kurve zeigt nicht wie erwartet näherungsweise einen quadratischen Verlauf des Ionenstroms nach [41] und bildet deshalb die floatende Potentialverteilung innerhalb des Teilers als typisches Fehlerbild ab. Die Ursache hierfür ist, dass sich mit steigender Spannung die Potentialverteilung aufgrund der Komplexität der Teilerkonstruktion undefiniert verändert. Da die Erdelektrode ohne Erdung das Potential durch das Feld an der Position der Elektrode annimmt (vgl. [47]), steigt der Strom an der Erdelektrode. Da dieser Strom allerdings nicht durch Raumladungen im Isoliergas verursacht wird, handelt es sich nach der Definition des Ionenstroms aus Kapitel 1.3 nicht um ebendiesen, sondern einen Strom durch das floatende Potential. Das zugehörige Fehlerbild der Ionenstrommessung ist deshalb charakteristisch für das Fehlerbild der fehlenden Erdung.

Im Gegensatz dazu zeigt der Ionenstrom einen charakteristischen, parabelförmigen Verlauf für ein leerlaufendes Kabel auf Hochspannungspotential (vgl. Abbildung 5-7 c)). Ursächlich hierfür sind die TE, die am Kabelende aufgrund der Feldüberhöhung in Luft entstehen und entsprechend des Shockley-Ramo-Theorems nach Gl. (2) eine Erhöhung des Ionenstroms aufgrund von mehr Ladungen, einem lokal erhöhten Feld und einer erhöhten Geschwindigkeit der Raumladungen zur Folge haben.



a) Partikel auf Platinen

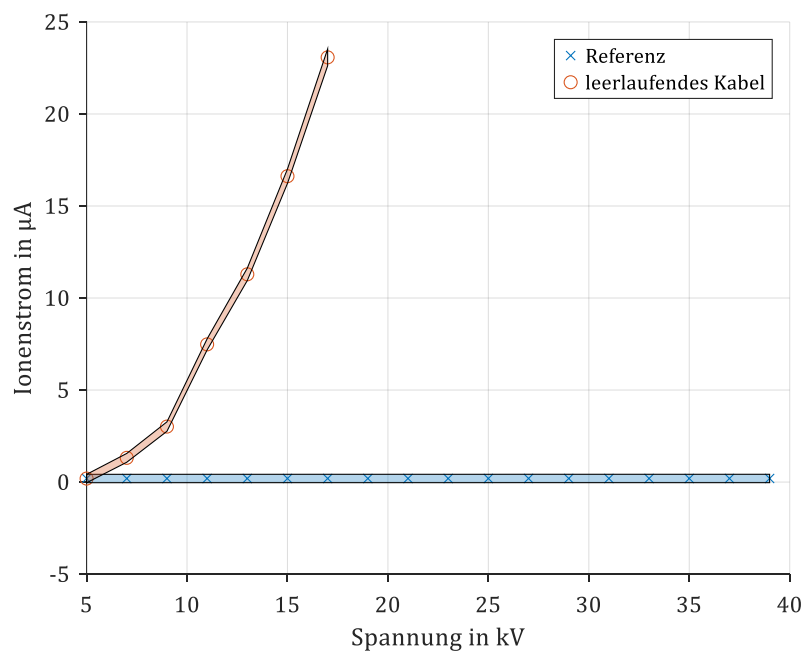
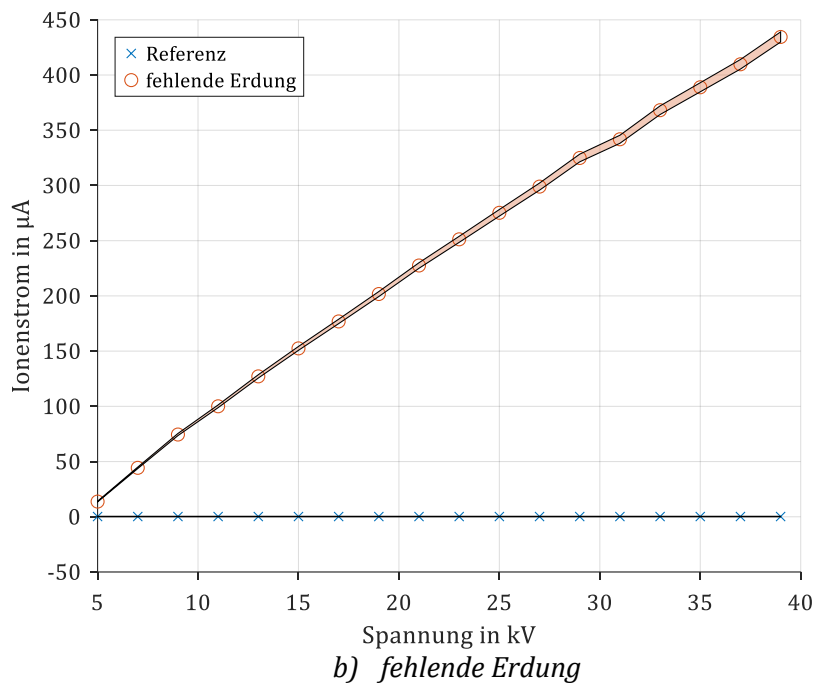


Abbildung 5-7: Ionenströme für verschiedene Fehlerbilder am RC-Spannungsteiler bei positiver Polarität

Dass bei den Fehlerbildern mit Partikeln am Spannungsteiler kein Ionenstrom detektierbar ist, ist mit der niedrigen Feldstärke innerhalb der Teilerkonfiguration zu begründen. Ohne Verschmutzung liegt wie in der eigenen Veröffentlichung [Ve01] gezeigt, bei einer maximal angelegten Spannung von 32 kV eine mittlere Feldstärke von 3,56 kV/cm zwischen den Platinen zweier Stufen vor. Dieser Wert liegt allerdings unterhalb der kritischen Feldstärke von Luft von

30 kV/cm bei 20 °C und 1 bar Umgebungsdruck [18]. Da die Konfiguration zwischen den Ebenen außerdem näherungsweise einen homogenen Feldverlauf aufweist, ist das Auftreten von Teilentladungen, die einen Ionenstrom erzeugen, unmittelbar mit einem lokalen Überschlag verbunden (vgl. [18]), welcher nach dem Konzept zur Anwendung der Ionenstrommessung zum Schutz der Messtechnik zu vermeiden ist. Eine Ausnahme bildet das leerlaufende Kabel, welches einen inhomogenen Feldverlauf erzeugt, sodass ein Durchschlag nicht beim Einsetzen der Entladungen auftritt (vgl. [18]) und ein parabelförmiger Ionenstrom erkennbar ist.

Infolge der Ergebnisse ist festzuhalten, dass die Ionenstrommessung für Diagnosen am RC-Spannungsteiler mit komplexer Geometrie anwendbar ist. Dabei zeigen sich typische Fehlerbilder für ein leerlaufendes Kabel auf Hochspannungspotential und eine fehlende Erdung. Für die Metallpartikel deutet die Ionenstrommessung nicht auf einen Fehler hin, was auf den vollen Abnutzungsvorrat des Isoliergases hinweist. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass charakteristische Ionenstromkurven für ausgewählte Fehlerbilder an komplexen Aufbauten von den parabelförmigen Kurvenverläufen nach Kapitel 1.3 abweichen können, was die Bedeutung der Referenzmessung betont. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass Gl. (4) erfüllt ist, wenn eine Verminderung des Abnutzungsvorrats vorliegt.

Insgesamt bestätigen die Erkenntnisse die Eignung des Teilers für den (Langzeit-) Betrieb, da die Metallpartikel die dielektrische Funktion des Teilers nicht einschränken. Die anderen beiden Fehlerfälle schränken die dielektrische Funktion des Teilers allerdings ein, wobei zu beachten ist, dass diese Extremfälle in der Montage, bzw. Inbetriebnahme durch Qualitätssicherungsmaßnahmen auffallen. Somit entfällt für den Teiler die Anwendung des empirischen Risikomodells, da der Teiler wie oben beschrieben robust ist. Darüber hinaus ist die Anwendung der evidenztheoretischen Modelle in der dargestellten Kombination von Evidenzquellen nicht sinnvoll, da der Teiler vor der Inbetriebnahme in einem Gehäuse montiert wird, für welches kein Fenster zur Koronadetektion vorgesehen ist.

5.3 Einordnung der Reaktionen der Ionenstrommessung

Aus den vorherigen Kapiteln lässt sich die Reaktion der Ionenstrommessung auf typische Fehlerbilder wie folgt zusammenfassen: Zum einen ist anhand der Diagnosemessungen aus Kapitel 5.1 zu erkennen, dass die Ionenstrommessung materialunspezifisch reagiert. Dies bedeutet, dass das in den Feldraum eingebrachte Material, welches ein Fehlerbild repräsentiert, eine Veränderung des Ionenstroms erzeugt, aber keine charakteristischen Verläufe für bestimmte Materialien zeigt. So zeigt Abbildung 5-1 für die GIL, dass sowohl Aluminium- als auch Kupfergranulate den gleichen Ionenstrom verursachen. Analog gilt diese Aussage für Kupferpulver und Eisenspäne, welche die gleichen Werte für den Ionenstrom wie die

Referenzmessung an der Erdelektrode provozieren. Diese Eigenschaft lässt sich anhand des Shockley-Ramo-Theorems nach Gl. (2) bestätigen (vgl. Kapitel 5.1.1).

Die Unterschiede der Diagnosemessungen sind auf die Feldverzerrung durch die Partikel zurückzuführen. Nach dem Shockley-Ramo-Theorem ist nach Gl. (2) zu erwarten, dass beim Auftreten einer lokalen Feldüberhöhung, aber bei gleicher angelegter Spannung, der Ionenstrom an der Erdelektrode ($k = 1$) zunimmt. Die Begründung erfolgt anhand folgenden Beispiels für die GIL-Anordnung mit einem Granulat (kugelförmig) (vgl. Abbildung 5-8). Durch die lokale Feldüberhöhung am Granulat an Punkt P (in Luft) steigt der Strom an der Erdelektrode $i_{k=1}$ aufgrund der räumlichen Nähe zu ebendieser an, weil eine Ladung q im Punkt P durch das elektrische Feld beschleunigt wird und nach Gl. (2) einen Strom an der Erdelektrode induziert. Dabei bleibt das gesamte elektrische Feld mit der Einhaltung von $U = \int \vec{E} d\vec{s}$ gleich. Außerdem steigt auch die Geschwindigkeit \vec{v} der Ladung q im Punkt P an, da das elektrische Feld $\vec{E}_{Pk=1}$ größer als in der Anordnung ohne Granulat ist. Im Vergleich zur Anordnung ohne Granulat ist zwar das elektrische Feld homogener, aber die Geschwindigkeit \vec{v} einer Ladung q ist niedriger, sodass der induzierte Strom $i_{k=1}$ kleiner ist als bei eingebrachtem Partikel.

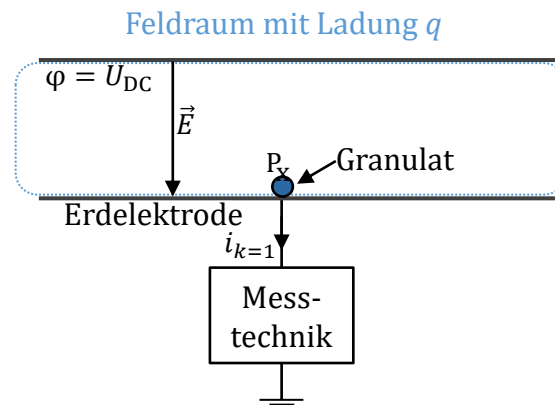


Abbildung 5-8: Shockley-Ramo-Theorem für GIL mit Partikel

Analog zum Beispiel mit Granulat treffen diese Aussagen für weitere feldverzerrende Geometrien, wie z. B. Späne zu. Für Puder ist neben der Feldverzerrung auch der Effekt des Abhebens bei Erfüllung von Gl. (1) zu berücksichtigen. So verzerrt Kupferpulver das elektrische Feld aufgrund der Geometrie an der Erdelektrode (Durchmesser der Körnung: $<38 \mu\text{m}$), während Aluminiumpulver (Durchmesser der Körnung: max. $100 \mu\text{m}$) aufgrund der geringeren Dichte im Vergleich zu Kupfer als leitfähiges Partikel im Feldraum schwebt und zusätzlich zur geometriebedingten Feldverzerrung eine Feldüberhöhung aufgrund der elektrostatischen Ladung der Partikel verursacht (vgl. Kapitel 1.2.1).

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Ionenstrommessung neben einfachen Geometrien wie der GIL auch an komplexeren Geometrien wie dem RC-Spannungsteiler Fehlerbilder anzeigt.

Somit ist mit den Messungen stets ein Rückschluss auf den Abnutzungsvorrat des Isoliergases und angrenzender Komponenten gegeben.

Darüber hinaus verändert sich der Ionenstrom aufgrund der Grenzfrequenz von 10 Hz lediglich mit Entladungen, die einen Gleichanteil, bzw. Signale mit Frequenzanteilen bis 5 Hz haben (vgl. Gl. (33)), wodurch Glimmentladungen und Streamer erkennbar sind. Damit gehört die Ionenstrommessung zu den Diagnosemethoden der Früherkennung (vgl. Kapitel 4.1).

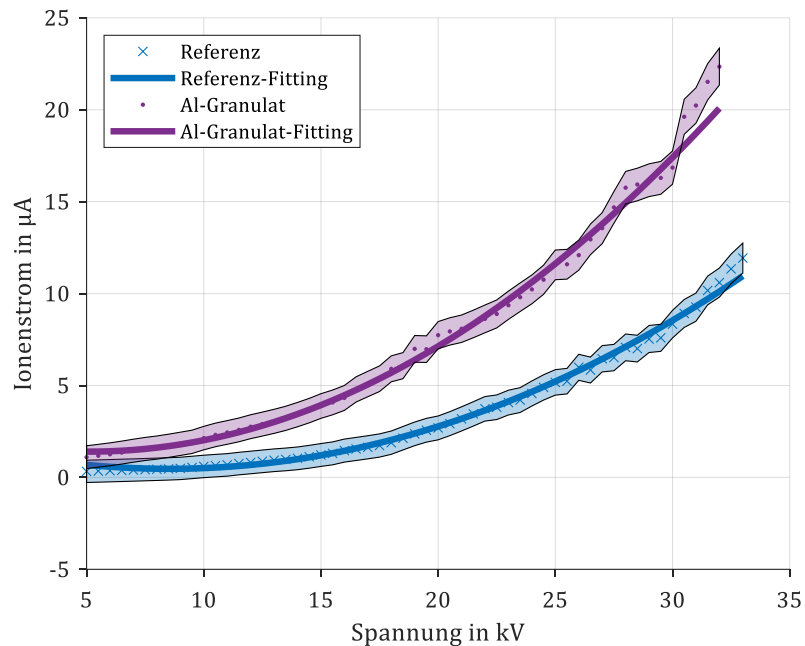
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Ionenstrom auf Feldverzerrungen durch Partikelgeometrien reagiert. Die Menge der Partikel beeinflusst hierbei, wie viele lokale Feldverzerrungen es gibt, worauf der Ionenstrom ebenfalls reagiert. Infolgedessen sind auftretende Fehlerbilder detektierbar, sodass Rückschlüsse auf den Abnutzungsvorrat des Isoliergases möglich sind. Um diese Rückschlüsse zu beziffern, sind nachfolgend die Diagnoseergebnisse basierend auf der empirischen Modellierung dargestellt und diskutiert.

6 Empirische Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder

Um aus der Ionenstrommessung ein Diagnoseergebnis zu erhalten, bildet das empirische Risikomodell auf Grundlage der Kenngrößen der Ionenstrommessung zur Beschreibung des Abnutzungsvorrats eine Berechnungsmethode der absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit. Diese führt weitergehend zur Risikomatrix bzgl. des Ausfalls des jeweils betrachteten HVDC-Systems, da der Abnutzungsvorrat des Isoliergases verringert, bzw. erschöpft ist.

6.1 Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder in GIL

Um aus den Ionenstromkurven ein reproduzierbares Diagnoseergebnis zu erhalten, ist ein Parabelfitting (s. Kapitel 1.3) notwendig. Exemplarisch stellt Abbildung 6-1 die Werte für die Referenz und Aluminiumgranulat dar, während in Anhang E die Daten weiterer Messreihen dargestellt sind. Dabei zeigt der Bewertungsparameter *RMSE* (root mean square error [94]), dass das Parabelfitting näherungsweise eine gute Modellierungsgrundlage für die Mittelwerte der Ionenstromkurven im Definitionsbereich zwischen Einsetz- und Durchschlagspannung liefert, da der *RMSE*-Wert sich null annähert. Aus den ermittelten Daten ergeben sich die in Tabelle 6-1 dargestellten charakteristischen Kenngrößen der Ionenstrommessung für das empirische Risikomodell. Die Anwendung des empirischen Modells basiert auf den Definitionen der Kenngrößen (s. Kapitel 2.3) und Tabelle 6-2 zeigt exemplarisch für die Messreihe „Aluminium-Granulat“ die Modellanwendung und -ergebnisse. Dabei sind die Kenngrößenwerte den Aspektwerten wie in [6] zuzuordnen, sodass die Ausfallwahrscheinlichkeit berechenbar ist. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten für die anderen Messreihen stellt Abbildung 6-2 dar, während Anhang F die Teilergebnisse zusammenfasst.



$$I_{\text{Ref}}(U) = 0,0175 \frac{\mu\text{A}}{\text{kV}^2} \cdot U^2 - 0,2983 \frac{\mu\text{A}}{\text{kV}} \cdot U + 1,7384 \mu\text{A}, RMSE = 0,0901$$

$$I_{\text{AlGr}}(U) = 0,0258 \frac{\mu\text{A}}{\text{kV}^2} \cdot U^2 - 0,263 \frac{\mu\text{A}}{\text{kV}} \cdot U + 2,0716 \mu\text{A}, RMSE = 0,1921$$

Abbildung 6-1: Referenz und der Messreihe „Aluminium-Granulat“ mit zugehörigem Parabelfitting

Tabelle 6-1: Ergebnisübersicht der Diagnosekenngrößen für positive Polarität

Messreihe	ΔU_{Onset} in kV	ΔP in mW	ΔU_{DS}^- in kV
Referenz	-	-	Außerhalb des Messbereichs
Al-Puder	0,5	90,62	
Cu-Puder	-1,5	-16,36	
Al-Granulat (2g)	3,5	233,9	
Cu-Granulat	3,5	247,58	
Al-Span	0,5	51,71	
Fe-Span	0	-5,8	
Span auf Isolator	-2	324	>9
Span auf Isolator & HV-Elektrode	-8,5	176,05	>13,5
Span auf HV-Elektrode	-8,5	95,73	>2,5
Granulat auf HV-Elektrode	-8,5	-57,24	Außerhalb des Messbereichs
2 Körner	-2	42,09	
5 Körner	-1,5	149,13	

Tabelle 6-2: Diagnose für die Messreihe „Al-Granulat“

Einflussparameter & Aspekte	Parameterschätzung
Ort (IP_1) ▪ Auf Komponenten (A_1)	Ja = 1
Mittelwerte und Trends (IP_2) ▪ Synthetische Ionenstromleistung (A_1)	Eindeutiger Anstieg = 1
Angelegte Spannung (IP_3) ▪ Einsatzspannung (A_1) ▪ Verminderte Durchschlagspannung (A_2)	Starker Anstieg = 0,8 Keine Veränderung = 0
$N_l = 3, R_{\min} = 0, R_{\max} = 1, c = 1$	
Ergebnis: TFP = 83,33%	

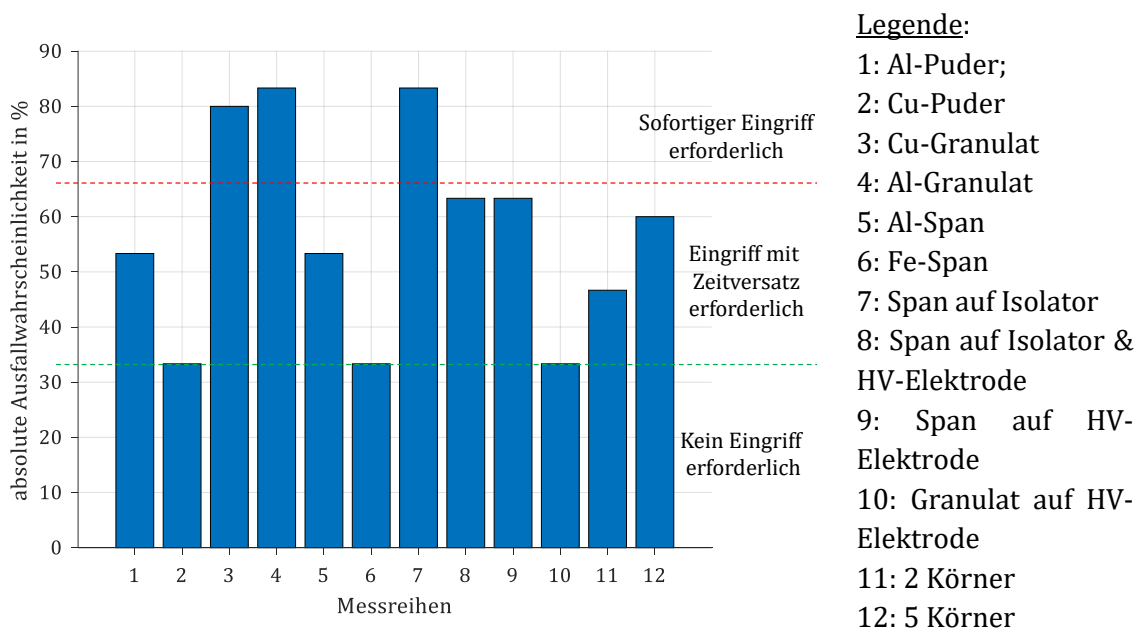


Abbildung 6-2: Absolute Ausfallwahrscheinlichkeit der GIL für verschiedene Verschmutzungen

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass entsprechend der Feldverzerrungen und dem Erreichen der Abhebefeldstärke verschiedene Verschmutzungen unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeiten zur Folge haben: Während Kupferpulver, Eisenspäne und Granulate auf der Hochspannungselektrode eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 33,33 % erzeugen und somit nicht auf einen gravierenden Fehler hinweisen (vgl. Tabelle 3-2), zeigen z. B. Kupfer- und Aluminiumgranulat sowie der Span auf einem Isolator eine Ausfallwahrscheinlichkeit von > 80 %, sodass ein gravierender Fehler bzgl. der Funktionsfähigkeit des Isoliergases vorliegt. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten führen zur Risikomatrix in Abbildung 6-3: Die Messreihen sind den Risiken zugeordnet, wobei die Funktionalität, bzw. der Abnutzungsvorrat des Isoliergases Luft zugrunde liegt. Die Grenzwerte zwischen den Risikogruppen sind hier mit 33,3 % für geringfügige Fehler und 67,7 % für gravierende Fehler definiert und sind abhängig vom Anwendungsfall neu zu setzen. Die Einordnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Messreihen

gibt eine Übersicht über das Ausmaß der Fehler, bzw. den verbleibenden Abnutzungsvorrat des Isoliergases.

