

Sven Hunold

Algorithmische Bestimmung der Alterungscharakteristik von
Mittelspannungskabelmuffen basierend auf diagnostischen
Messwerten und Betriebsmitteldaten

Sven Hunold

Algorithmische Bestimmung der Alterungscharakteristik von
Mittelspannungskabelmuffen basierend auf diagnostischen
Messwerten und Betriebsmitteldaten



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2017

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Titelgrafik: Sven Hunold
Satz/Layout: Sven Hunold

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-96100-008-1

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-216676>

Algorithmische Bestimmung der
Alterungscharakteristik von
Mittelspannungskabelmuffen basierend auf
diagnostischen Messwerten und
Betriebsmitteldaten

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz
genemigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Kaufm. Sven Hunold,
geboren am 1. Dezember 1966 in Magdeburg

eingereicht am 20. Juni 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft
Prof. Dr.-Ing. Ronald Plath

Tag der Verteidigung: 15. Dezember 2016

"[...] in jeder Wissenschaft gilt als vornehmste Lösung die Aufgabe, in der Fülle der vorliegenden Einzelerfahrungen und Einzeltatsachen nach Ordnung und Zusammenhang zu suchen, um dieselbe durch Ergänzung der Lücken zu einem einheitlichen Bilde zusammenzuschließen."

*(Max Planck,
Rede, gehalten anlässlich der Feier zum Gedächtnis des Stifters der
Friedrich-Wilhelm-Universität Berlin am 03. 08. 1914.
"Dynamische und statistische Gesetzmäßigkeiten")*

Bibliografische Beschreibung

Hunold, Sven

Algorithmische Bestimmung der Alterungscharakteristik von Mittelspannungskabelmuffen basierend auf diagnostischen Messwerten und Betriebsmitteldaten

163 Seiten, 108 Abbildungen, 36 Tabellen, 76 Literaturstellen

Deskriptoren: Mittelspannungsnetz, Mittelspannungskabelmuffen, Teilentladung, Alterung, Schadensakkumulation, Maschinelles Lernen, Clustering, Klassifizierung, Nächster-Nachbar-Methode

Kurze Beschreibung:

Bei der Zustandsbewertung von Kabeln steht derzeit das Mittelspannungsnetz im Fokus der Betrachtungen. Das Mittelspannungsnetz verbindet das Hochspannungsnetz mit dem Niederspannungsnetz und nimmt damit eine besondere Bedeutung ein. Störungen in diesem Netz wirken sich direkt als Versorgungsunterbrechung auf den Letztverbraucher aus. Rund 80 bis 85 % der Versorgungsunterbrechungen resultieren Problemen im Mittelspannungsnetz, sodass dortige Aktivitäten den größten Hebel bei der Steigerung der Versorgungsqualität entwickeln.

Mittels Zustandsbewertung von Kabeln können, verdeckte Fehler aufgedeckt oder deren Alterungszustand bestimmt werden. Nicht jeder diagnostizierte Fehler führt unmittelbar zum Ausfall. Er beschleunigt jedoch die Alterung, die letztendlich zum Ausfall führt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Identifizierung von Fehlern in Mittelspannungskabelmuffen im Zusammenhang mit der Alterung, um die Restlebensdauer auszunutzen und dem Ausfall vorzuzukommen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	13
Symbolverzeichnis	15
1 Einleitung	21
1.1 Gegenwärtige energiepolitische Situation	21
1.2 Stand der Diagnostik elektrischer Betriebsmittel	21
1.3 Ziel der Arbeit und Herangehensweise	24
2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung	27
2.1 Kabelgarnituren	27
2.1.1 Überblick über Kabelgarnituren	27
2.1.2 Grundelemente	28
2.1.3 Feldsteuerung	33
2.2 Diagnostische Verfahren	34
2.2.1 Überblick über diagnostische Verfahren	34
2.2.2 Teilentladungsdiagnose	35
2.3 Texturerkennung und Grauwertmatix	44
2.4 Maschinelles Lernen	45
2.4.1 Überblick über maschinelles Lernen	45
2.4.2 Bewertung von Klassifikationsverfahren	47
2.5 Alterung von Kabelsystemen	48
2.6 Betriebswirtschaftliche Überlegungen	52
2.7 Zusammenfassung und Vorgehen	57
3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation	61
3.1 Regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation	61
3.1.1 Aufnahme und Segmentierung des Bestands	61
3.1.2 Plausibilitätsprüfung des Bestands	63
3.1.3 Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer Garniturspezifikation	66
3.2 Bestimmung der Garniturspezifikation durch Referenzvergleich	69
3.2.1 Konzeption der Tests	69
3.2.2 Ergebnisse der Tests	72
3.2.3 Bestimmung des besten Lernverfahrens	94
4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen	97
4.1 Simulation des Schadensakkumulationstests	98
4.2 Vortest zum Schadensakkumulationstest	102
4.3 Durchführung	103
4.4 Ergebnisse	105
4.4.1 Alterungstyp 01	107
4.4.2 Alterungstyp 02	109
4.4.3 Alterungstyp 03	112
4.4.4 Alterungstyp 04	115
4.4.5 Alterungstyp 05	117

5 Anwendung des Vorgehensschemas	121
5.1 Vor-Ort-Messung	121
5.2 Regelbasierende Bestimmung	121
5.3 Bestimmung durch Referenzvergleich	121
5.4 Nachuntersuchung	128
6 Zusammenfassung und Ausblick	131
Anhang	133
A Datentabellen	135
B Herleitung Schadensakkumulation	137
C Datenmodell Garniturspezifikationen	139
C.1 Anwendungsfälle	139
C.2 Garniturspezifikation	140
C.2.1 Grundmodell	140
C.2.2 Anschlüsse	142
C.2.3 Bezug	145
C.3 Garnitur	146
C.3.1 Status, Alterungstyp, Eigenschaften	146
C.3.2 Vergleichsparameter	148
Literaturverzeichnis	151
Abbildungsverzeichnis	157
Tabellenverzeichnis	161
Thesen	163

Abkürzungsverzeichnis

ARegV	Anreizregulierungsverordnung
BNetzA	Bundesnetzagentur
DIN	Deutsches Institut für Normung
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
GP	Gesamte Periode
nHP	Negative Halbperiode
PE	Polyethylen (u. a. zur Kabelisolierung eingesetzt)
pHP	Positive Halbperiode
PRPD	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm (Phase Resolved Partial Discharge pattern)
PSA	Puls-Sequenz-Analyse
TE	Teilentladung
TGL	Technische Güte und Lieferbedingungen
VLf	Very-Low-Frequency(i. d. R. 0,1 Hz)
VPE	Vernetztes Polyethylen (u. a. zur Kabelisolierung eingesetzt)

Symbolverzeichnis

$A(E)$	elektrische Alterung
$A(T)$	thermische Alterung
C	Kapazität
C_K	Kapazität des Koppelkondensators
C_P	Kapazität des Prüflings
E	elektrische Feldstärke
E_A	Aktivierungsenergie
E_0	kritische Feldstärke
G_D	Gewinn durch Diagnose
G_{ij}	Grauwertbild
H_{ij}	relative Häufigkeitsverteilung
h_i, h_j	relative Randhäufigkeitsverteilung
h_{ij}, h_{ji}	bedingte relative Häufigkeitsverteilung
k	allgemeine Konstante
k_B	Boltzmannkonstante
k_e	Konstante der elektrischen Alterung
k_{IPG}	Konstante des Invers-Power-Gesetzes
k_t	Konstante der thermischen Alterung
K_A	Ausfallkosten
K_S	Störungskosten
K_N	Einnahmeverluste durch nicht gelieferte Energie (Netznutzungsentgelte)
K_{SA}	Kosten aufgrund des Q-Faktors nach § 19 ff. ARegV
K_{SM}	Kosten des Störungsmanagements
K_T	Kosten der Reparatur (Tiefbau, Montage und Material)
K_{SI}	Imageschaden
K_R	Kosten planmäßiger Reparatur
K_{RM}	Kosten planmäßiger Freischaltung
K_{DE}	Erstdiagnosekosten
K_{DF}	Kosten einer Folgediagnose
l_K	Länge des Kabels
l_T	Länge bis zur Teilentladungsstelle
m	Menge, inverser Alterungsfaktor
n	Alterungsfaktor, Anzahl der Wiederholungen, Anzahl der Teilentladungsimpulse der Gesamtperiode
n_p	Anzahl der Teilentladungsimpulse der positiven Halbperiode
n_n	Anzahl der Teilentladungsimpulse der negativen Halbperiode
$N_{TE}(U_p, t)$	Impuls wiederholungsrate
N_{ij}	absolute Häufigkeitsverteilung
P_{Dis}	Entladeleistung
$P_{Dis,0}$	Entladeleistung der ursprünglichen Messreihe
$P_{Dis,1}$	Entladeleistung der ersten Simulation
$P_{Dis,n}$	Entladeleistung der n-ten Simulation
P_V	Verlustleistung
Q	Ladung
$Q_{max}(U_p)$	maximale scheinbare Ladung

Q_{max}	maximale scheinbare Ladung der Gesamtperiode
$Q_{max,p}$	maximale scheinbare Ladung der positiven Halbperiode
$Q_{max,n}$	maximale scheinbare Ladung der negativen Halbperiode
$Q_{med,p}$	Median der scheinbaren Ladung der positiven Halbperiode
$Q_{med,n}$	Median der scheinbaren Ladung der negativen Halbperiode
$Q_{min}(U_p)$	minimale scheinbare Ladung (Grundstörpegel)
Q_{min}	minimale scheinbare Ladung der Gesamtperiode
$Q_{min,p}$	minimale scheinbare Ladung der positiven Halbperiode
$Q_{min,n}$	minimale scheinbare Ladung der negativen Halbperiode
$Q_{mit}(U_p)$	mittlere scheinbare Ladung
Q_{mit}	mittlere scheinbare Ladung der Gesamtperiode
$Q_{mit,p}$	mittlere scheinbare Ladung der positiven Halbperiode
$Q_{mit,n}$	mittlere scheinbare Ladung der negativen Halbperiode
Q_s	scheinbare Ladung
Q_{std}	Standardabweichung der scheinbaren Ladung der Gesamtperiode
$Q_{std,p}$	Standardabweichung der scheinbaren Ladung der positiven Halbperiode
$Q_{std,n}$	Standardabweichung der scheinbaren Ladung der negativen Halbperiode
Q_{sum}	Summe der scheinbaren Ladung
$Q_{sw,p}$	Spannweite der scheinbaren Ladung der positiven Halbperiode
$Q_{sw,n}$	Spannweite der scheinbaren Ladung der negativen Halbperiode
$Q_{(p)}$	p-Quantile
R	Widerstand
r_E	Eigenkapitalverzinsung
η	Inflationsrate
R_M	Wurzel der gemittelten Fehlerquadrate
s	Standardabweichung
t	diskrete Zeitpunkte
T	Temperatur
$t_{I \leftrightarrow II}$	Schnittpunkt der Kennlinien I und II
$t_{I \leftrightarrow III}$	Schnittpunkt der Kennlinien I und III
T_{ref}	Referenzmesszeit
U_a	Teilentladungs-Aussetzspannung
U_B	Betriebsspannung
U_E	Erdschlussspannung
U_e	Teilentladungs-Einsetzspannung
U_n	Nennspannung
U_p	Prüfspannung
$U_{p,50}$	Prüfspannung mit einer Frequenz von 50 Hz
$U_{p,0,1}$	Prüfspannung mit einer Frequenz von 0,1 Hz
u_{00}	Startspannung des Steigerungsversuchs
U_0	Leiter-Erde-Spannung
v	Ausbreitungsgeschwindigkeit
W_{Dis}	an der Teilentladungsstelle umgesetzte Energie
W_{Clp}	Grauwertmarix
\bar{x}	Mittelwert
\tilde{x}	Median

y_i	Parameter
\hat{y}_i	geschätzter Mittelwert des Parameters y_i
Z_M	Messimpedanz
Z_S	Sperrimpedanz
α, β	Koeffizienten
ΔC_r	relative Kapazitätsabweichung
ΔR_r	relative Widerstandsabweichung
Δt	Zeitdifferenz
Δt_S	Stufendauer
Δt_Z	Steigerungszeit
$\Delta \tan \delta_r$	relative Abweichung des Verlustfaktors
Δu	Spannungsabsenkung, Stufenhöhe
ΔU_r	relative Abweichung der Einsetzspannung
$\tan \delta$	Verlustfaktor
v	Schiefe
v_C	Schiefe der relativen Kapazitätsabweichung
v_R	Schiefe der relativen Widerstandsabweichung
$v_{\tan \delta}$	Schiefe der relativen Abweichung des Verlustfaktors
v_U	Schiefe der relativen Abweichung der Einsetzspannung
ϕ	Phasenwinkel
$\phi_{max,p}$	maximaler Winkel der positiven Halbperiode
$\phi_{max,n}$	minimaler Winkel der negativen Halbperiode
$\phi_{med,p}$	Median des Winkels der positiven Halbperiode
$\phi_{med,n}$	Median des Winkels der negativen Halbperiode
$\phi_{min,p}$	minimaler Winkel der positiven Halbperiode
$\phi_{min,n}$	minimaler Winkel der negativen Halbperiode
$\phi_{mit,p}$	mittlerer Winkel der positiven Halbperiode
$\phi_{mit,n}$	mittlerer Winkel der negativen Halbperiode
$\phi_{std,p}$	Standardabweichung des Winkels der positiven Halbperiode
$\phi_{std,n}$	Standardabweichung des Winkels der negativen Halbperiode
$\phi_{sw,p}$	Spannweite des Winkels der positiven Halbperiode
$\phi_{sw,n}$	Spannweite des Winkels der negativen Halbperiode
ω	Wölbung

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Teil meiner beruflichen Tätigkeit bei den Städtischen Werken Magdeburg GmbH & Co. KG sowie bei der Netze Magdeburg GmbH.

Ich danke dem technischen Geschäftsführer der Städtischen Werke Magdeburg GmbH & Co. KG und dem aktuellen BDEW-Präsidenten Johannes Kempmann und dem Geschäftsführer der Netze Magdeburg GmbH Ewald Schwieger für die schon 2003 getroffene zukunftsweisende Entscheidung, in Geräte und Ausrüstung der Kabeldiagnostik zu investieren, sowie für die Unterstützung bei der weiteren Vervollständigung und Aktualisierung der Ausrüstung.

Ich danke dem Personal der Messwagen, insbesondere Heinz Glock, für die Unterstützung bei allen Messungen, die ich im Netz der Netze Magdeburg GmbH durchführen konnte.

Ich danke Professor Wolfgang Schufft, der diese Arbeit anregte sowie in vielen Diskussionen unterstützte und mir dadurch die Möglichkeit der fachlichen Weiterbildung gab.

Ich danke den Mitarbeitern der Professur für Energie- und Hochspannungstechnik, insbesondere Su-leiman Hadid, für die Unterstützung bei allen Messungen und die fruchtbaren Diskussionen.

Ich danke Herrn Professor Plath für die Diskussionen, der kritischen Durchsicht der Arbeit sowie für die Begutachtung der Dissertation.

Ich danke meiner Frau Kathrin Hunold, die mich mit ihrer aufrechten und liebevollen Art stets unterstützt, motiviert und ihre eigenen Belange zurückgestellt hat. Vor allem hat sie großen Anteil am Zustandekommen und Gelingen dieser Arbeit.

1 Einleitung

1.1 Gegenwärtige energiepolitische Situation

Nach dem Energiewirtschaftsgesetz vom 07. Juli 2005 sind die dem Gesetz unterliegenden Unternehmen (u. a. Verteilnetzbetreiber) verpflichtet, "eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität" [1, § 1 S. 1 EnWG] sicherzustellen.

Energieversorgungsunternehmen müssen demnach zu effizienten Strukturen und Prozessen aufbauen und zu anderen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ergreifen, um vorhandene Potenziale weiter auszuschöpfen. Eine in diese Richtung weisende Maßnahme stellt die Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel dar. Während die Zustandsbewertung an Großgeräten, wie Leistungstransformatoren, schon seit 50 Jahren mit Erfolg angewendet wird, sind die Potenziale in der Zustandsbewertung von Kabeln noch nicht erschöpft.

Betrachtungen zur Zustandsbewertung von Kabeln fokussieren derzeit das Mittelspannungsnetz, das das Hochspannungsnetz mit dem Niederspannungsnetz verbindet und daher von besonderer Bedeutung ist. Störungen in diesem Netz wirken sich direkt als Versorgungsunterbrechung auf den Letztverbraucher aus. Nach [2] resultieren rund 80 bis 85 % der Versorgungsunterbrechungen aus Problemen im Mittelspannungsnetz, sodass Aktivitäten im Mittelspannungsnetz den größten Hebel bei der Steigerung der Versorgungsqualität entwickeln.

1.2 Stand der Diagnostik elektrischer Betriebsmittel insbesondere der Diagnostik von Kabel und Muffen

Ziele der Diagnostik: Die diversen Ziele der Diagnostik elektrischer Betriebsmittel sind nach Feser [3] auf der gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technischen Ebene zu finden.

Gesellschaftliche Ziele liegen in der Reduktion der Risiken für die Umwelt durch frühzeitiges Erkennen sich entwickelnder Fehler, der technischen Information durch bewusstes Handeln (keine negativen Schlagzeilen) sowie der Erhöhung der Sicherheit und Erleichterung der Arbeit für das Betriebspersonal.

Auf der wirtschaftlichen Ebene soll die adaptive Wirkung die Betriebskosten sowie den Personalaufwand reduzieren. Des Weiteren sollen Betriebsunterbrechungen (für Wartung bzw. Instandsetzung) besser planbar werden, um die Ausfallkosten zu senken. Die Planung von Ersatzinvestitionen auf Basis des Zustands der Betriebsmittel (Restlebensdauer abschätzbar) hat einen nicht unerheblichen wirtschaftlichen Vorteil.

Ziele auf der technischen Ebene sind die Optimierung der Betriebsmittel und der Systeme. Bessere Kenntnisse der Belastungen im Betrieb, die Erfassung anscheinend sporadischen Fehlverhaltens durch kontinuierliche Diagnostik sowie quantitative Informationen über die Entwicklung und das Verhalten bestimmter Kenngrößen, z. B. Teilentladungen, können die Beurteilung des Verhaltens von Betriebsmitteln und Systemen verbessern. Die Korrelation der Messgrößen mit Wartungsintervallen und Restlebensdauer hat bedeutendes Optimierungspotenzial.

Entwicklung der Kabel und der Kabeldiagnostik: Die Entwicklung von Kabeln [4, 5, 6] zur Energieübertragung begann 1870 mit Isolierungen auf Basis von Naturkautschuk. In den Folgejahren bis zum 1. Weltkrieg wurde sowohl die Hauptisolierung als auch die Konstruktion weiterentwickelt. 1880 entwickelte Edison seine "Street Pipe" mit einer Isolierung auf Jutebasis. Ferranti konstruierte 1890 das erste konzentrische Kabel mit massegetränkter Papierisolierung, das seit 1917 auch abgeschirmt war. Mit Entwicklung des Polyethylens (PE) 1937 erfolgte 1942 der erste Einsatz als extrudierte Kabelisolierung. 1963 wurde das Polyethylen zum vernetzten Polyethylen (VPE) weiterentwickelt. Ab dem Jahr 1968 wurde das VPE als Kabelisolierung eingesetzt. Anfang der 1970er Jahre traten zunehmend Probleme mit Water-Trees in PE/VPE-Kabeln auf. Das führte in Nordamerika zur Entwicklung Water-Tree-resistenten VPE, indem das VPE mit Additiven versetzt wurde. In Europa haben drei wesentliche Maßnahmen zur Water-Tree-Beständigkeit beigetragen: die 3-fach Extrudierung, die "trockene" Vernetzung und die Verwendung von PE als Mantel, der eine geringere Diffusion von Wasser zulässt. Daneben wurden die Isoliercompounds verbessert.

Parallel mit der Entwicklung der Kabel wurden auch Diagnoseverfahren (weiter)entwickelt. Diagnoseverfahren in diesem Zusammenhang sind die integralen dielektrischen Verfahren (Rückkehrspannungsmethode, Relaxationsstrommethode und Verlustfaktormessung) sowie die Teilentladungsmessung.