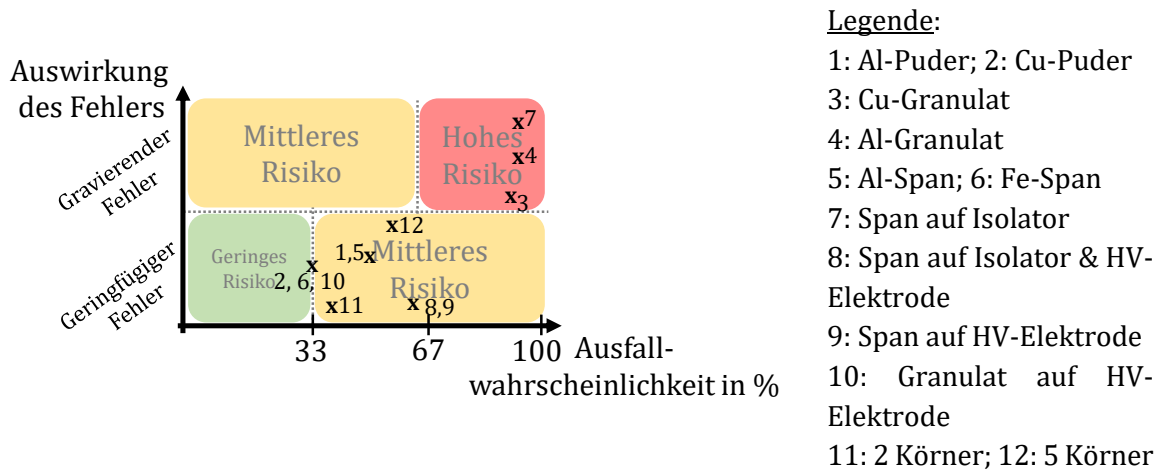


Abbildung 6-3: Risikomatrix des empirischen Modells für die GIL

Die berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit für Al-Granulat liegt im Vergleich zu den Ausfallwahrscheinlichkeiten für mobile Partikel aus [6] wie in Tabelle 6-3 gezeigt um ca. 22 Prozentpunkte oberhalb der Werte für die Sammelschiene (275 kV Nennspannung) und der GIS (150 kV Nennspannung). Dieser Unterschied ist auf die Anwendung verschiedener Diagnosemethoden (akustische und UHF-Messung) sowie Geometrien und Spannungsebenen zurückzuführen. Besonders die Anzahl der Einflussparameter N_I bestimmt, mit welchem Anteil der jeweilige Einflussparameter in die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit eingeht (vgl. Kapitel 1.4.1). Da für die Ionenstrommessung $N_I = 3$ und für mobile Partikel nach [6] $N_I = 4$ gilt, beeinflussen die charakteristischen Kenngrößen der Ionenstrommessung die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit stärker (jeweils mit 33,33 % statt 25 %). Somit erhöht sich die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit bei einer Änderung der Kenngrößen der Ionenstrommessung und damit des Abnutzungsvorrats stärker als in [6]. Damit liefert das empirische Risikomodell ein plausibles Ausfallrisiko für die Ionenstrommessung. Um die Übertragbarkeit auf weitere Messreihen, bzw. Diagnosemessungen an weiteren HVDC-Systemen zu bestimmen, ist nachfolgend die Anwendbarkeit des empirischen Risikomodells diskutiert.

Tabelle 6-3: Vergleich des empirisch ermittelten Risikos der GIL für Aluminium-Granulat mit CIGRÉ-Daten für mobile Partikel aus [6]

Messreihe	Spannungsebene	TFP in %	Vergleich in %P
Al-Granulat	bis 33 kV	83,33	-
Sammelschiene	275 kV	61,5	21,83
GIS	150 kV	60,7	22,63

6.2 Anwendbarkeit der empirischen Risikoermittlung

Zur Übertragung des empirischen Risikomodells auf weitere HVDC-Systeme ist die Anwendbarkeit des Modells zu diskutieren. Zunächst ist festzuhalten, dass das Modell auf charakteristischen Kenngrößen des Ionenstroms beruht und somit in Analogie zum AC-Modell aus Referenz [6] Teilentladungen berücksichtigt, welche ein Indikator für die Veränderung des Abnutzungsvorrats sind. Somit ist das Prinzip, dass die Charakterisierung von Teilentladungen zu einer Ausfallwahrscheinlichkeit (vgl. Kapitel 1.4.1) führt, für beide Spannungsarten gleich.

Damit ermöglicht dieser Modellierungsansatz eine einfach handhabbare Diagnosemethode, die im Zweifelsfall des Diagnostikers aufgrund einer Überschätzung des Ausfallrisikos zu einer verfrühten Instandsetzung und somit zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit beiträgt. Allerdings ist unvollständiges Wissen bzgl. eines Aspekts sowohl im anerkannten Ansatz der CIGRÉ [6] als auch im vorliegenden Modell durch eine Wahrscheinlichkeit ausgedrückt. Besonders bei der Durchschlagspannung tritt dieser Fall ein, da nicht für jede Diagnose- und Referenzmessung die Unsicherheit statistisch umfangreich beschrieben ist. Damit ist der Ansatz nach der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie zur Beschreibung einer Wahrscheinlichkeit für die Aspekte streng genommen weder für AC noch DC zulässig (vgl. [55]). Die Anwendbarkeit des empirischen Modells beruht daher auf der einfachen Handhabung und dem empirischen Zusammenhang zwischen Teilentladungen, Ionenströmen und dem Abnutzungsvorrat. Somit erzielt ein Diagnostiker mit Erfahrung in der Durchführung und Interpretation ein reproduzierbares und aussagekräftiges Ergebnis bzgl. des Abnutzungsvorrats (vgl. Kapitel 6.1), welcher durch die eigens für den Ionenstrom definierten Kenngrößen und einhergehenden Fehlerbildern zu beziffern ist (vgl. Kapitel 3.1). Die Einordnung der Fehlerbilder erlaubt dem Diagnostiker basierend auf seiner Erfahrung ein Ausfallrisiko zu ermitteln. Da das Modell robust ist, d. h. dass Fehleinschätzungen der Aspektwerte kein geringeres Ausfallrisiko zur Folge haben (vgl. Anhang G), ist die Reproduzierbarkeit in Hinblick auf die durchzuführenden Handlungsempfehlungen gewährleistet.

Die Anwendbarkeit für widersprüchliche Kenngrößen ist durch eine Revision der Kenngrößen, bzw. einen verfrühten Eingriff zur Instandsetzung des Systems zu erhalten. Ein solcher Fall trifft auf die Messreihen mit Span auf Isolator mit und ohne Kontakt zur Hochspannungselektrode zu, die einen Aspektwert von eins für ΔU_{DS}^- generiert, während ΔU_{Onset} aufgrund eines negativen Werts eine null annimmt. Somit sind die Aspektwerte widersprüchlich, während ΔU_{DS}^- nach [6], [18] auf eine gestiegene Ausfallwahrscheinlichkeit hinweist. Da das Modell in diesem Fall eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,33% ausgibt und somit einen erforderlichen Eingriff mit Zeitversatz zur Folge hat, ist die Anwendbarkeit des Modells gewährleistet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das empirische Risikomodell anwendbar und auf andere HVDC-Systeme übertragbar ist. Die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit für das betrachtete System liefert die Grundlage zur Bewertung des Abnutzungsvorrats des Isoliergases und erlaubt deshalb eine Korrelation mit dem Ausfallrisiko. Die Berücksichtigung des unvollständigen Wissens in der Modellierung ist aber mathematisch nicht korrekt, weshalb die evidenztheoretischen Risikomodelle im Folgenden Anwendung finden.

7 Evidenztheoretische Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder

Die Evidenztheorie berücksichtigt unvollständiges Wissen (vgl. Kapitel 1.4.2), welches in die Modellbildung eingeht. Daher zeigen die folgenden Kapitel, welche Diagnoseergebnisse die evidenztheoretischen Modelle trotz zu berücksichtigenden unvollständigen Wissens erzielen und welchen Mehrwert die Modellierungsart gegenüber dem empirischen Modellansatz hat.

7.1 Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder in GIL

Die evidenztheoretischen Modelle aus Kapitel 3.2 sind für Ionenstrommessungen an der GIL anwendbar, die das Koronaskop als zweite, statistisch unabhängige Messmethode (und somit Evidenzquelle) ergänzt. Abbildung 7-1 zeigt die Ionenströme für verschiedene Fehlerbilder und in Abbildung 7-2 sind exemplarisch die Aufnahmen des Koronaskops für eine Messung mit Aluminiumspänen (2g) dargestellt. Auf die Darstellung der Referenzmessung mittels Koronaskop wird verzichtet, da keine Entladungen zu erkennen sind. Ursächlich hierfür ist die Homogenität der GIL-Anordnung, durch welche ohne Partikel keine Korona erzeugt werden, die mittels Koronaskop detektierbar sind. Weitere signifikante Koronaskop-Aufnahmen sind zur Vollständigkeit Anhang D zu entnehmen.

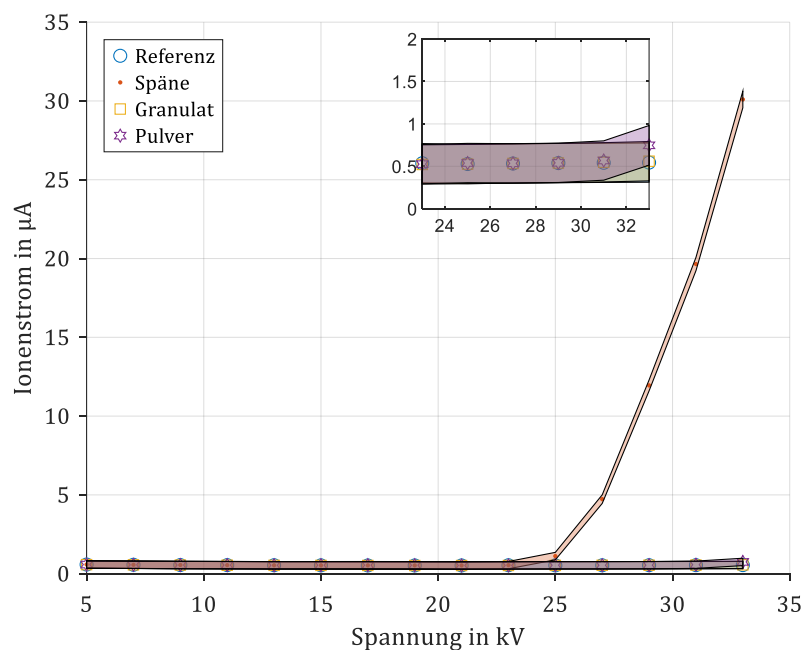
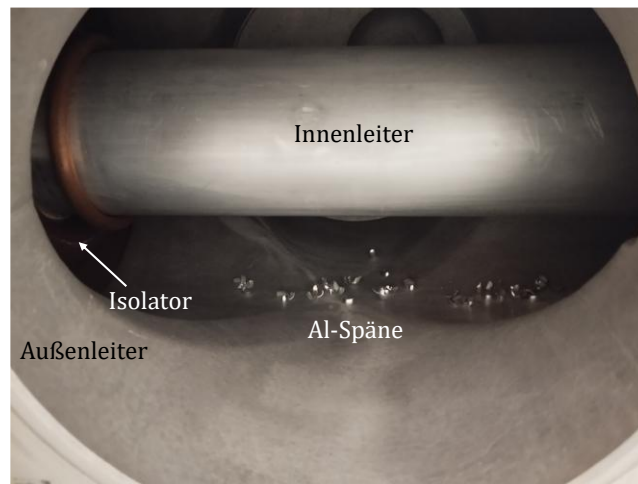


Abbildung 7-1: Ionenstrommessungen für die evidenztheoretischen Risikomodelle



a) Bei Tageslicht und 0 kV

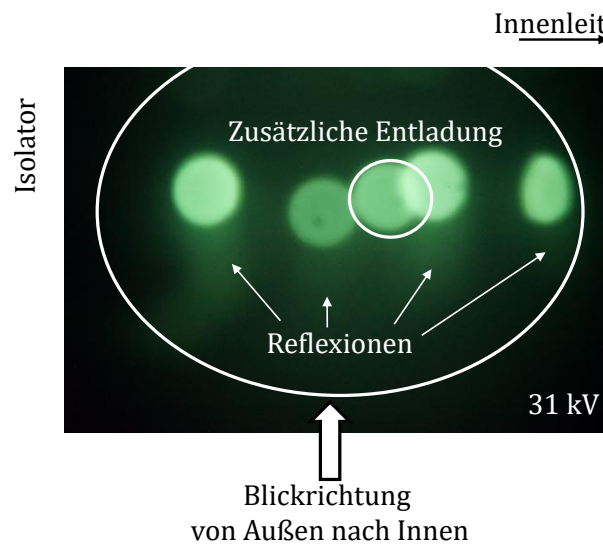
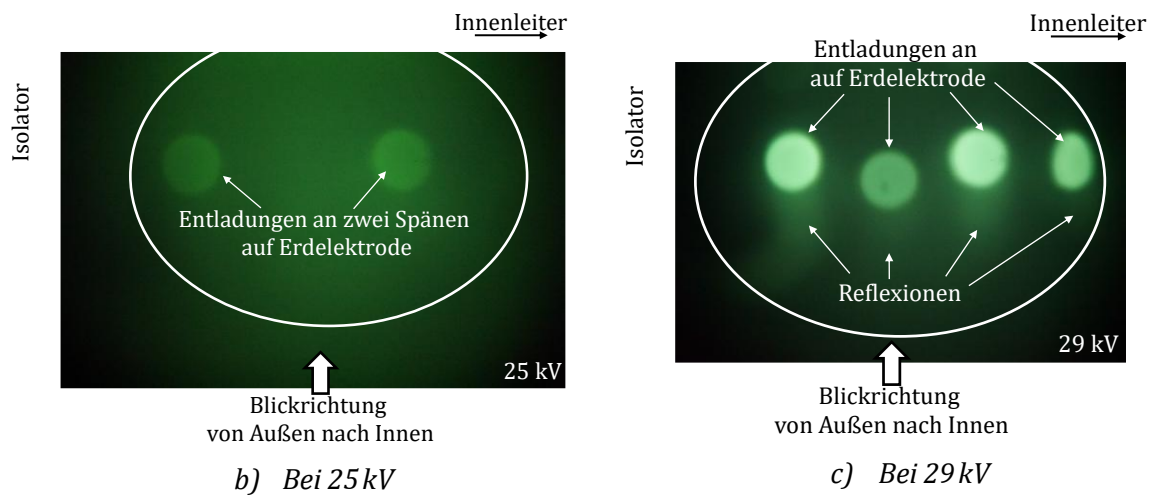


Abbildung 7-2: Koronaskop-Aufnahmen für die GIL-Reproduktionsmessung

Zur Anwendung des **Fehlerdetektionsmodells** sind die charakteristischen Kenngrößen der Ionenstrommessung (vgl. Kapitel 2.3) zu bestimmen und der Verlauf ist einer

Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Aus den beiden Evidenzquellen ergeben sich entsprechend die in Tabelle 7-1 dargestellten Massezahlen des Fehlerdetektionsmodells. Analog zu den Beispielen und Messergebnissen in Kapitel 3.2 nehmen die Massezahlen vor dem Hintergrund Werte an, wie sehr die jeweilige Evidenzquelle auf die entsprechende Menge X_i, Y_j hinweist und die Massezahlen dementsprechend die Evidenzen angemessen beschreiben.

Tabelle 7-1: Fehlerdetektionsmodell für Reproduktionsdaten der GIL

Messmethode	Späne	Granulat	Puder
Ionenstrommessung	$icm_1 = 0,05$ $icm_2 = \mathbf{0,9}$ $icm_3 = 0,05$	$icm_1 = \mathbf{0,9}$ $icm_2 = 0,05$ $icm_3 = 0,05$	$icm_1 = \mathbf{0,85}$ $icm_2 = 0,1$ $icm_3 = 0,05$
Koronaskop	$cs_1 = 0,025$ $cs_2 = \mathbf{0,95}$ $cs_3 = 0,025$	$cs_1 = 0,175$ $cs_2 = \mathbf{0,8}$ $cs_3 = 0,025$	$cs_1 = \mathbf{0,95}$ $cs_2 = 0,025$ $cs_3 = 0,025$
Für alle Messreihen: $K_{Norm} = 1$, bzw. $k_{corr} = 0$			

Auf dieser Grundlage resultieren aus der Kombination der Evidenzen jeweils die Sicherheiten für detektierte Fehler und die Fehlerursache wie in Tabelle 7-2 zusammengefasst. Für das Fehlerdetektionsmodell ergeben sich demnach die folgenden Glaubensmaße für die Späne:

$$\begin{aligned}
 m(Z_1) = m(Z_3) = m(Z_7) = m(Z_9) &= 0,05 \cdot 0,025 = 0,00125, \\
 m(Z_2) = m(Z_8) &= 0,9 \cdot 0,025 = 0,0225, \\
 m(Z_4) = m(Z_6) &= 0,05 \cdot 0,95 = 0,0475 \text{ und} \\
 m(Z_5) &= 0,9 \cdot 0,95 = 0,855.
 \end{aligned}
 \tag{60}$$

Demnach weist die Glaubensfunktion von

$$Bel_{ICM} \oplus Bel_{CS}([\text{ein detektierbarer Fehler}]) = \sum_{B \subseteq A} m_{ICM} \oplus m_{CS}(A)
 \tag{61}$$

$$= m_{ICM} \oplus m_{CS}(A) = m(Z_5) = 0,855 \text{ mit } A = [\text{ein detektierbarer Fehler}]$$

mit einer relativen Sicherheit von 0,855 auf das Vorliegen eines Fehlers hin. Für die Messreihen Puder und Granulat weist die Kombination analog zu Gl. (61) allerdings mit Sicherheiten von 0,0028 und 0,04 auf einen detektierbaren Fehler hin, woraus kein Fehlerfall ableitbar ist.

Tabelle 7-2: Kombinationsergebnis der GIL-Messdaten im Fehlerdetektionsmodell

Messung	$m_{ICM} \oplus m_{CS}(A)$		
	kein Fehler	ein Fehler	keine Aussage
Späne	0,0007	0,9461	0,0007
Granulat	0,1575	0,04	0,00125
Puder	0,9137	0,0028	0,0014

Dies zeigt, dass der Wahrnehmungsrahmen Ω_{Det} für die GIL-Anordnung nicht fein genug ist, was auf die Homogenität der Anordnung zurückzuführen ist: Die definierten atomaren Ereignisse des Fehlerdetektionsmodells beschreiben auf Basis der Spitze-Platte-Anordnung mit der zugrunde liegenden Wirkungskette die eintretenden Ereignisse, um Rückschlüsse auf den Abnutzungsvorrat zu liefern. Für die atomaren Ereignisse ist der Homogenitätsgrad aber von

zentraler Bedeutung, da durch lokale Feldüberhöhungen, z. B. durch Partikel, die Einsetzfeldstärke für niedrigere Spannungen erreicht wird als in einer homogenen Feldanordnung bei gleicher Spannung und Feldverzerrung durch Partikel. Somit sind die atomaren Ereignisse zur Fehlerdetektion für die GIL als quasi-homogene Anordnung nicht ausreichend, um die Feldüberhöhungen durch Puder und Granulat zu erfassen, da die lokale Feldüberhöhung durch diese Partikel geringer als durch Späne ist. Daher äußern sich die Widersprüche zwischen tatsächlich vorliegendem Fehler und denen durch das Modell detektierten Fehlern durch die geringen, bzw. fehlenden Abweichungen der Diagnosemessungen als Ereignisse beider Evidenzquellen. Zwar treten die Ereignisse der nachvollziehbaren Messung ($[c]$) und des korrekten Fokus' ($[f]$) ein, allerdings sind geringe, bzw. keine Abweichungen bei den Messreihen Granulat und Puder zu erkennen. Besonders Y_2^{dist} zur Beschreibung des Fehlers erzeugt bei der Messreihe Granulat den Widerspruch zwischen Modell und tatsächlichem Fehler, was einen Rückschluss auf den tatsächlichen Abnutzungsvorrat ermöglicht: Zwar führt die Insensitivität der Ionenstrommessung im Bereich der Einsetzspannung durch die Filtereigenschaft dazu, dass die ersten Entladungen mit Impulscharakteristik (hier: positive Bursts, vgl. [41]) nicht detektierbar sind, aber das Fehlerdetektionsmodell erkennt ausschließlich Fehler, die tatsächlich zu einer Abminderung führen. So sind beispielsweise Partikel wie Puder und Granulat nicht detektierbar, da ihre Auswirkungen durch lokale Feldüberhöhung oder eine erhöhte Leitfähigkeit die Festigkeit des Isoliergases, bzw. den Abnutzungsvorrat des Isoliergases nicht mindern.

Auf dieser Grundlage zeigt Tabelle 7-3 die Anwendung der Handlungsempfehlungen des Fehlerdetektionsmodells aus Tabelle 3-15. Da der Konfliktfaktor für das Fehlerdetektionsmodell nach Gl. (44)-(46) $Con(Bel_{ICM}, Bel_{CS}) = 0$ beträgt, gehen keine Informationen der Evidenzen der Modelle verloren, weshalb die Handlungsempfehlungen alle vorliegenden Informationen durch die Evidenzquellen beinhalten.

Tabelle 7-3: Handlungsempfehlungen des Fehlerdetektionsmodells für die Reproduktionsmessung

Messreihe	Späne	Granulat	Puder
Maximum der kombinierten Massezahlen	$m(Z_5)$	$m(Z_6)$	$m(Z_1)$
Empfehlung	Eingriff an Anordnung notwendig	Revision der Evidenzen	Keine Handlung

Zusammenfassung zu den Diagnoseergebnissen des Fehlerdetektionsmodells

Das Fehlerdetektionsmodell eignet sich auf Basis der charakteristischen Kenngrößen des Ionenstroms und den definierten Ereignissen zur Fehlerdetektion für quasi-homogene Anordnungen. Dabei ist keine Kenntnis zur Fehlerursache vorausgesetzt und das Modell detektiert Fehler, die den Abnutzungsvorrat des Isoliergases aufgrund lokaler

Feldüberhöhungen und Steigerungen der Leitfähigkeit vermindern. Folglich bildet es definitionsgemäß die Grundlage zur Anwendung des Fehlerursachenmodells. Die resultierenden Handlungsempfehlungen basieren im Modell auf den jeweils berechneten Glaubensmaßen, welche dem Diagnostiker einen Rückschluss auf den Abnutzungsvorrat erlauben.

Für das **Fehlerursachenmodell** sind die Kenngrößen aus Kapitel 2.4 zu bestimmen und die Einschätzung der Massezahlen erfolgt analog zu Kapitel 3.2.2 und 3.2.3. Für Späne sind beispielsweise die Ergebnisse wie folgt: Die Ionenstrommessung weist ohne eingetretene Durchschlagsspannung auf den Span hin, weil der gestiegene Ionenstrom, I_C^+ , mit einer deutlichen Abweichung von der Referenz vorliegt und I_C^e nicht ausschließt. Daneben stellt das Koronaskop eindeutig Späne aufgrund der aufgetretenen zusätzlichen Entladungen (PD^+) dar. Dementsprechend präsentiert Tabelle 7-4 die Massezahlen für die Messreihen Späne, Granulat und Puder bei positiver Polarität.

Tabelle 7-4: Fehlerursachenmodell für Reproduktionsdaten der GIL

Messmethode	Späne	Granulat	Puder
Ionenstrommessung	$icm_1^{dist} = 0,5$ $icm_2^{dist} = 0,45$ $icm_4^{dist} = 0,05$	$icm_1^{dist} = 0,02$ $icm_2^{dist} = 0,03$ $icm_4^{dist} = 0,95$	$icm_1^{dist} = 0,05$ $icm_2^{dist} = 0,2$ $icm_4^{dist} = 0,75$
Koronaskop	$cs_1^{dist} = 0,95$ $cs_2^{dist} = 0,03$ $cs_4^{dist} = 0,02$	$cs_1^{dist} = 0,05$ $cs_2^{dist} = 0,9$ $cs_4^{dist} = 0,05$	$cs_1^{dist} = 0,02$ $cs_2^{dist} = 0,08$ $cs_4^{dist} = 0,9$
Für alle Messreihen: $K_{Norm} = 1$, bzw. $k_{corr} = 0$			
Legende: grau: aufgrund gleicher Teilmengen entfällt die Verwendung der markierten Massezahl			

Weiterführend zeigt Tabelle 7-5 die kombinierten Massezahlen für die verschiedenen Fehlerursachen mit den Schnittmengen $Z_1^{dist}, Z_6^{dist,(+)}, Z_{11}^{dist,(+)}$ und Z_{16}^{dist} . So weist das Modell beispielsweise für die Späne mit dem Höchstwert von 47,5% auf den Span als Fehler hin. Im Gegensatz dazu zeigen die Glaubensfunktionen der Messreihen mit Granulat und Puder, dass die Evidenzen auf „keine Identifikation“ (Z_{16}^{dist}) hindeuten.

Tabelle 7-5: Kombinationsergebnis der GIL-Messdaten im Fehlerursachenmodell

Messung	$m_{ICM} \oplus m_{CS}(Z_n^{dist})$			
	Span	Granulat	Puder	keine Identifikation
Späne	0,475	0,0135		0,001
Granulat	0,001	0,027		0,0475
Puder	0,001	0,016		0,675

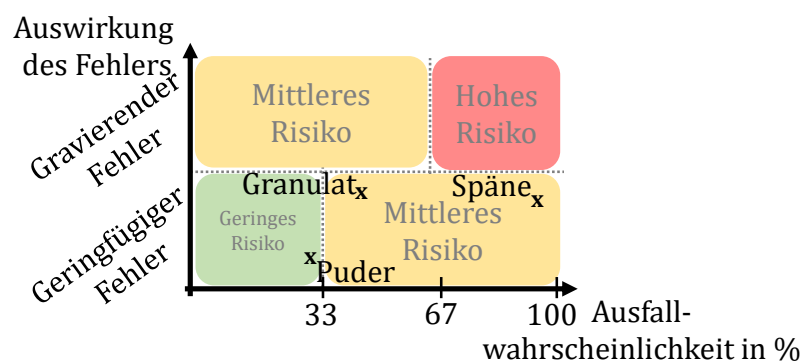
Dass die Fehlerursachen Granulat und Puder nicht identifizierbar sind, ist auf den Wahrnehmungsrahmen Ω_{Dist} zurückzuführen, da dieser atomare Ereignisse zur Beschreibung

inhomogener Anordnungen berücksichtigt (s.o.). Daher sind die beiden Modellergebnisse in sich stimmig: Während das Fehlerdetektionsmodell auf widersprüchliche Evidenzen für Granulat hineist, aber nicht eindeutig einen Fehler ermittelt und die Messreihe Puder als kein Fehler erkannt wird, ist das Kombinationsergebnis für „keine Identifikation“ im Fehlerursachenmodell für beide Messreihen plausibel. Folglich ist die sukzessive Anwendung der beiden Modelle sinnvoll, auch wenn sie mathematisch unabhängig voneinander sind.

Die Ergebnisse des Fehlerursachenmodells erlauben weiterführend auf Basis der Glaubensfunktionen einen Rückschluss auf das Ausmaß der jeweiligen Fehler und somit auf das Ausfallrisiko, für welches die gleiche Skala wie beim Fehlerdetektionsmodell zugrunde gelegt wird²³. Die kombinierten Massezahlen für Z_1^{dist} der Messreihe Späne mit $m(Z_1^{\text{dist}})$ zeigen daher, dass ein mittleres Ausfallrisiko vorliegt. Analog liegt für die Messreihe Granulat mit dem höchsten Kombinationswert der Massezahlen von $m(Z_{14,15}^{\text{dist}}) = 0,855$ ebenfalls ein mittleres Risiko vor, da die Evidenzquellen widersprüchlich sind, da das Koronaskop mit $icm_4^{\text{dist}} = 0,95$ keine Identifikation anzeigt und das Koronaskop allerdings auf Puder und Granulat mit jeweils $cs_2^{\text{dist}} = 0,9$ deutet. Somit ist kein sofortiges Eingreifen für den gewählten Messbereich bei beiden genannten Messreihen erforderlich. Ein niedriges Ausfallrisiko dagegen erzeugt die Messreihe Puder, für welche schon das Fehlerdetektionsmodell kein Eingreifen erfordert (s.o.) und das Ausmaß des Fehlers damit gering ist. Dies führt zur Risikomatrix in Abbildung 7-3, wobei das Ausfallrisiko AR für Puder mit

$$AR = 1 - (Bel_{ICM} \oplus Bel_{CS}([\text{keine Identifikation}])) \quad (62)$$

aufgrund des nicht detektierbaren Fehlers zu berechnen ist. Dagegen entspricht das Ausfallrisiko für Späne und Granulat der Glaubensfunktion für ebendiese Fehlerursachen.²⁴



²³ Aufgrund der geringen Datenbasis bei Verwendung der Ionenstrommessung liefert das Ausmaß des Fehlers keinen konkreten Zeithorizont wie in [51] gefordert.

²⁴ Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Risikomatrix auf Basis der evidenztheoretischen Modellbildung entspricht einer relativen Sicherheit und stellt keine Wahrscheinlichkeit im Sinne der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie dar.

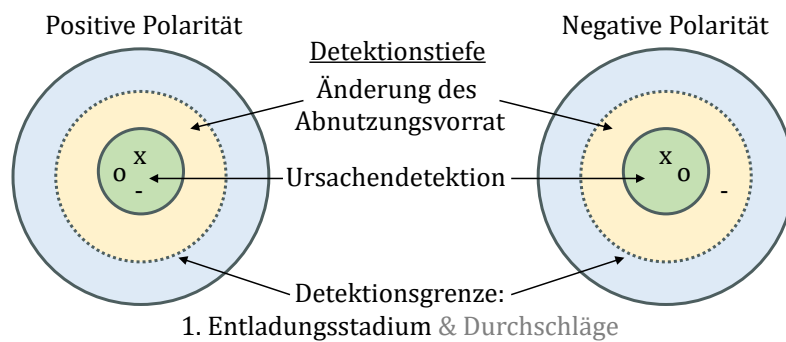
*Abbildung 7-3: Risikomatrix der evidenztheoretischen Modelle für die GIL***Zusammenfassung zu den Diagnoseergebnissen des Fehlerursachenmodells**

Das Fehlerursachenmodell ermittelt auf Grundlage der Evidenzen für die GIL die zugrunde liegenden Fehler. Für alle Messungen sind die Ergebnisse mit dem Fehlerdetektionsmodell stimmig, wobei die Späne korrekt detektiert und als Ursache bestimmt sind. Für die Messreihen Puder und Granulat hingegen widersprechen die Kombinationsergebnisse der tatsächlich vorliegenden Verschmutzung, was auf einen Erhalt, bzw. einer geringfügigen Verminderung des Abnutzungsvorrats schließen lässt. Ursächlich hierfür ist der Wahrnehmungsrahmen Ω_{Dist} , welcher für inhomogene Anordnungen statt für quasi-homogene Anordnungen definiert ist. So beeinflussen einerseits die elektrische Festigkeit des Isoliergases die Modellergebnisse, welche durch Pulver nicht vermindert wird und andererseits die Sensitivität der Ionenstrommessung für den Wertebereich der angelegten Spannung. Da in der Messung der Ionenstrom aufgrund der Filterschaltung nicht signifikant von der Referenz abweicht (und auch keinen exponentiellen Verlauf zeigt), tritt die größte Massezahl für „keine Identifikation“ auf. Somit zeigt das Fehlerursachenmodell Fehlerursachen an, welche durch Abweichungen auf Basis der Evidenzquellen im Fehlerdetektionsmodell detektiert werden. Weiterführend ist auf Grundlage dieser Erkenntnisse die Übertragbarkeit der Modelle im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

7.2 Anwendbarkeit der evidenztheoretischen Risikoermittlung

Um den Mehrwert gegenüber dem empirischen Modell darzustellen, ist die Anwendbarkeit der evidenztheoretischen Modelle im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf weitere HVDC-Systeme zu diskutieren. Die Modellgrundlage der beiden Modelle bilden die Evidenzen aus der Spitze-Platte-Anordnung (vgl. Kapitel 3.2.3) und das vorangegangene Kapitel zeigt, dass die Übertragung von inhomogenen auf quasi-homogene Anordnungen verfeinerte Wahrnehmungsrahmen erfordert. Für die Anwendbarkeit ist daher das Spannungsfeld aus **Detektionsumfang und -tiefe** in Abbildung 7-4 anhand der Spitze-Platte-Anordnung zu betrachten. Die Detektionstiefe ist hierbei in Ringen für die Ursachendetektion (größte Tiefe), die Änderung des Abnutzungsvorrats (mittlere Detektionstiefe) und die Detektionsgrenze (keine, bzw. geringe Tiefe) dargestellt. Die Messungen mit Spänen, Granulat und Puder sind jeweils zur Darstellung des Detektionsumfangs in den jeweiligen Ringen eingeordnet. Anhand der Darstellung ist erkennbar, dass für positive Polarität die evidenztheoretischen Modellierungen alle Fehlerfälle sowohl als Änderung des Abnutzungsgrades als auch der zugehörigen Ursache beschreiben. Für negative Polarität weisen die Modelle ebenfalls auf eine Änderung des Abnutzungsvorrats und für Späne sowie Granulat insbesondere auf die Ursache hin. Die Unterschiede zwischen den Messungen bei beiden Polaritäten ist auf den

Polaritätseffekt zurückzuführen: Für negative Polarität setzen Entladungen bei gleicher Anordnung bei niedrigerer Spannung ein, während der Durchschlag für höhere Spannungen als bei positiver Polarität eintritt (vgl. Polaritätseffekt [18], [44]). Die Evidenzquellen zeigen, dass der Polaritätseffekt eine geringere Auswirkung auf den Ionenstrom und das Koronaskop als die lokale Feldverzerrung hat, wie beispielhaft PD^* für Späne (Fehlerursachenmodell) zeigt (vgl. Kapitel 7.1). Die Evidenzquellen, bzw. die eintretenden Ereignisse basieren entsprechend der Messergebnisse auf der Wirkungskette zwischen der Entstehung von Teilentladungen sowie der Entstehung von UV-Strahlung und dem Ionenstrom und berücksichtigen damit sowohl den Polaritätseffekt als auch den Entladungsmechanismus durch die charakteristischen Kenngrößen (vgl. Kapitel 2.3, Kapitel 2.4). Der Wirkungskette folgend bilden die Modelle die Grundlage für einen Rückschluss auf den Abnutzungsvorrat und die Ursache für die Veränderung. Damit sind die Modelle auf inhomogene gasisolierte Anordnungen übertragbar.



Legende: x: Span; o: Granulat; -: Puder; grau: Randbereich

Abbildung 7-4: Detektionsumfang und-tiefe der Ionenstrommessung mit evidenztheoretischer Datenauswertung an der Spitze-Platte-Anordnung

Die Anwendung der evidenztheoretischen Modelle auf die Diagnosemessungen an der GIL zeigt die Übertragbarkeit der Modelle auf Diagnoseergebnisse an **quasi-homogenen Anordnungen**: Die Detektionsquote des Fehlerdetektionsmodells beträgt für die GIL 33,3 % und ist neben der Feinheit des Wahrnehmungsrahmens Ω_{Det} auf die unterschiedlichen Feldverzerrungen durch die Verschmutzungen zurückzuführen. Da hier maßgeblich das Attribut $d_{\text{ICM,CS}}$ entscheidend ist, führt dieses auf die Evidenzquellen, deren Sensitivität für die Messreihen Granulat und Puder $d_{\text{ICM,CS}}$ nicht ausreichen, um die Teilentladungen im Frühstadium, d. h. mit Wechselanteilen im Teilentladungssignal und ohne DC-Anteil (vgl. [41]), zu detektieren. Für die Messreihe Späne dagegen zeigt sich, dass die Unterscheidungsmerkmale beider Evidenzquellen erfassbar sind: Hier nimmt der höchste Wert der Glaubensfunktion den Wert für $Z_1^{\text{dist}} = [U_o^{\text{CS}} PD^+ PD^* I_C^e I_C^+]$ (beide Evidenzquellen weisen auf Späne hin) an. Für quasi-homogene Anordnungen zeigen folglich die Modellergebnisse für die GIL, dass der Detektionsumfang Partikel umfasst, die eine

lokale Feldverzerrung erzeugen, sodass die Anordnung lokal eine geringere Homogenität aufweist und entsprechend ein signifikanter Fehler den Abnutzungsvorrat vermindert.

Des Weiteren berücksichtigt die Berechnung der Glaubensfunktion das unvollständige Wissen der Messergebnisse, bzw. Evidenzquellen (vgl. Kapitel 1.4.2). Dementsprechend spiegelt das bestimmte Ausfallrisiko die Sicherheit wider, mit der das betrachtete HVDC-System ausfällt. Das Fehlerdetektionsmodell ist dementsprechend mit Handlungsempfehlungen und das Fehlerursachenmodell mit dem Ausmaß des Fehlers verknüpft. Die Berücksichtigung des unvollständigen Wissens durch die evidenztheoretische Risikomodellierung ist damit die Grundlage für die Reproduzierbarkeit der Modellergebnisse. Folglich berechnen für gleiche Messdaten die Berechnungsmodelle die gleichen Endergebnisse mit Handlungsempfehlungen, da die Modelle im Sinne von Taguchi (vgl. [95]) robust sind. Auch wenn das Festlegen der Massezahlen als Eingangsgröße der evidenztheoretischen Modelle vom Anwender abhängig ist, führt die Kombination und Interpretation der Glaubensfunktionen folglich zum gleichen Endergebnis (vgl. Anhang G), auch wenn der Anwender die Fehlerursache bereits kennt. Somit fließen Erfahrungen des Diagnostikers ein, ohne die Handlungsempfehlung und Risikokategorie zu verfälschen.

Die berechneten Glaubensfunktionen sind physikalisch zu interpretieren und orientieren sich an den entwickelten Szenarien. Damit bindet die Interpretation Expertenwissen ein, ermöglicht aber die Nutzung durch Unerfahrene, wobei sich ein reproduzierbares Ergebnis, bzw. eine Handlungsempfehlung ergibt. Darüber hinaus stellt das Fehlerdetektionsmodell die Grundlage zur Entwicklung des Fehlerursachenmodells dar, da die Modellierung der verschiedenen Szenarien mit zugehörigen Schnittmengen der Kombination ein hohes Maß an Expertenwissen im Bereich der evidenztheoretischen Modellierung sowie der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren erfordert. Da dadurch der primäre Zugang zur Modellbildung erschwert ist, dienen beide evidenztheoretischen Modelle als Exempel für weitere evidenztheoretische Diagnosemodelle an HVDC-Systemen, die fallspezifisch anwendbar sind.

Darüber hinaus erfordern beide Modelle zwei unterschiedliche Messmethoden (Ionenstrommessung und Koronaskop-Aufnahmen) mit unterschiedlichen zugrunde liegenden physikalischen Prozessen zur TE-Detektion. Da sich die beiden Messmethoden sowohl aufgrund der physikalischen Prozesse zur Detektion als auch die Anschlüsse innerhalb des Labors nicht gegenseitig beeinflussen, sind die Evidenzquellen (bedingt) statistisch unabhängig voneinander. Dies spiegelt sich auch in der formellen Unabhängigkeit der Mengen $X_i, Y_j, X_i^{\text{dist}}, Y_j^{\text{dist}}$ wider. Somit ist eine der Grundvoraussetzungen zur Anwendung der Dempster-Shafer-Theorie erfüllt.

Zwischenfazit

Das Fehlerdetektions- und Fehlerursachenmodell liefern fundierte Erkenntnisse sowohl zur Fehlerdetektion als auch -distinktion für inhomogene und quasi-inhomogene Anordnungen. Die definierten Ereignisse und die Berücksichtigung des Polaritätseffekts sind auf eine geeignete Datenbasis zurückzuführen, welche die Übertragbarkeit der Modelle ermöglicht. Damit sind sowohl die zugrunde liegenden Daten als auch die Modelle geeignet, um eine Risikobewertung für HVDC-Systeme auf Basis des Abnutzungsvorrats zu treffen, wobei die Fehlerdetektion und Ursachenunterscheidung aufgrund der Kombination der beiden Evidenzquellen basiert. Dabei zeigen die Modellierungsergebnisse, dass die Sensorfusion durch die Kombinationsregel die Aussagekraft der Ionenstrommessung zur Diagnose aufgrund der Einbindung des Wissens aus den Koronaskop-Aufnahmen verbessert. Vor diesem Hintergrund ist zu klären, unter welchen Bedingungen die evidenztheoretischen Modelle dem empirischen Modellansatz zu bevorzugen sind.

7.3 Vergleich der Risikomodellierungen

Die vorgestellten Diagnoseergebnisse an der GIL zeigen, dass sowohl mit dem empirischen als auch evidenztheoretischen Modellierungsansatz Diagnoseergebnisse und Ausfallrisiken bestimmbar sind. Somit bilden alle Modelle die Grundlage zur Bewertung des Abnutzungsvorrats. Der Vergleich der Modellierungsansätze ist in Tabelle 7-6 zusammengefasst.

Tabelle 7-6: Vergleich der Risikomodelle

Kriterium	Empirisches Modell	Evidenztheoretische Modelle
Unvollständiges Wissen	Überbewertung des Risikos	Berücksichtigt & keine Überbewertung des Risikos; Glaubensfunktion ermöglicht Rückschluss auf Risiko
Reproduzierbarkeit	Sehr hoch für Handlungsempfehlungen & Risikokategorien	
Anwendungsaufwand	Gering, aber hohe Expertise notwendig	Gering
Anpassungsaufwand	Sehr gering	Hoch, weil Informationen aus Messmethoden einfließen
Anwendbarkeit	Für die häufigsten Fehlerbilder geeignet (Abhängigkeit Homogenitätsgrad der Anordnung)	
Schnittstellen	Ergebnisse der Ionenstrommessung & menschliches Eingreifen	
	Interpretation der Ergebnisse	Einschätzung der Massezahlen

Während das empirische Modell Einflussfaktoren und Aspekte vorgibt, die die Abnutzung eines Systems basierend auf hohem Expertenwissen beschreiben, fusionieren die evidenztheoretischen Modelle Informationen aus der Ionenstrommessung und Koronaskop-Aufnahmen, die im Labor mit zusätzlichem Aufwand zu erzeugen sind. Allerdings stehen bei

Betriebsmitteln im Feld weitere Sensordaten zur Verfügung, wie z. B. Temperatur, Druck und Informationen von Schutzmechanismen (vgl. [96]). Somit ist die Anwendbarkeit im Labor mit erhöhtem Aufwand gegeben, während im Feld der Anwendungsaufwand der evidenztheoretischen Modelle gegenüber dem empirischen Ansatz sinkt. Dementsprechend ist eine Erweiterung der evidenztheoretischen Modelle durch weitere Evidenzquellen möglich, um weitere Informationen in die Diagnose einzubinden. Dagegen ist eine Erweiterung des empirischen Modells nicht sinnvoll, da die Berechnung der absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit mit der steigenden Anzahl an Kenngrößen das Gesamtergebnis verzerrt, da alle Aspekte und Einflussparameter gleich gewichtet sind (vgl. Kapitel 1.4.1). Daher ist lediglich ein 1:1-Ersatz des jeweiligen Aspekts sinnvoll, um einerseits weitere Informationen einzubinden und andererseits die Interpretation, bzw. die Aussagefähigkeit der Ionenstrommessung mittels empirischen Modells zu erhalten. Zusammenfassend ermöglichen die evidenztheoretischen Modelle eine Erweiterung und Berücksichtigung weiterer Informationen, während das empirische Modell auf den Anwendungsfall mit beweglichen Partikeln beschränkt ist.

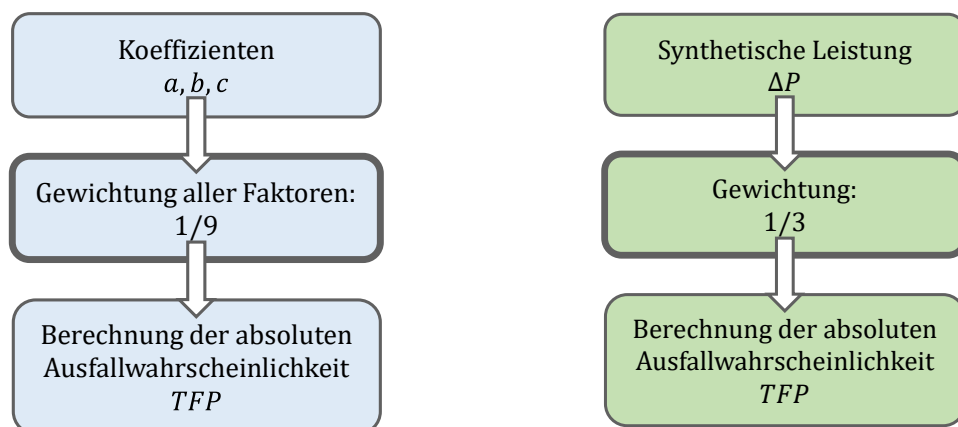
Des Weiteren setzt der empirische Ansatz voraus, dass die Fehlerursache (mobile Partikel) bekannt ist, um die Aspekte einzuordnen. Bei den evidenztheoretischen Modellen ist dies nicht der Fall, weswegen sie bei unbekannter Ursache zu bevorzugen sind.

Außerdem berücksichtigen beide Modellierungsarten jeweils die Unsicherheit der Ionenstrommessung in Bezug auf eine Diagnose, auch wenn sie unterschiedlich in die Ergebnisse einfließen. Besonders im empirischen Modell ist das unvollständige Wissen mathematisch falsch berücksichtigt, während die evidenztheoretischen Modelle das unvollständige Wissen explizit einbinden (vgl. Kapitel 1.4.2). Als Resultat berücksichtigt das empirische Modell eine einfache Abschätzung mit erhöhtem Risiko, was eine Überbewertung des tatsächlichen Risikos darstellt und die wirtschaftlichen Vorzüge einer zustandsorientierten Wartung basierend auf dem empirischen Modell vermindert. Im Gegensatz dazu berücksichtigen die evidenztheoretischen Modelle über die Massezahlen das unvollständige Wissen und geben eine robuste Risikokategorie, bzw. Handlungsempfehlung aus.

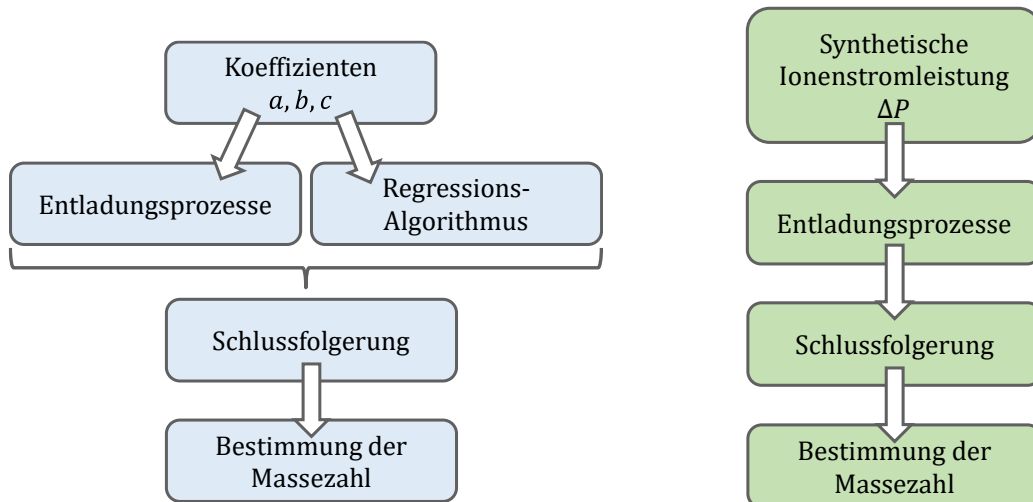
Die Grundlage für die Diagnoseergebnisse beider Modelle ist die Veränderung des Ionenstromverlaufs (und ggf. der Koronaskop-Aufnahmen): Das empirische Modell ermittelt sowohl über ΔU_{DS}^- als auch ΔP eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit und das Fehlerdetektionsmodell berücksichtigt zur Ermittlung des Ereignisses d_{ICM} ebenfalls die charakteristischen Kenngrößen der Ionenstrommessung. Das Fehlerursachenmodell dagegen ermittelt speziell die Änderungen des spannungsabhängigen Verhaltens des Ionenstroms zur Bestimmung der Fehlerursache.

Außerdem ist die Kenntnis über Fehlerbilder, bzw. die Auswirkung typischer Fehler auf den Ionenstrom in der Anordnung unerlässlich. Dennoch bietet die Ionenstrommessung mit den beiden gezeigten Modellierungsansätzen eine Bewertungsgrundlage für die Beschreibung des Abnutzungsvorrats mit Fokus auf der Funktionalität des Isoliergases. Zwar liefern beide Risikomodellierungen eine relative Aussage zur Ausfallwahrscheinlichkeit und dem einhergehenden (geringfügigen oder gravierenden) Fehler, allerdings ist diese Aussage in Diagnoseanwendungen ausreichend, um Wartungen, bzw. Instandsetzungen in die Wege zu leiten.