Die Verlustfaktormessung begann mit der Schering-Messbrücke im Jahr 1919. Ab den 1930er Jahren war die produktionsbegleitende Verlustfaktormessung am Massekabel Stand der Technik. Mit der Möglichkeit, eine Very-Low-Frequency-Messspannung (VLF-Messspannung) vor Ort zu erzeugen (ca. 1990), war es auch möglich, mit vertretbarem Aufwand Verlustfaktormessungen an in Betrieb befindlichen Kabeln durchzuführen.

Die Forschungen an Teilentladungsmechanismen begannen 1915 [7]. Erste Ersatzschaltbilder, zunächst für einen Hohlraum, wurden 1932 aufgestellt. Ab 1965 war eine produktionsbegleitende Teilentladungsmessung mit analogen Messgeräten Stand der Technik. Vor-Ort-Messungen an Kabeln mit einer Messspannung von 50 Hz sind seit 1976 möglich. Die ersten digitalen Teilentladungsmessungen datieren auf das Jahr 1986. Seit 1999 sind Geräte auf dem Markt, mit denen auf Basis der VLF-Messspannung Teilentladungsmessungen vor Ort realisiert werden können.

Stand der Kabeldiagnostik: Über Kabeldiagnostik im Allgemeinen liegen zahlreiche Veröffentlichungen vor. Diese beschäftigen sich mit der Erzeugung von Prüfspannungen, Signalauskopplungen, der Einzelsignalbewertung und der Bewertung Signalgruppen (z. B. typische Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramme oder typische Puls-Sequenz-Analyse-Bilder). Veröffentlichungen über die Bewertung von Messergebnissen im Sinne des Asset-Managements sind dagegen rar, wie z. B. nach Petzold [8, 9] oder nach Wester [10, 11]. Nach Einschätzung des Verfassers können die vertretenen Konzepte präzisiert und konkretisiert werden. Die in den vorgenannten Literaturstellen herausgearbeiteten Konzepte stellen auf folgende Eckpunkte ab:

Die Beurteilung eines teilentladungsbehafteten Betriebsmittels erfolgt auf Basis weniger Parameter, namentlich Teilentladungseinsetzspannung U_e , Teilentladungsaussetzspannung U_a , Teilentladungspegel sowie folgende Prämissen der Netzbetreiber:

- Ein Betriebsmittel soll bei Betriebsspannung U_B teilentladungsfrei sein.
- Die Einsetzspannung U_e soll über dem 1,7-Fachen der Betriebsspannung U_B oder zumindest die Aussetzspannung U_a über der Betriebsspannung U_B liegen.
- Die Messspannung sollte das 1,7-Fache der Betriebsspannung U_B nicht überschreiten.

- Des Weiteren soll eine Teilentladungsdiagnose eine mögliche Teilentladungsstelle anregen, um detektiert und lokalisiert zu werden, jedoch die Teilentladungsstelle nicht weiter schädigen.

Petzold und Beigert [8, S. 328] kommen zu folgender Einschätzung:

"Für die Teilentladungsdiagnose sollte eine Spannungsform benutzt werden, welche vergleichbare Teilentladungsparameter (Ein- und Aussetzspannung und Teilentladungspegel) erzeugt, wie die 50 Hz Betriebsspannung. [...] Bei Verwendung deutlich abweichender Spannungsformen (z. B. 0,1 Hz Sinus) sollten Kenntnisse vorliegen, ob und wie die gewonnenen Messergebnisse auf 50 Hz Beanspruchungen übertragen werden können."

Die vorgenannten Aussagen zielen auf eine Sinusspannung mit einer Frequenz von 50 Hz ab. Die derzeit gebräuchlichen Prüfspannungen für eine Teilentladungsdiagnose sind jedoch eine Sinus- bzw. Cosinus-Rechteck-Spannung mit einer Frequenz von 0,1 Hz und eine abklingende Wechselspannung mit einer Frequenz im Bereich von 70 bis 400 Hz. Petzold und Beigert [8, S. 331] liefern tabellarisch Trend- bzw. Grenzwerte bezogen auf Kabelelemente und Isolierungen, deren Herkunft über die dort angegebene Quelle [10] nicht nachvollzogen werden konnte.

Die Ausführungen in [8] sind sehr allgemein gehalten. Weder gebräuchliche Prüfspannung oder Messaufbau noch Spezifikationen des Betriebsmittels (z. B. bei Muffen nach Garnitortyp, Feldsteuerung, Grundtechnik oder Hersteller) und Fehlern (z. B. Fehlerart oder typisches Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm) werden differenziert. Zudem werden die Grenzen einer Teilentladungsdiagnose nicht benannt. Diese bestehen in der erzeugten Vor-Ort-Prüfspannung, in der Länge des Kabels und in dem Störpegel auf dem Kabel.

In der jüngsten Vergangenheit sind einige Arbeiten entstanden, die Aspekte des Asset-Managements behandeln. So haben sich Mladenovic und Schuchardt [12, 13] mit Teilentladungen und dem Verlustfaktor an Mittelspannungskabeln mit massegetränkter Papierisolierung bei Prüffrequenzen von 50 Hz bzw. 0,1 Hz beschäftigt. Eisemann und Borlinghaus [14, 15, 16] untersuchten das Verhalten von Kabeln mit extrudierter Kunststoffisolierung (besonders PE-Isolierung) mittels Verlustfaktormessung bei 0,1 Hz.

1.3 Ziel der Arbeit und Herangehensweise

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit im Betrieb gealterten teilentladungsbehafteten Mittelspannungskabelmuffen, um das Asset-Management zu optimieren.

Dazu wird auf Algorithmen des maschinellen Lernens zurückgegriffen. Im Gegensatz zu bisherigen Veröffentlichungen, z. B. von Gulski [17, 18], Sahoo [19] oder Obralic [20, 21], wird nicht nur ein bei einer Messspannung aufgenommenes Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm ausgewertet, sondern eine Reihe von Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagrammen, die auf einer Sequenz von Messspannungen beruhen.

Des Weiteren entstand die Arbeit als Fortführung der Bemühungen der Arbeitsgruppe "Bewertung von TE-Messungen an Mittelspannungskabel" des Arbeitskreises Kabeltechnik im VDE Bezirksverein Dresden. Die von dieser Arbeitsgruppe 2012 verabschiedete Handlungsempfehlung [22] ließ Fragen offen, die nachfolgend als Ziele formuliert sind.

Ziele der Arbeit: Gegenstand der Untersuchungen sind betriebsgealterte teilentladungsbehaftete Mittelspannungskabelmuffen (im Folgenden Muffen genannt). Betriebsgealtert heißt in diesem Fall, dass die Muffen in einem Kabel¹ montiert waren und während einer Erstdiagnose² zur Inbetriebnahme oder einer Folgediagnose³ auffällig wurden. Als auffällig wurden Muffen eingestuft, deren Teilentladungseinsetzspannung U_e zwischen der Leiter-Erde-Spannung U_0 und der doppelten Leiter-Erde-Spannung $2 \times U_0$ liegt.

Folgende Fragestellungen werden behandelt:

1. Wie kann die Garniturspezifikation⁴ einer nicht zugänglichen teilentladungsbehafteten Muffe auf Basis statistischer Werte ermittelt werden?
2. Wie kann die Garniturspezifikation einer nicht zugänglichen teilentladungsbehafteten Muffe auf Basis eines maschinellen Lernverfahrens ermittelt werden?
3. Mit welchem Alterungsfaktor altert eine teilentladungsbehaftete Muffe?
4. Mit welchem Algorithmus oder Modell kann das Wissen über eine teilentladungsbehaftete Muffe verbessert oder zumindest bestätigt werden?
5. Wie muss ein Datenmodell beschaffen sein, das die Anforderungen abdeckt?

Herangehensweise: Zur Veranschaulichung der Herangehensweise wurde ein idealtypisches Vorgehensschema zur Beurteilung teilentladungsbehafteter Muffen aufgestellt (Abbildung 1.1), das aus den nachstehenden Schritten besteht:

¹Ein Kabel wird durch Endverschlüsse an jedem Ende begrenzt. Ein Kabelabschnitt wird durch Muffen oder Endverschlüssel begrenzt. Somit besteht ein Kabel aus mindestens einem Kabelabschnitt.

²Eine Erstdiagnose besteht aus einer Teilentladungsmessung und einer Verlustfaktormessung.

³Umfang wie Erstdiagnose.

⁴Garniturspezifikation: Kombination aus Garniturstyp, Grundtechnik, Verbindungstechnik, Feldsteuerung und Querschnitt des Leiters.

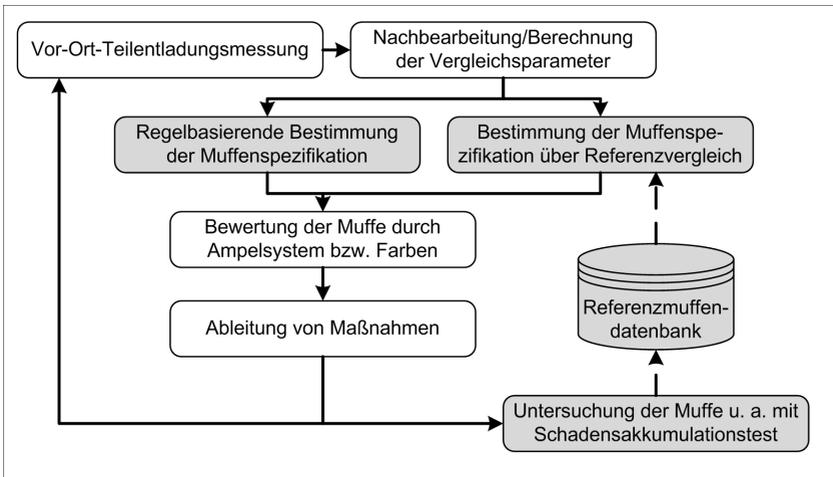


Abbildung 1.1: Vorgehensschema zur Beurteilung einer teilentladungsbehafteten Muffe

Vor-Ort-Teilentladungsmessung

Die Vor-Ort-Teilentladungsmessung erfolgt mit einem industriellen Teilentladungsmesssystem, z.B. PD TaD 60 der Firma BAUR. Dieser Ansatz ist für alle gebräuchlichen Prüfspannungen, Prüfspannungsformen und Prüffrequenzen gleichermaßen geeignet. Die Messfolge ist in Abschnitt 3.2.1 beschrieben.

Nachbearbeitung/Berechnung der Vergleichsparameter

Aus dem industriellen Messsystem sind die Parameter, die eine Teilentladung beschreiben, zwischenspeichern und dem Bewertungssystem in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen.

Regelbasierende Bestimmung der Muffenspezifikation

Die regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation erfolgt mithilfe der in einem Verteilnetzbetreiber typischerweise vorhandenen Daten mit den Methoden der beschreibenden und schließenden Statistik. Unterkapitel 3.1 widmet sich diesem Thema.

Bestimmung der Muffenspezifikation über Referenzvergleich

Die Ausführungen über die Bestimmung der Garniturspezifikation über Referenzvergleich sind in Unterkapitel 3.2 beschrieben. Es werden die optimalen Vergleichsparameter, die aus den Parametern, die eine Teilentladung beschreiben, sowie das optimale maschinelle Lernverfahren zur Bestimmung der Referenz vorgestellt.

Bewertung der Muffe durch ein Ampelsystem bzw. durch ein Farbsystem

Der nächste Schritt ist die Bewertung durch ein Ampelsystem nach [23] auf der Zustandsebene der Referenzmuffe im vorliegenden Zusammenhang (Systemebene). Der Zusammenhang kann die Bedeutung des Kabels im System sein, wie die Anzahl der versorgten Letztverbraucher, installierte Transformatorleistung der Netzstationen der Leitung oder die mittlere transportierte Leistung. Ein weiterer Zusammenhang kann die alsbaldige (Teil-)Auswechslung sein.

Ableitung von Maßnahmen

Maßnahmen sind hier vorrangig die Auswechslung oder die Wiedervorlage im Sinne einer Folgediagnose.

Untersuchung der Muffe u. a. mit einem Schadensakkumulationstest

Für den Fall der Auswechslung wird die Muffe geborgen und weiter untersucht. Diese Muffe wird einem Schadensakkumulationstest, wie in Kapitel 4 beschrieben, unterzogen. Eine Demontage oder eine Röntgen-Computer-Tomografie zur abschließenden Fehlerbestimmung mit Aufnahme in die Referenzmuffendatenbank bilden den letzten Schritt des Vorgehensschemas.

Aufbau der Arbeit: Nach dieser Einleitung mit Ausführungen über die gegenwärtige energiepolitische Situation, den Stand der Diagnostik sowie die Ziele und die Herangehensweise folgen Ausarbeitungen zu Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung. Es wird auf den Aufbau von Kabelgarnituren und auf Verfahren der Kabeldiagnose eingegangen. Des Weiteren sind Ausführungen über maschinelle Lernverfahren, Alterung von Kabelsystemen und betriebswirtschaftliche Überlegungen in diesem Kapitel enthalten. Mit einer Zusammenfassung und der Beschreibung des Vorgehens endet dieses Kapitel.

Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation sind im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Das Kapitel ist unterteilt in die regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation und die Bestimmung der Garniturspezifikation mittels Referenzvergleichs. Die regelbasierende Bestimmung greift auf Daten, die in einem Verteilnetzbetreiber vorliegen müssen, zurück. Nach einer Plausibilitätsprüfung werden statistische Verfahren der beschreibenden und schließenden Statistik genutzt. Für die Bestimmung der Garniturspezifikation mittels Referenzvergleichs wird die Teilentladungsmessung genutzt. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Test konzipiert, nach dem die Messungen auszuführen sind. Die Darstellung der Ergebnisse und die Bestimmung der optimalen Parameter und das optimale Verfahren für den Referenzvergleich folgen.

Das Kapitel Schadensakkumulationstest an teilentladungsbehafteten Muffen beginnt mit einer Simulation des Tests. Diese simuliert den Verlauf der Teilentladungseinsetzspannung und die in der Muffe umgesetzte Teilentladungsleistung nach der Zeit. Zur Verifizierung des Tests wurde ein Vortest durchgeführt. Mit der Beschreibung der Durchführung des Tests und der Darstellung der Ergebnisse sowie der Definition von Alterungstypen einer Muffe endet das Kapitel.

Es schließt ein Kapitel zur Testung und Verifizierung des Vorgehensschemas an einer realen Kabelstrecke an.

Mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick endet diese Arbeit.

2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung

2.1 Kabelgarnituren

2.1.1 Überblick über Kabelgarnituren

Die Zwecke von Kabelgarnituren sind das Herstellen einer Verbindung von Kabeln untereinander und der Abschluss von Kabeln. Kabelgarnituren für das Mittelspannungsnetz sind Muffen (Verbindungsmuffen, Übergangsmuffen und Anzweigmuffen), spannungsfeste Endmuffen, Endverschlüsse sowie steckbare Kabelendverschlüsse [24, 25, 26].

Endverschlüsse, z. B. [27, 28], verbinden ein Kabel mit einem Anlagenteil z. B. einer Schaltanlage, einem Transformator oder einer Freileitung. Je nach Anwendung wird in Innenraum-Endverschluss und Freiluft-Endverschluss unterschieden.

Steckbare Kabelendverschlüsse, Kabelsteckteile und -adapter, z. B. [29], dienen zum Verbinden eines Kabels mit einer Schaltanlage oder einem Transformator. Zudem können mittels T-Adapter je nach Platzverhältnissen zwei oder mehrere Kabel mit einer Schaltanlage oder einem Transformator verbunden werden. Steckbare Kabelendverschlüsse sind berührungssicher. In der Mittelspannungsebene ist ein Verbinden oder Lösen der Steckverbindung nur im spannungslosen Zustand möglich.

Zudem befinden sich auf dem Markt leitfähige Endkappen, z. B. [30, 31], die in der Regel als Montagehilfsmaterial dienen, um eine Ortung des in der Erde befindlichen Kabels zu realisieren. Leitfähige Endkappen sind nur spannungsfest bis 1 kV.

Muffen werden wie folgt eingeteilt:

Endmuffen

Schließen ein Kabel ab, ohne es mit einem anderen Kabel oder einer Anlagen zu verbinden.

Verbindungsmuffen

Verbinden zwei Kabelabschnitte gleicher Isolierung miteinander. Der Querschnitt kann variieren.

Übergangsmuffen

Verbinden zwei Kabelabschnitte unterschiedlicher Isolierung miteinander.

Anzweigmuffen

Verbinden je nach Konstruktion drei oder vier Kabelabschnitte miteinander, die auch eine unterschiedliche Isolierung aufweisen können.

Auf Verbindungs- und Übergangsmuffen wird in den nachfolgenden Abschnitten näher eingegangen, d. h., auf typische Bestandteile einer Muffe, Grundtechniken der Muffenmontage, der Verbindungstechnik sowie der Feldsteuerung beschrieben.

2.1.2 Grundelemente

Als Grundelemente einer Muffe werden in diesem Zusammenhang die einzelnen Bestandteile einer Muffe verstanden. Diese werden unter dem Punkt Garniturtypen und Grundtechniken der Montage behandelt. Die Verbindungstechnik wird gesondert beschrieben.

Garniturtypen

Übergangsmuffen verbinden zwei Kabelabschnitte unterschiedlicher Isolierung miteinander. Verbindungen von Kabelabschnitten, die nach TGL gefertigt wurden, mit Kabelabschnitten, die nach DIN gefertigt wurden, werden in der Literatur gelegentlich zu den Übergangsmuffen gezählt. In dem betrachteten Fall werden diese Muffen gesondert behandelt, aber zu den Verbindungsmuffen gezählt. Abbildung 2.1 illustriert einen Schnitt durch eine Übergangsmuffe.

Verbindungsmuffen verbinden zwei Kabelabschnitte gleicher Isolierung miteinander. In einigen Literaturquellen wird der Leiterquerschnitt in die Definition einer Verbindungsmuffe einbezogen. Verbindungsmuffen sind dann nur Muffen, die Kabelabschnitte gleicher Isolierung und gleichen Querschnitts verbinden. Im betrachteten Fall ist die Definition ohne Beachtung des Querschnitts [24, 25]. Die Abbildung 2.2 zeigt den Schnitt einer Verbindungsmuffe für VPE-Kabel in Warmschrumpftechnik.

Für Muffenkonstruktionen steht eine unüberschaubare Anzahl von Bestandteilvarianten und Kombinationsmöglichkeiten zur Verfügung. Exemplarisch sind in den Abbildungen 2.1 und 2.2 für je eine Übergangsmuffe und eine Verbindungsmuffe die Bestandteile dargestellt. Nachfolgend werden sie erläutert.

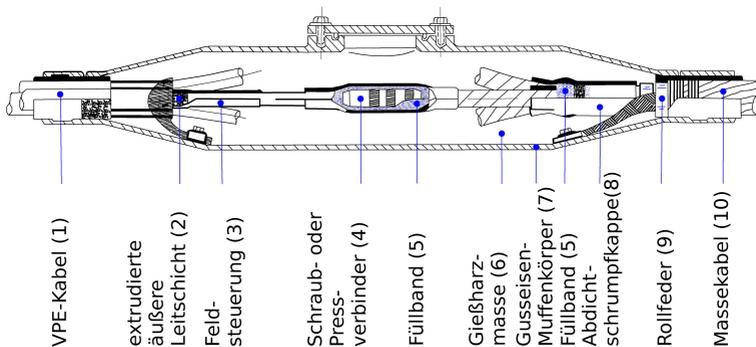


Abbildung 2.1: Schnitt einer Übergangsmuffe von Massekabel auf VPE-Kabel

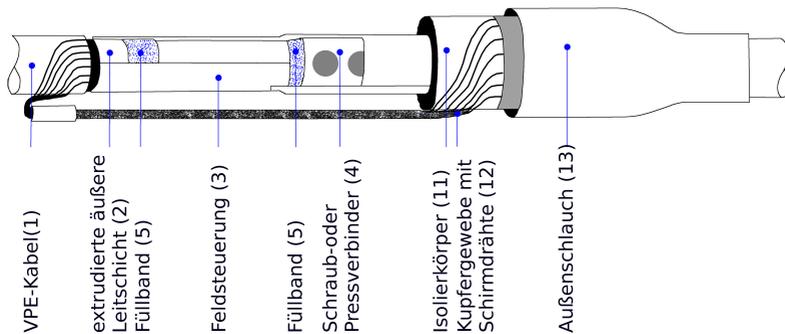


Abbildung 2.2: Schnitt einer Verbindungsmuffe für VPE-Kabel

Erläuterung der Positionen in den Abbildungen 2.1 und 2.2:

Positionen 1, 10

Unter den Nummern 1 und 10 sind die Kabel benannt, die verbunden werden sollen. Dabei sind alle Kombinationen aus VPE-/PE-Kabeln und Massekabel möglich sowie die Ausführung mit Einleiter- und Dreileiterkabeln.