Die Reproduzierbarkeit beider Modellansätze ist hinsichtlich der Risikokategorie und der Handlungsempfehlung nach Kapitel 6.2 und 7.2 gewährleistet. Die Grundlage dafür ist die Definition der synthetischen Ionenstromleistung ΔP . Für das empirische Modell gilt, dass die Koeffizienten als einzelne Aspekte einen geringeren Einfluss von 11,1% auf die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit, TFP , haben, während ΔP mit einem Einfluss von 33,3% die gleichen Abweichungen der Diagnose- von der Referenzmessung darstellt (vgl. Abbildung 7-5 a)). Damit beeinflusst ΔP das Gesamtergebnis stärker als die Einzelaspekte bei gleichem Kurvenverlauf des Ionenstroms. Analog zum empirischen Modell liefert ΔP für das Fehlerdetektionsmodell eine Hilfsgröße für den Diagnostiker zur Einschätzung der Massezahlen (vgl. Abbildung 7-5 b)): Für den Anwender sind keine Kenntnisse zur Abhängigkeit der einzelnen Koeffizienten vom Regressionsalgorithmus und den physikalischen Prozessen vorausgesetzt, um die Massezahlen zu bestimmen. Eine Einschätzung auf Basis von ΔP vereinfacht somit die Anwendung des Fehlerdetektionsmodells, besonders für unerfahrene Anwender, und steigert somit die Attraktivität zur Anwendung des Fehlerdetektionsmodells.



a) Ablaufdiagramme des empirischen Modells

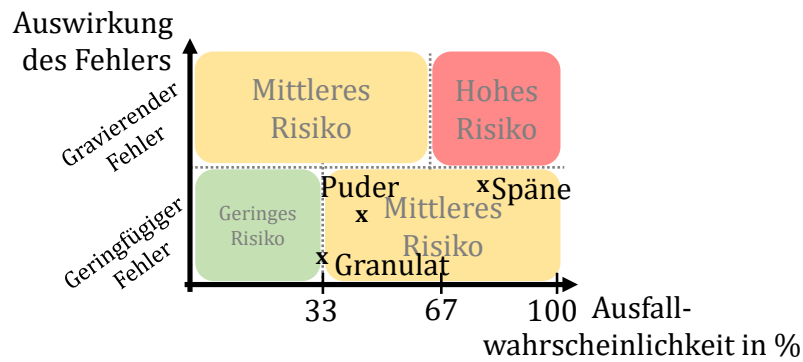


b) Ablaufdiagramme der evidenztheoretischen Modelle

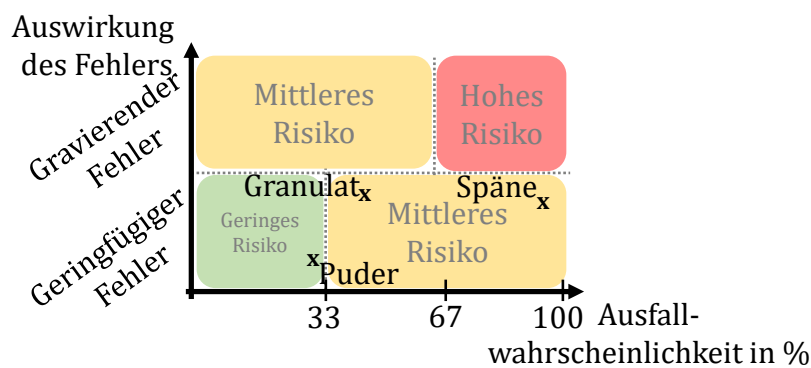
Abbildung 7-5: Vergleich der synthetischen Ionenstromleistung zur Einzelbetrachtung der Koeffizienten

Die Einschätzung der beiden Modellierungsansätze setzt mit den charakteristischen Kenngrößen unterschiedlich viel Expertise voraus. Während das empirische Modell voraussetzt, dass anhand der Ionenstrommessung eine Interpretation hinsichtlich des Ausfallrisikos erfolgt, basieren die evidenztheoretischen Modelle auf der Einschätzung, inwiefern der Anwender den Ergebnissen glaubt, dass ein bestimmtes Szenario auf Basis der zugehörigen Ereignisse eingetreten ist. Somit erfordern die evidenztheoretischen Modelle eine geringere Expertise, bzw. Erfahrung in der Anwendung als das empirische Modell. Speziell bei geringem Erfahrungsschatz oder nicht eindeutiger Evidenz durch die Ionenstrommessung allein sind die evidenztheoretischen Modelle anzuwenden.

Beide Ansätze zum Erhalt eines Diagnoseergebnisses führen zur angestrebten Risikomatrix nach Kapitel 1.4 und die Ergebnisse der gemeinsamen Messreihen stellt Abbildung 7-6 dar. Die zugrunde liegenden Ausfallwahrscheinlichkeiten für das empirische Modell sind Anhang F zu entnehmen. Da das empirische Modell die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit und die evidenztheoretischen Modelle die Glaubensfunktion jeweils ausgeben, sind die Risikokategorien miteinander vergleichbar. Damit zeigt sich, dass beide Modellansätze für alle Messreihen ein mittleres Risiko mit geringfügigem Fehler zur Folge haben und somit übereinstimmen.



a) Empirische Risikomodellierung



b) Evidenztheoretische Risikomodellierung

Abbildung 7-6: Risikomatrizen der unterschiedlichen Risikomodellierungen

Da in beiden Modellierungsansätzen die Entstehung des Ionenstroms und damit auch die Wirkungsweise durch aufgetretene Fehler auf den Ionenstrom Berücksichtigung finden, liefern beide Modelle eine valide Aussage über das Ausfallrisiko, bzw. die Ausfallwahrscheinlichkeit der GIL. Ein besonderer Vorzug ist bei der Anwendung der evidenztheoretischen Modelle, dass die Evidenzen durch den Konfliktfaktor überprüfbar sind (vgl. Kapitel 7.2), welcher widersprüchliche Aussagen der Evidenzquellen anzeigt. Außerdem zeigen die Werte der Glaubensfunktionen widersprüchliche Messergebnisse auf und Informationen aus mehreren Evidenzquellen liegen der Risikoberechnung zugrunde, was beim empirischen Modell mit einer Diagnosemessung für HVDC-Systeme nicht möglich ist.

Zusammenfassung

Für beide Modellierungsansätze gilt, dass sie nützliche Werkzeuge für eine Diagnose an gasisolierten HVDC-Systemen mit unterschiedlichen Homogenitätsgraden sind. Während die empirische Modellierung dem Vorbild der TE-Diagnose folgt, erweitern die evidenztheoretischen Modelle die Informationen aus der Ionenstrommessung um Ergebnisse mittels Koronaskop-Aufnahmen. So zeigt dieser Modellansatz nicht nur die Anwendbarkeit zur

Diagnose auf Basis der Ionenstrommessung, sondern demonstriert weiterführend das Potential der Ionenstrommessung in Kombination mit anderen Messmethoden für HVDC-Aufbauten. Besonders für unbekannte Fehler und eine korrekte Berücksichtigung des unvollständigen Wissens sind die evidenztheoretischen Modelle anzuwenden. Dabei ermöglichen sie neben der Bewertung des Abnutzungsvorrats die Berechnung des Ausfallrisikos ohne eine Überschätzung wie im empirischen Modell.

Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Suche nach geeigneten Monitoring- und Diagnosemethoden für HVDC-Betriebsmittel präsentiert diese Arbeit die bereits bekannte Ionenstrommessung für Diagnosen. Damit stellt die Ionenstrommessung eine Alternative zur TE-Messung für HVDC-Systeme dar. Treten leitfähige Partikel oder Fehlkonstruktionen in einem gasisolierten System auf, reagiert die Ionenstrommessung auf die Geometrie aufgrund der lokalen Feldverzerrung, wobei das Material keinen Einfluss auf die Diagnosemessungen zeigt.

Da die Ionenstrommessung einem Gleichstrom im Isoliergas entspricht, gehört die Ionenstrommessung zu den Diagnosemethoden der Früherkennung in inhomogenen Anordnungen. Besonders die einfache Durchführung und Messdatenauswertung sowie die Nicht-Invasivität ermöglichen die Anwendung, für welche das entwickelte Anwendungskonzept die Grundlage bildet.

Um aufbauend auf den Messergebnissen Rückschlüsse auf den Abnutzungsvorrat eines Systems zu erhalten, modelliert diese Arbeit mittels zwei unterschiedlicher Ansätze die Ausfallwahrscheinlichkeit, bzw. das Ausfallrisiko eines fehlerbehafteten Systems: Zum Einen bietet das empirische Modell eine Auswertungsmethode zur Ermittlung der absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit, die Erfahrungen des Diagnostikers einbezieht und sich für vor-Ort-Diagnosen im spannungsfreien Zustand eignet. Zum Anderen bieten die evidenztheoretischen Modelle aufgrund der Datenfusion mit dem verwendeten Koronaskop mehr Wissen über das vorliegende Fehlerbild und erlauben neben der Fehlerdetektion die Ursachenbestimmung. Damit bilden die evidenztheoretischen Modelle ausblickend eine Möglichkeit zum automatisierten Online-Monitoring von Systemen, die neben der Ionenstrommessung weitere Sensoren zur Überwachung und Detektion kombinierter Fehlerursachen haben.

Zusammenfassend qualifiziert diese Arbeit die Ionenstrommessung für Diagnosen an drei verschiedenen, luftisolierten Systemen, für die jeweils Referenz- und Fehlerdaten vorliegen. Die Datenauswertung erfolgt mittels der genannten Ansätze hinsichtlich des Ausfallrisikos des jeweiligen Systems. Eine Übertragung der Diagnosemethode auf weitere Systeme unter DC ist möglich, wenn entweder Referenzdaten des Abnutzungsvorrats vorliegen oder die elektrische Festigkeit des Systems (und somit der Abnutzungsvorrat) zu einem Zeitpunkt vor der Anwendung der Ionenstrommessung bekannt ist. Dies ist üblicherweise zur Inbetriebnahme eines Systems aufgrund genormter Qualifikationstests der Fall. Folglich stellt die Ionenstrommessung als Diagnosemethode eine Alternative zur TE-Messung für HVDC-Systeme dar, die zur Langzeitstabilität des elektrischen Energieversorgungsnetzes beiträgt.

Anhang A. Modellierung der elektrischen Feld- und Abhebefeldstärke

Herleitung der Abhebefeldstärke

Zur Berechnung der Abhebefeldstärke basierend auf [40], [97], [98] in einer luftgefüllten ($\epsilon_r = 1$) GIL wird der vereinfachte Querschnitt aus Abbildung A 1 betrachtet: Zwischen der Hochspannungs- und Erdelektrode mit Abstand s liegt ein kugelförmiges, ideal leitfähiges Partikel, das eine Gewichtskraft \vec{F}_g in Abhängigkeit des Partikelradius r_p , der Materialdichte ρ und des Ortsfaktors g mit

$$F_g = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho g, \quad (63)$$

erfährt [97]. Die Berechnung ist zur Durchführung der Diagnosemessungen von Bedeutung, um den Messbereich zu definieren (vgl. Kapitel 2.2.1).

Neben dem Plattenkondensator wird der dargestellte Zusammenhang analog für einen Rohrleiter, bzw. Koaxialaufbau und den in dieser Arbeit verwendeten Spannungsteiler verwendet. Die Anwendung am Spannungsteiler ist mit dem Aufbau des Teilers begründet: Durch den radialen Spannungsabbau sowohl pro Stufe der Konstruktion als auch entlang der Höhe des Teilers ist das gewählte Isoliermedium Luft, was den Teiler als Testobjekt zur Qualifikation der Ionenstrommessung als Diagnoseverfahren eignet.

Grundsätzlich gelten für das beschriebene Problem des abhebenden Partikels die Laplace-Gleichungen mit den folgenden Randbedingungen [97] (vgl. Abbildung A 1):

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = 0, \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (64)$$

$$\varphi_1 = U_{DC}, \varphi_2 = 0 \text{ V}. \quad (65)$$

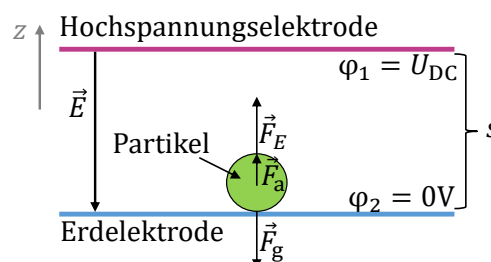


Abbildung A 1: Plattenkondensator zur Berechnung der Abhebefeldstärke für ein leitfähiges, kugelförmiges Partikel [97]

Zur Lösung des Problems wird ein Simulationsmodell in COMSOL erstellt und die Oberflächenladung eines Partikels wird nach der Lösung der Laplace-Gleichung mit Randbedingungen zu [97]

$$q = \int_{s'} \vec{D} ds' = -\frac{2\pi^3 \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot U_{DC}}{3s} \quad (66)$$

berechnet. Dabei entspricht s' der Integrationsvariable, die den Abstand zwischen den Elektroden beschreibt, s der Schlagweite und U_{DC} der angelegten Spannung, wobei $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ die Dielektrizitätskonstante des Vakuums angibt. Weiterführend wird die Coulomb-Kraft in Luft ($\varepsilon_r \approx 1$) zu [97]

$$F_E = \int_{s'} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \cdot E^2}{2} ds = \frac{2k\pi^3 \varepsilon_0 r^2 U_{DC}^2}{3s^2} = kEq, \quad (67)$$

wobei sich der elektrostatische Korrekturfaktor nach [99] aus der Wirkung der Oberflächenladung auf das Partikel zu $k = 0,832$ ergibt, da das Partikel elektrischen Kontakt zur Elektrode hat. Der elektrostatische Korrekturfaktor nimmt die Werte 0,832 oder 1 an. Der Wert wird 1, wenn das Partikel keinen elektrisch leitfähigen Kontakt zu den Elektroden hat [99].

Da die angelegte Spannung U_{DC} die anliegende Coulomb-Kraft am Partikel beeinflusst (s.o.), ist U_{DC} entscheidend, um Bedingung (1) zu erfüllen. Für die **Abhebefeldstärke** gilt nach [98]

$$E_a = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2\rho r g}{k\varepsilon_0}}, \quad (68)$$

welche von der Beschaffenheit des Partikels mit Dichte und Radius abhängt, nicht aber vom Gasdruck der Anordnung. Für weitere Partikelformen gibt [11] eine Übersicht über Ladung, Coulomb-Kraft und Abhebefeldstärke.

COMSOL-Modell zur Abschätzung der Abhebefeldstärke

Im Folgenden wird das in COMSOL erstellte elektrostatische 2D-Modell des GIL-Querschnitts zur Abschätzung der elektrischen Feldstärke am Partikelort der Koaxialanordnung dargestellt. Die Maße sind Abbildung 2-5 entnommen. Damit ergeben sich die Geometrie und das Mesh wie in folgender Abbildung für den Referenzzustand ohne Verschmutzung. Zu berücksichtigen ist die Gültigkeit des Modells im Bereich der effektiven Innenleiterlänge (vgl. Kapitel 2.2.2 und [43]) und die Berechnung auf Basis elektrostatischer anstatt plasmaphysikalischer Vorgänge. Die verschiedenen Partikel sind mit mittlerem Radius kugelförmig nach Tabelle 2-4 modelliert und Abbildung A 4 stellt exemplarisch die Feldberechnung für Puder und Granulat dar. Die elektrische Feldstärke wird jeweils im Punkt $(0cm | s - r_i + 2 \cdot r_p)$ mit dem Partikelradius r_p bestimmt und außerhalb der Koaxialanordnung liegt ein feldfreier Raum vor, da die Potentiale an den Innenleitern jeweils anliegen.

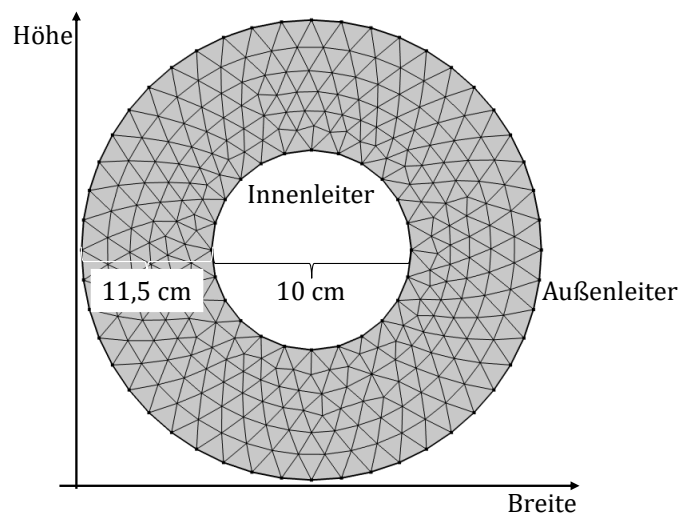


Abbildung A 2: Geometrie und Mesh des 2D-Modells des Koaxialaufbaus

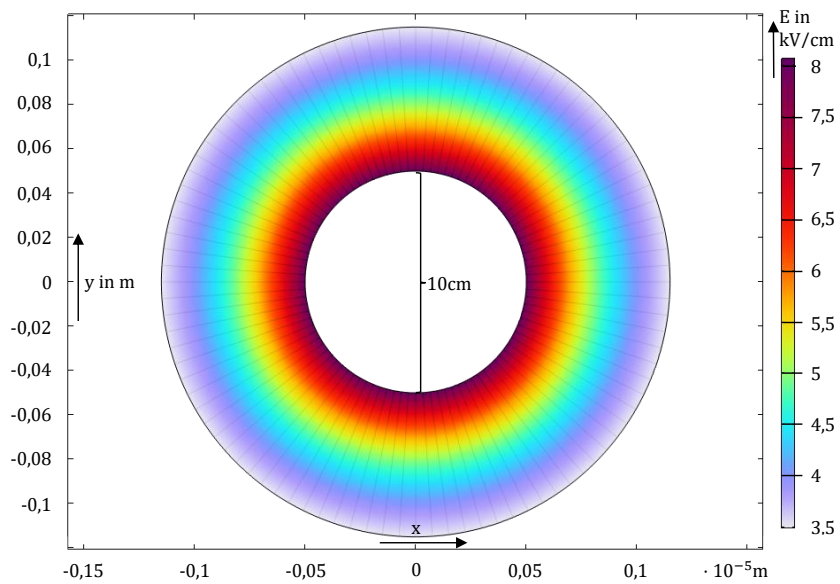
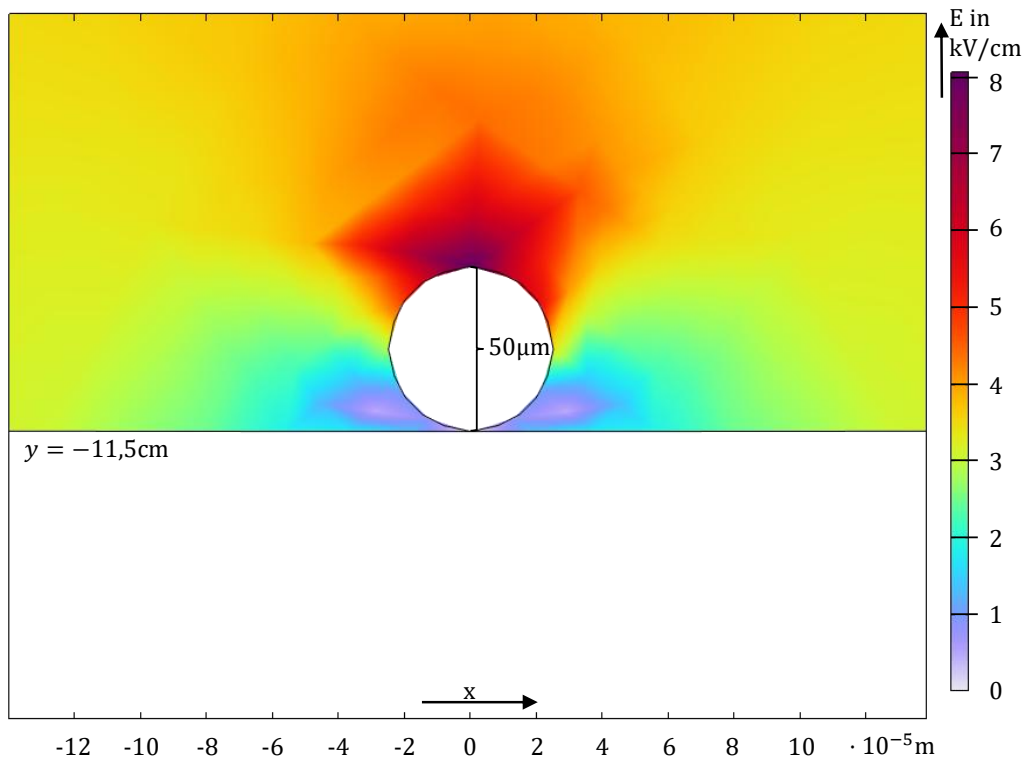
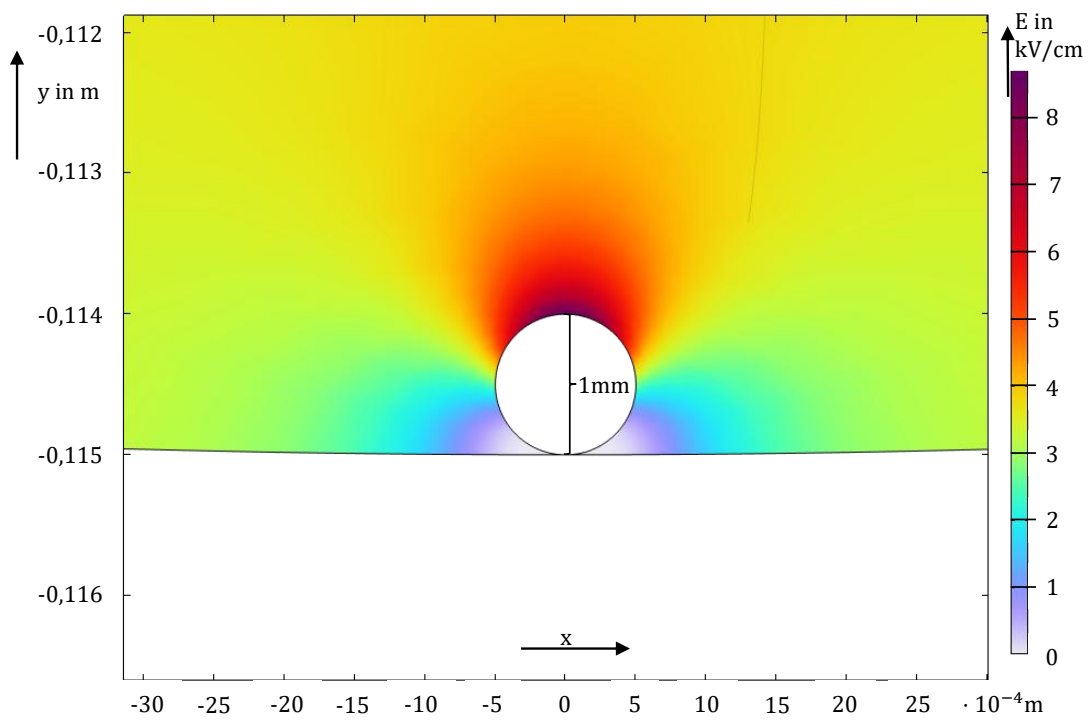


Abbildung A 3: Feldberechnung im Koaxialaufbau ohne Entladung für 33,5 kV



a) Aluminiumpulver ($r_p = 25\mu\text{m}$)



b) Aluminiumgranulat ($r_p = 0,5\text{mm}$)

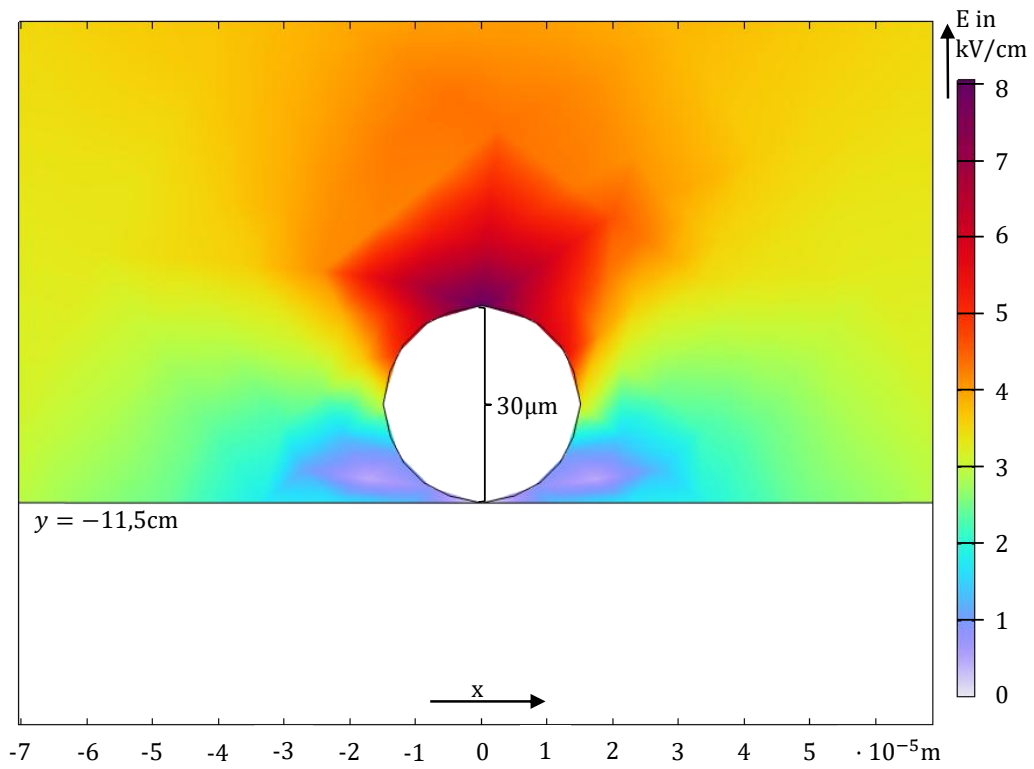
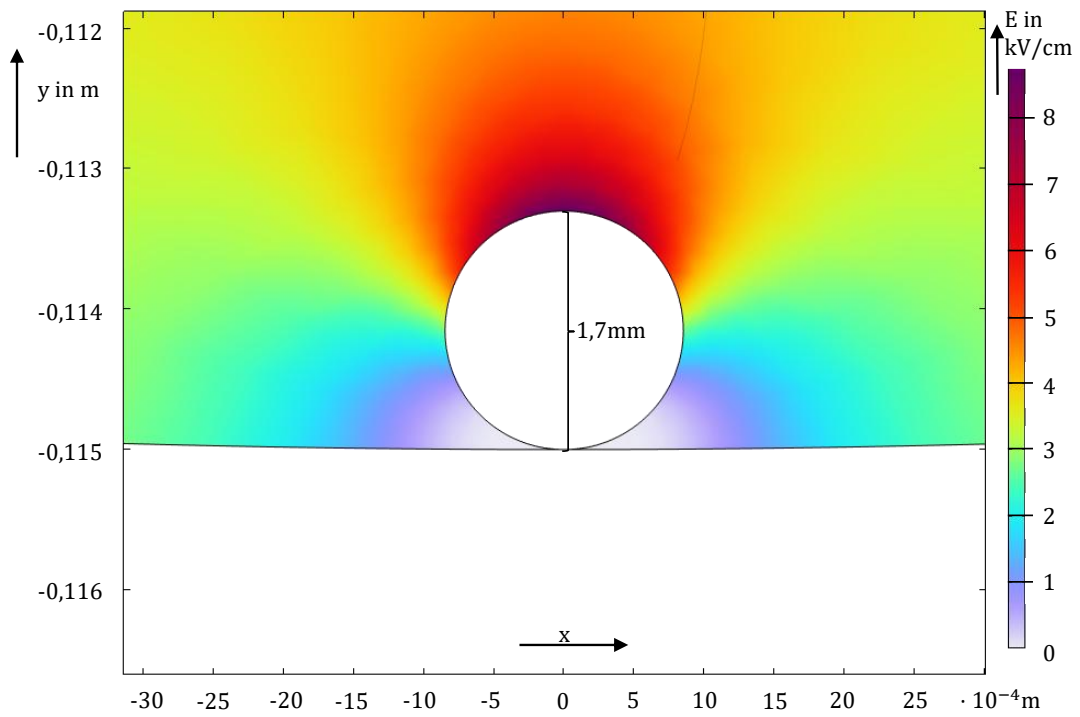
c) Kupferpulver ($r_p = 15\mu\text{m}$)d) Kupfergranulat ($r_p = 0,85\text{mm}$)

Abbildung A 4: Feldverläufe für Verschmutzungen im Koaxialaufbau

Anhang B. Veranschaulichungen der Evidenztheorie

Beispiel Münzwurf

Anhand des Münzwurfs aus [53] soll verdeutlicht sein, dass unvollständiges Wissen eines Betrachters in Wahrscheinlichkeiten eingehen, auch wenn dies nach der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie nicht möglich ist: Für einen Münzwurf gibt der Betrachter eine Wahrscheinlichkeit von 0,5 für jeweils „Kopf“ und „Zahl“ an. Für eine ideale Münze bestätigt die Literatur das Ergebnis, aber für eine reale Münze ist das Ergebnis ungewiss. Trotzdem gibt der Betrachter für eine reale Münze das genannte Ergebnis an und lässt damit sein unvollständiges Wissen in das Ergebnis einfließen. Diese kognitiven Einflüsse lassen sich aber in Wahrscheinlichkeitsverteilungen nicht berücksichtigen. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Evidenztheorie die Modellierung des unvollständigen Wissens bzgl. des Ausgangs des Münzwurfs mittels Glaubensfunktion und Kombinationsregel, wodurch kognitive Hintergründe des Betrachters zum Generieren eines Ergebnisses Berücksichtigung finden.

Die Ereignisse zur Beschreibung des Beispiels sind in der Evidenztheorie atomare Ereignisse, während in der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitstheorie die atomaren Ereignisse den Elementarereignissen entsprechen (vgl. [55]).

Kombinationsregel

Eine **Veranschaulichung** der Kombinationsregel ist in Abbildung B 1 dargestellt: Mit der Massezahl m_1 zu einer Glaubensfunktion Bel_1 im Wahrnehmungsrahmen Ω und den fokalen Elementen A_1, \dots, A_k erfolgt die Darstellung als Zahlenstrahl zwischen 0 und 1 (s. Abbildung B 1 links). Analog gilt dies für Massezahl m_2 zur Glaubensfunktion Bel_2 mit den fokalen Elementen B_1, \dots, B_l . Die orthogonale Kombination führt für diesen Sonderfall somit zu einem Quadrat (s. Abbildung B 1 rechts), welches die gesamte Glaubensmasse darstellt. Die sich ergebenden Streifen durch die Massezahlen der einzelnen fokalen Elemente schneiden sich und die überlappenden Bereiche sind mit $m_1(A_i)m_2(B_j)$ auf $A_i \cap B_j$ bemessen. [53]

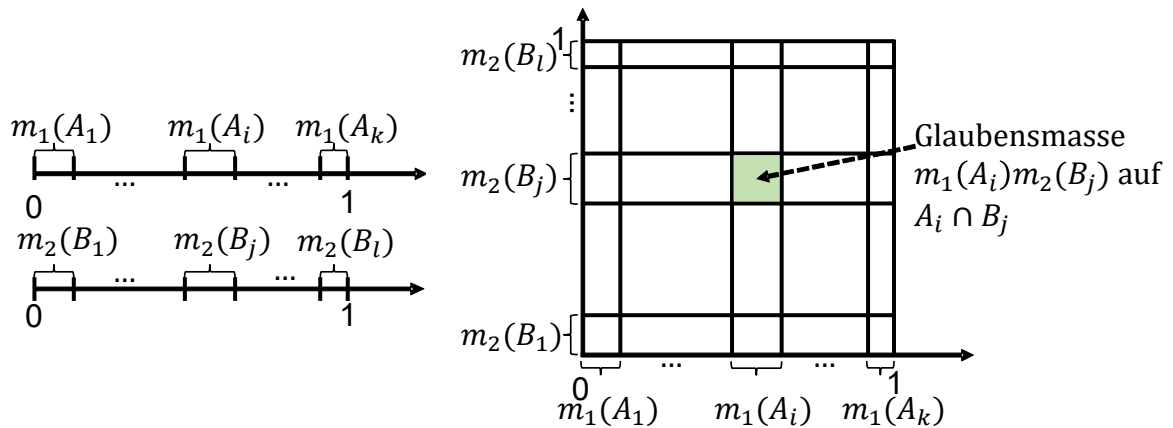


Abbildung B 1: Darstellung der Kombinationsregel für zwei Glaubensfunktionen [53]

Beschreibt $A_i \cap B_j = A$ eine Teilmenge A von Ω , lässt sich der Glaube von A mit

$$m_1 \oplus m_2(A) = \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j) \cdot K \tag{69}$$

berechnen.

Beispiel Konfliktfaktor

Zur Veranschaulichung des Konfliktfaktors ist nachfolgend ein Beispiel dargestellt. Für die beiden Sensoren S_1 und S_2 umfasst der Wahrnehmungsrahmen Ω zwei Teilmengen: Teilmenge $X = \{a, b, c\}$ mit $X_1 = \{a, b, c\}$ und $X_2 = \{c\}$ beschreibt den Wertebereich von S_1 , während $Y = \{a, c\}$ mit $Y_1 = \{a\}$ und $Y_2 = \{c\}$ zu Sensor S_2 gehören. Die Schnittmengen ergeben sich nach Tabelle B 1.

Tabelle B 1: Schnittmengen des Korrekturfaktor-Beispiels

Teilmenge X	Teilmenge Y	Schnittmenge $Z_n = X_i \cap Y_j$
X ₁	Y ₁	{a}
	Y ₂	∅
X ₂	Y ₁	∅
	Y ₂	{c}

Daraus folgt der Korrekturfaktor mit

$$k_{\text{corr}} = \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X) \cdot m_2(Y) = m_1(X_1)m_2(Y_2) + m_1(X_2)m_2(Y_2) \neq 0 \tag{70}$$

und führt zum Konfliktfaktor von

$$\text{Con}(\text{Bel}_1, \text{Bel}_2) = \log(k_{\text{corr}}) \neq 0. \tag{71}$$

Wahl der Massezahlen

Um die Massezahlen festzulegen, bestimmt der Diagnostiker zwischen null (unsicher) und eins (absolut sicher) für jedes Messergebnis unter der Berücksichtigung der Frage, ob und inwiefern

eines der Szenarien eingetreten ist. Die folgende Tabelle zeigt die zugehörigen Wertebereiche auf. Bei der Wahl ist Gleichung (15) zu berücksichtigen.

Tabelle B 2: Wertebereiche zur Festlegung der Massezahlen im Diagnoseprozess

Sicherheit, dass Szenario eingetreten ist	Wertebereich
Unsicher	0...0,1
Gering	0,1...0,3
Mittel	0,4...0,75
Groß	0,75...0,85
Absolut sicher	0,85...1

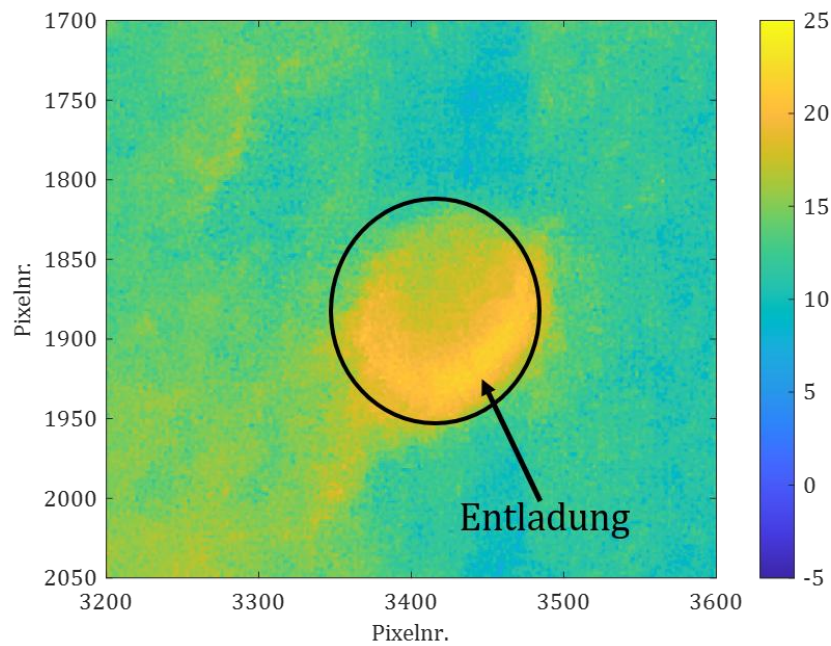
Anhang C. Auswertung der Koronaskop-Aufnahmen

Bei der Verwendung eines Koronaskops ist zu berücksichtigen, dass aufgrund unterschiedlicher Aufnahmesituationen, z. B. durch eine hellere Umgebung, die Aufnahmeeinstellungen der Systemkamera in Kombination mit dem Koronaskop anzupassen sind. Zur Auswertung ist der Kontrast der Entladung als Bewertungsgrundlage heranzuziehen. Wie Abbildung C 1 für die Spitze-Platte-Anordnung exemplarisch zeigt, beeinflusst das Rauschen, bzw. das Signal-Rausch-Verhältnis

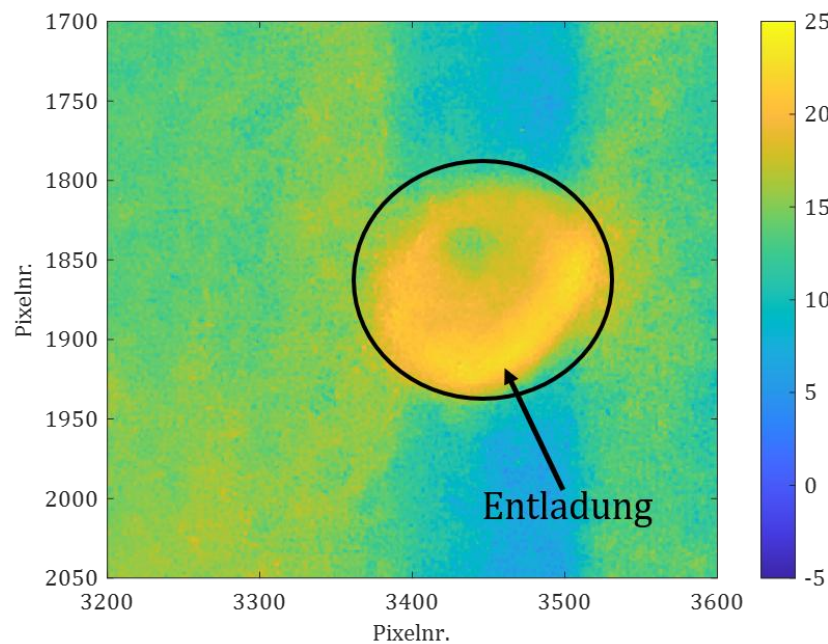
$$SNR = 10 \cdot \log(p_{\text{grau}}/\sigma), \quad (72)$$

welches aus dem Graustufenwert pro Pixel p_{grau} und der Standardabweichung σ des Gesamtbildes zu berechnen ist, die Bestimmung der Einsatzspannung der Koronaskop-Aufnahmen: Da das SNR lediglich für die Entladung zwischen 20 dB und 25 dB liegt, ist das Erkennen für den Diagnostiker herausfordernd. Außerdem sinkt das SNR außerhalb der Entladung im Übergang zur Umgebung ab. Dabei ist anhand der Aufnahmen nicht zu unterscheiden, ob die erfassten Photonen durch die TE oder Photonenrauschen (vgl. [90]) entstehen. Dies erschwert ebenfalls die Einschätzung bzgl. der Entladungsgröße und -erkennung für den Diagnostiker, besonders bei 5 kV. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Fähigkeit des Erkennens von z. B. Objekten (hier: Entladungen) von der Erfahrung des Diagnostikers abhängt (vgl. [100]), sodass eine Interpretation und die Anwendung der *zusätzlichen*, bzw. *helleren Entladung* zur Anwendung in den evidenztheoretischen Modellen möglich ist.

Des Weiteren ist die Verwendung des Koronaskops zur Bestimmung der *zusätzlichen*, bzw. *helleren Entladung* nicht universell an HVDC-Systemen anwendbar, weil das Koronaskop ein Sichtfenster ohne UV-Filter benötigt. Außerdem erfasst das Koronaskop die Entladungen ausschließlich im Bereich des Sichtfensters. Deshalb ist eine Ergänzung der Evidenzquellen durch eine orts aufgelöste TE-Messung wie z. B. mittels UHF-Messung (vgl. [101]) oder einer optischen Messung (vgl. [18]) sinnvoll.



a) Für 5kV



b) Für 7kV

Abbildung C 1: SNR der Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung (Referenzmessung, positive Polarität)

Darüber hinaus beeinflussen die Lichtverhältnisse die praktische Anwendung des Koronaskops als Evidenzquelle im Feld. Da allerdings die *hellere Entladung* mittels Kontrasts der Entladung zur Umgebung zu ermitteln ist, sind Schwankungen der Werte für die Blende, Belichtungszeit und den ISO-Wert zulässig. Grund hierfür ist, dass z. B. bei einer insgesamt helleren Aufnahme

durch eine kleinere Blendenzahl, eine größere Belichtungszeit oder einen steigenden ISO-Wert der Kontrast einer Entladung zur Umgebung sich wie in Abbildung C 2 gezeigt entwickelt: Den größten Kontrast erzeugt die helle Entladung zur direkten Umgebung außerhalb des Pixelintervalls von [3050, 3250]. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass mit einem sich verändernden ISO-Wert sich grundsätzlich der *SNR* verändert [89] und dass bei Überbelichtung Aufnahmen „ausbrennen“, wodurch Aufnahmen unbrauchbar sind (vgl. [100]). Dies führt dazu, dass Bereiche mit einem Grauwert von $p_{\text{grau}} \approx 1$ lediglich Aufschluss über die Intensität und nicht über Strukturen der Entladungen geben (vgl. Abbildung C 3). Außerdem beeinflusst die Blendenzahl die sog. Schärfentiefe [89], weshalb anwendungsbezogen die Zahl anzupassen ist: Für die Spitze-Platte-Anordnung ist eine geringe Blendenzahl zu wählen, um eine geringe Schärfentiefe zu erzeugen, da im Hintergrund keine Entladungen zu erwarten sind. Dagegen ist in einem räumlich tief ausgedehnten Aufbau, z. B. der Koaxialanordnung entlang des Leiters, eine stark geschlossene Blende einzustellen. Aufgrund der Vielzahl an Aufnahmeparametern ist daher spezifisch für eine Anwendung des Koronaskops eine automatisierte Erfassung und Datenauswertung auf Basis des Kontrasts zur Ermittlung der *helleren Entladung* anzustreben. So ist der Einfluss der Expertise des Diagnostikers auf die Massezahlen der evidenztheoretischen Modelle zu verringern und die Anwendung der Kenngröße *hellere Entladung* zu verbessern.

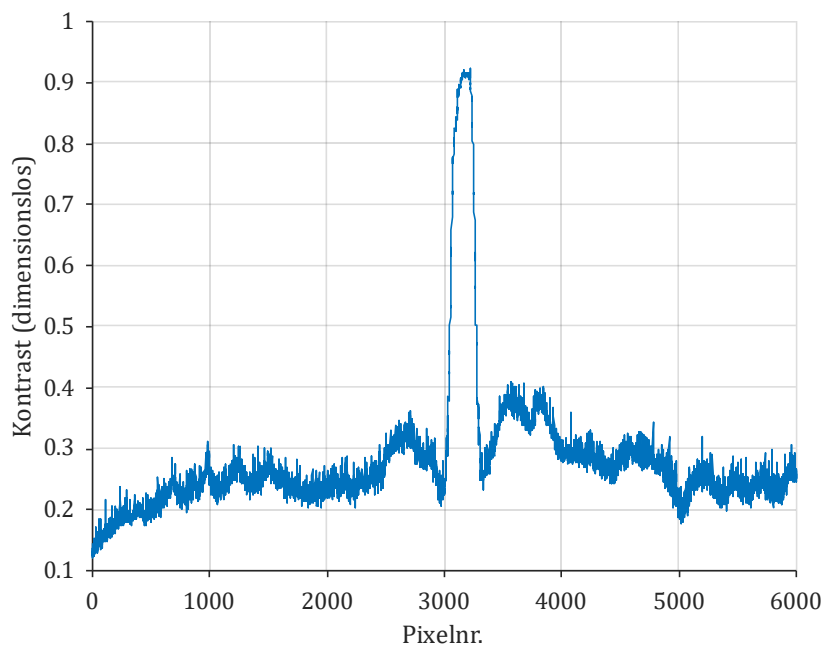


Abbildung C 2: Kontrast der Aufnahme der Spitze-Platte-Anordnung (Referenzmessung, positive Polarität) für 20 kV in der Grauwertdarstellung

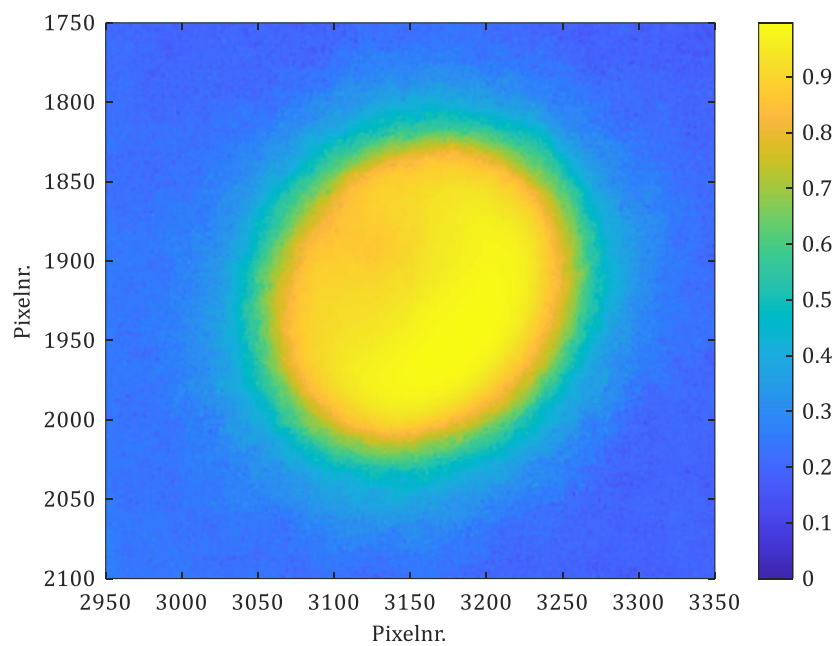


Abbildung C 3: Ausgebrannte Teilentladung an der Spitze-Platte-Anordnung (Referenzmessung, positive Polarität) für 20 kV in der Grauwertdarstellung

Anhang D. Koronaskop-Ergebnisse

Spitze-Platte-Anordnung: positive Polarität

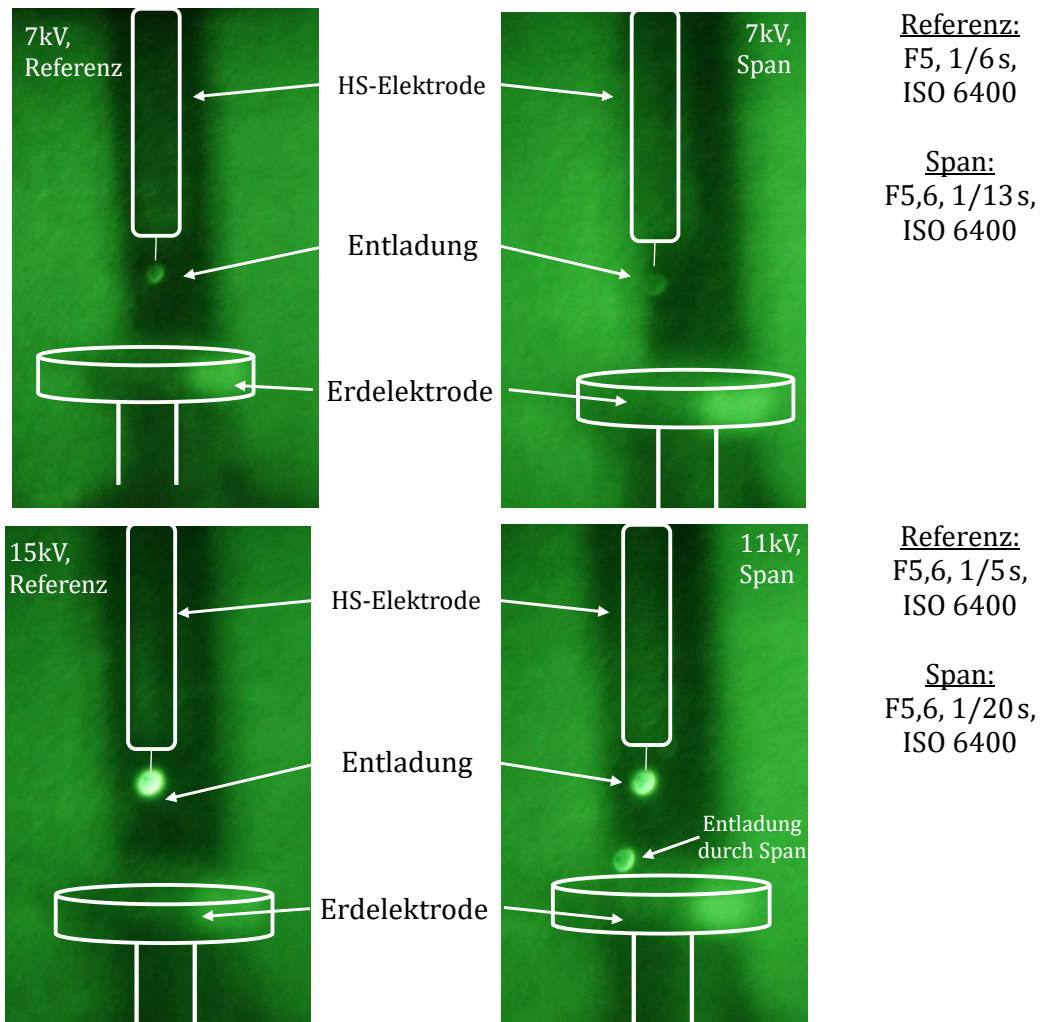


Abbildung D 1: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für positive Polarität; links Referenzmessung, rechts Verschmutzungstest mit Span