Position 2

Bestandteil des Kabelaufbaus von VPE-Kabeln ist die extrudierte äußere Leitschicht. Die Absetzkante der äußeren Leitschicht stellt bezüglich der zulässigen Feldstärke eine hochsensible Stelle dar.

Position 3

Die in einer Muffe notwendige Feldsteuerung ist in dem Abschnitt 2.1.3 ab Seite 33 beschrieben.

Position 4

In Muffen kommen verschiedene Verbindungstechniken zum Einsatz. Diese werden im Abschnitt 2.1.2 ab Seite 32 erläutert.

Position 5

Füllband, das in der Regel halbleitend ist, kommt zur Feldglättung und Verhinderung von Hohlräumen an verschiedenen Stellen in einer Muffe vor. Die Feldglättung am Verbinder ist die häufigste Einsatzstelle. Des Weiteren kommt das Füllband an der Absetzstelle der äußeren Leitschicht bei VPE-Kabeln oder im Aufteilungszwickel von Massekabeln zum Einsatz.

Positionen 6, 11

Die ausgehärtete Gießharzmasse (6) oder ein Isolierkörper (11) stellt die Isolierung der Muffe sicher. In begrenztem Umfang ist auch ein mechanischer Schutz gegeben.

Position 7

Die Aufgabe eines Gusseisen-Muffenkörpers ist es, den mechanischen Schutz sowie die Schirmung der Muffe sicherzustellen.

Position 8

Die Abdichtschumpfkappe verhindert das Eindringen von Kabelmasse in die Muffe. Zudem wird eine Feldsteuerung erreicht.

Position 9

Nummer 9 stellt die Rollfeder dar, deren Aufgabe darin besteht, die elektrische Verbindung zwischen dem Kabelschirm eines Massekabel und dem Gusseisen-Muffenkörper herzustellen.

Position 12

Mit einem Kupfergewebe und mit den Schirmdrähten wird der Schirm der Muffe sichergestellt.

Position 13

Der Außenschlauch übernimmt den mechanischen Schutz der Muffe und verhindert das Eindringen von Feuchtigkeit in die Muffe.

Grundtechniken zur Herstellung der Muffenisolierung

Nachfolgend werden die Montagetechniken für Gabelgarnituren vorgestellt. Auf dem Markt sind für alle Kabelbauformen sowie Kombinationen von Kabelbauformen und Kabelquerschnitten in fast allen Montagetechniken Produkte verfügbar.

Wickeltechnik

Bei der Wickeltechnik werden massegetränkte Papierbänder (bei Massekabeln) oder selbstverschweißende Kunststoffbänder (bei Kunststoffkabeln) verwendet. Diese mehrlagig aufgetragenen Bänder stellen zugleich die Feldsteuerung, die Isolierung und die Schutzhülle dar. Mit der Wickeltechnik wird meist eine kapazitive Feldsteuerung erreicht. Diese Art der Herstellung von Kabelmuffen hat in der Praxis der Mittelspannungskabelmuffen ihre Bedeutung weitgehend verloren.

Vergusstechnik

Bei der Vergusstechnik wird in Heißvergastechnik und Kaltvergastechnik unterschieden. Je nach Literaturquelle wird die Gießharztechnik eigenständig behandelt oder der Kaltvergastechnik, wie in diesem Fall, zugeordnet.

Heißvergusstechnik

Die Heißvergusstechnik wurde im letzten Jahrhundert als Technik zur Isolierung von Verbindungen von Massekabeln entwickelt. Unter Beachtung ihrer thermischen und chemischen Eigenschaften ist es auch möglich, diese Technik für kunststoffisolierte Kabel zu verwenden.

In der Regel wird ein Metall- oder Kunststoffgehäuse benötigt, in das während der Montage die heiße Vergussmasse eingefüllt wird. Die Aufgaben des Gehäuses sind der mechanische Schutz nach Erkalten und der Schutz gegen Auslaufen während der Montage. Die Vergussmasse dient dem Feuchtigkeitsschutz und hat die Aufgabe der Isolierung, sofern dies nicht eine spezielle Innenmuffe mit Kabelmasse übernimmt. Heißvergussmassen unterliegen einer Schrumpfung, ggf. muss entsprechend nachgefüllt werden. Heißvergussmassen werden in der Regel auf Bitumenbasis produziert.

Bei der Verarbeitung von Heißvergussmassen ist bezüglich des Arbeits- und Gesundheitsschutzes besondere Vorsicht gefordert, um Brandverletzungen und andere Gesundheitsgefährdungen zu verhindern.

Kaltvergusstechnik

Kaltvergussmassen basieren auf Ein- oder Zweikomponentensystemen. Wie schon bei der Heißvergusstechnik beschrieben wird ein Gehäuse als mechanischer Schutz benötigt. Vergussmassen dienen dem Feuchtigkeitsschutz und der Isolierung.

Kaltvergussmassen können dauerelastisch bleiben oder aushärten. Ein Vertreter der Kaltvergussmassen sind Gießharzmassen. Gießharze sind Zweikomponentenwerkstoffe. Marktübliche Gießharze sind Polyurethane und Polybutadiene. Polyurethane entstehen durch die Vernetzung eines Harzes (Polyol) mit einem niedermolekularen Härter (Diisocyanat). Die beiden Komponenten reagieren in einer Polyadditionsreaktion zu einem festen, duromeren Formstoff. Polyurethane härten exotherm, d. h. unter Wärmeentwicklung, nach dem Gelieren fast schlagartig aus und sind nach ca. 30 min fest. Bei Polybutadienen reagieren zwei Harzkomponenten. Die beiden Komponenten tragen reaktive Gruppen, die nach dem Mischen zu einem chemisch vernetzten System reagieren. Es entsteht ein hochelastischer Formstoff, der wiederentfernbar ist. Bei Polybutadienen entsteht beim Aushärten keine Wärme. Polybutadiene härten kontinuierlich aus und sind nach ca. 30 min fließbehindert.

Bei der Verarbeitung von Gießharzen ist eine entsprechende Arbeitsschutzkleidung, mindestens jedoch Arbeitsschutzhandschuhe, zu tragen. Dämpfe des Härter der Polyurethane können allergische Reaktionen hervorrufen. Polyurethane (Diisocyanat) sind als gesundheitsgefährdend eingestuft und kennzeichnungspflichtig.

Schrumpftechnik

Die Schrumpftechnik wird in Warmschrumpftechnik und Kaltschrumpftechnik unterschieden. Beide Techniken finden ihre Anwendung als Muffe oder Endverschluss.

Kaltschrumpftechnik

Bestandteile der Kaltschrumpftechnik sind aufgeweitete, mechanisch vorgespannte Kunststoffformteile, die mittels Stützwendel oder Stützrohr im aufgeweiteten Zustand gehalten werden. Zur Montage wird der Stützwendel oder das Stützrohr entfernt. Die Feldsteuerung ist in der Regel in den Formteilen integriert. Als Kunststoffmaterial kommt Silikonkautschuk zur Anwendung.

Warmschrumpftechnik

Auch in der Warmschrumpftechnik werden aufgeweitete Kunststoffformteile verwendet. Im Gegensatz zur Kaltschrumpftechnik erfolgt das Schrumpfen durch Wärmezufuhr. Die Kunststoffformteile sind in

2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung

der Regel ein Feldsteuerschlauch für jede Seite, ein Isolierkörper und die äußere Schutzmuffe mit thermoplastischem Kleber. Alle diese Teile sind warm schrumpfend und müssen einzeln mit externer Wärmezufuhr (Propanflamme) geschrumpft werden. Dabei ist der entsprechende Arbeits- und Gesundheitsschutz zu beachten.

Aufschiebetechnik

Für die Ausschiebetechnik werden ebenfalls Kunststoffformteile verwendet. Diese sind jedoch nicht aufgeweitet, sondern in Grenzen elastisch, sodass ein Aufschieben mit einem Montagehilfsmittel (z. B. Silikonfett) möglich ist. Die Abdichtung erfolgt mittels Presspassung. Das Aufschiebeteil hat die Aufgabe der Isolierung und in der Regel der Feldsteuerung. Die äußere Schutzmuffe ist zumeist ein warm schrumpfender Schlauch mit thermoplastischem Kleber.

Verbindungstechniken

Verbindungstechniken dienen dem Verbinden von Hauptleitern oder Kabelschirmen. Leiterverbindungen müssen thermischen und dynamischen Beanspruchungen standhalten. Während des ungestörten und des gestörten Betriebs dürfen sich die Eigenschaften der Leiterverbindungen nicht unzulässig ändern [26]. Leiterverbindungen werden in thermische und mechanische Verbindungen unterschieden, Letztere weiter in lösbare und nicht lösbare Verbindungen differenziert. In der Mittelspannungstechnik werden aktuell mechanische, nicht lösbare Verbindungen mittels Pressen, Schrauben und Klemmen.

In Mittelspannungskabelgarnituren findet das Verbindungsverfahren Klemmen bei der Verbindung von Kabelschirmen durch sogenannte Rollfedern Verwendung. Hauptleiter werden mit diesen Verfahren nicht verbunden.

Das Verfahren Pressen wird in der Mittelspannungsebene zum Verbinden von Hauptleitern und Kabelschirmen verwendet. Dabei kommen Sechskantpresswerkzeuge zum Einsatz. Zu beachten ist, dass für jede Kombination aus Querschnitt Kabel 1, Querschnitt Kabel 2 und Material (Aluminium und/oder Kupfer) ein dafür ausgelegter Verbinder genutzt werden muss.

Universeller ist hingegen das Verfahren Schrauben, das ebenfalls zum Verbinden von Hauptleitern oder Schirmdrähten dient. Obwohl das Verfahren Schrauben zu den lösbaren Verbindungen zählt, kann hier aufgrund der Verbinderkonstruktion mit Abreißschrauben nicht von einer lösbaren Verbindung gesprochen werden. Die Abreißschrauben bewirken, dass der Hauptleiter und der Verbinder mit einer definierten Kontaktkraft verbunden werden. Wird bei der Montage ein definiertes Drehmoment erreicht, reißt der Schraubenkopf ab und die Verbindung ist unlösbar und die definierte Kontaktkraft erreicht.

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der einfacheren und sicheren Montage (durch Drehmoment-schlüssel und Gegenhalter für Schraubverbindungen) und der garantierten Kontaktkraft für die Verbindung. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass durch die im Verbinder vorhandene Schneidvorrichtung der Kontaktwiderstand einer Schraubverbindung geringer ist als der einer Pressverbindung.

2.1.3 Feldsteuerung

Den Grenzflächen zwischen dem Isolierstoff und einem Gas wie der Luft kommt in der Hochspannungstechnik wie auch in der Mittelspannungstechnik eine besondere Bedeutung zu. Sinn der Feldsteuerung ist es, unzulässig hohe Feldstärken durch tangential und normal gerichtete Felder zu verhindern. Ein entsprechend hohes tangenciales Feld führt zu Oberflächen- oder Gleitentladungen, die wegen hoher Querkapazitäten leistungsstark sein und die Isolierung stark schädigen können. Eine hohe Feldstärke in einem Zwickel führt ebenso zu Entladungen.

Feldsteuertechnologien werden wie folgt unterteilt:

Geometrische Feldsteuerung

Für die geometrische Feldsteuerung wird die äußere Leitschicht bzw. der Kabelmantel trichterförmig erweitert. Dabei muss ein definiertes Profil, wie das Rogowski-Profil, herausgearbeitet werden. Dieses Profil bewirkt, dass die Feldstärke von innen nach außen stark abnimmt. Zur mechanischen Unterstützung wird ein Steuerkonus aus elastomerem Material verwendet.

Kapazitive Feldsteuerung

Durch Aufbringen (Wickeln) kapazitiver Steuerbeläge zwischen Erd- und Hochspannungspotenzial wird die kapazitive Feldsteuerung erreicht. Die Kapazität zwischen den einzelnen Belägen bewirkt die entsprechende Potenzialaufteilung durch Versatz in Längsrichtung. Je nach Dimensionierung der Beläge ist eine nahezu lineare Feldaufteilung möglich. In der Mittelspannungstechnik hat diese Art der Feldsteuerung ihre Bedeutung weitgehend verloren.

Refraktive Feldsteuerung

Bei der refraktiven Feldsteuerung wird am freien Ende einer Kabelisolierung ein Material aufgebracht, das eine wesentlich höhere Dielektrizitätszahl aufweist. Die Refraktion bewirkt ein Verdrängen des Felds, das somit entzerrt und dessen Feldstärke verringert wird.

Resistive Feldsteuerung

Bei der resistiven Feldsteuerung ist das aufgebrachte Material halbleitfähig. Die Kombination aus dem aufgebrachten Material und den Querkapazitäten führt zu einer RC-Kettenleiterstruktur, die die gewünschte Potenzialsteuerung entlang der Isolierung entstehen lässt.

Nichtlineare Feldsteuerung

Durch Aufbringung nichtlinearer Materialien wird eine nichtlineare Feldsteuerung erreicht. Die Nichtlinearität zeigt sich darin, dass bei niedrigen Feldstärken ein höheres Isoliervermögen als bei höheren Feldstärken besteht, bei denen dieses Material leitfähiger ist. Als Material kommt ein Trägermaterial zum Einsatz in dem das eigentliche nichtlineare Material, wie Zinkoxid (ZnO) oder Siliziumcarbid (SiC), enthalten ist.

Im Mittelspannungsnetz finden die refraktive, die resistive und die nichtlineare Feldsteuerung Anwendung. Die geometrische und die kapazitive Feldsteuerung sind in Garnituren des Hoch- und Höchstspannungsnetzes anzutreffen.

Die Qualität der Ausführung der Feldsteuerung ist von entscheidender Bedeutung. Fehler zwischen Kabelisolierung und aufgebrachtem Material, wie Hohlräume, Fremdkörpereinschlüsse, Nichteinhaltung von Absetzmaßen, führen zu Entladungen, die die Isolierung schädigen und letztendlich zum Ausfall führen.

2.2 Diagnostische Verfahren

2.2.1 Überblick über diagnostische Verfahren

Abbildung 2.3 stellt eine Übersicht der derzeit etablierten Prüf- und Diagnoseverfahren zur Zustandsbewertung von Mittelspannungskabeln dar.

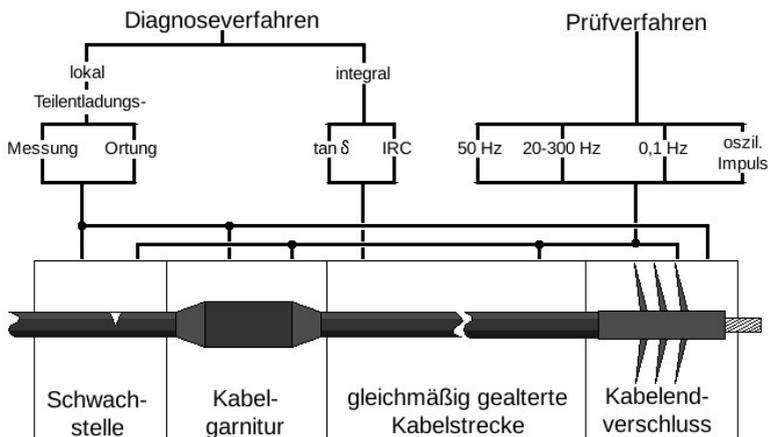


Abbildung 2.3: Prüf- und Diagnoseverfahren zur Zustandsbewertung von Mittelspannungskabeln [32]

Die gezeigten Prüfverfahren sind Spannungsprüfungen, bei denen ein festgelegter Prüfspannungspegel eine festgelegte Prüfzeit an einem Prüfling angelegt wird. Die Prüffrequenz sollte die Netzfrequenz sein. Bei ortsveränderlichen Prüfanlagen ist die notwendige Blindleistungsbereitstellung ein Problem, sodass sich alternative Prüffrequenzen (z. B. 0,1 Hz) etabliert haben. Das Ergebnis einer Spannungsprüfung ist eine klare Ja-Nein-Aussage.

Diagnoseverfahren liefern eine differenziertere Aussage über den Zustand eines Kabels bzw. einer Isolierung, dürfen die Isolierung während der Messung aber nicht weiter schädigen oder gar zerstören. Ihre Einteilung ist nach vielen Gesichtspunkten möglich. In diesen Zusammenhang soll die nachfolgende Abgrenzung integraler und ortsauflösender (lokale) Verfahren Verwendung finden (Abbildung 2.3).

Integrale (dielektrische) Verfahren [4, S. 271 ff.], [33, S. 406 ff.] bzw. [34, S. 307 ff.] liefern einen Zustandswert für gleichmäßig gealterte Isolierungen. Isolierungen unterliegen normalen Alterungen, die durch eindringende Feuchtigkeit sowie normale und außergewöhnliche Belastungen hervorgerufen werden. Integrale Verfahren sind auf die spezifischen physikalischen Eigenschaften der Hauptisolierung abgestimmt und können nicht zwischen einer lokalen Schädigung und gleichmäßiger Alterung unterscheiden.

Integrale Verfahren unterteilen sich in Diagnosen im Frequenzbereich (Verlustfaktormessung mit konstanter Frequenz und variabler Prüfspannung bzw. variabler Frequenz und konstanter Prüfspannung) und in Diagnosen im Zeitbereich (Relaxationsstrommessung, Rückkehrspannungsmessung).

Teilentladungsmessung bzw. Teilentladungsart sind ortsauflösende Verfahren. Ihre ausführliche Beschreibung erfolgt im nachfolgenden Abschnitt.

2.2.2 Teilentladungsdiagnose

Teilentladungen entstehen in und an Isolierungen. Sie überbrücken Teile der Isolierung, führen aber nicht unmittelbar zum Durchschlag und treten immer dann auf, wenn die elektrische Beanspruchung örtlich größer ist als die elektrische Festigkeit. Eine Teilentladung ist stets Konsequenz einer lokalen, stark inhomogenen elektrischen Feldstärkerhöhung [34, 35].

Arten

Teilentladungen können an der Oberfläche oder im Inneren der Isolierung auftreten. Abbildung 2.4 zeigt typische Modellanordnungen, die zu unterschiedlichen Teilentladungsarten führen [33, 35].

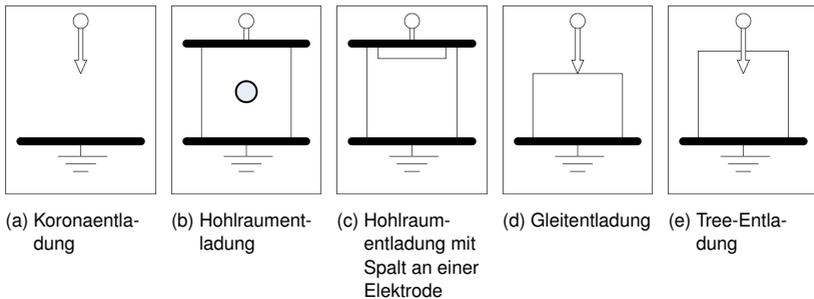


Abbildung 2.4: Unterscheidung von Teilentladungen an typischen Modellanordnungen [35, S. 63]

Bei der **Koronaentladung** (Abbildung 2.4a) handelt es sich um eine äußere Teilentladung an scharfkantigen, unter Spannung stehenden elektrischen Leitern. In Luft ist diese Entladung meist ungefährlich (bis auf eventuell gestörten Radio- und Fernsehempfang). Im Gasraum oder flüssigkeitsisolierten Räumen kann eine Koronaentladung aggressive oder toxische Abbauprodukte erzeugen, die die Lebensdauer der Materialien herabsetzen können. Koronaentladungen treten im Bereich des Spannungsmaximums auf, sofern die Einsetzspannung geringer ist als die anliegende Spannung. Koronaentladungen sind im Mittelspannungsnetz in der Regel nur an Endverschlüssen bzw. an nicht optimalen Anschlussbedingungen an das Messsystem zu finden. Die Koronaentladung wird als Störer betrachtet.