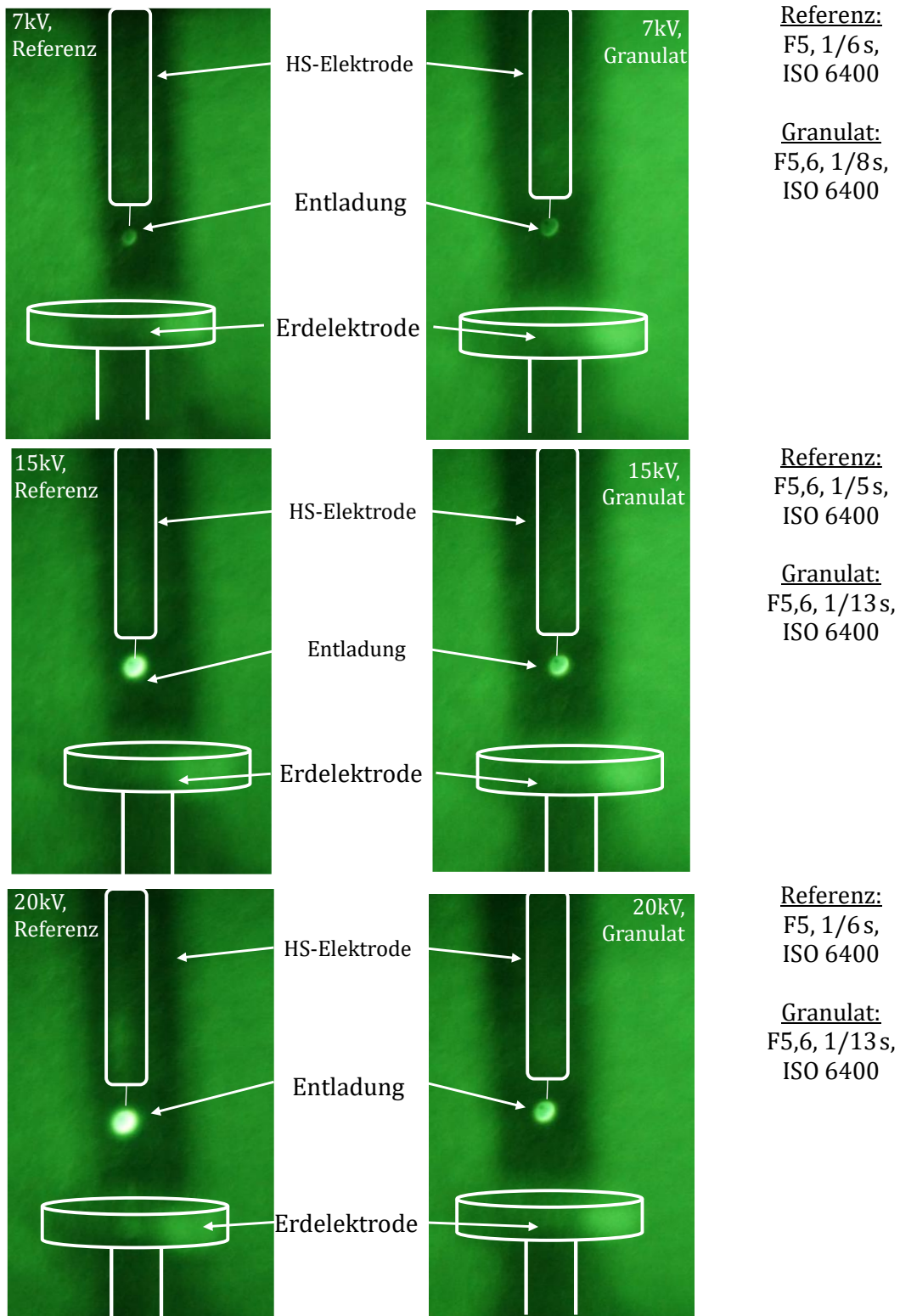


Abbildung D 2: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für positive Polarität; links Referenzmessung, rechts Verschmutzungstest mit Granulat

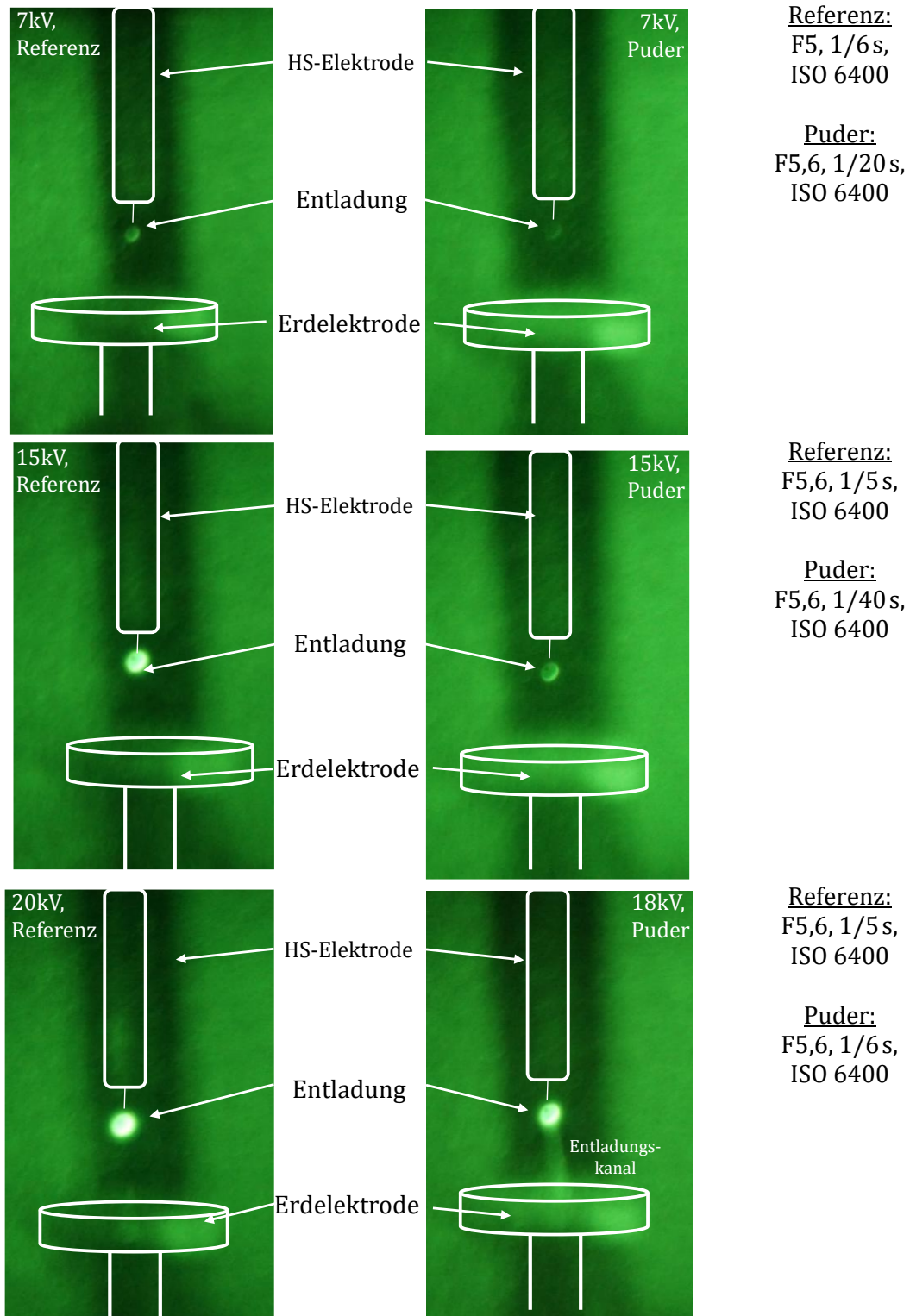


Abbildung D 3: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für positive Polarität; links Referenzmessung, rechts Verschmutzungstest mit Puder

Spitze-Platte-Anordnung: negative Polarität

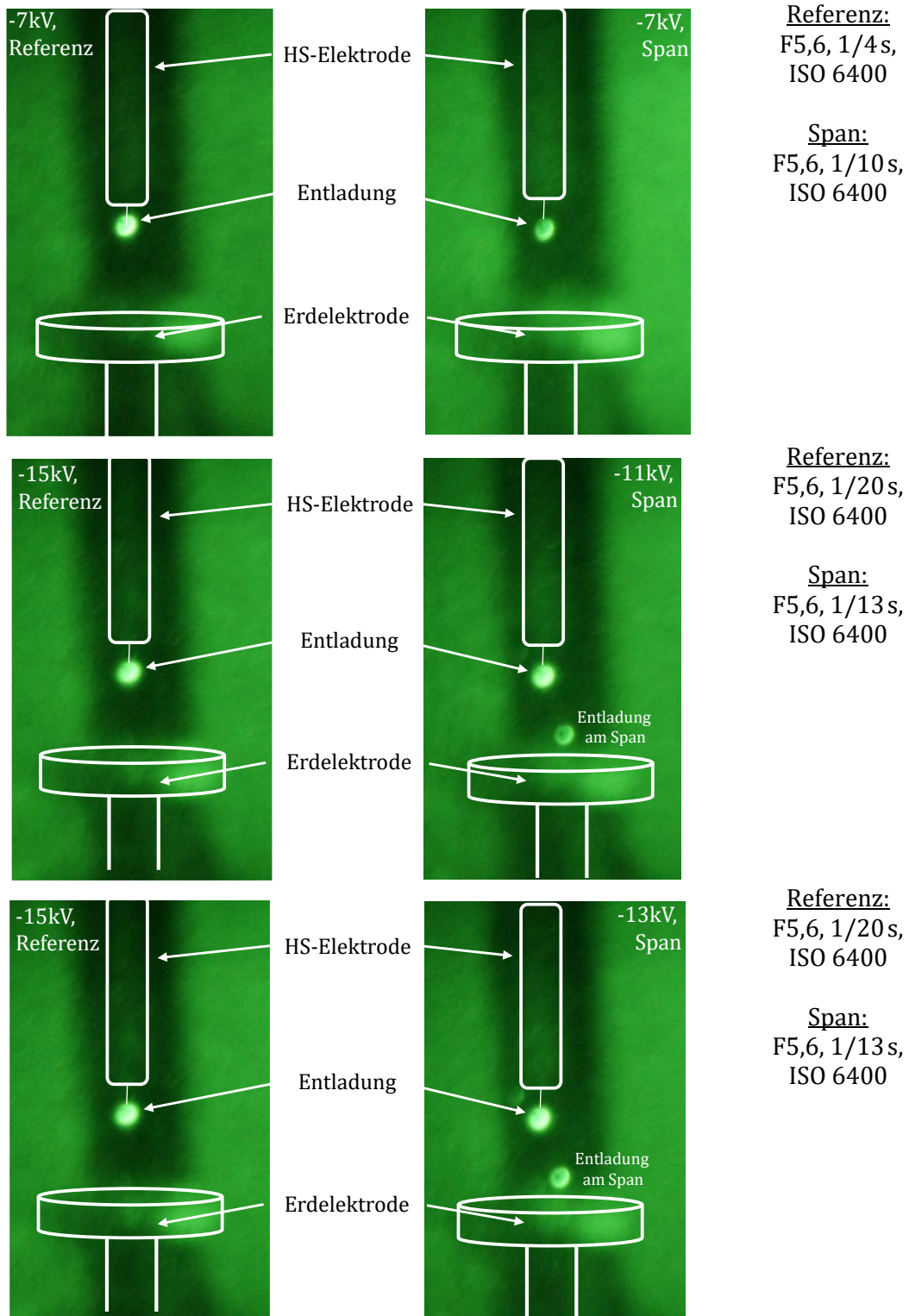
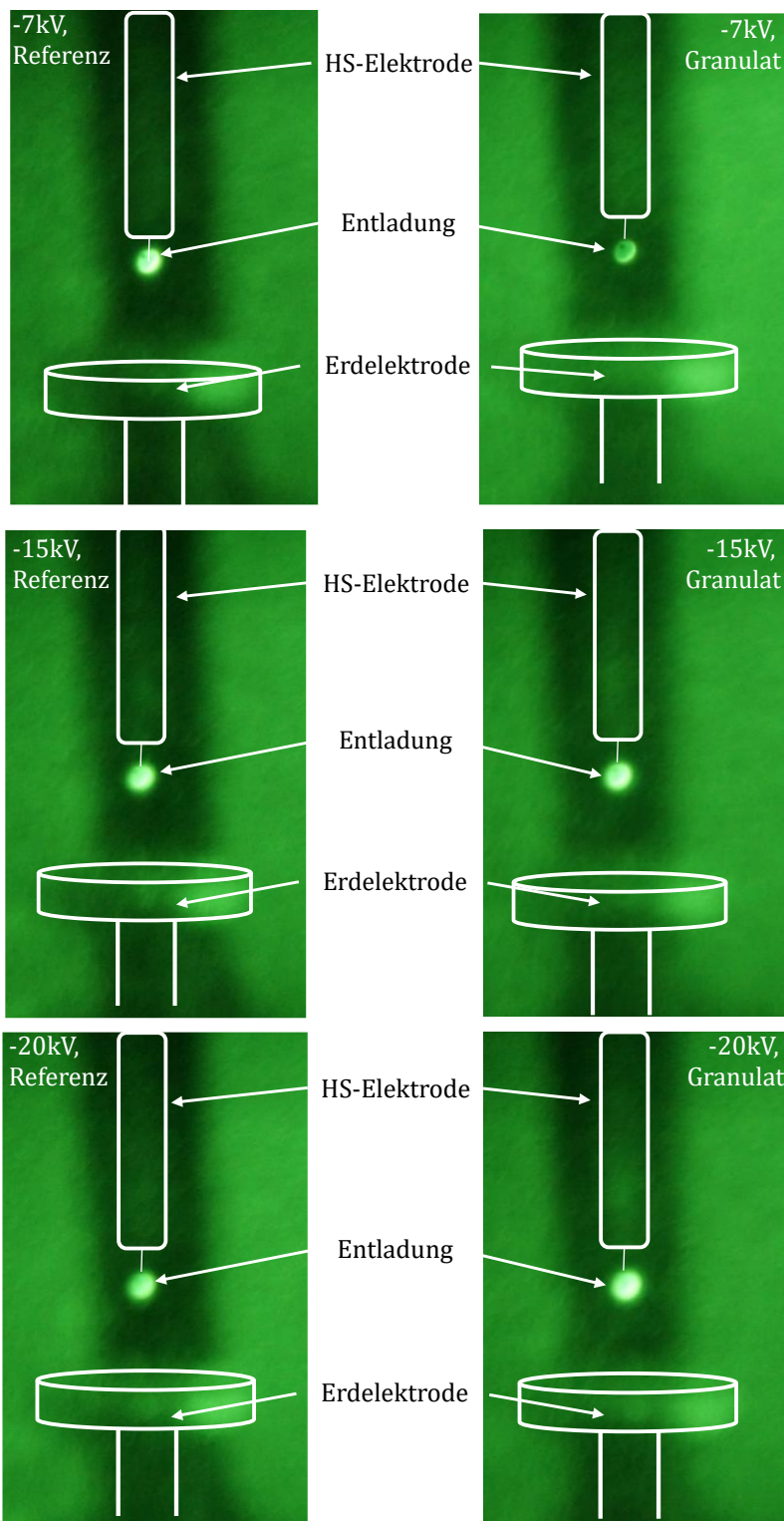


Abbildung D 4: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für negative Polarität; links Referenzmessung, rechts Verschmutzungstest mit Span



Referenz:
F5,6, 1/4 s,
ISO 6400

Granulat:
F5,6, 1/13 s,
ISO 6400

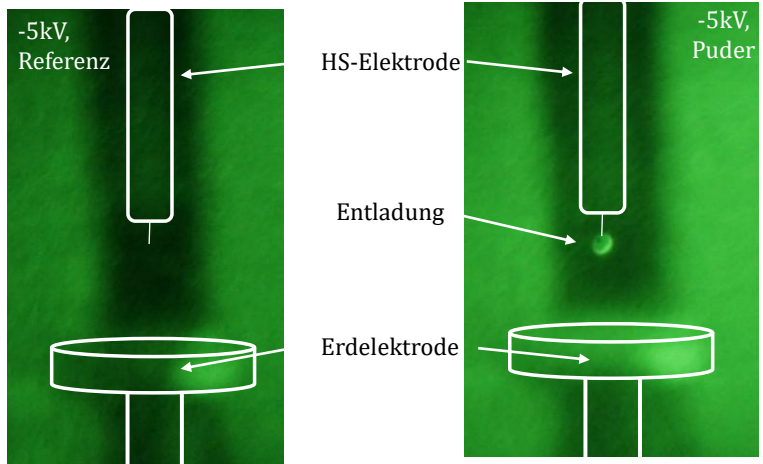
Referenz:
F5, 1/6 s,
ISO 6400

Granulat:
F5,6, 1/13 s,
ISO 6400

Referenz:
F5, 1/6 s,
ISO 6400

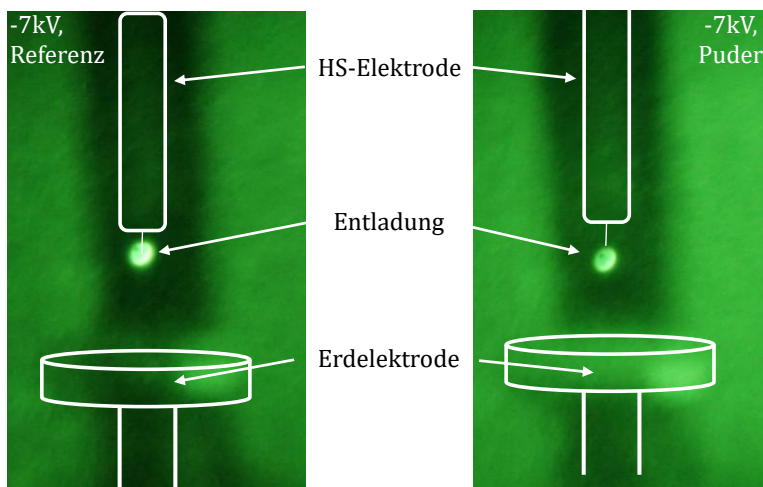
Granulat:
F5,6, 1/13 s,
ISO 6400

Abbildung D 5: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für negative Polarität; links Referenzmessung, rechts Verschmutzungstest mit Granulat



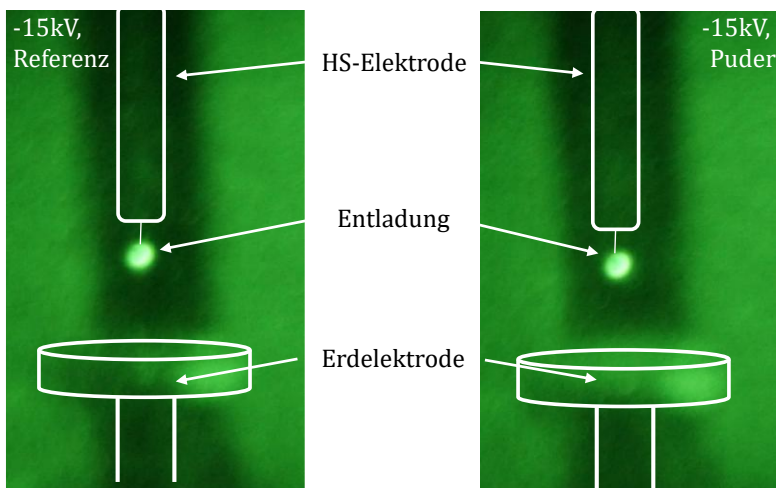
Referenz:
F5,6, 1/3 s,
ISO 6400

Puder:
F5,6, 1/10 s,
ISO 6400



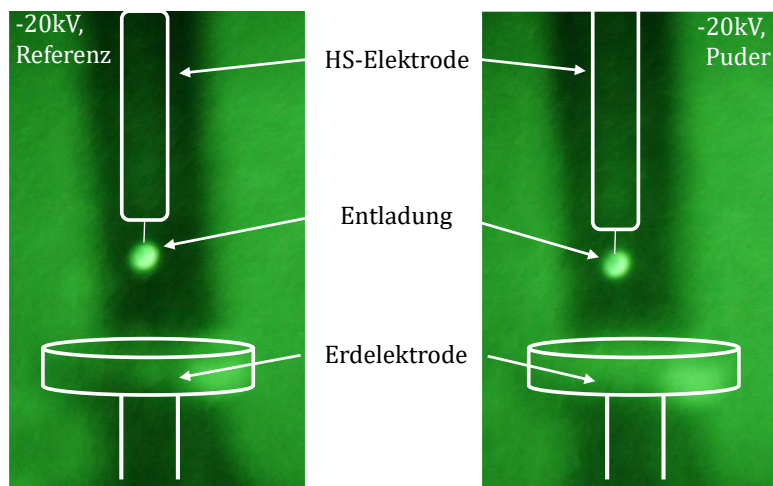
Referenz:
F5,6, 1/4 s,
ISO 6400

Puder:
F5,6, 1/8 s,
ISO 6400



Referenz:
F5, 1/6 s,
ISO 6400

Puder:
F5,6, 1/15 s,
ISO 6400



Referenz:
F5, 1/6 s,
ISO 6400

Puder:
F5,6, 1/30 s,
ISO 6400

Abbildung D 6: Koronoskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für negative Polarität; links Referenzmessung, rechts Verschmutzungstest mit Puder

GIL-Anordnung: Granulat bei positiver Polarität

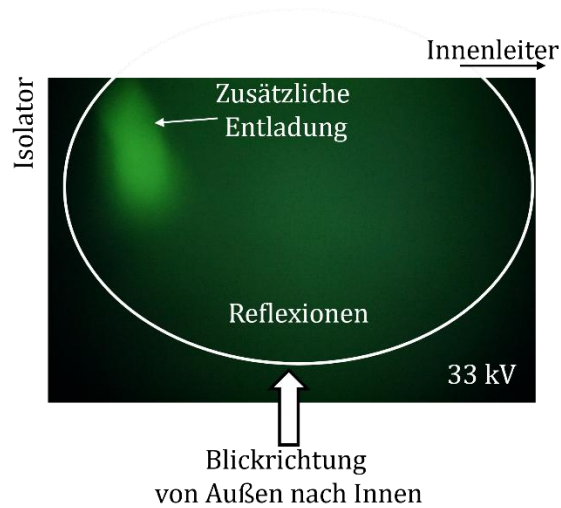


Abbildung D 7: Koronoskop-Aufnahme der GIL-Anordnung mit Granulat für positive Polarität bei 33 kV

Anhang E. Fitting-Daten für das empirische Risikomodel

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Parabel-Fittings²⁵ dargestellt, wobei die Koeffizienten $p_1 \dots p_3$ nach folgender Gleichung den Ionenstrom $I(U)$ berechnen:

$$I(U) = p_1 U^2 + p_2 U + p_3. \quad (73)$$

Die Bewertungsgröße $RMSE$ ist nach [94] mit dem Zielwert Null als optimal definiert und die Ergebnisse in nachstehender Tabelle zeigen, dass das quadratische Parabelfitting einen guten Modellierungsansatz bietet, sodass die Mittelwerte näherungsweise durch die Parabeln abgebildet werden.

Tabelle E 1: Ergebnisse des Parabel-Fittings der GIL

Messreihe	p_1 in $\mu\text{A}/\text{kV}^2$	p_2 in $\mu\text{A}/\text{kV}$	p_3 in μA	$RMSE$
Referenz GIL	0,0175	-0,2983	1,7384	0,0901
Alu-Puder GIL	0,0243	-0,3894	2,3612	0,1782
Cu-Puder GIL	0,0194	-0,3756	2,2915	0,3318
Alu-Granulat GIL	0,0258	-0,263	2,0716	0,1921
Cu-Granulat GIL	0,026	-0,2459	1,928	0,2481
Alu-Span GIL	0,0212	-0,3484	2,0361	0,2713
Fe-Span GIL	0,0163	-0,2693	1,5954	0,0945
Span auf Isolator	0,1961	-4,0508	21,745	0,724
Span auf Isolator mit HV-Kontakt	0,1445	-2,0548	8,0378	1,2775
Granulat auf HV-Elektrode	0,012	-0,2039	1,2677	0,2219
Span auf HV-Elektrode	0,0819	-2,8001	24,24	1,0389
2 Körner	0,0276	-0,5792	3,5207	0,2264
5 Körner	0,0335	-0,6614	4,4783	0,6376
2g Körner	0,0258	-0,263	2,0716	0,1921

²⁵ The MathWorks Inc., *Matlab® Mathematics*, Dokumentation zu R2024b.

Anhang F. Diagnoseergebnisse für typische Fehlerbilder an der GIL-Anordnung

Nach dem Vorbild für die Messreihe „Aluminium-Granulat“ zeigt Tabelle F 1 die absolute Ausfallwahrscheinlichkeit für die weiteren Messreihen an der GIL. Die Werte für die Aspekte basieren auf den Messergebnissen und der Einschätzung bzgl. der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats.

Tabelle F 1: Diagnoseergebnisse nach dem empirischen Modell für die GIL-Anordnung

Messreihe	$A_1 IP_2$	$A_1 IP_3$	$A_2 IP_3$	TFP in %
Al-Puder	0,4	0,4	0	53,33
Cu-Puder	0	0	0	33,33
Cu-Granulat	1	0,8	0	80,00
Al-Span	0,4	0,4	0	53,33
Fe-Span	0	0	0	33,33
Span auf Isolator	1	0	1	83,33
Span auf Isolator & HV-Elektrode	0,4	0	1	63,33
Span auf HV-Elektrode	0,4	0	1	63,33
Granulat auf HV-Elektrode	0	0	0	33,33
2 Körner	0,4	0	0	46,67
5 Körner	0,8	0	0	60,00

Tabelle F 2: Diagnoseergebnisse nach dem empirischen Modell für die GIL-Anordnung (Messreihen mit Isolator-Austausch)

Messreihe	$A_1 IP_2$	$A_1 IP_3$	$A_2 IP_3$	TFP in %
Al-Puder	0,4	0	0	46,67
Al-Granulat	0	0	0	33,33
Al-Späne	1	0,6	0	76,67

Anhang G. Robustheitsstudie der evidenztheoretischen Risikomodelle

Im Folgenden sind die Studien zur Robustheit der beiden evidenztheoretischen Risikomodelle dargestellt. Für das Fehlerdetektionsmodell gilt: Schwankungen der Glaubensfunktion treten auf, wenn die Massezahlen durch verschiedene Nutzer unterschiedlich eingeschätzt werden, was besonders bei nicht eindeutigen Messergebnissen oder fehlender Erfahrung, bzw. Wissenslücken vorkommt. Dies betrifft besonders die Messergebnisse der Ionenstrommessung, da diese für Diagnosen bislang kein weites Anwendungsfeld findet. Deshalb sind für die Robustheitsstudie die Grenzwerte der Massezahlen der Ionenstrommessung für die Szenarien mit den zugehörigen Schnittmengen $Z_{1,5,9}$ zu ermitteln, während die Massezahlen für die Koronaskop-Aufnahmen schrittweise zu variieren sind und somit Einschätzungen des Nutzers widerspiegeln. Für beide Messmethoden gilt dabei die Annahme, dass die Messergebnisse nachvollziehbare Daten liefern, da die Datenerfassung korrekt verlaufen ist. Folglich gilt für die Studie $cs_3 = icm_3 = 0,05$, was die zugrunde liegende Unsicherheit aller Messungen widerspiegelt. Tabelle G 1 zeigt die Studie und für das erste Szenario, „korrekte Datenerfassung aber keine Abweichung“, jeweils den Minimalwert, um die Handlungsempfehlung von $m(Z_1) \geq 0,67$ (voller Abnutzungsvorrat, „keine Handlung notwendig“) zu erreichen. Analog ist die Vorgehensweise für das zweite Szenario, „korrekte Datenerfassung und Eingreifen erforderlich“, mit $m(Z_5) \geq 0,33$ (geschrumpfter Abnutzungsvorrat, vgl. Kapitel 3.2.3). Für Szenario 1 mit der Schnittmenge $Z_1 = [c\bar{d}_{ICM}f\bar{d}_{CS}]$ zeigt die Robustheitsstudie, dass die Massezahlen mit $cs_1 = 0,75$ und $icm_1 = 0,8933$ den Grenzfall des vollen Abnutzungsvorrats abbilden. Für Massezahlen des Koronaskops, die kleiner als 0,75 ausfallen, liefert das Modell nach Gl. (15) keine zulässigen Massezahlen für den Ionenstrom, um auf den vollen Abnutzungsvorrat hinzuweisen. Darüber hinaus stehen die Massezahlen für beide Evidenzquellen mit jeweils $cs_1, icm_1 > 0,8$ für den vollen Abnutzungsvorrat und sind damit für Diagnostiker trotz geringer Vergleichsdaten und Erfahrung in Bezug auf die Ionenstrommessung für Diagnosen wählbar.

Für die Schnittmenge $Z_5 = [cd_{ICM}fd_{CS}]$ mit einem Grenzwert von 0,33 für die Handlungsempfehlung „Eingreifen erforderlich“ sind für beide Evidenzquellen geringere Massezahlen als für Z_1 notwendig. Hier liegt der Grenzfall bei $cs_2 = 0,35$ und $icm_2 = 0,9429$, wobei die Ionenstrommessung eindeutig auf einen Fehler hinweist, während das Koronaskop nicht darauf hinweist. Allerdings zeigt die Studie auch, dass die Ionenstrommessung für die Massezahlen $cs_2 = 0,5$ und $icm_2 = 0,66$ ebenfalls auf „Eingreifen erforderlich“ hinweist, auch

wenn die Massezahlen mit den genannten Werten vergleichsweise gering ausfallen. Damit liefert das Fehlerdetektionsmodell für diesen Fall trotzdem als Ausgabe einen detektierten Fehler. Folglich ist das Fehlerdetektionsmodell für Z_5 ebenfalls robust. Somit weist das Modell auch im Falle, dass die Ionenstrommessung nicht sensitiv genug auf den geschrumpften Abnutzungsvorrat des Isoliergases reagiert, auf ebenjenen Zustand des Abnutzungsvorrats hin. Analog gelten diese Erkenntnisse auch für das Fehlerursachenmodell (vgl. Anhang F). Beide beschriebenen Fälle treten besonders dann auf, wenn die Ionenstrommessung nicht, bzw. nur teilweise signifikant von der Referenzmessung abweicht (vgl. Kapitel 3.2.3).

Tabelle G 1: Robustheitsstudie zum Fehlerdetektionsmodell

Szenario	Massezahlen CS			Massezahlen ICM			Robustheit: Ergebnis
	cs_1	cs_2	cs_3	icm_1	icm_2	icm_3	
Keine Handlung erforderlich	0,8	0,15	0,05	0,8375	0,1125	0,05	Evidenz für keine Fehler nicht eindeutig; Evidenzen weisen auf vollen Abnutzungsvorrat als Grenzfall hin
	0,75	0,2		0,8933	0,0567		
	0,74	0,21		0,9054	-0,955		
	0,7	0,25		0,9571	-0,0071		
	0,5	0,45		>1			
Handlung erforderlich	0,45	0,5	0,05	0,29	0,66	0,05	Evidenzen für Fehler sehr gering, aber Ergebnis weist trotzdem auf geschrumpften Abnutzungsvorrat hin
	0,55	0,4		0,125	0,825		
	0,6	0,35		0,0071	0,9429		
	0,65	0,3		-0,15	1,1		

Analog zur Robustheitsstudie des Fehlerdetektionsmodells gelten die folgenden Annahmen:

- Die Messergebnisse beider Messungen sind nachvollziehbar und zeigen Veränderungen im Vergleich zur Referenz. Es gilt die Annahme, dass die Fehlerursache eindeutig identifizierbar ist. Somit ist $icm_4^{dist} = cs_4^{dist} = 0,05$ für alle Parametervariationen.
- Als Schwellwerte für die Fehlerursachen gelten jeweils $icm_{1,2,3}^{dist} = cs_{1,2}^{dist} \geq 0,33$.
- Puder und Granulat haben für positive Polarität dieselben atomaren Ereignisse. Deshalb sind für positive Polarität ihre Massezahlen stets gleich. Dementsprechend ist die Massezahl der Definition des Basismaßes folgend zu berechnen. Für negative Polarität sind die Massezahlen unterschiedlich, da die atomaren Ereignisse sich unterscheiden. Der Annahme folgend, dass die Fehlerursache eindeutig erkennbar ist, fällt die Massezahl für das jeweils andere Ereignis mit 0,1 niedriger aus.
- Der Annahme folgend, dass die Fehlerursache eindeutig erkennbar ist, gilt für die Massezahlen der Späne, dass sie für Granulat & Puder jeweils gleich sind.

Darauf aufbauend variieren die Massezahlen der Koronaskop-Aufnahmen pro Ereignis, während für die Ionenstrommessung der untere Grenzwert zur Erfüllung von $Bel_{ICM} \oplus Bel_{CS}([Fehlerursache]) \geq 0,33$ gesucht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell die jeweiligen Fehlerursachen anzeigt, auch wenn die Massezahlen der Ionenstrommessung

vergleichsweise gering sind. Die Ursache hierfür ist die Akkumulation durch die Berechnung der Glaubensfunktion für den jeweiligen Fehler.

Tabelle G 2: Massezahlen des Koronaskops für die Robustheitsstudie des Fehlerursachenmodells

Szenario	Massezahlen-Triplet Koronaskop			
	cs_1^{dist}	cs_2^{dist}	cs_3^{dist}	cs_4^{dist}
Späne	0,5	0,45		0,05
	0,4	0,55		
	0,35	0,3		
	0,3	0,65		
Granulat / Puder (+)	0,05	0,9		0,05
	0,15	0,8		
	0,25	0,7		
	0,35	0,6		
Puder ²⁶ (-)	0,05	0,4	0,5	0,05
	0,25	0,3	0,4	
	0,35	0,25	0,35	
	0,45	0,2	0,3	

Tabelle G 3: Robustheitsstudie des Fehlerursachenmodells

Sze- nario	Massezahlen-Triplet Ionenstrommessung				Robustheit: Ergebnis
	icm_1^{dist}	icm_2^{dist}	icm_3^{dist}	icm_4^{dist}	
Späne	0,66	0,29		0,05	Evidenz für Späne nicht eindeutig, aber Ergebnis weist trotzdem auf Ereignis hin *: unzulässiges Ergebnis nach Definition des Basismaßes
	0,825	0,125			
	0,943	0,007			
	1,1*	-0,15*			
Granulat / Puder (+)	0,583	0,367		0,05	Evidenzen für Puder / Granulat (+) einzeln betrachtet sehr gering, aber Ergebnis weist trotzdem auf Ursache hin
	0,5375	0,4125			
	0,4786	0,4714			
	0,4	0,55			
Puder ²⁷ (-)	0,5789	0,2063	0,165	0,05	Evidenzen für Puder / Granulat (-) einzeln betrachtet sehr gering, aber Ergebnis weist trotzdem auf Ursache aufgrund der Akkumulation nach Definition der Glaubensfunktion hin
	0,4688	0,275	0,2063		
	0,3843	0,33	0,2357		
	0,2625	0,4125	0,275		

²⁶ Durch den Tausch von cs_2^{dist} und cs_3^{dist} sind die Ergebnisse für icm_2^{dist} und icm_3^{dist} ebenfalls zu tauschen, um die Ergebnisse für Granulat (-) zu erhalten.

²⁷ Vgl. Fußnote 26.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: TE-Messkreis nach [9].....	5
Abbildung 1-2: Abbaukurve und Beurteilungsstufen des Abnutzungsvorrats nach [21], [26] und Einordnung der Diagnosemethodenbeispiele	6
Abbildung 1-3: Häufige Ursachen für dielektrisches Isolationsversagen nach [6], [25], [28].....	7
Abbildung 1-4: Schematische Darstellung der Partikelorte in einer GIL in Anlehnung an [8].....	9
Abbildung 1-5: Schematische Darstellung der Partikel im SMD-basierten RC-Spannungsteiler nach [Ve01]	10
Abbildung 1-6: Veranschaulichung des Shockley-Ramo-Theorems in Anlehnung an [41]	11
Abbildung 1-7: Messung eines Ionenstroms unter einer HGÜ-Freileitung nach [17].....	12
Abbildung 1-8: Entstehung des Ionenstroms unter Berücksichtigung des Entladungsmechanismus.....	13
Abbildung 1-9: Darstellung von Glaubens- und Plausibilitätsgrad nach [15]	18
Abbildung 2-1: Ersatzschaltbild der Ionenstrommessung für Diagnosen nach Vorbild der TE-Messung nach Norm [9]	23
Abbildung 2-2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der Ionenstrommessung im sicheren Betrieb und geglätteter Gleichspannung.....	23
Abbildung 2-3: Ablaufdiagramm zur Durchführung der Ionenstrommessung zu Diagnosezwecken bei DC im Labor	26
Abbildung 2-4: Übersicht Aufbau Klimakammer	27
Abbildung 2-5: Koaxialaufbau	28
Abbildung 2-6: Fotos der dargestellten Verschmutzungsmaterialien auf Millimeterpapier (jeweils v.l.n.r. unter Angabe der Durchmesser)	30
Abbildung 2-7: Laboraufbau mit Spannungsteiler.....	32
Abbildung 2-8: Spitze-Platte-Anordnung zur Ionenstrommessung.....	33
Abbildung 2-9: Kenngrößen zur Beschreibung des Abnutzungsvorrats an einer generischen Ionenstromkurve	33
Abbildung 3-1: Übersicht der Risikomodelle mit Resultaten.....	39
Abbildung 3-2: Vereinfachte Risikomatrix nach [6] zur Anwendung in beiden Risikomodellen	40
Abbildung 3-3: Ablaufdiagramm zur Anwendung der evidenztheoretischen Modelle.....	44
Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen Teilentladungen, Ionenströmen und Koronaskop-Aufnahmen	45
Abbildung 3-5: Ablaufdiagramm zur Anwendung des Fehlerdetektionsmodells	49

Abbildung 3-6: Inhalte der Plausibilitätsprüfung der Evidenzquellen a) einer schematischen Ionenstrommessung b) schematischer Koronaskop-Aufnahmen für eine Spitze-Platte-Anordnung.....	50
Abbildung 3-7: Veranschaulichung der Abweichungen der Evidenzquellen für a) die Ionenstrommessung und b) die Koronaskop-Aufnahmen.....	50
Abbildung 3-8: Ablaufdigramm zur Anwendung des Fehlerursachenmodells.....	59
Abbildung 3-9: Schematisches Messergebnis einer Ionenstrommessung.....	60
Abbildung 3-10: Schematische Aufnahme eines Koronaskops	62
Abbildung 3-11: Messergebnisse der Ionenstrommessung.....	64
Abbildung 3-12: Koronaskop-Aufnahmen der Spitze-Platte-Anordnung für positive Polarität	65
Abbildung 4-1: Detektionsbereich der Ionenstrommessung bezogen auf Entladungsphänomene	74
Abbildung 4-2: Bewertungsaufwand durch die empirische und evidenztheoretische Datenauswertung	76
Abbildung 4-3: Verifikation der Messergebnisse an der Spitze-Platte-Anordnung; links: Beträge für Ströme und Spannungen aus [91]; rechts: Referenzmessung negativer Polarität ($s = 2,5 \text{ cm}$)	80
Abbildung 4-4: Referenzdaten der Ionenstrommessungen (Koaxialaufbau, 22°C , 50 % r. F.) aus der vorliegenden Arbeit (Laborluft) und [43] (Stickstoff)	81
Abbildung 5-1: Ionenstrom unter Einfluss mobiler Partikel bei positiver Polarität.....	86
Abbildung 5-2: Ablagerungsorte des Aluminiumpuders nach der Ionenstrommessung (Messung mit Isolator-Austausch)	88
Abbildung 5-3: Ionenstrom unter Einfluss unterschiedlicher Granulatmassen	89
Abbildung 5-4: Ionenstrom unter Einfluss fixierter Partikel	90
Abbildung 5-5: Ionenstrom unter Einfluss unterschiedlicher Spanpositionen.....	91
Abbildung 5-6: Einfluss des Abnutzungsvorrats der GIL für die Ionenstrommessung bei positiver Polarität; 1: Messungen mit Originalisolator; 2: Messungen mit Austausch-Isolator.....	92
Abbildung 5-7: Ionenströme für verschiedene Fehlerbilder am RC-Spannungsteiler bei positiver Polarität	94
Abbildung 5-8: Shockley-Ramo-Theorem für GIL mit Partikel	96
Abbildung 6-1: Referenz und der Messreihe „Aluminium-Granulat“ mit zugehörigem Parabelfitting.....	100
Abbildung 6-2: Absolute Ausfallwahrscheinlichkeit der GIL für verschiedene Verschmutzungen	101
Abbildung 6-3: Risikomatrix des empirischen Modells für die GIL.....	102

Abbildung 7-1: Ionenstrommessungen für die evidenztheoretischen Risikomodelle	105
Abbildung 7-2: Koronaskop-Aufnahmen für die GIL-Reproduktionsmessung.....	106
Abbildung 7-3: Risikomatrix der evidenztheoretischen Modelle für die GIL.....	111
Abbildung 7-4: Detektionsumfang und-tiefe der Ionenstrommessung mit evidenztheoretischer Datenauswertung an der Spitze-Platte-Anordnung.....	112
Abbildung 7-5: Vergleich der synthetischen Ionenstromleistung zur Einzelbetrachtung der Koeffizienten.....	117
Abbildung 7-6: Risikomatrizen der unterschiedlichen Risikomodellierungen	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Auswahlkriterien (*) und Idealwert (kursiv) für geeignete Diagnoseverfahren zur Anwendung im Feld nach [21]	4
Tabelle 1-2: Beispiele bekannter Diagnoseverfahren zur Untersuchung der dielektrischen Festigkeit aus [21]	4
Tabelle 1-3: Übersicht TE-Aktivität beeinflussender Materialeigenschaften nach [29]	8
Tabelle 1-4: Empirische Konstanten der Peek-Formel nach Whitehead [45]	14
Tabelle 2-1: Übersicht technischer Spezifikationen zur Durchführung der Ionenstrommessung in der vorliegenden Arbeit	24
Tabelle 2-2: Einflussfaktoren auf die Ionenstrommessung	26
Tabelle 2-3: Übersicht der Verschmutzungsmaterialien und -arten der GIL-Versuche	29
Tabelle 2-4: Übersicht der Abhebefeldstärken für Aluminium- und Kupferpartikel und Differenz zur simulierten Feldstärke an Erdelektrode (Referenz) bei maximaler Prüfspannung von 33,5 kV	31
Tabelle 2-5: Übersicht der Verschmutzungs- und Fehlertests der Spannungsteiler-Versuche ..	32
Tabelle 3-1: Einflussparameter und Aspekte zur Risikomodellierung basierend auf der Ionenstrommessung für eine GIL	41
Tabelle 3-2: Zuordnung der absoluten Ausfallwahrscheinlichkeit zu Abnutzungsvorrat und Handlungsempfehlung	42
Tabelle 3-3: Grenzwerte der Aspekte für Ablagerungen auf Komponenten	42
Tabelle 3-4: Szenarien und Teilereignisse im Fehlerdetektionsmodell	47
Tabelle 3-5: Fokale Mengen des Fehlerdetektionsmodells	47
Tabelle 3-6: Kombination der Evidenzen (Ionenstrommessung & Koronaskop)	48
Tabelle 3-7: Verbindung zwischen Diagnosemessungen und Fehlerursachenbestimmung	54
Tabelle 3-8: Fokale Mengen des Fehlerursachenmodells	55
Tabelle 3-9: Schnittmengen des Fehlerursachenmodells	57
Tabelle 3-10: Zuordnung der Fehlerursachen zu Schnittmengen des Fehlerursachenmodells ..	57
Tabelle 3-11: Ereignisse und Massezahlen eines fiktiven Beispiels	62
Tabelle 3-12: Ereignisse der Messreihen beider Polaritäten für beide Modelle	65
Tabelle 3-13: Massezahlen pro Messreihe für das Fehlerdetektionsmodell	66
Tabelle 3-14: Modellergebnisse für das Fehlerdetektionsmodell	66
Tabelle 3-15: Allgemeine Handlungsempfehlungen für Kombinationsergebnisse des Fehlerdetektionsmodells	67

Tabelle 3-16: Handlungsempfehlungen des Fehlerdetektionsmodells für alle Messreihen	67
Tabelle 3-17: Massezahlen pro Messreihe für das Modell zur Fehlerursachensuche.....	68
Tabelle 3-18: Modellergebnisse für das Fehlerursachenmodell.....	69
Tabelle 4-1: Übersicht – Ionenstrommessung zur Diagnose nach allgemeinen Kriterien aus [21]	71
Tabelle 4-2: Bewertung der Kenngrößen des Abnutzungsvorrats	77
Tabelle 4-3: Vergleichsdaten der Koaxialanordnungen zur Plausibilisierung der Ionenströme	81
Tabelle 4-4: Vergleich der Ionenstrommessung für Diagnosen zum Idealprofil für Diagnosemethoden und UHF-Messung nach [21].....	82
Tabelle 4-5: Vergleich der Ionenstrommessung und UHF-Methode nach [21]	82
Tabelle 6-1: Ergebnisübersicht der Diagnosekenngrößen für positive Polarität	100
Tabelle 6-2: Diagnose für die Messreihe „Al-Granulat“	101
Tabelle 6-3: Vergleich des empirisch ermittelten Risikos der GIL für Aluminium-Granulat mit CIGRÉ-Daten für mobile Partikel aus [6]	102
Tabelle 7-1: Fehlerdetektionsmodell für Reproduktionsdaten der GIL	107
Tabelle 7-2: Kombinationsergebnis der GIL-Messdaten im Fehlerdetektionsmodell	107
Tabelle 7-3: Handlungsempfehlungen des Fehlerdetektionsmodells für die Reproduktionsmessung	108
Tabelle 7-4: Fehlerursachenmodell für Reproduktionsdaten der GIL	109
Tabelle 7-5: Kombinationsergebnis der GIL-Messdaten im Fehlerursachenmodell.....	109
Tabelle 7-6: Vergleich der Risikomodelle.....	114

Literaturverzeichnis, Publikationen und studentische Arbeiten

Das abgebildete Literaturverzeichnis umfasst sowohl die in der vorliegenden Dissertation verwendeten Werke sowie ein gesondertes Verzeichnis für eigene Publikationen, in denen die in der Arbeit verwendeten Referenzen mit dem zugehörigen Kürzel gekennzeichnet sind, sowie betreute studentische Arbeiten.

Literaturverzeichnis

- [1] V. Gustedt, B. Greve, C. Brehm und C. Halici, "Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023: Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber," 2023.
- [2] Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates der Bundesrepublik Deutschland, *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien: EEG 2023*, 2014.
- [3] K. Burges, M. Döring, C. Hussy, J.-M. Rhiemeier, C. Franck und M. Rabie, "Konzept zur SF6-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie: Abschlussarbeit," Feb. 2023.
- [4] UNITED NATIONS, "Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change," 2303 U.N.T.S., Dez. 1997.
- [5] Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, L-2985 Luxemburg, "Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Februar 2024 über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014,"
- [6] WG D1.03, "Technical Brochure 525: Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics," Feb. 2013.
- [7] WG D1.66, "Technical Brochure 933: Requirements and application of UHF PD monitoring systems for gas insulated systems," Mai. 2024.
- [8] JWG D1 / B3.57, "Technical Brochure 842: Dielectric Testing of gasinsulated HVDC Systems," Sep. 2021.
- [9] *Hochspannungs-Prüftechnik: Ladungsbasierte Messung von Teilentladungen*, 60270, DIN EN IEC, Feb. 2023.
- [10] G. C. Stone, A. Cavallini, G. Behrmann und C. Serafino, *Practical partial discharge measurement on electrical equipment*. Hoboken New Jersey: Wiley, 2023.
- [11] WG D1.03, "Technical Brochure 506: Gas Insulated System for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems," 2012.