Die Ursachen von **Hohlraumentladungen** (Abbildungen 2.4b und 2.4c) sind in der Regel fehlerhafte Herstellungsprozesse, fehlerhafte Montage oder elektrische, thermische und mechanische Überlastungen. Sie treten in kleinen, meist gasgefüllten Hohlräumen, in flüssigen und insbesondere in festen

Isolierstoffen auf. Die Hohlräume können vom Dielektrikum vollständig umschlossen sein (Abbildung 2.4b) oder an einer der Elektroden liegen (Abbildung 2.4c). Wie Gleitentladungen treten Hohlraumentladungen vom Nulldurchgang bis zum Spannungsmaximum auf. Im Gegensatz zu Gleitentladungen ist ihre Teilentladungsintensität nahezu konstant. Für kugelförmige und ellipsoide Hohlräume ist eine analytische Berechnung mithilfe einer Feldberechnung möglich. Da allerdings die Form des Hohlraums meist unbekannt ist, können nur prinzipielle Überlegungen anhand des kapazitiven Ersatzschaltbilds vorgenommen werden.

Gleitentladungen (Abbildung 2.4d) treten auf, wenn entlang der Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Isoliermaterialien lokal hohe elektrische Feldstärken wirken. Ihr dauerhafter Einfluss bewirkt irreversible Schäden durch Depolymerisation und chemische Sekundärprozesse, die zu einer Oberflächenerosion bis schließlich zum vollständigen Versagen der Isolationsfähigkeit führen können. Gleitentladungen entstehen an Durchführungen, Kabelendverschlüssen und an hier besonders interessierenden Muffen sowie an sonstigen Schräggrenzflächen. Gleitentladungen treten in der Regel vom Nulldurchgang bis zum Spannungsmaximum einer ansteigenden oder abfallenden Spannung mit einer ansteigenden Teilentladungsintensität auf.

Abbildung 2.4e illustriert eine **Tree-Entladung**, die in Polyethylen-Isolierungen von Kabeln vorkommt. Durch Verunreinigungen während der Herstellung oder durch Einfluss von Wasser während des Betriebs von außen kommt es zur Ausprägung von Water-Trees in der Isolierung. Die Bildung und das Wachstum von Water-Trees sowie deren Weiterentwicklung zum Electrical-Tree sind sehr komplexe Prozesse. Ein einmal begonnener Prozess des Water-Tree-Wachstums führt zwangsläufig zu einem Durchschlag. Dieser Prozess kann wenige Minuten (unter Prüfbedingungen) bis einige Jahre dauern. In Bestandteilen einer Garnitur wurden bisher keine Tree-Entladungen nachgewiesen.

Zu den Entladungen an typischen Modellanordnungen treten in der Praxis auch ein Kontaktrauschen bei schlecht verbundenen Leitern im Bereich vor und nach dem Nulldurchgang der Spannung sowie Teilentladungen durch metallische Teile auf freiem Potenzial auf. Diese Entladungen sind als Störer zu betrachten.

Wirkung

Die schädigenden und erodierenden Wirkungen von Teilentladungen bestehen darin, dass in einem kleinen Volumen dauernd Energie umgesetzt wird. Nach [35] wird an einer Teilentladungsstelle eine Leistung von $P_{\text{Dis}} = 1 \dots 10 \text{ W/cm}^3$ im Gegensatz zu den dielektrischen Verlusten von $P_V = 0,01 \text{ W/cm}^3$ umgesetzt. Die während einer Teilentladung umgesetzte Energie W_{Dis} berechnet sich nach Gleichung 2.1 [35] aus dem Integral über der Zeit mit den Parametern Spannungsabsenkung Δu und umgesetzte Ladung Q .

$$W_{\text{Dis}} = \int_0^{\Delta t} \Delta u(t) \cdot dQ(t) \quad (2.1)$$

Folgende Wirkungen sind an den Teilentladungsstellen zu erwarten [35]:

Optisch

Aus der Entladung entstehen unmittelbar Strahlungen im sichtbaren und ultravioletten Bereich.

Akustisch

Der Entladungsprozess geht mit einer Druckänderung an der Entladungsstelle einher, die zu akustisch messbaren Druckwellen führt.

Thermisch

Der lokal hohe Leistungsumsatz verursacht einen punktuellen Temperaturanstieg.

Chemisch

Die Energie einer Teilentladung kann chemische Reaktionen bewirken, die eine Strukturveränderung an den betroffenen Materialkomponenten auslösen.

Elektrisch

Der Stromfluss in der Zuleitung bewirkt eine Ausbreitung elektromagnetischer Felder mit Frequenzen bis 100 MHz.

Messung

Aus den erwarteten Wirkungen ergibt sich die Möglichkeit, über entsprechend geeignete Sensoren Teilentladungsdetektionen zu intendieren. So ist es möglich, mit Ultraschallsensoren und Mikrofonen akustische Teilentladungen sowie mit Tageslicht-UV-Kameras und Infrarot-Kameras optische und thermische Teilentladungen aufzuspüren. Daneben sind chemische Analysen wie die Gas-in-Öl-Analyse möglich.

Das Prinzip der elektrischen Teilentladungsdetektion besteht darin, den elektrischen Nachladeimpuls zu messen. Neben einigen Messgeräten, die induktive Sensoren nutzen, ist der kapazitive Standardmesskreis nach IEC 60270 [36] die etablierte Messanordnung.

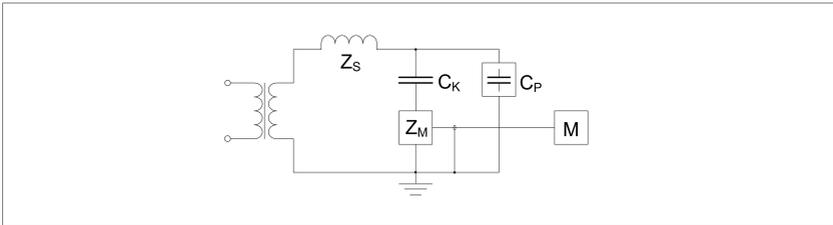


Abbildung 2.5: Standardmesskreis nach IEC 60270 [35, S. 66], [36, S. 22, Bild 1a]

Dieser Standardmesskreis besteht aus dem Prüfling C_P , dem Koppelkondensator C_K , der Messimpedanz Z_M und der Sperrimpedanz (Sperrinduktivität) Z_S (Abbildung 2.5). Nach einer Teilentladung kommt es zu einem Stromimpuls, der das Nachladen der Kapazitätsanordnung (hier mit C_P bezeichnet) bewirkt. Dieser Nachladestrom wird durch Umladen des Koppelkondensators C_K geliefert. Der fließende Nachladestrom wird über die Messimpedanz Z_M einem Teilentladungsmessgerät zum Speichern, Auswerten und Darstellen zugeführt. Die Sperrinduktivität Z_S stellt sicher, dass der Nachladestrom nur durch das Umladen des Koppelkondensators gespeist wird und Störungen aus der Prüfspannungsquelle gedämpft werden.

2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung

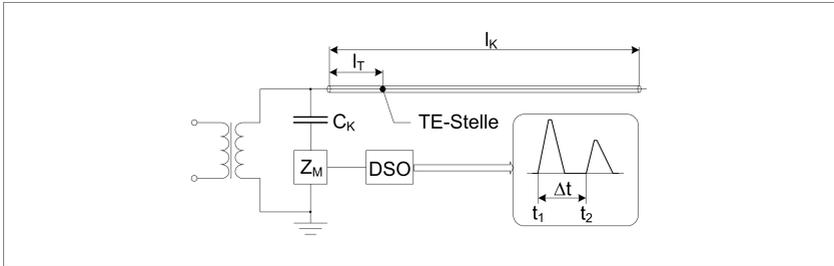


Abbildung 2.6: Prinzip der Teilentladungsortung [35, S. 138]

Abbildung 2.6 veranschaulicht das Prinzip der Teilentladungsortung an einem Kabel. Basis für eine Teilentladungsortung ist die hinreichend genau bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit v . Der durch das Umladen der Kondensatoranordnung an der Teilentladungsstelle entstehende Teilentladungsimpuls, wird an der Teilentladungsstelle geteilt. Der erste Teil läuft direkt mit der Zeit nach Gleichung 2.2 zum Anfang und wird im Teilentladungsmessgerät erfasst. Der zweite Teil läuft zum Ende, wird dort reflektiert und gelangt dann zum Teilentladungsmessgerät mit der Zeit nach Gleichung 2.3. Aus der Laufzeitdifferenz der Teilentladungsimpulse $\Delta t = t_2 - t_1$, der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit v und der Länge des Kabels l_K kann die Entfernung l_T vom Anfang A zur Teilentladungsstelle errechnet werden (Gleichungen 2.4 und 2.5).

$$t_1 = \frac{l_T}{v} \quad (2.2)$$

$$t_2 = \frac{2 \cdot l_K - l_T}{v} \quad (2.3)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2 \cdot (l_K - l_T)}{v} \quad (2.4)$$

$$l_T = l_K - \frac{\Delta t \cdot v}{2} \quad (2.5)$$

Die ursprünglich sehr steilen, nur wenige Nanosekunden dauernden Teilentladungsimpulse werden durch die Dämpfung des Kabels in ihrer Amplitude gemindert und zeitlich gestreckt. Die Fläche, die ein Teilentladungsimpuls einschließt, bleibt erhalten. Die Integrale unter den beiden aufgezeichneten Teilentladungsimpulsen zusammen geben die scheinbare Ladung Q_s wieder.

Da im Regelfall die Kapazitäten des Netzwerks unbekannt sind, muss vor Beginn der Messung eine Kalibrierung erfolgen.

Weiterhin führen Grundstörungen zu einer verringerten Empfindlichkeit, sodass eine Teilentladung über einen bestimmten Wert der scheinbaren Ladung liegen muss, um erfasst werden zu können.

Auswertungen

Ziel der Auswertung ist das Erkennen schädigungs- bzw. ausfallrelevanter Teilentladungsprozesse. Dabei sind aus dem stochastischen Charakter von Teilentladungen Gesetzmäßigkeiten abzuleiten.

Zur Auswertung stehen folgende **primäre Messgrößen** zur Verfügung:

- scheinbare Ladung Q_s nach Integration der aufgezeichneten Impulse,
- Polarität der Teilentladung,
- Phasenwinkel ϕ einzelner Teilentladungen bezüglich der Prüfspannung und
- Amplitude der Prüfspannung U_P .

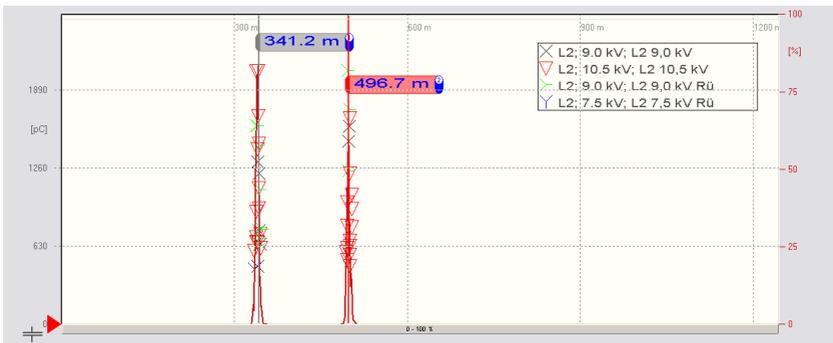


Abbildung 2.7: Teilentladungs-Mapping-Diagramm (Quelle: BAUR-Software, eigene Vor-Ort Messung)

2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung

Aus den primären Messgrößen können folgende **sekundäre Messgrößen** bestimmt werden:

- mittlere scheinbare Ladung $Q_{\text{mit}}(U_P)$,
- minimale scheinbare Ladung $Q_{\text{min}}(U_P)$,
- maximale scheinbare Ladung $Q_{\text{max}}(U_P)$,
- Impulswiederholffrequenz $N_{TE}(U_P, t)$ in einer definierten Zeiteinheit oder einer definierten Anzahl von Perioden.

Die erste Auswertungsmöglichkeit besteht in der Lokalisierung der Teilentladungsstellen (**Teilentladungsmapping**) nach Abbildung 2.7. In der Regel erzeugt das Teilentladungsmesssystem diese Abbildung halb- oder vollautomatisch aus den Reflektogrammen der aufgezeichneten Messreihen (Abbildung 2.6 und Gleichung 2.5). Je nach Messsystem werden darin auch Betriebsmittel (Muffen und Endverschlüsse) eingeblendet. Abbildung 2.7 beschreibt zwei Teilentladungsstellen eines Leiters (L2). Aus der Legende geht hervor, dass ein Hystereseversuch realisiert und eine Teilentladungseinsetzspannung von 9,0 kV sowie eine Teilentladungsaussetzspannung von 7,5 kV ermittelt wurde.

Zur **grafischen Identifikation der Teilentladungsarten** stehen das Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm und die Puls-Sequenz-Analyse zur Verfügung. Beide Darstellungen erzeugen charakteristische Teilentladungsbilder nach den Abbildungen 2.8 und 2.9, aus denen die jeweilige Teilentladungsart ersichtlich ist.

In Abbildung 2.4 sind typische Modellanordnungen dargestellt, die zu typischen Teilentladungsarten führen. Die Korrespondenz zwischen den Modellanordnungen und den typischen Teilentladungsbildern stellt Tabelle 2.1 für die Teilentladungsarten Koronaentladung, Gleitentladung, Hohlraumentladung und Tree-Entladung her. In Abbildung 2.8 (2.8g, 2.8h) sind zusätzlich die beiden Bilder für Kontaktrauschen und Entladung von Elektroden auf freiem Potenzial dargestellt. Diese haben keine zugeordnete Modellanordnung, sind jedoch in der Praxis anzutreffen. Koronaentladungen in Luft gegen eine dielektrisch beschichtete Gegenelektrode und stochastisch erzeugte Teilentladungsimpulse zeigt Abbildung 2.9 (2.9b, 2.9f).

Weitere Möglichkeiten zur Unterscheidung von Teilentladungsarten sind der Hystereseversuch und der Spannungssteigerungsversuch ([33] bzw. Abbildung 2.10).

Mittels Hystereseversuchs werden die Teilentladungseinsetzspannung U_e und die Teilentladungsaussetzspannung U_a bestimmt. Aus deren Verhältnis kann zwischen Koronaentladung und Hohlraumentladung bzw. Oberflächenentladung unterschieden werden.

Die beiden Spannungen sind für die Beurteilung einer Teilentladung von besonderer Bedeutung, da folgende Fragen beantwortet werden können.

1. Ist die Teilentladungsstelle im ungestörten Betrieb aktiv?
2. Kann die Teilentladungsstelle durch eine zeitweilige Überspannung (Erdschluss) im Netz aktiviert werden?

Durch den Spannungssteigerungsversuch können Anzeichen gefunden werden, ob Entladungen in Hohlräumen oder auf der Oberfläche stattfinden.

Abschließend sei betont, dass die Interpretation der Teilentladungsbilder für singuläre Teilentladungsstellen sehr gut gewährleistet ist. Bei multiplen Teilentladungsstellen ist durch Überlagerung eine Interpretation erheblich schwieriger.

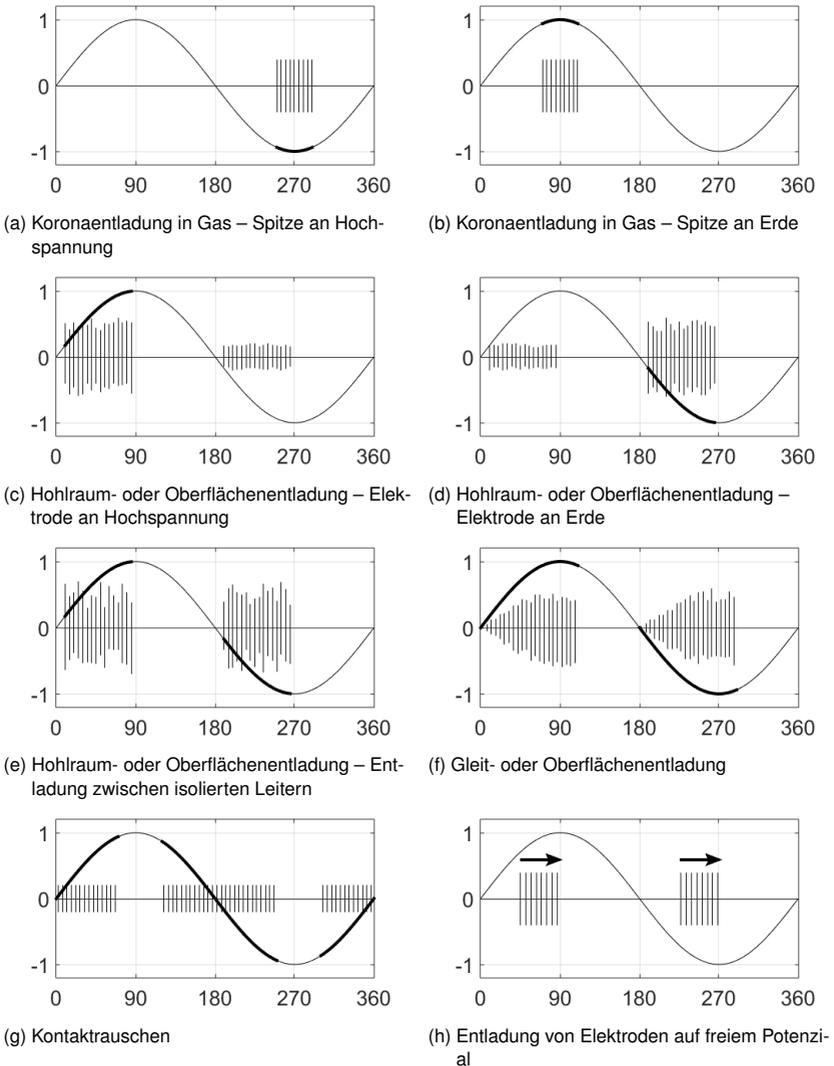
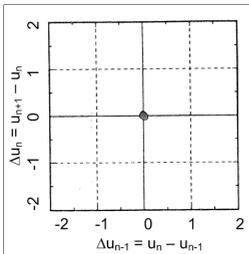
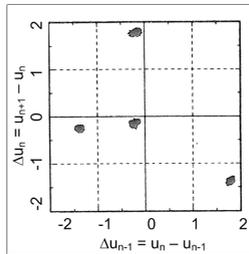


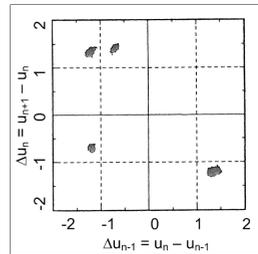
Abbildung 2.8: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm für unterschiedliche Teilentladungsstellen [33, S. 251]



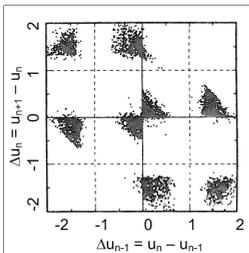
(a) Koronaentladung



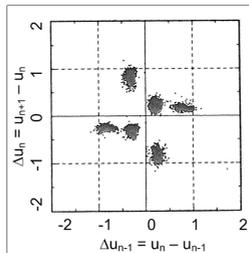
(b) Koronaentladung gegen eine beschichtete Elektrode



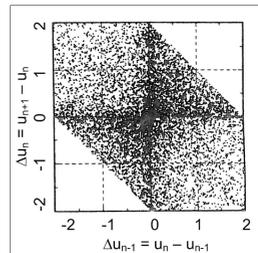
(c) Hohlraumentladung



(d) Gleitentladung



(e) Tree-Entladung



(f) Störer mit stochastischem Charakter

Abbildung 2.9: PSA-Diagramme für unterschiedliche Teilentladungsstellen [37, S. 55]

Da in der Praxis von multiplen Teilentladungsstellen ausgegangen werden muss, jedoch immer eine Teilentladungsstelle dominiert, wird im Folgenden der Begriff der dominierenden Teilentladungsstelle verwendet.

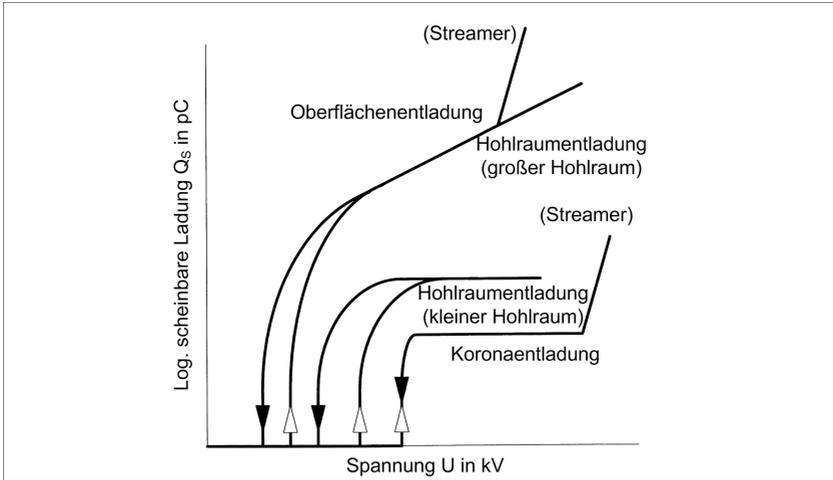


Abbildung 2.10: Charakteristische Kurven der Teilentladungsintensität über der Spannung [33, S. 252]

Entladungsart:	Abbildung:
Koronaentladung	Modellanordnung: Abbildung 2.4a PRPD-Bild: Abbildung 2.8a bzw. 2.8b PSA-Bild: Abbildung 2.9a bzw. 2.9b
Hohlraumentladung	Modellanordnung: Abbildung 2.4b bzw. 2.4c PRPD-Bild: Abbildung 2.8c, 2.8d bzw. 2.8e PSA-Bild: Abbildung 2.9c
Gleitentladung	Modellanordnung: Abbildung 2.4d PRPD-Bild: Abbildung 2.8f PSA-Bild: Abbildung 2.9d
Tree-Entladung	Modellanordnung: Abbildung 2.4e PRPD-Bild: - PSA-Bild: Abbildung 2.9e

Tabelle 2.1: Typische Modellanordnungen mit korrespondierenden typischen Teilentladungsbildern

2.3 Texturerkennung und Grauwertmatrix

In dem verfolgten Ansatz wird eine Sequenz von Teilladungsmessungen bei verschiedenen Spannungen statistisch ausgewertet. Dabei entstehen sehr viele Daten, die mit der Texturerkennung auf Basis einer Grauwertmatrix sinnvoll reduziert werden.

Die Texturerkennung auf Basis einer Grauwertmatrix ist ein wichtiger Bestandteil der digitalen Bildverarbeitung. So wird in [38, 39] die Erzeugung einer Grauwertmatrix aus einem Grauwertbild beschrieben. Das prinzipielle Vorgehen bei einer Texturerkennung auf Basis einer Grauwertmatrix ist in [40, 41, 42] vorgestellt. Die Verwendung dieses Prinzips Bewertung von Messwerten bzw. aus Messwerten abgeleiteten Werten ist wenig verbreitet.

Um Messwerte einer Texturerkennung zugänglich zu machen, müssen diese skaliert und ein Grauwertbild erzeugt werden. Die Skalierung ist sowohl linear als auch nicht linear, z. B. logarithmisch, möglich. In diesem Zusammenhang wird eine lineare Skalierung nach Gleichung 2.6 verwendet, in der der Bereich vom minimalen bis maximalen Messwert in den Wertebereich des Grauwertbilds von 1, ..., 8 umgerechnet wird. Der Operand "div" gibt den ganzzahligen Anteil einer Division an.

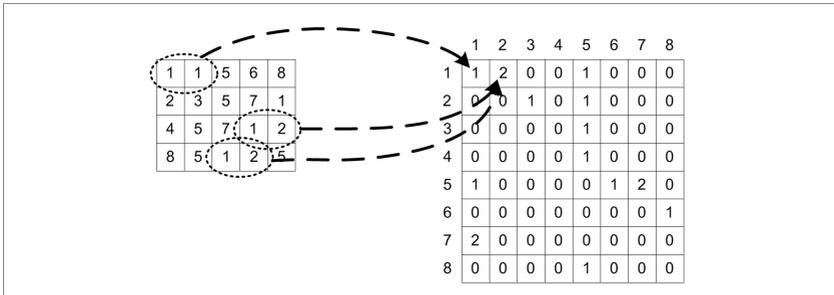


Abbildung 2.11: Berechnung einer Grauwertmatrix (Prinzip)

$$G_{i,j} = \left(\frac{M_{i,j} - \min(M_j)}{\max(M_j) - \min(M_j)} \cdot 8 + 1 \right) \text{ div } 1; G \in \mathbb{N} \quad (2.6)$$

$$G_{i,j} = (g(x,y)) = \{1, \dots, 8\} \quad (2.7)$$

$$W_{G,\rho}(g_1, g_2) = [a_{g_1, g_2}] \quad (2.8)$$

(a_{g_1, g_2} - Häufigkeit der Grauwertkombination

(g_1, g_2) = [$g(x_1, y_1), g(x_2, y_2)$] bezüglich der Relation ρ)

Nach Jähne [40, S. 137 f.] ist die Bildung einer Grauwertmatrix wie folgt definiert:

"Das Element $p^\rho(i,j)$ der Grauwertmatrix (Co-Occurrence-Matrix) G^ρ ist gleich oder proportional der Häufigkeit, mit der zwei Bildpunkte, deren räumliche Beziehung zueinander durch den Verschiebungsfaktor ρ beschrieben wird, die Grauwerte i bzw. j haben. Die einzelnen Verbundwahrscheinlichkeiten lassen sich in eine Matrix zusammenfassen."

Die Gleichungen 2.7 und 2.8 mit der nachfolgenden Bedingung geben die formale Beschreibung wieder. Die Veranschaulichung der Berechnung ist in Abbildung 2.11 festgehalten. Die Umsetzung erfolgt auf Basis von [42] mit dem Softwarepaket [43].

2.4 Maschinelles Lernen

Die maschinellen Lernverfahren werden für die Bestimmung einer unbekanntes Muffe eingesetzt. Es wird die Grauwertmatrix der unbekanntes Muffen mit den Grauwertmatrizen bekannter Muffen (Referenzmuffen) verglichen und somit die Muffe bestimmt.

Die Einordnung der maschinellen Lernverfahren ist auf vielfältige Weise möglich und kann nach [44] in die maschinelle Intelligenz, nach [45, 46, 47] etwas allgemeiner in die künstliche Intelligenz oder nach [39, 48, 49] in die digitale Bildverarbeitung erfolgen. Eine weitere Einordnung ist in das "Knowledge Discovery in Databases" nach [50] als Art des Data-Minings, wie in [51], möglich.

Eine Sonderstellung nehmen die neuronalen Netze ein. Je nach Literaturquelle werden sie eigenständig behandelt oder einige Formen der neuronalen Netze dem maschinellen Lernen zugeordnet.

2.4.1 Überblick über maschinelles Lernen

Das maschinelle Lernen kann in vielfacher Weise eingeordnet werden. In diesem Fall wird der Einordnung nach [50] gefolgt. Wie aus Abbildung 2.12 hervorgeht, ist das maschinelle Lernen dem "Knowledge Discovery in Databases" untergeordnet und steht damit auf einer Stufe mit der Statistik und mit Datenbanksystemen, deren wesentliche Eigenschaften ebenfalls in Abbildung 2.12 enthalten sind. Diese Einordnung ist erkenntnisgetrieben und für große Datenmengen konzipiert. Im vorliegenden Fall existieren Daten im Umfang von rund 100 GB, sodass dieses Vorgehen gerechtfertigt ist.

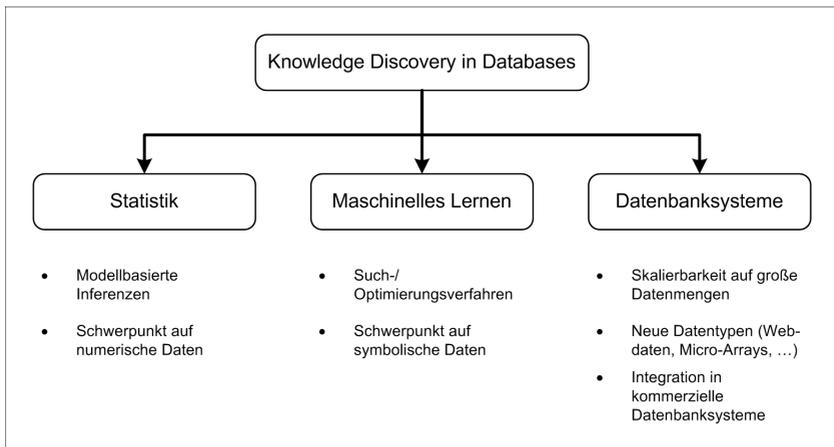


Abbildung 2.12: Einordnung des maschinellen Lernens

2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung

Das maschinelle Lernen [52, 53] kann Abbildung 2.13 folgend in unüberwachtes und überwachtes Lernen unterteilt werden. Beide Lernarten unterscheiden sich darin, dass beim überwachten Lernen das Ergebnis bekannt ist, beim unüberwachten Lernen jedoch nicht. Das unüberwachte Lernen kann nach [50] in Clustering, Outlier-Detection und Assoziationsregeln unterteilt werden. Grundsätzlich dient das unüberwachte Lernen der Identifikation einer endlichen Menge von Kategorien, Klassen oder Gruppen (Cluster) von Daten. Ähnliche Objekte sollen gleichen Clustern und unähnliche Objekte unterschiedlichen Clustern zugeordnet werden. Die sowohl beim unüberwachten als auch beim überwachten Lernen auftretende Outlier-Detection, soll Ausreißer identifizieren und eliminieren.

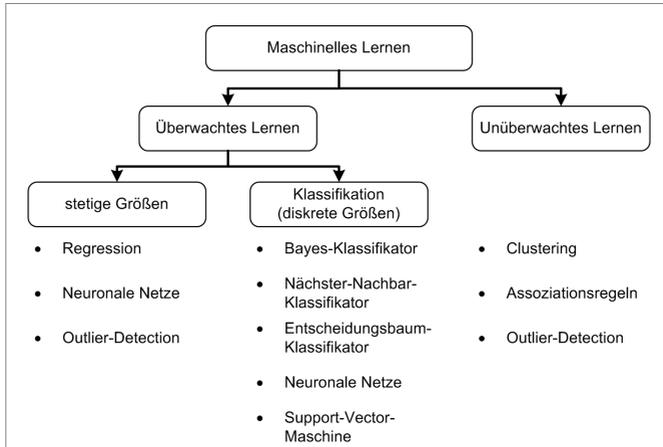


Abbildung 2.13: Übersicht und Strukturierung maschineller Lernverfahren

Im Folgenden wird nur noch auf die Verfahren der Klassifikation eingegangen. Die Klassifikation (für diskrete Ergebnisse) wird zusammen mit der Regression (für stetige Ergebnisse) und der schon erwähnten Outlier-Detection dem überwachten Lernen zugeordnet. Da im vorliegenden Fall eine Muffe bzw. eine Garniturspezifikation erkannt werden soll, sind die zur Klassifikation gehörenden Verfahren zu testen.

Die getesteten Verfahren sind Grundtypen der überwachten maschinellen Lernverfahren. Lernverfahren wurden für spezielle Anwendungen, z. B. aus der Finanzökonomie, optimiert und für diese Bedingungen abgeleitet. Die Auswahl der getesteten Verfahren orientiert sich an [52, 53].

Die untersuchten Grundtypen der Verfahren sind:

- Bayes-Klassifikator,
- Nächster-Nachbar-Klassifikator,
- Entscheidungsbaum-Klassifikator,
- neuronale Netze,
- Support-Vector-Maschine.

Unter dem Begriff neuronale Netze ist ein Bündel von Methoden mit unterschiedlichen Zielstellungen zusammengefasst worden. In diesem Zusammenhang wurde nur das auf neuronalen Netzen beruhende Klassifikationsverfahren untersucht. Die Support-Vector-Maschine dient in der Grundform der Zuordnung eines Objekts zu genau zwei Klassen. Da die Menge der Klassen prinzipiell unbegrenzt ist, wird diese Methode nicht weiter betrachtet. Neben diesen Grundformen existieren Modifikationen, Erweiterungen und Kombinationen, die ebenfalls nicht weiter betrachtet werden.

2.4.2 Bewertung von Klassifikationsverfahren

Unter Klassifikation wird die Zuordnung eines zunächst unbekanntes Objekts zu einer bekannten Klasse verstanden. Der Prozess des überwachten Lernens läuft in drei Schritten ab:

- Konstruktion des Modells,
- Validierung des Modells,
- Anwendung des Modells.

Zunächst wird die bekannte Grundmenge der Objekte in zwei Mengen geteilt: eine sogenannte Trainingsmenge und eine Validierungsmenge. Der Schlüssel der Aufteilung ist von der Menge der Objekte und dem Klassifikationsverfahren abhängig.

Die Trainingsmenge wird mit dem Klassifikations-Algorithmus gelernt. Das Ergebnis ist der Klassifikator. Zur Bestimmung der Güte wird im nächsten Schritt der Klassifikator auf die Validierungsmenge angewendet. Die Eigenschaften, welche die Güte eines Klassifikators definieren, sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Der abschließende Schritt ist die Anwendung des Klassifikators auf unbekannte Objekte. Das Ergebnis ist die Zuordnung des unbekanntes Objekts zu einer bekannten Klasse.

Zur Bestimmung der Güte von Klassifikatoren existiert eine Reihe von Bewertungsmethoden (siehe Tabelle 2.3).

Die einfachste Bewertungsmethode ist das Train-and-Test, das der oben beschriebenen Grundmethode entspricht und für große Datenmengen anwendbar ist. Für geringere Datenmengen steht die m -fache Überkreuz-Validierung zur Verfügung. Als Beispiel wird die dreifache Überkreuz-Validierung beschrieben. Die Grundmenge wird dabei in drei Teile geteilt und der Klassifikator zunächst mit den Mengen m_1 und m_2 gelernt. Die Menge m_3 dient als Validierungsmenge. Im nächsten Lernschritt werden die Mengen getauscht, sodass jede Menge einmal die Validierungsmenge war. Eine weitere Methode für geringe Datenmengen ist das Bootstrap-Verfahren. Die Validierungsmenge stellt dabei eine Auswahl aus der Grundmenge dar. In der statistischen Wahrscheinlichkeitstheorie wird dieses Verfahren als "Ziehen mit Zurücklegen" bezeichnet. In diesem Zusammenhang wird Leave-one-out als Verfahren zur Bestimmung der Güte der Klassifikatoren verwendet. Aus der Grundmenge wird ein Objekt ausgewählt, das die Validierungsmenge darstellt. Die verbleibenden Objekte dienen als

Eigenschaften der Güte eines Klassifikators:
Klassifikationsgenauigkeit
Klassifikationsfehler
Kompaktheit des Modells (Klassifikator)
Interpretierbarkeit
Effizienz (Konstruktion und Anwendbarkeit)
Skalierbarkeit
Robustheit gegen Rauschen
Performance des Klassifikationsvorgangs

Tabelle 2.2: Eigenschaften der Güte eines Klassifikators

Bewertungsmethode:	Charakteristik:
Train-and-Test m-fache Überkreuz- Validierung Bootstrap	Trennung in Trainings- und Validierungsmengen Anwendung, wenn wenige Objekte zur Verfügung stehen. Validierungsmenge wird durch Ziehen mit Zurücklegen bestimmt.
Leave-one-out	Validierungsmengen in Trainingsmenge enthalten Trainingsmenge = Grundmenge minus ein Objekt Wiederholungen = $n - 1$.

Tabelle 2.3: Bewertungsmethoden

Trainingsmenge. Sofern die Objekte geordnet sind, kann durch Bestimmung der Objekte 1 bis n als Validierungsmenge der Fehler bestimmt werden. Ist das Objekt 1 die Validierungsmenge, muss der Klassifikator Objekt 2 als Klasse erkennen. Erkennt der Klassifikator das Objekt 2, so ist die Klasse richtig, andernfalls liegt ein Fehler vor. Ist das Objekt 2 die Validierungsmenge, kann der Klassifikator die Objekte 1 oder 3 als richtig erkennen, andernfalls liegt ein Fehler vor. Diese Bewertungsmethode findet im Unterkapitel 3.2 Anwendung.

2.5 Alterung von Kabelsystemen

Alterung: Die Alterung von Kabelsystemen entsteht durch Belastung. In [54] wird von einer TEAM-Belastung (**T**hermische, **E**lektrische, **u**mweltbedingte (**A**mbient) und **M**echanische Alterung) gesprochen. Unter Alterung im elektrischen Sinne wird die Änderung von Isoliereigenschaften verstanden, die nur eintritt, wenn eine Belastung bzw. ein Alterungsfaktor wirkt. Das Wirken eines Alterungsfaktors wird als Alterungsvorgang bzw. nach [54] als Ageing bezeichnet. Die Änderung einer Eigenschaft kann temporär (Degradation) oder irreversibel (Deterioration) sein. Abbildung 2.14 veranschaulicht diese Zusammenhänge.

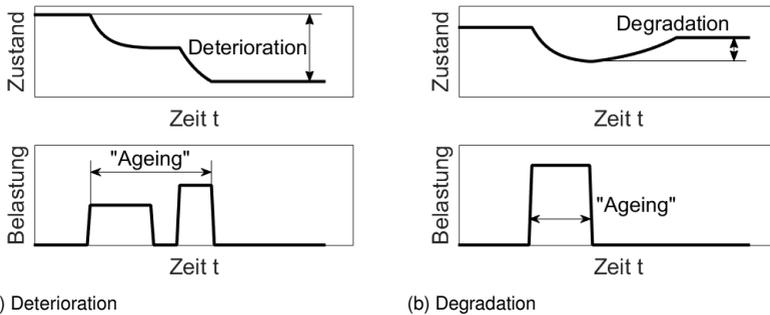


Abbildung 2.14: Ageing [54, S. 166]

Die Alterung kann überdies in eine intrinsische und eine extrinsische Alterung differenziert werden [54]. Erstere ist eine stofflich bedingte Alterung der Isolierung durch die Einwirkung von Alterungsfaktoren. Unter extrinsischer Alterung wird das Auftreten irreversibler Eigenschaftsänderungen der Isolierung durch die Wirkung von Alterungsfaktoren auf unbeabsichtigt eingebrachte Fehler verstanden. Eine Fehlstelle in der Isolierung ruft eine extrinsische Alterung hervor, sodass die Isolation versagt. Mitunter können Synergieeffekte mit anderen Alterungsfaktoren auftreten, die möglicherweise die Isolation nicht schädigen würden. Damit erhöht sich die Geschwindigkeit der Alterung. Ist ein Alterungsfaktor dominant, spricht man von Einfaktoralterung, andernfalls von Multifaktoralterung. Grundsätzlich ist die Alterung ein komplexer Vorgang.

Abbildung 2.15 zeigt die typische Alterung eines Kabelsystems. In der Betriebspraxis existieren Kabelsysteme, die langsam, durchschnittlich und schnell altern. Da teilentladungsbefahtene Muffen nicht sofort ausfallen, sondern bis zum Ausfall noch einige Zeit vergeht, sind diese dem schnellen Altern zuzuordnen.