- [12] M. Bennett, N. Dhaliwal und L. Crowe, "Reliability and Availability of HVDC Systems," in *High Voltage DC Transmission Systems* (CIGRÉ Green Books), B. R. Andersen und S. L. Nilsson, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 1–24.
- [13] A. Pirker, "Messung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung zur Identifikation von Defekten gasisolierter Systeme," Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik, TU Graz, Graz, 2020.
- [14] S. Okabe, "Phenomena and mechanism of electric charges on spacers in gas insulated switchgears," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 14, Nr. 1, S. 46–52, 2007, doi: 10.1109/TDEI.2007.302871.
- [15] W. Feilhauer, "Ein Verfahren zur Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel," Dissertation, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung, Universität Dortmund, Dortmund, 2005.
- [16] H. Miao, R. Ni, K. Liu und L. He, "A D-S evidence theory fault diagnosis method based on MapReduce for SF6 high voltage switchgear: October 27-30, 2017, Chengdu, China," *2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, S. 1817–1821, 2017. doi: 10.1109/ICCT.2017.8359944. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8356864>
- [17] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, *IEEE guide for the measurement of DC electric-field strength and ion related quantities*. New York, N.Y., USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1990. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=2245>
- [18] A. Küchler, *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [19] *Isolationskoordination: Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen*, 60071-1 (VDE 0111-1), DIN EN IEC, Okt. 2022.
- [20] *High-voltage switchgear and controlgear: Part 318: DC gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages including and above 100 kV*, 62271-318, IEC, Feb. 2024 (zur Abstimmung).
- [21] T. Tabke, "Entwicklung und Anwendung eines typunabhängigen, minimalinvasiven Zustandsbewertungsverfahrens für SF6-Hochspannungsschaltanlagen," Dissertation, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2017.
- [22] B. Woelke, M. Monedero, D. Jebamony, "Application of novel sensor technology in an environmental friendly SF6 free medium voltage gas insulated switchgear pilot setup," *VDE-Hochspannungstechnik 2018*, 2018.

- [23] WG D1, "Technical Brochure 849: Electric performance of non-SF₆ gases and gas mixtures for gas-insulated systems," 2021.
- [24] B. Habib, O. A. Zaabi, N. Harid, K. A. Hosani und M. Alkhatib, "Condition Monitoring based on Partial Discharge Diagnostics using UHF Sensors: A Comprehensive State-of-the-Art Review," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, S. 1, 2024, doi: 10.1109/TDEI.2024.3409517.
- [25] H. Koch, Hg. *Gas insulated substations*. Chichester West Sussex United Kingdom: IEEE Press Wiley, 2014.
- [26] *Grundlagen der Instandhaltung*, 31051, DIN EN, Berlin, Jun. 2019.
- [27] *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung*, 133306, DIN EN, Berlin, Feb. 2018.
- [28] JWG 33/23.12, "Insulation Co-ordination of GIS: Return of Experience, On Site Tests and Diagnostics Techniques," *Électra*, Jg. 1998, Nr. 176, Feb. 1998.
- [29] T. Berg, "Leitfähige Partikel im koaxialen Rohrleiter unter Gleichspannungsbeanspruchung," Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Graz, 2014.
- [30] T. Berg, T. Fedtke, M. Aksoy, M. Kieper und A. Rose-Pötzsch, "Partikelfallensystem für eine gasisolierte Anlage und gasisolierte Anlage mit Partikelfallensystem," EP 3 528 357 A1, 18156885.8, Aug 21, 2019.
- [31] T. Berg, T. Fedtke, M. Kieper und A. Rose-Pötzsch, "Partikelfalle für eine gasisolierte Anlage und gasisolierte Anlage mit Partikelfalle," WO 201/055020 A1, EP 2016070944W·2016-09-06, Apr 6, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/056940013/publication/WO2017055020A1?q=WO%202017%2F055020>
- [32] Y. Chang, Z. Liu, Q. Li, N. Xue, J. Wang und M. Hadad, "Capture Mechanism and Optimal Design of Micro-Particle Traps in HVAC/HVDC Gas Insulated Equipment," *IEEE Trans. Power Delivery*, Jg. 37, Nr. 6, S. 4700–4710, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3155641.
- [33] WG D1-103, "Insulation Characteristics in DC-GIS: Surface charge phenomena on epoxy spacer and metallic particle motions," 2018.
- [34] S.M. Neuhold *et al.*, "Return of Experience: The CIGRE UHF PD sensitivity verification and on-site detection of critical defects," 2018.
- [35] C. Li *et al.*, "Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 25, Nr. 4, S. 1152–1166, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007004.
- [36] B. Qi *et al.*, "Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 18, Nr. 3, S. 792–800, 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.5931067.

- [37] T. Berg, H. Koch und K. Juhre, "Free Moving Particles in Gas-Insulated Lines Under DC Conditions – Basic Properties, Specific Effects and Countermeasures," in *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering (Lecture Notes in Electrical Engineering)*, B. Németh, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 1489–1499.
- [38] K. Sakai, D. Labrado Abella, Y. Khan, J. Suehiro und M. Hara, "Experimental studies of free conducting wire particle behavior between non-parallel plane electrodes with ac voltages in air," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 10, Nr. 3, S. 418–424, 2003, doi: 10.1109/TDEI.2003.1207467.
- [39] C. M. Cooke, R. E. Wootton und A. H. Cookson, "Influence of particles on AC and DC electrical performance of gas insulated systems at extra-high-voltage," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, Jg. 96, Nr. 3, S. 768–777, 1977, doi: 10.1109/T-PAS.1977.32390.
- [40] P. Simka und M. Seeger, "Electric Field Lift-off and Motion of Particles in Gaseous Insulation," *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, 2013, Art. Nr. OD3-06.
- [41] P. S. Maruvada und S. Bisnath, *Corona in transmission systems: Theory, design and performance* (Eskom power series vol. 7). Johannesburg: Crown Publications, 2011.
- [42] JWG B4/C3/B2.50, *Technical Borchure 473: Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Overhead Transmission Lines*, 2011. Aufl. (Technical brochure / CIGRE 473). CIGRÉ: CIGRE, 2011.
- [43] J. Kortenbrede, "Methode zur Einflussbewertung des Luftdrucks auf den Ionenstrom an einer Gleichspannungsleitung," Dissertation, Lehrstuhl für Hochspannungstechnik, TU Dortmund, Dortmund, 2020.
- [44] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller und W. Zaengl, *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen [für die Anwendung]*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1986.
- [45] J. B. Whitehead, "The High Voltage Corona in Air," *Proceedings of the American Philosophical Society*, Jg. Jul.-Aug. 1911, Vol. 50, No. 200, S. 374–396, 1911.
- [46] F. W. Peek, "The Law of Corona and the Dielectric Strength of Air-IV The Mechanism of Corona Formation and Loss," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, Jg. XLVI, S. 1009–1024, 1927, doi: 10.1109/T-AIEE.1927.5061442.
- [47] W. Mathis und A. Reibiger, *Küpfmüller Theoretische Elektrotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

- [48] F. P. Grosu, A. M. Bologa, H.-R. Paur, M. K. Bologa und O. V. Motorin, "Generalization of the Townsend current-voltage characteristics of a corona discharge," *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, Jg. 50, Nr. 4, S. 306–310, 2014, doi: 10.3103/S1068375514040085.
- [49] E. Hering, J. Triemel und H.-P. Blank, *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, 5. Aufl. (Engineering online library). Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [50] L. Papula, *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler - Anwendungsbeispiele*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [51] WG A3.43, *Technical Brochure 953. Tools for lifecycle management of T&D switchgear based on data from condition monitoring systems*, 1. Aufl. CIGRÉ, 2025.
- [52] V. Lohweg, K. Voth, S. Glock, "A Possibilistic Framework for Sensor Fusion with Monitoring of Sensor Reliability," *World Conference on Soft Computing*, 2011.
- [53] G. Shafer, *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.
- [54] A.P. Dempster, *Upper and Lower Probabilities induced by a multi-valued mapping* (Annals of Mathematical Statistics 38: 325-339), 1967.
- [55] C. Beierle und G. Kern-Isberner, *Methoden wissensbasierter Systeme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [56] G. Balzer und C. Schorn, *Asset Management for Infrastructure Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [57] V. Lohweg und U. Monks, "Sensor fusion by two-layer conflict solving," S. 370–375.
- [58] S. Glock, K. Voth, J. Schaede und V. Lohweg, "A Framework for Possibilistic Multi-source Data Fusion with Monitoring of Sensor Reliability," *World Conference on Soft Computing*, Jg. 2011.
- [59] X. Fan und M. J. Zuo, "Fault diagnosis of machines based on D–S evidence theory. Part 1: D–S evidence theory and its improvement," *Pattern Recognition Letters*, Jg. 27, Nr. 5, S. 366–376, 2006, doi: 10.1016/j.patrec.2005.08.025.
- [60] X. Fan und M. J. Zuo, "Fault diagnosis of machines based on D–S evidence theory. Part 2: Application of the improved D-S evidence theory in gearbox fault diagnosis," *Pattern Recognition Letters*, Jg. 27, Nr. 5, S. 366–376, 2005.
- [61] Institute of Electrical and Electronics Engineers und IEEE Power & Energy Society, *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC): November 8-10, 2017, IEEE PES Bangalore Chapter*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8303184>
- [62] M. Demirci, M. Saka, H. Gozde, M. Dursun und M. C. Taplamacioglu, "Dempster Shafer Evidence Theory Application for Fault Diagnosis of Power Transformers," in *2022 9th*

- International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, Alanya, Turkey, 2022, S. 40–44, doi: 10.1109/ICEEE55327.2022.9772608.
- [63] L. H. Min und C. S. Chang, "Application of Dempster-Shafer's theory of evidence for transformer incipient fault diagnosis," S. 324, doi: 10.1049/cp.2009.1844.
- [64] Y. Zhang, F. Gao, J. Li, X. Feng, X. Song und C. Li, "Risk assessment for distribution transformer burning-out based on D-S evidence theory," in *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Changsha, China, 2015, S. 1498–1503, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432483.
- [65] S. Fan *et al.*, "Mechanical Condition Assessment of High Voltage Circuit Breakers Based on Improved Dempster-Shafer Theory," in *2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, Kitakyushu, Japan, 2019, S. 603–606, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928754.
- [66] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2017 17th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT 2017): October 27-30, 2017, Chengdu, China*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8356864>
- [67] S. Ma, Y. Yuan, J. Wu, Y. Jiang, B. Jia und W. Li, "Multisensor Decision Approach for HVCB Fault Detection Based on the Vibration Information," *IEEE Sensors J.*, Jg. 21, Nr. 2, S. 985–994, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.2980081.
- [68] Rui L. und V. Lohweg, "A Novel Data Fusion Approach using Two-Layer Conflict Solving," *2008 IAPR Workshop on Cognitive Information Processing*, 2008.
- [69] T. Kari, W.-S. Gao, Y.-Q. Liu, Y.-Q. Chen und H. Li, "Condition assessment of power transformer using fuzzy and evidential theory," in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Xi'an, China, 2016, S. 28–31, doi: 10.1109/CMD.2016.7757759.
- [70] WG D1.25, *UHF partial discharge detection system for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification* (Technical brochure / CIGRÉ 654). Paris, France: CIGRÉ, 2016.
- [71] J. Lange und T. Lange, *Mathematische Grundlagen der Digitalisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [72] *Betrieb von elektrischen Anlagen*, 0105-100, DIN EN, Berlin, Okt. 2015.
- [73] M. Comber und G. Johnson, "HVDC Field and Ion Effects Research at Project UHV: Results of Electric Field and Ion Current Measurements," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, Jg. PAS-101, Nr. 7, S. 1998–2006, 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317447.

- [74] S. Liu, S. Li, Y. Jiang, N. Jiang, J. Li und Y. Wu, "Study on influencing factors of ion current density measurement in corona discharge of HVDC transmission lines," *Plasma Sci. Technol.*, Jg. 22, Nr. 4, S. 44001, 2020, doi: 10.1088/2058-6272/ab571e.
- [75] WG B2.62, "Technical Brochure 831: Compact DC overhead lines," Jg. 2021, Mrz. 2021.
- [76] D. Govender, "A Study Of The Electrical Environment Below HVDC Transmission Lines," Masterarbeit, University of Kwazulu-Natal, Südafrika, 2008.
- [77] C. Fang, X. Cui, X. Zhou, T. Lu, Y. Zhen und X. Li, "Impact Factors in Measurements of Ion-Current Density Produced by High-Voltage DC Wire's Corona," *IEEE Trans. Power Delivery*, Jg. 28, Nr. 3, S. 1414–1422, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2252203.
- [78] G. Ismayel, K. Sairam, V. Sunil Kumar, P. S V N Sudhakar, "Comparative Studies on Different Laboratory Investigations of Ionic Current environment of HVDC lines," *International Journal of Advanced Science and Technology*, Nr. 29, S. 10357–10364, 2020.
- [79] Y. Yi, C. Zhang, L. Wang und Z. Chen, "Conductor Surface Conditions Effects on the Ion-Flow Field of Long-Term Operating Conductors of the HVDC Transmission Line," *IEEE Trans. Power Delivery*, Jg. 32, Nr. 5, S. 2171–2178, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2503361.
- [80] M. Tschentscher und C. M. Franck, "Conduction processes in gas-insulated HVDC equipment: from saturated ion currents to micro-discharges," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 25, Nr. 4, S. 1167–1176, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007171.
- [81] P. S. Maruvada, "Influence of Wind on the Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, Jg. 29, Nr. 6, S. 2561–2569, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2302373.
- [82] E. Schrüfer, L. M. Reindl und B. Zagar, *Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen*, 13. Aufl. (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2022.
- [83] *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen: Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe*, 5725-1, DIN EN, Nov. 1997. [Online]. Verfügbar unter: <https://nautos.de/I9W/search/item-detail/DE19006755>
- [84] J. Wellnitz und M. Gluschke, "Leitlinie zur Methodvalidierung," *Qualitätssicherungsstelle im Bund/Länder-Messprogramm Nord- und Ostsee (BLMP)*, 2005.
- [85] D. Peier, *Einführung in die elektrische Energietechnik (ELTEX)*. Heidelberg: Hüthig, 1987.
- [86] R. Schmerling, M. Freiburg, F. Jenau, T. Weissgerber und F. Pohlmann, "Development and Application of a Climate Chamber for Testing Large Dimensioned High Voltage Components up to 100kV," *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, 2013.

- [87] C. Kammer, *Aluminium Taschenbuch 3: Weiterverarbeitung und Anwendung*, 17. Aufl. (Beuth Praxis). Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [88] N. N. Greenwood und A. Earnshaw, *Chemie der Elemente*, 1. Aufl. Weinheim: VCH, 1990.
- [89] P. Albrecht, *Einstieg in die digitale Fotografie*. Burgthann: Markt+Technik, 2018.
- [90] S. W. Hasinoff, "Photon, Poisson Noise," in *Computer Vision: A Reference Guide*, 2. Aufl. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer, 2021, S. 980–982.
- [91] X. Zhuansun *et al.*, "The impact of negative dc corona discharge on the ultraviolet photon count in rod to plane air gaps," in *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Ann Arbor, MI, USA, 2015, S. 362–365, doi: 10.1109/CEIDP.2015.7352091.
- [92] F. J. Brunner und K. W. Wagner, *Qualitätsmanagement: Leitfaden für Studium und Praxis*, 6. Aufl. (Praxisreihe Qualitätswissen). München: Hanser, 2016.
- [93] S. A. Ward, M. A. A. Allah und A. A. Youssef, "Multi-particle initiated breakdown of gas mixtures inside compressed gas devices," in *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Montreal, QC, Canada, 2012, S. 353–356, doi: 10.1109/CEIDP.2012.6378793.
- [94] W. Wang und Y. Lu, "Analysis of the Mean Absolute Error (MAE) and the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Rounding Model," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Jg. 324, S. 12049, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/324/1/012049.
- [95] B. Klein, *Versuchsplanung - Design of Experiments: Einführung in die Taguchi- und Shainin-Methodik*, 5. Aufl. (De Gruyter Oldenbourg Studium). Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2021.
- [96] R.-M. Cernat *et al.*, "Hochspannungs-Schaltanlage mit Sensor-Array und Verfahren zur Verwendung der Sensoren," DE 10 2018 216 475 A1, Mrz 26, 2020.
- [97] J. Wang, Q. Li, B. Li, C. Chen, S. Liu und C. Li, "Theoretical and experimental studies of air gap breakdown triggered by free spherical conducting particles in DC uniform field," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 23, Nr. 4, S. 1951–1958, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.7556466.
- [98] H. You *et al.*, "Motion and discharge characteristics of metal particles existing in GIS under DC voltage," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Jg. 24, Nr. 2, S. 876–885, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006210.
- [99] Z. Zhan, D. Wang, J. Xie, W. Xin, W. Wang und Z. Zhang, "Motion Characteristics of Metal Powder Particles in AC GIL and Its Trap Design," *IEEE Access*, Jg. 9, S. 68619–68628, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077649.

- [100] J. Beyerer, F. Puente León und C. Frese, *Automatische Sichtprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [101] WG D1.25, *Technical Brochure 654: UHF partial discharge detection system for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification* (Technical brochure / CIGRE 654). Paris, France: CIGRE, 2016.

Publikationen: Zeitschriften- und Konferenzbeiträge & Patente

Im Folgenden sind die Publikationen sowohl in der Erst- als auch Mitautorenschaft chronologisch aufgeführt.

2021

Autoren	Titel	Zeitschrift oder Konferenz
L. Vogelsang, S. Düsdieler, F. Jenau	Upgraded Circuit Simulation and Test Circuit Design for Transient Overvoltages in MMC HVDC Links	56 th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)
P. Huber, S. Düsdieler, F. Jenau	Numerical Investigations of Superimposed DC Voltages with Overvoltages and their Effect on the Insulating Gas Air	IEEE International Conference 2021

2023

Autoren	Titel	Zeitschrift oder Konferenz
T. Kuhnke, S. Düsdieler, F. Jenau	Frequency Analysis of a 10 kV RC Voltage Divider Module composed of SMD-Components and Printed Circuit Boards for Power Quality Measurement	2023 IEEE Belgrade PowerTech
S. Düsdieler, T. Kuhnke, M. Razavifar, F. Jenau	Simulation and Verification of a 10kV RC Divider Module composed of SMD components on PCBs for Power Quality Measurement	2023 IEEE Belgrade PowerTech
T. Kuhnke, S. Düsdieler, F. Jenau, E. Callpani, M. Razavifar	The Resonance Frequency Method for Fast Approximation of the Bandwidth of Resistive-Capacitive High-Voltage Dividers	23 rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023)
S. Düsdieler, K. Veith, F. Jenau	Case Study: Using a probabilistic calculation to determine the lifetime costs of assets with alternative insulation gas	27 th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)

S. Düsdieler, T. Kuhnke, F. Jenau	Study on a High Voltage Divider composed of SMD components on PCBs for Power Quality Measurement	2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)
---	--	--

2024

Autoren	Titel	Zeitschrift oder Konferenz
S. Düsdieler, K. Schloßer, T. Cramer, F. Jenau	Risk Assessment Based on Ion Current Measurement on a DC-GIL with Metal Particles <i>Verweis in der Arbeit: [Ve02]</i>	59 th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)
S. Düsdieler, T. Kuhnke, H. Geisler, F. Jenau	Design of a Modular 20 kV RC Divider based on SMD Components for Power Quality Measurement Using 3D Printing <i>Verweis in der Arbeit: [Ve01]</i>	59 th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)
T. Kuhnke, B. Zimmer, S. Düsdieler, F. Jenau	Niederinduktiver und breitbandig ausgelegter ohmsch-kapazitiver Spannungsteiler zur Teilentladungsmessung <i>Verweis in der Arbeit: [Ve03]</i>	Patentanmeldung mit Nummer DE 10 2024 204 057.6 Anmeldedatum: 30.04.2024

2025

Autoren	Titel	Zeitschrift oder Konferenz
S. Düsdieler, S. Kreis, F. Jenau, G. Kern-Isberner	Risk Assessment Based on Sensor Fusion for the Ion Current Measurement as a Diagnosis Method for HVDC Systems <i>Verweis in der Arbeit: [Ve04]</i>	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulations Einreichungsdatum: 10.02.2025

Studentische Arbeiten

Die folgend aufgeführten betreuten Arbeiten sind im Zeitraum von November 2020 bis Dezember 2025 entstanden. Dabei handelt es sich um Bachelor- und Masterarbeiten, Projektgruppen- und Projektarbeiten.

Bachelorarbeiten

Autor	Titel	Datum
S. Kreis	Untersuchung des klimatischen Einflusses auf gasgefüllte Prüfbehälter für Hochspannungsanwendungen	08.07.2021
L. Gerigk	Bewertung eines Ersatzschaltbildmodells eines ohmsch-kapazitiven Teilers	01.10.2021
K. Veith	Modellierung von Betriebskosten von Betriebsmitteln mit alternativen Isoliergasen unter Berücksichtigung von Risikokategorien	17.08.2022
E. Callpani	Erweiterung eines Ersatzschaltbildmodells eines ohmsch-kapazitiven Teilers	25.10.2022
N. Porath	Untersuchungen zur Ionenstrommessung als Diagnosemethode in der Hochspannungstechnik	07.06.2023
H. Geisler	Konzeptionierung eines niederinduktiven Verbindungssystems eines SMD-basierten ohmsch-kapazitiven Spannungsteilers	14.08.2023
F. Vallböhmer	Konzeptionierung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode an einem Hochspannungsteiler	16.10.2023
S. Plötz	Entwicklung eines empirischen Bewertungsverfahrens und Weiterentwicklung eines Risikomodells zur Anwendung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode	06.02.2024
I. Zotau	Erweiterung eines Sensorfusion-Modells zur Anwendung auf die Ionenstrommessung als Diagnosemethode	24.10.2024

Masterarbeiten

Autor	Titel	Datum
T. Cramer	Modellierung der Betriebskosten von Betriebsmitteln mit alternativen Isoliergasen unter Berücksichtigung von Risikokategorien und Verschmutzungsgrad des Isoliergases	05.09.2022
M. Razavifar	Modellierung und experimentelle Untersuchungen eines ohmsch-kapazitiven Teiler	20.02.2023
K. Schloßer	Untersuchung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode zur Anwendung auf Betriebsmittel mit alternativen Isoliergasen unter Berücksichtigung von Fremdschichten	07.04.2023
H. Haj Satouf	Optimierung eines ohmsch-kapazitiven Spannungsteilers unter elektrischen und geometrischen Randbedingungen	15.07.2023
S. Kreis	Aufbau eines evidenztheoretischen Modells zur Anwendung auf die Ionenstrommessung als Diagnosemethode	10.06.2024
K. Veith	Untersuchung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode zur Anwendung auf einen Hochspannungsteiler	18.06.2024
E. Callpani	Auslegung eines breitbandigen ohmsch-kapazitiven Hochspannungsteilers auf SMD-Platinenbasis für Power-Quality- und Teilentladungsmessungen	30.07.2025
K. Sari	Entwicklung eines integrierten Managementhandbuchs	11.08.2025

Projektgruppen- & Projektarbeiten

Autor(en)	Titel	Datum
T. Cramer, K. Schloßer	Alternative Isoliergase in der Hochspannungstechnik	17.01.2021
J. Kremer	Mechanische Aspekte zur Applikation alternativer Isoliergase in der Hochspannungstechnik	31.05.2021
K. Veith, P. Zöller, S. Schmitz-Heinen	Alternative Isoliergase - Kann SF ₆ nachhaltig abgelöst werden?	18.10.2021
P. Bergner, E. Callpani, U. Ottou, J. Scheliga, M. Staudt	Realisierung und Experimentelle Versuche an einem 20 kV Spannungsteiler auf Basis von PCBs	15.12.2023
F. Imamoglu	Zustandsbewertung der SF ₆ -Eigenschaften in Hochspannungsanlagen	22.04.2024