Lebensdauer: Die Lebensdauer ist ein Grenzwert, der dann erreicht ist, wenn ein weiterer Betrieb technisch und ökonomisch nicht sinnvoll oder ein sicherer Betrieb nicht mehr gewährleistet ist. Die Lebensdauer wird von der TEAM-Belastung geprägt und folgt den LebensdauerGesetzen, konkret dem Arrhenius-Gesetz und dem Invers-Power-Gesetz [56]. Das Arrhenius-Gesetz (thermische Alterung) besagt, dass mit zunehmender elektrischer Belastung E_A die Verlustleistung steigt, wodurch die Beanspruchungstemperatur T des Betriebsmittels zunimmt. Diese höhere Temperatur T verkürzt die Lebensdauer, setzt jedoch erst nach Erreichen einer "Aktivierungsenergie" ein [33, 54, 57]. Gleichung 2.9 beschreibt das Arrhenius-Gesetz der thermischen Alterung. k_B und k_t stellen Konstanten dar.

$$A(T) = k_t \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B T}} \quad (2.9)$$

Das Invers-Power-Gesetz (elektrische Alterung) hingegen stellt einen Zusammenhang zwischen Belastungsfeldstärke E und Lebensdauer t her [54, 55, 58]. Wenn die elektrische Belastung unter einer

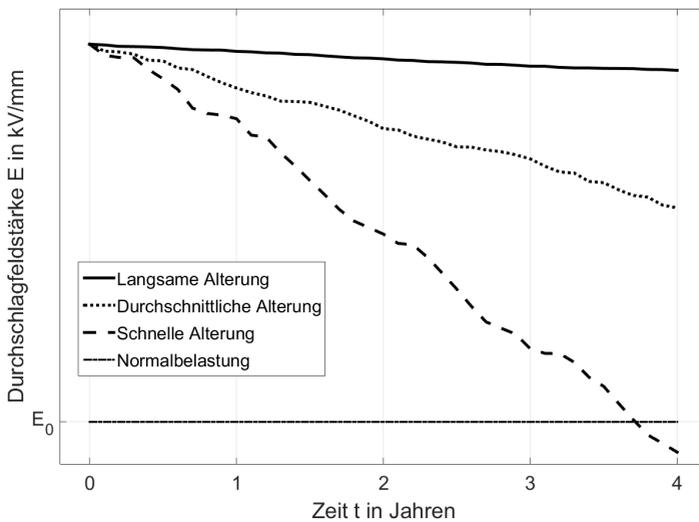


Abbildung 2.15: Typische Alterung eines Kabelsystems ([55, S. 38])

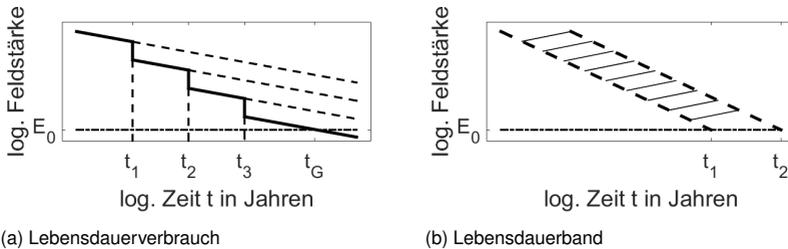


Abbildung 2.16: Lebensdauerband [54, S. 173] [55, S. 39] und Lebensdauerverbrauch [54, S. 177]

kritischen Feldstärke liegt, ist die Lebensdauer theoretisch unendlich groß, verringert sich aber mit steigender Belastung. Gleichung 2.10 drückt diesen Sachverhalt aus. n stellt den Alterungsfaktor dar, k_e ist eine Konstante der thermischen Alterung.

$$A(E) = k_e \cdot E^n \quad (2.10)$$

Eine sprunghafte Verringerung der Lebensdauer erfährt ein Betriebsmittel durch Überbelastungen in Form von Blitz- und Schaltüberspannungen sowie zeitweilige Überspannungen (Abbildung 2.16a). In Abbildung 2.16a sind Überbelastungen zu den Zeitpunkten t_1 bis t_3 mit der entsprechenden Verringerung der Lebensdauer eingetragen. Während der Überlastung wird Schaden an einem Betriebsmittel akkumuliert, sodass sich die Lebensdauer verringert. Der Zeitpunkt t_G stellt den Zeitpunkt dar, in dem die Lebensdauer unter den kritischen Wert E_0 sinkt und es zum Durchschlag kommen muss.

Des Weiteren ist nach [54, S. 175] Folgendes festzuhalten: "Es ist heute allgemein akzeptiert, dass eine elektrische Alterung nur bei Vorhandensein von Teilentladungen oder von Prozessen, die Teilentladungen vorbereiten, existiert."

Da die genannten Belastungen nicht ohne Weiteres quantifiziert werden können, muss von einer großen Streuung der Lebensdauer, einem Lebensdauerband, ausgegangen werden (Abbildung 2.16b). Die kritische Feldstärke E_0 kann schon zum Zeitpunkt t_1 oder erst zum Zeitpunkt t_2 unterschritten werden.

Nelson [59, 60] und Mladenovic [61, 62, 63] beschreiben Alterungstests an Kabeln mit massegetränkter Papierisolierung. Dabei erfolgten parallel eine Teilentladungsmessung und eine Verlustfaktormessung. Durch Kombination aus Spannungsbelastung und Strombelastung ist eine Quantifizierung nach dem Arrhenius-Gesetz $A(T)$ und dem Invers-Power-Gesetz $A(E)$ möglich. Die dort formulierten Überlegungen zum Test der Alterung sind sehr aufwendig und auf das Problem teilentladungsbehalteter Muffen nicht übertragbar.

2.6 Betriebswirtschaftliche Überlegungen

Teilentladungsbehaftete Muffen fallen langfristig aus und führen zu Versorgungsunterbrechungen. Im Folgenden werden die in diesem Zusammenhang stehenden betriebswirtschaftlichen Überlegungen erörtert. Sie basieren auf der Kapitalwerttheorie nach [64, S. 778 ff.] und [65] sowie der Entscheidungstheorie nach [64, S. 154 ff.]. Um betriebswirtschaftliche Überlegungen zu strukturieren, werden nachfolgend vier Szenarien entworfen, beschrieben und bewertet.

Szenario 1

(Grundszenario) keine Diagnose, Störungsereignis zum Zeitpunkt $t = 0$

Szenario 2

Erstdiagnose, Störungsereignis zum Zeitpunkt $t > 0$

Szenario 3

Erstdiagnose, sofortige Auswechslung **einer** teilentladungsbehafteten Muffe zum Zeitpunkt $t = 0$

Szenario 4

Erstdiagnose, keine Aktion zum Zeitpunkt $t = 0$, Folgediagnosen zum Zeitpunkt $t \neq 0$ über die Lebenszeit des Kabels.

Die in den Szenarien 1 bis 4 genannten Bestandteile, wie

- ein Störungsereignis,
- die planmäßige Auswechslung einer Muffe,
- die Erstdiagnose,
- die Folgediagnose

werden folgend näher beschrieben.

Ein Störungsereignis, d. h. eine ungeplante Versorgungsunterbrechung, ist charakterisiert durch die Ausfallkosten K_A , die sich aus den Störungskosten K_S , den Einnahmeverlusten K_N durch nicht gelieferte Energie, den Kosten K_{SA} des Q-Faktors der Bundesnetzagentur (nach § 19 ff. ARegV¹) sowie dem Imageschaden, den der Netzbetreiber durch die Versorgungsunterbrechung erleidet, zusammensetzen (Szenario 1 - Gleichung 2.11). Die Störungskosten K_S umfassen die Kosten für das Störungsmanagement K_{SM} und die Kosten für die Reparatur K_T (Gleichung 2.12).

$$K_{A, t=0} = K_S + K_N + K_{SA} + K_{SI} \quad (2.11)$$

$$\text{mit } K_S = K_T + K_{SM} \quad (2.12)$$

¹ARegV - Anreizregulierungsverordnung.

Die Kosten für das Störungsmanagement K_{SM} werden durch folgende Tätigkeiten hervorgerufen:

- Störungseingrenzung,
- (Teil-)Wiederversorgung,
- Fehlerortung,
- Freigabe zur Reparatur und deren Rücknahme,
- Kabelprüfung,
- Inbetriebnahme,
- ggf. entstehende Wartezeiten.

Der Kostenblock Reparatur K_T setzt sich wie folgt zusammen:

- Tiefbaukosten,
- Montagekosten,
- Materialkosten.

Es wird definiert, dass der Kostenblock Reparatur K_T im Störfall und Nicht-Störfall (planmäßige Reparatur) gleich ist.

In der Zeit der Versorgungsunterbrechung entstehen dem Netzbetreiber Einnahmeverluste K_N als nicht erlöste Netznutzungsentgelte durch nicht gelieferte Energie. Unstrittig ist, dass diese Einnahmeverluste zum Zeitpunkt der Versorgungsunterbrechung entstehen, sodass ein Großteil fraglos nachgeholt wird. So wird in der Regel die Produktions-, Wärme- und Kälteleistung nachgeholt, Lichtleistungen dagegen nicht und der Konsum sowie die Arbeit mit elektronischen Geräten nur teilweise nachgeholt. Je nach Tageszeit der Versorgungsunterbrechung und Zusammensetzung der Kundengruppen kann von einer Nachholquote von 20 bis 30 % ausgegangen werden. Stichprobenuntersuchungen von Versorgungsunterbrechungen eines Netzbetreibers im Jahr 2013 bestätigen diese Annahme.

Gemäß Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und der daraus abgeleiteten Anreizregulierungsverordnung (ARegV) ist durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) eine Qualitätsregulierung vorzunehmen. Alle Netzbetreiber haben ihre Versorgungsunterbrechungen (geplante und Störungen) der BNetzA zu übermitteln. Die Versorgungsunterbrechungen werden von der BNetzA bewertet und das Ergebnis dem Netzbetreiber mit einem Bonus-/Malus-Bescheid bekannt gegeben. Demzufolge schmälert jede Versorgungsunterbrechung den Bonus oder erhöht den Malus K_{SA} . Angesichts der zeitversetzten Erstellung des Bescheids und der großen Zahl von Eingangsparametern ist eine Ermittlung der Kosten für eine Versorgungsunterbrechung nahezu unmöglich, sodass in diesem Zusammenhang darauf verzichtet wird.

Die letzte aufgeführte Kostenkomponente ist der Imageschaden K_{SI} , der bezogen auf eine konkrete Versorgungsunterbrechung nicht bestimmbar ist. Durch wiederholende Umfragen kann ein Ansehen zum Thema Versorgungsunterbrechungen ermittelt und dann dessen monetäre Bewertung über alle Versorgungsunterbrechungen ausgeglichen werden. Derartige Untersuchungen sind bisher allerdings nicht veröffentlicht.

Die planmäßige Auswechslung einer Muffe K_R besteht aus den Kosten für die planmäßige Freischaltung K_{RM} und den im vorherigen Abschnitt definierten Reparaturkosten K_T (Szenario 3 - Gleichung 2.13).

$$K_{R,t=0} = K_T + K_{RM} \quad (2.13)$$

In den Kosten der planmäßigen Freischaltung sind folgende Kosten enthalten:

- Freigabe zur Reparatur und deren Rücknahme,
- Kabelprüfung,
- Inbetriebnahme.

Die Erstdiagnose beinhaltet die Kosten (Erstdiagnosekosten K_{DE}) für die eigentliche Diagnose (Messung), die Bewertung der Messergebnisse, das Freischalten sowie die, für die Bewertung der Messergebnisse von entscheidender Bedeutung, Eruierung der Betriebsmittel in ihrer Spezifikation, Länge und Reihenfolge. Die letzte Kostenart entfällt für **eine Folgediagnose** (Folgediagnosekosten K_{DF} , da sich definitionsgemäß die Betriebsmittel nicht geändert haben dürfen, andernfalls ist es eine Erstdiagnose.

Für die nachfolgende Gegenüberstellung der Szenarien 2 - 4 mit dem Grundszenario werden Annahmen getroffen:

1. Die Eigenkapitalverzinsung r_E beträgt 10 % p. a. Sämtliche (auch virtuelle) Gewinne steigen mit der Eigenkapitalverzinsung.
2. Die Inflationsrate r_I beträgt 2 % p. a. Sämtliche Kosten steigen mit der Inflationsrate.

Gegenüberstellung: Grundszenario und Szenario 2 Die Ausfallkosten K_A steigen im Zeitverlauf mit der Inflationsrate r_I (Gleichung 2.14 Grundszenario). Demgegenüber steht das Szenario 2, in dem die vermiedenen Kosten G_D (virtueller Gewinn) aus den Ausfallkosten K_A , vermindert um die Kosten der Erstdiagnose, ausgewiesen sind (Gleichung 2.15). Durch Gleichsetzen der Ausfallkosten K_A und der vermiedenen Kosten G_D kann der Zeitraum $t_{I \leftrightarrow II}$ ermittelt werden, in dem die Diagnose zuverlässig die Ausfallfreiheit vorhersagen muss (Gleichung 2.18).

$$K_{A,t>0} = K_A \cdot (1 + r_I)^t \quad (2.14)$$

$$G_{D,t>0} = (K_A - K_{DE}) \cdot (1 + r_E)^t \quad (2.15)$$

$$K_{A,t>0} = G_{D,t>0} \quad (2.16)$$

$$K_A \cdot (1 + r_I)^t = (K_A - K_{DE}) \cdot (1 + r_E)^t \quad (2.17)$$

$$t_{I \leftrightarrow II} = \frac{\ln \frac{K_A}{K_A - K_{DE}}}{\ln \frac{(1 + r_E)}{(1 + r_I)}} \quad (2.18)$$

Gegenüberstellung: Grundscenario und Szenario 3 Den Ausfallkosten K_A wird das Szenario 3 gegenübergestellt, das aus den Kosten für die planmäßige Auswechslung K_R zuzüglich der Kosten der Erstdiagnose K_{DE} besteht. Hier besteht der Gewinn durch die Diagnose G_D in der Differenz der Ausfallkosten K_A mit den Reparaturkosten K_R und den Kosten für die Erstdiagnose K_{DE} . Durch Gleichsetzen und Auflösen nach $t_{I \leftrightarrow III}$ kann der Zeitraum ermittelt werden, der nach einer Reparatur störungsfrei bleiben soll (Gleichungen 2.19 bis 2.22).

$$G_{D,t=0} = K_A - (K_R + K_{DE}) \quad (2.19)$$

$$K_{A,t>0} = G_{D,t>0} \quad (2.20)$$

$$K_A \cdot (1+r_I)^t = (K_A - K_R - K_{DE}) \cdot (1+r_E)^t \quad (2.21)$$

$$t_{I \leftrightarrow III} = \frac{\ln \frac{K_A}{K_A - K_R - K_{DE}}}{\ln \frac{(1+r_E)}{(1+r_I)}} \quad (2.22)$$

Gegenüberstellung: Grundscenario und Szenario 4 Das Szenario 4 soll den störungsfreien Betrieb über die gesamte Lebensdauer des Kabels sicherstellen. Nach einer Erstdiagnose K_{DE} zur Inbetriebnahme wird eine bestimmte Anzahl n von Folgediagnosen K_{DF} bis zum Ende der Lebensdauer durchgeführt, ohne dass ein Ausfall auftritt (Gleichung 2.23). Die Gleichung 2.23 ist in diesem Fall nach Anzahl der Folgediagnosen aufzulösen (Gleichungen 2.24 bis 2.27).

$$G_{D,t=0} = K_A - (K_{DE} + n \cdot K_{DF}) \quad (2.23)$$

$$K_{A,t>0} = G_{D,t>0} \quad (2.24)$$

$$K_A \cdot (1+r_I)^t = (K_A - K_{DE} - n \cdot K_{DF}) \cdot (1+r_E)^t \quad (2.25)$$

$$n = \frac{K_A - K_{DE} - K_A \frac{(1+r_I)^t}{(1+r_E)^t}}{K_{DF}} \quad (2.26)$$

$$n = \frac{K_A \left(1 - \left(\frac{1+r_I}{1+r_E} \right)^t \right) - K_{DE}}{K_{DF}} \quad (2.27)$$

$$K_A \cdot (1+r_I)^t = \left(K_A - K_{DE} - \sum_{i=1}^k n_i \cdot K_{DF} \right) \cdot (1+r_E)^t \quad (2.28)$$

Die Gleichung 2.25 stellt einen vereinfachten, überschläglichen Ansatz dar, da alle Auszahlungen zum Zeitpunkt $t = 0$ vorgenommen werden und damit Zins- und Zinseszinsseffekte späterer Auszahlungen vernachlässigt werden. Gleichung 2.28 berücksichtigt diesen Sachverhalt.

Beispiel 1

In der Tabelle 2.4 sind Werte für die betriebswirtschaftlich relevanten Kosten in typischer Höhe angegeben.

Kosten			
Ausfallkosten	K_A	=	6000 EUR
Reparaturkosten	K_R	=	3500 EUR
Erstdiagnosekosten	K_{DE}	=	700 EUR
Folgediagnosekosten	K_{DF}	=	500 EUR

Tabelle 2.4: Kostenbeispiel

$$t_{k \rightarrow II} = \frac{\ln \frac{6000}{6000-700}}{\ln \frac{(1+0,1)}{(1+0,02)}} \quad (2.29)$$

$$t_{k \rightarrow II} = 1,64a \quad (2.30)$$

$$t_{k \rightarrow III} = \frac{\ln \frac{6000}{6000-3500-700}}{\ln \frac{(1+0,1)}{(1+0,02)}} \quad (2.31)$$

$$t_{k \rightarrow III} = 15,94a \quad (2.32)$$

$$n = \frac{6000 \left(1 - \left(\frac{1+0,02}{1+0,1} \right)^{40} \right) - 700}{500} \quad (2.33)$$

$$n = 10 \quad (2.34)$$

Die Werte aus Tabelle 2.4 wurden in die Gleichungen 2.18 (2.29, 2.30), 2.22 (2.31, 2.32) und 2.27 (2.33, 2.34) eingesetzt.

Daraus folgt, für den garantiert störungsfreien Betrieb nach einer Diagnose $t_{k \rightarrow II}$ ein Zeitraum von $t_{k \rightarrow II} = 1,64$ Jahren. Für den störungsfreien Betrieb nach einer planmäßigen Auswechslung $t_{k \rightarrow III}$ muss der Zeitraum $t_{k \rightarrow III} = 15,94 \approx 16$ Jahre betragen.

Abbildung 2.17 stellt den Verlauf des Grundszenarios mit den Szenarien 2 und 3 sowie die Zeitpunkte $t_{k \rightarrow II}$ und $t_{k \rightarrow III}$ dar.

Sollte der störungsfreie Betrieb über die gesamte Lebensdauer eines Kabels von 40 Jahren angestrebt werden, ließe sich alle vier Jahre eine Diagnose durchgeführt (vereinfachte Berechnung).

Die oben aufgeführten Szenarien sind erweiterbar. Es können weitere entwickelt und kombiniert werden. Realistisch wäre z. B., dass zu einer beliebigen Folgediagnose an einer Muffe Teilentladungen diagnostiziert werden, sodass diese dann ausgewechselt werden muss.

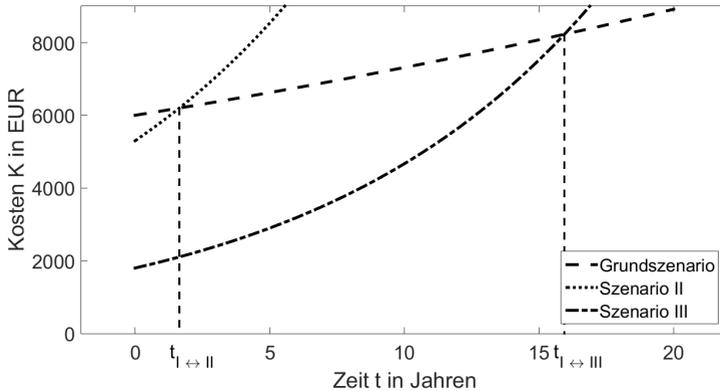


Abbildung 2.17: Zeitverlauf diagnostische Kosten

2.7 Zusammenfassung und Vorgehen

Garniturspezifikation: Die vorangegangenen Abschnitte beschäftigten sich mit Ausführungen zu Garniturtypen, Grundtechniken, Verbindungstechniken und Feldsteuerungen. Alle Hersteller haben Kombinationen aus Garniturtyp, Grundtechnik, Verbindungstechnik und Feldsteuerung sowie dem Querschnitt des Leiters entwickelt und bieten diese dem Markt an. Eine solche Kombination wird im Folgenden Garniturspezifikation genannt. Garniturspezifikationen sind wegen der unüberschaubaren Möglichkeiten konstruktiver Gestaltung nicht oder nur eingeschränkt vergleichbar und verfügen über individuelles Fehlerpotenzial. Als Fehler wird ein nicht **eingehaltenes Maß** oder ein nicht richtig **ausgeführter Montageschritt** gewertet. In Tabelle 2.5 sind für ausgesuchte Garniturspezifikationen die maximale Anzahl der Einzelfehler aufgeführt.

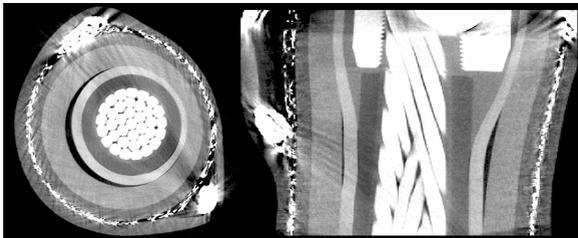


Abbildung 2.18: Fehler in einer Warmschrumpfgarnitur (Bild einer Röntgen-Computertomografie)

2 Grundlagen und Abgrenzung der Aufgabenstellung

Hersteller:	Bezeichnung:	Verwendungszweck:	Fehlermöglichkeiten:
Tyco Electronics Raychem GmbH	SXSU	Verbindungs- muffe für Kunststoffkabel	Muffe: 34 Satz: 102
Cellpack GmbH	CHMSV	Verbindungs- muffe für Kunststoffkabel	Muffe: 46 Satz: 138
Tyco Electronics Raychem GmbH	RPKJ	Übergangsmuffe Gürtelkabel auf Einleiter-Kunststoffkabel	151
Höhne GmbH (Tece)	Quickset 10-kV-KM 142-Ü	Übergangsmuffe Gürtelkabel auf Einleiter-Kunststoffkabel	157
Cellpack GmbH	CHMPR3	Übergangsmuffe Gürtelkabel auf Dreileiter-Kunststoffkabel	115

Tabelle 2.5: Mögliche Fehler je Garniturspezifikation

Abbildung 2.18 illustriert einen typischen Fehler einer Warmschrumpfmuffe. Hier wurde der Isolierkörper unzureichend geschrumpft, sodass ein Luftspalt zwischen dem Feldsteuerschlauch und dem Isolierkörper verblieben ist. Dieser Fehler führt zu Teilentladungen, deren scheinbare Ladung Q_s und Teilentladungshäufigkeit N_{TE} typisch für diese Garniturspezifikation sind.

Nicht jeder der möglichen Fehler führt zu Teilentladungen in einer Muffe. Es ist zu beobachten, dass sich in einer Garniturspezifikation Fehler wiederholen. Daraus folgt die Überlegung, dass betriebsgealterte teilentladungsbehaftete Muffen auf Basis ihrer Garniturspezifikation bewertet werden müssen.

Da die in den folgenden Kapiteln entwickelten Algorithmen nicht nur auf Muffen, sondern auch andere Garniturstypen angewendet werden können, wird allgemein von einer Garnitur- statt von einer Muffenspezifikation gesprochen.

Teilentladungsbewertung: Die vorherigen Ausführungen haben gezeigt, dass für typische (labormäßige) Modellanordnungen eine gute Zuordnung zu einem künstlichen Fehler, der zu Teilentladungen führt, gewährleistet ist. In einem gewissen Rahmen sind auch mehrere Fehler, die zu unterschiedlichen Teilentladungsarten führen, unterscheidbar.

In einer fehlerhaft montierten Garnitur sind in der Regel mehrere Teilentladungsstellen gleicher Art anzutreffen, sodass die herkömmliche Klassifizierung in Bezug auf Teilentladungsart, Teilentladungspegel und Teilentladungshäufigkeit nicht angewendet werden kann.

In dieser Arbeit wird die Gesamtheit aller Teilentladungsaktivitäten in einer Garniturspezifikation betrachtet. Die Auswertung der bisher durchgeführten Teilentladungsmessungen ergab, dass bei der Montage einer bestimmten Garniturspezifikation stets dieselben Fehler anzutreffen sind, und zwar

nahezu unabhängig vom Monteur, dem Zeitpunkt der letzten Montageschulung sowie der Häufigkeit erfolgter Garniturmontagen.

Vorgehen: Bei einem kooperierenden Verteilnetzbetreiber wurden bisher 724 Teilentladungsdia-
gnosen durchgeführt (Stand 31.12.2015). Deren Auswertung ergab einen Bestand von 5 bis 7 %² teil-
entladungsbehafteter Muffen, von denen jährlich ca. 2 % ausfallen. Auf Basis dieser Befunde wurde
eine Stichprobe mit folgenden Eigenschaften gezogen:

1. teilentladungsbehaftet,
2. Teilentladungspegel und Teilentladungshäufigkeit in definierten Klassengrenzen,
3. unterschiedliche Garniturspezifikationen.

Aus Sicht der Stichprobentheorie handelt es sich um eine mehrstufige, bedingt zufällige Stichprobe [69, 70].

Mit den Testobjekten (teilentladungsbehaftete Muffen) der Stichprobe wurde wie folgt verfahren: Zunächst erfolgt eine Vor-Ort-Messung mit einem industriellen Messsystem nach [36] mit einer definierten Spannungsrampe. Danach wurden die Testobjekte geborgen und die Garniturspezifikation bestimmt. Im Hochspannungslabor der TU Chemnitz erfolgten weitere Untersuchungen. Es wurden Teilentladungsmessungen mit einer definierten Spannungsdoppelrampe (Spannungen wie bei der Vor-Ort-Messung) sowie ein Spannungssteigerungstest bis $5 \times U_0$ durchgeführt.

Auf Basis dieser Werte wurde das beste Lernverfahren für den Vergleich zwischen einer unbekanntem Muffe und einer Referenzmuffe und anschließend die besten Parameter für den Vergleich zwischen einer unbekanntem Muffe und einer Referenzmuffe aus einer Datenbank bestimmt. Aus der Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse wurden zwei Verfahren zur Bestimmung der Garniturspezifikationen entwickelt:

- Bestimmung der Garniturspezifikation bzw. der wahrscheinlichsten Garniturspezifikation aus den im Unternehmen vorhandenen Daten,
- Bestimmung der Garniturspezifikation bzw. der wahrscheinlichsten Garniturspezifikation mittels ausgewählter Teilentladungsparameter auf Basis des Vergleichs mit den Daten aus einer Referenzmuffendatenbank.

Abschließend wurde mit den Testobjekten ein Schadensakkumulationstest entwickelt und durchgeführt, um die Einsatzspannung U_e einer teilentladungsbehafteten Garniturspezifikation zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde eine Simulation durchgeführt, dann im Hochspannungslabor der TU Chemnitz ein Vortest an einem Testobjekt durchgeführt und schließlich die Erkenntnisse in einen allgemeinen Schadensakkumulationstest überführt. Der entwickelte Schadensakkumulationstest nutzt als Alterungstest ausschließlich den Alterungsfaktor der Beanspruchung mit einer Prüfspannung $U_{p,50}$ zur Schadensakkumulation.

Auf Basis der Ergebnisse aller Schadensakkumulationstests wurden die Testobjekte mittels eines Clusteringverfahrens in Gruppen mit gleichem Verhalten unterteilt. Dabei wurde der beste für das verwendete Clusteringverfahren beschreibende statistische Parameter ermittelt. Auf diese Weise werden Referenzmuffen einem Alterungstyp zugeordnet.

²Ähnliche Fehlerraten sind in [66, 67, 68] veröffentlicht.

3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation

3.1 Regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation

Die Kenntnis der Garniturspezifikation ist für die Beurteilung einer teilentladungsbehafteten Muffe von entscheidender Bedeutung. In diesem Unterkapitel wird ein Verfahren vorgestellt, das auf Basis statistischer Werte für eine aufgefallene Muffe die Garniturspezifikation ermittelt. Abbildung 3.1 verdeutlicht die Einordnung der regelbasierenden Bestimmung der Garniturspezifikation in das Vorgehensschema. Für den Fall, dass mehrere Garniturspezifikationen gefunden wurden, wird jeder Garniturspezifikation eine Wahrscheinlichkeit (statistische Verteilung) zugeordnet.

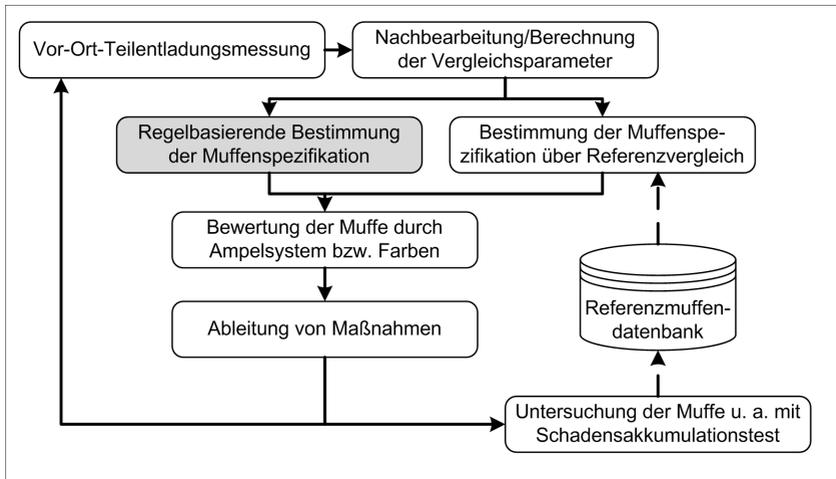


Abbildung 3.1: Einordnung der regelbasierenden Bestimmung der Garniturspezifikation in das Vorgehensschema

3.1.1 Aufnahme und Segmentierung des Bestands

In der Regel wird bei einem Verteilnetzbetreiber die hier behandelte Fragestellung in der Dokumentation nicht berücksichtigt, wenngleich einige Quellen existieren, die für die Bestimmung der Garniturspezifikation in Betracht gezogen werden können.

3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation

Unter anderem sind das:

- das kaufmännische System (ERP-System, z. B. SAP)¹,
 - Auswertung der Belege über Lieferungen,
 - Auswertung der Belege über Warenentnahmen, Verkäufe, Montagedienstleistungen,
- Informationen der Hersteller über Lieferungen,
- die Netzdokumentation nach [71],
- sonstige Informationen, z. B.
 - Anzahl und Art von Störungen,
 - Anzahl und Art von Investitions- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen,
 - allgemeine Informationen von Baudienstleistern (Montagefirmen) bzw. Logistikdienstleistern (externe Lager).

Das Ergebnis einer solchen Segmentierung ist eine absolute Häufigkeitsverteilung N_{ij} (Gleichung 3.1) des Garniturbestandes mit den Parametern Garniturspezifikation sowie Zeit. Die Zeiteinheit kann ein Jahr, ein Quartal eines Jahres oder eine feinere Zeiteinheit sein. Aus der absoluten Häufigkeitsverteilung kann die relative Häufigkeitsverteilung H_{ij} (Gleichung 3.2) abgeleitet werden.

$$N_{ij} = \sum_{x \leq i} \sum_{y \leq j} n_{xy} \quad (3.1)$$

$$H_{ij} = N_{ij}/n \quad (3.2)$$

Index i = Jahr der Montage

Index j = Garniturspezifikation

Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft die relative Häufigkeitsverteilung von 6 Garniturspezifikationen² der Jahre 1999 bis 2013. Zu sehen ist, dass in den Jahren 2004 und 2011 ein Wechsel der Garniturspezifikation vorgenommen wurde. Des Weiteren schwankt die Anzahl der verbauten Muffen von Jahr zu Jahr, welches ihren Grund in einer veränderten Investitionstätigkeit findet. In Tabelle A.1 befindet sich die Tabelle mit den Werten der relativen Häufigkeitsverteilung.

¹ Aufbewahrung von Unterlagen gemäß den Grundsätzen ordnungsgemäßer Buchführung (GoB) insbesondere § 147 Abgabenordnung (AO), 10 Jahre.

² VPE-PE 1; VPE-VPE 1; VPE-PE 2; VPE-VPE 2; VPE-PE 3; VPE-VPE 3.

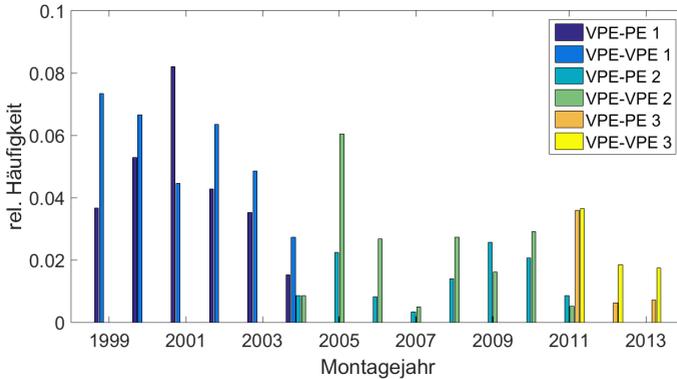


Abbildung 3.2: Relative Häufigkeit der Muffen je Spezifikation und Jahr

3.1.2 Plausibilitätsprüfung des Bestands

Da die Quellen zur Ermittlung des Muffenbestandes sehr heterogen sind, ist eine Plausibilitätsprüfung vorzunehmen. Im Sinne einer journalistischen Recherche sollten mindestens zwei Quellen übereinstimmende Zahlen liefern. Zu beachten ist die zeitliche Differenz zwischen einer Lieferung von Muffen und deren Montage.

Wie zuvor erwähnt ist es möglich, die Garniturspezifikation bzw. den Muffenbestand aus der Netzdokumentation herzuleiten. In der VDE-Anwendungsregel Netzdokumentation [71, Punkt 6] sind die Mindestanforderungen für die, in der Netzdokumentation zu erfassenden Daten definiert. Für Leitungen sind dies:

- Typ (Bauartkennzeichen),
- Spannungsebene,
- Leitungsart,
- Verlegedatum bzw. Verlegejahr,
- Länge,
- Betriebsstatus und
- Eigentümer.

Im Weiteren sind Einbauteile definiert, wie Muffen und Masten [71]. Von diesen Einbauteilen sind Typ (Garniturstyp nach Abschnitt 2.1.2), Einbaudatum, Betriebsstatus und Eigentümer zu erfassen. Das Datenmodell nach [71] ist für die betrachteten Fälle unzureichend, da keine Hinweise auf die Garniturspezifikation enthalten sind.

3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation

Zur Ermittlung des Muffenbestands aus den Daten der Netzdokumentation wurde der Bestand der Muffen (Summe aller Spezifikationen) jahresweise mit Hilfe folgender Kriterien herangezogen:

- Gesamtlänge der in dem Jahr gelegten Kabel (Leiterlänge),
- Anzahl der Kabelabschnitte der in dem Jahr gelegten Kabel,
- durchschnittlichen Leiterlänge der in dem Jahr gelegten Kabel.

Abbildung 3.3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Anzahl der in einem Jahr eingesetzten Muffen und der Gesamtlänge, der in einem Jahr gelegten Kabel. Zusätzlich ist die lineare Regressionsgerade mit den 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

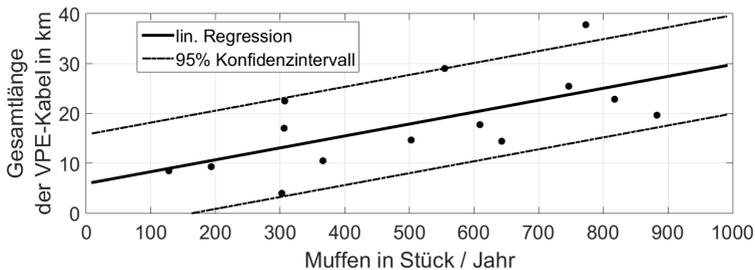


Abbildung 3.3: Muffenbestand und Gesamtlänge

In der Abbildung 3.4 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl der in einem Jahr eingesetzten Muffen und der Anzahl der Kabelabschnitte der im selben Jahr gelegten Kabel dargestellt. Wie in Abbildung 3.3 sind zusätzlich die Regressionsgerade und das Konfidenzintervall dargestellt.

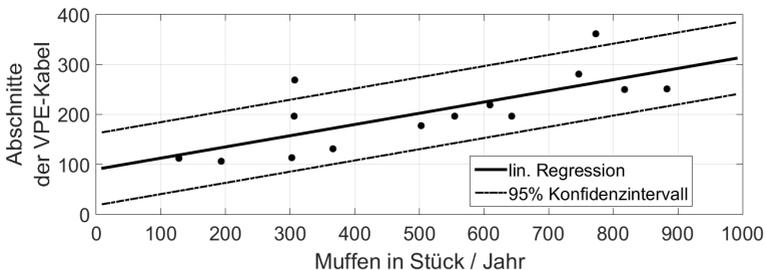


Abbildung 3.4: Muffenbestand und Anzahl der Kabelabschnitte

Abbildung 3.5 visualisiert den Zusammenhang zwischen der Anzahl der im selben Jahr eingesetzten Muffen und der durchschnittlichen Leiterlänge der im selben Jahr gelegten Kabel mit der linearen Regression und dem Konfidenzintervall.

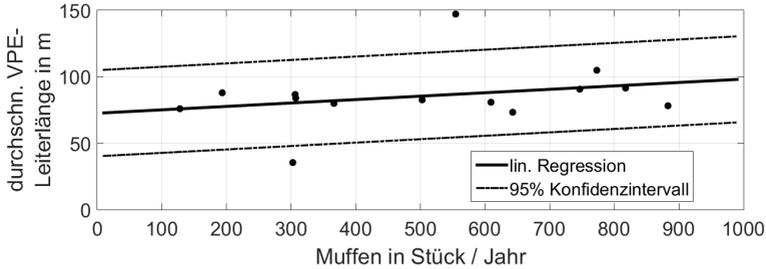


Abbildung 3.5: Muffenbestand und durchschnittliche Leiterlänge

$$y_i = \alpha + \beta x_i \quad (3.3)$$

$$R_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.4)$$

Mit dem Softwarepaket [72] wurden die vorgenannten Gegenüberstellungen auf nicht lineare und lineare Regression untersucht und ein linearer Zusammenhang nach Gleichung 3.3 ermittelt. Der Muffenbestand ist die Variable x_i . y_i steht für die Gesamtlänge, die Anzahl der Leiterabschnitte oder die durchschnittliche Leiterlänge.

Die ermittelten Parameter α und β der Gleichung 3.3 listet Tabelle 3.1 auf. Zudem sind die Parameter für das 95%-Konfidenzintervall dargestellt. In der Tabelle 3.1 ist außerdem der Fehler der Regression R_M (Wurzel aus den gemittelten Fehlerquadraten) nach Gleichung 3.4 bzw. [72] angegeben. Ersichtlich wird, dass negative Parameter des 95%-Konfidenzintervalls auftreten. Für den Fall des negativen Parameters α ist die gesuchte Größe null. Sollte der Parameter β negativ sein, wird die gesuchte Größe zu einem bestimmten Zeitpunkt negativ. Ab diesem Zeitpunkt ist die gesuchte Größe null zu setzen.

Folgende Ursachen bewirken eine Veränderung des Muffenbestands:

- Störgeschehen (defekte Muffe wird durch zwei neue ersetzt),
- Netzveränderungen, insbesondere (Teil-)Außerbetriebnahmen.

Da keine auf bestimmte Zeiteinheiten bezogene Abnahmerate zu quantifizieren ist, wird diese null gesetzt.

3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation

Zusammenhang:	α	β	Fehler R_M
Muffenbestand versus			
Gesamtlänge	5981,00	23,9100	0,4235
95-%-Konfidenzintervall	-3938,00	6,3640	
	15770,00	41,4600	
Muffenbestand versus			
Anzahl der Kabelabschnitte	90,06	0,2244	0,5481
95-%-Konfidenzintervall	18,05	0,0963	
	162,10	0,3526	
Muffenbestand versus			
durchschnittliche Leiterlänge	72,51	0,0257	0,0728
95-%-Konfidenzintervall	40,12	-0,0319	
	104,90	0,0834	

Tabelle 3.1: Diverse Zusammenhänge mit dem Bestand von Muffen

Beispiel 2

Zur Veranschaulichung soll der Muffenbestand für das Jahr 1997 ermittelt werden. Aus den Daten der Netzdokumentation konnte eine durchschnittliche Aderlänge von 90 m berechnet werden.

$$Y_i = \alpha + \beta x_i \quad (3.5)$$

$$x_i = \frac{Y_i - \alpha}{\beta} = \frac{90 \text{ m} - 72,51 \text{ m}}{0,0257 \frac{\text{m}}{\text{Muffe}}} \approx 680 \text{ Muffen} \quad (3.6)$$

Daraus ergibt sich ein Muffenbestand für das Jahr 1997 von rund 680 Muffen mit einem Fehler R_M von 7,3 % ($\approx \pm 50$ Muffen).

Schlussfolgerung: Auf Basis des herausgearbeiteten Zusammenhangs ist es möglich, den Bestand von Muffen für andere Jahre, in diesem Fall vor 1999, wenn auch mit hoher Abweichung zu ermitteln.

3.1.3 Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer Garniturspezifikation

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer Garniturspezifikation wird aus der relativen Häufigkeitsverteilung (Gleichung 3.2) die relative Randhäufigkeitsverteilung $h_{i\cdot}$ bzw. $h_{\cdot j}$ (Gleichungen 3.7 und 3.8) abgeleitet. Sofern detailliertere Informationen vorliegen, kann aus einer relativen Häufigkeitsverteilung eine bedingte relative Häufigkeitsverteilung $h_{ij|j}$ bzw. $h_{ij|i}$ (Gleichungen 3.9 und 3.10) abgeleitet werden.

$$h_i = \sum_{j=1}^{j=k} h_{ij} = \sum_j h_{ij} = h(X = x_i) \quad (3.7)$$

$$h_j = \sum_{i=1}^{i=m} h_{ij} = \sum_i h_{ij} = h(Y = y_j) \quad (3.8)$$

$$h_{ij} = \frac{h_{ij}}{h_j} = h(x|Y = y_j) , \text{ mit } \sum_{i=1}^{i=m} h_{ij} = 1 \quad (3.9)$$

$$h_{ji} = \frac{h_{ij}}{h_i} = h(y|X = x_i) , \text{ mit } \sum_{j=1}^{j=k} h_{ji} = 1 \quad (3.10)$$

Index i = Jahr der Montage
 Index j = Garniturspezifikation

Für die Bestimmung einer Garniturspezifikation einer vorgefundenen Muffe sind die in Abbildung 3.6 aufgeführten Fälle zu unterscheiden.

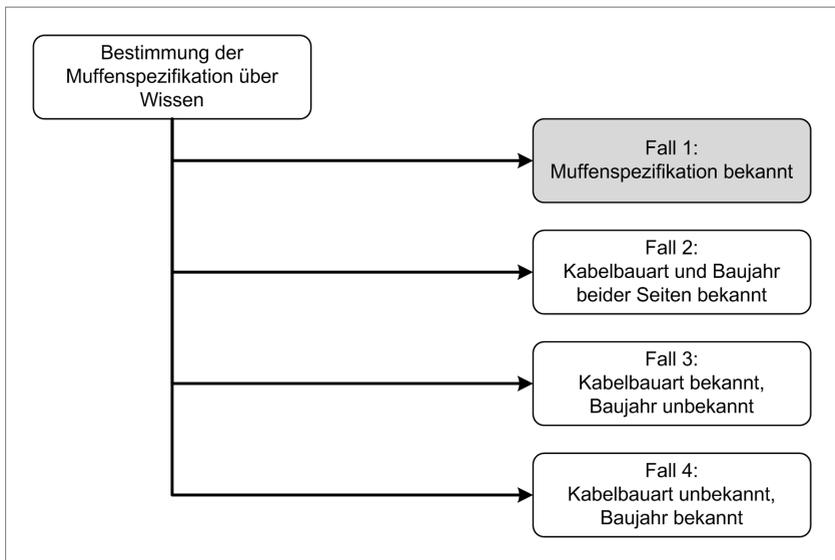


Abbildung 3.6: Fälle der Bestimmung der Garniturspezifikation über Wissen

Fall 1

Der Fall 1 (Garniturspezifikation bekannt) führt direkt zu einer Garniturspezifikation mit der Wahrscheinlichkeit von 100 %.

Fall 2

Der Fall 2 (Kabelbauart und Baujahr bekannt) führt in der Regel zu einer Garniturspezifikation. Wenn in dem betrachteten Jahr ein Wechsel der Garniturspezifikation vorgenommen wurde, ist das Ergebnis eine bedingte relative Häufigkeitsverteilung von zwei Garniturspezifikationen.

Fall 3

Wenn nur bekannt ist, dass es sich um zwei Kunststoffkabel handelt, die miteinander verbunden sind (Baujahr unbekannt), führt dieser Fall zu einer relativen Randhäufigkeitsverteilung (Anhang Tabelle A.1 letzte Zeile).

Fall 4

Der Fall 4 beschreibt, dass nur das Baujahr der Muffen bekannt ist. In diesem Fall wird die Wahrscheinlichkeit der Garniturspezifikation durch eine bedingte relative Häufigkeitsverteilung beschrieben.

Beispiel 3

Fall 2: In diesem Beispiel ist das Baujahr gegeben (2003) und die Muffe verbindet zwei VPE-Kabel miteinander. Damit ergibt sich nach Tabelle A.1 eine Wahrscheinlichkeit, dass es sich um die Garniturspezifikation VPE-VPE 1 handelt, von 100 %.

Fall 3: Für dieses Beispiel ist bekannt, dass die Muffe zwei Kunststoffkabel miteinander verbindet. Daraus ergibt sich eine relative Randverteilung mit den Werten für folgende Garniturspezifikationen: VPE-PE 1 26,5 %, VPE-VPE 1 32,4 %, VPE-PE 2 11,1 %, VPE-VPE 2 17,9 %, VPE-PE 3 4,9 % und VPE-VPE 3 7,2 %.

Fall 4: Für dieses Beispiel werden folgende Angaben vorgegeben: Baujahr 2004, Kabelbauart unbekannt. Damit ergeben sich nach Tabelle A.1 folgende Wahrscheinlichkeiten: Garniturspezifikation VPE-VPE 1 45,5 %, Garniturspezifikation VPE-PE 1 25,5 % sowie die Garniturspezifikationen VPE-PE 2 und VPE-VPE 2 je 14,5 %.

Schlussfolgerung: Für eine weitere Bewertung teilentladungsbehalteter Muffen ist für jede gefundene Garniturspezifikation ein Szenario aufzustellen.

3.2 Bestimmung der Garniturspezifikation durch Referenzvergleich

In diesem Abschnitt sollen die Garniturspezifikationen bzw. die Referenzmuffen auf Basis eines maschinellen Lernverfahrens hergeleitet werden. Abbildung 3.7 veranschaulicht die Einordnung der Garniturspezifikation durch Referenzvergleich in das Vorgehensschema. Mittels maschineller Lernverfahren wird eine Referenzmuffe ermittelt, die dann indirekt auch die Garniturspezifikation repräsentiert. Hierzu wird zunächst ein Spannungstest definiert und die Vergleichsparameter als Anfangswerte festgelegt. Es folgen Tests zur Bestimmung des effizienten maschinellen Lernverfahrens und der optimalen Vergleichsparameter. Der Abschnitt schließt mit der Darstellung der Ergebnisse.

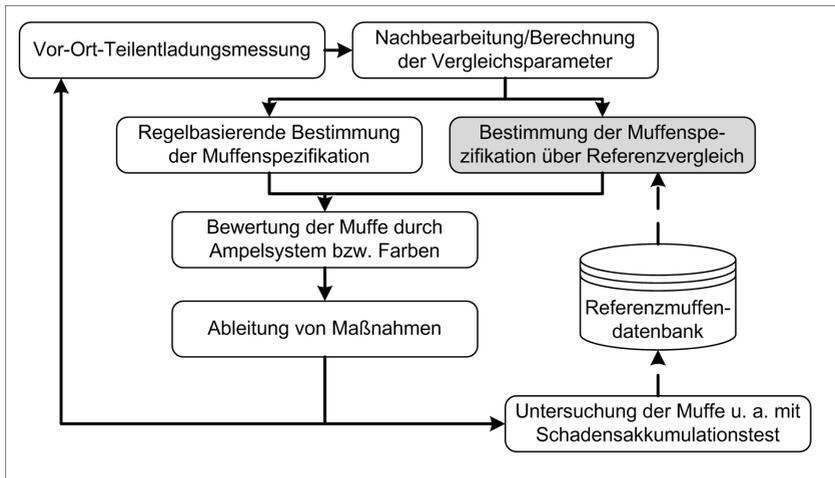


Abbildung 3.7: Einordnung der Garniturspezifizierung durch Referenzvergleich in das Vorgehensschema

3.2.1 Konzeption der Tests

Zur Bestimmung der Garniturspezifikation durch Referenzdatenvergleich kommt ein maschinelles Lernverfahren zum Einsatz. Ein maschinelles Lernverfahren hat gegenüber einem Expertensystem den Vorteil, dass auch unbekannte zukünftige Anforderungen abgedeckt werden können. Über das zu determinierende maschinelle Lernverfahren wird die Referenzmuffe bestimmt. Damit erfolgt auch eine Bestimmung der Garniturspezifikation.

Definition des Spannungstests: Um einen Referenzvergleich durchführen zu können, ist zunächst ein Spannungstest zu definieren, auf dessen Basis alle Messungen durchgeführt werden.

Ein solcher Test ist in [73] und [74] beschrieben. Tabelle 3.2 fasst die Testparameter Startspannung, Stufenhöhe, Stufendauer und Steigerungszeit zusammen.

3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation

	Parameter	Wert	
	Startspannung	$u_{00} = 0,500$	U_0
	Stufenhöhe	$\Delta u = 0,167$	U_0
	Stufendauer	$\Delta t_s = 20,000$	s
	Steigerungszeit	$\Delta t_z = 0,500$	s

Tabelle 3.2: Testparameter

Wie aus Abbildung 3.8 hervorgeht, sollten die Stufen bis zur Leiter-Erde-Spannung U_0 vermehrt um die Einsatzspannung U_e gesteigert und dann in gleichem Maße bis zur Aussetzspannung U_a vermindert werden. Die Aufzeichnung der Teilentladungen muss kontinuierlich, mindestens jedoch für jede Spannungsstufe erfolgen.

Aufbereitung der Messdaten: Je Spannungsstufe muss ein Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm (Abbildung 3.9) erzeugt werden, aus dem die Vergleichsparameter nach Tabelle 3.3 gewonnen werden. Somit entsteht pro Gesamtmessung eine Matrix von 33×13 (429) Vergleichsparametern.

	Gesamtperiode		Positive Halbperiode		Negative Halbperiode	
Teilentladungspegel	1	Prüfspannung U_p	–	–	–	
	2	Impulse n	8	Impulse n_p	21	Impulse n_n
	3	Summe Q_{sum}	–	–	–	–
	4	Minimum Q_{min}	15	Minimum $Q_{min,p}$	28	Minimum $Q_{min,n}$
	5	Maximum Q_{max}	17	Maximum $Q_{max,p}$	30	Maximum $Q_{max,n}$
	6	Mittelwert Q_{mit}	16	Mittelwert $Q_{mit,p}$	29	Mittelwert $Q_{mit,n}$
	7	Standardabw. Q_{std}	18	Standardabw. $Q_{std,p}$	31	Standardabw. $Q_{std,n}$
Winkel	–	–	19	Median $Q_{med,p}$	32	Median $Q_{med,n}$
	–	–	20	Spannweite $Q_{sw,p}$	33	Spannweite $Q_{sw,n}$
	–	–	9	Minimum $\phi_{min,p}$	22	Minimum $\phi_{min,n}$
	–	–	11	Maximum $\phi_{max,p}$	24	Maximum $\phi_{max,n}$
	–	–	10	Mittelwert $\phi_{mit,p}$	23	Mittelwert $\phi_{mit,n}$
	–	–	12	Standardabw. $\phi_{std,p}$	25	Standardabw. $\phi_{std,n}$
	–	–	13	Median $\phi_{med,p}$	26	Median $\phi_{med,n}$
	–	–	14	Spannweite $\phi_{sw,p}$	27	Spannweite $\phi_{sw,n}$

Tabelle 3.3: Vergleichsparameter (alle Parameter auf die Referenzzeit $T_{ref} = 10s$ bezogen)

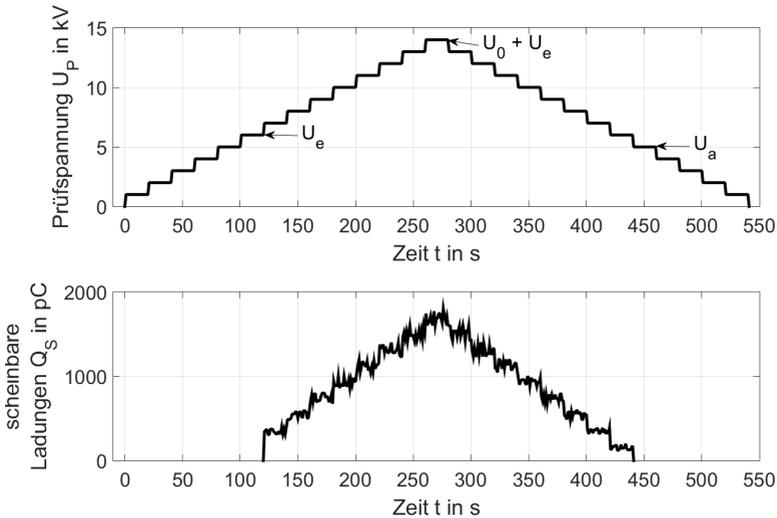


Abbildung 3.8: Spannungstest nach [74], Frequenz der Prüfspannung U_P : 50 Hz, Spannungsebene: 6/10 (12) kV

Bei dieser großen Anzahl von Vergleichsparametern und zumindest beim Aufbau einer Referenzmuffendatenbank mit wenigen Muffen (Datensätzen) besteht die grundsätzliche Gefahr eines Overfittings. Daraus folgt, dass die Vergleichsparameter zum einen komprimiert und zum anderen verringert werden müssen. Ein Weg der Komprimierung ist die Erstellung einer Grauwertmatrix. Aus der vorgenannten Matrix mit 33×13 Feldern wird ein Vektor mit 429 Feldern gebildet.

Unter Hinzunahme aller Messungen n entsteht wiederum eine Matrix von $n \times 429$ Feldern. Jede Spalte wird dann in den Wertebereich von 1 bis 8 skaliert (Gleichung 2.6). Durch Auszählen aufeinanderfolgender Wertepaare (Abbildung 2.11) je Zeile (Messung) entsteht die für das maschinelle Lernen benötigte Grauwertmatrix mit 8×8 Feldern je Messung (Gleichung 2.8).

Nach der Vektorisierung der Matrix und Hinzunahme aller Messungen steht für das maschinelle Lernen eine Matrix von $n \times 64$ Feldern zur Verfügung. Abbildung 3.10 zeigt exemplarisch für sechs Muffen die eingefärbte Grauwertmatrix.

Test mit allen Vergleichsparametern: Mit der Gesamtheit der Vergleichsparameter nach Tabelle 3.3 wird je Referenz eine Grauwertmatrix berechnet, die dann mit jedem maschinellen Lernverfahren nach Tabelle 3.4 kombiniert wird.

Test mit einzelnen Vergleichsparametern: Wie schon unter Punkt 2.4.2 erwähnt, kann das maschinelle Lernen mit vielen Vergleichsparametern zu einem Rauschen (Overfitting) und damit zu

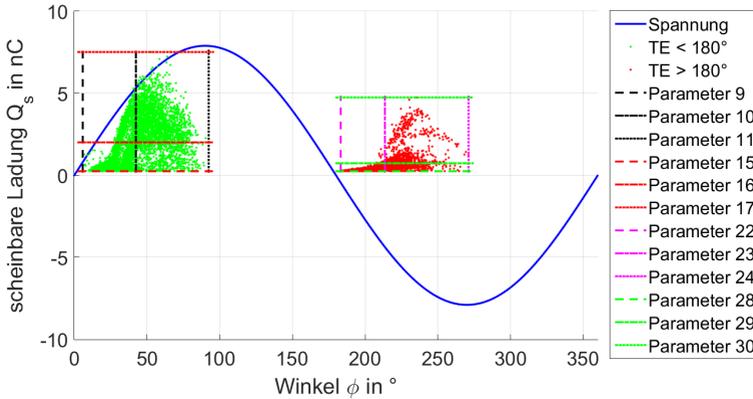


Abbildung 3.9: Vergleichsparameter im Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm

Maschinelle Lernverfahren
Bayes-Klassifikator
Nächster-Nachbar-Klassifikator
Entscheidungsbaum-Klassifikator
Neuronale Netze

Tabelle 3.4: Maschinelle Lernverfahren

unnötigen Fehlern führen. In diesem Test wird der Beitrag jedes Parameters zum Gesamtergebnis untersucht. Mit jedem einzelnen Vergleichsparameter nach Tabelle 3.3 wird je Referenz eine Grauwertmatrix berechnet und dann mit jedem maschinellen Lernverfahren nach Tabelle 3.4 kombiniert.

Bewertung der Tests: Zur Bewertung der Test kommt das Verfahren Leave-one-out wie unter Punkt 2.4.2 (Tabelle 2.3) beschrieben zur Anwendung. Zur Vorbereitung der Tests werden alle für den Test ausgewählten Messungen manuell geordnet. Mit diesem Schritt wird eine eindeutige Fehlererkennung sichergestellt.

3.2.2 Ergebnisse der Tests

In [43] wird für die Auswertung zunächst unbekannter Daten und Datenzusammenhänge folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Im ersten Schritt ist eine Korrelationskoeffizientenmatrix zu erstellen, aus der lineare Zusammenhänge der Parameter erkannt werden können. Im zweiten Schritt werden die maschinellen Lernverfahren auf alle Parameter angewendet. Für den dritten Schritt werden Streudiagramme für jeden Parameter bzw. für eine sinnvolle Gruppe von Parametern erstellt. Diese Streudia-

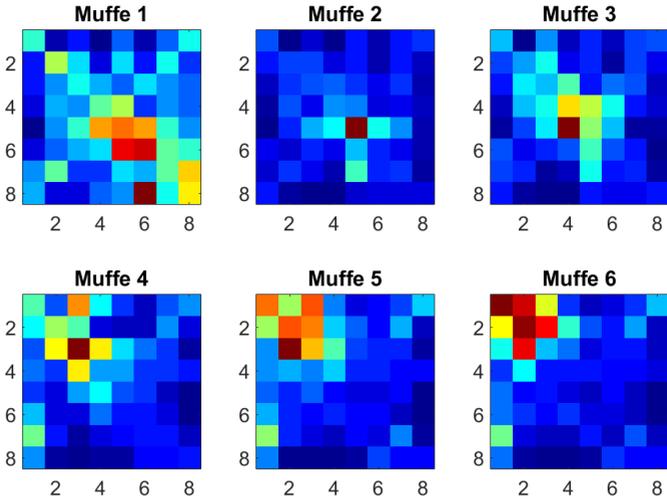


Abbildung 3.10: Eingefärbte Grauwertmatrizen von sechs Referenzmuffen

gramme werden manuell bewertet. Im letzten Schritt wird jeder einzelne Parameter mit den maschinellen Lernverfahren getestet.

Ergebnis der Korrelationskoeffizientenmatrix: Dem üblichen Vorgehen der Datenauswertung folgend wird zunächst eine Korrelationskoeffizientenmatrix erstellt (Abbildung 3.11). In den rot eingefärbten Feldern korrelieren die jeweils betrachteten Parameter positiv, in den blau eingefärbten Feldern negativ. Bei den grün eingefärbten Feldern konnte keine Korrelation ermittelt werden. Offensichtlich gibt es keine Korrelation von Parametern, die den Winkel beschreiben, mit den Parametern, die Teilentladungen beschreiben. Dem Anschein nach gibt es zwischen Parametern, die mit Teilentladungen im Zusammenhang stehen, eine Korrelation. Zwischen Parametern, die mit den Winkeln in Zusammenhang stehen, scheint es keinen Zusammenhang zu geben. Ebenfalls wie erwartet besteht ein Zusammenhang zwischen der Spannung, den Impulsen und einigen Teilentladungparametern. Diese Teilentladungsparameter sind: die Summe, der Mittelwert, die Standardabweichung, der Median und die Spannweite.

Ergebnis des Test mit allen Vergleichsparametern: Bei dem Test der maschinellen Lernverfahren mit allen Vergleichsparametern konnten die Lernverfahren Bayes-Klassifikator, Nächster-Nachbar-Klassifikator und Entscheidungsbaum-Klassifikator alle Objekte fehlerfrei erkennen. Die neuronalen Netze konnten nicht ein Objekt fehlerfrei erkennen (Fehlerrate 100%). Die Fehlerrate von 100% liegt nach [53] an dem Missverhältnis zwischen Trainings- und Validierungsmenge zu Anzahl

3 Untersuchungen zur Bestimmung der Garniturspezifikation

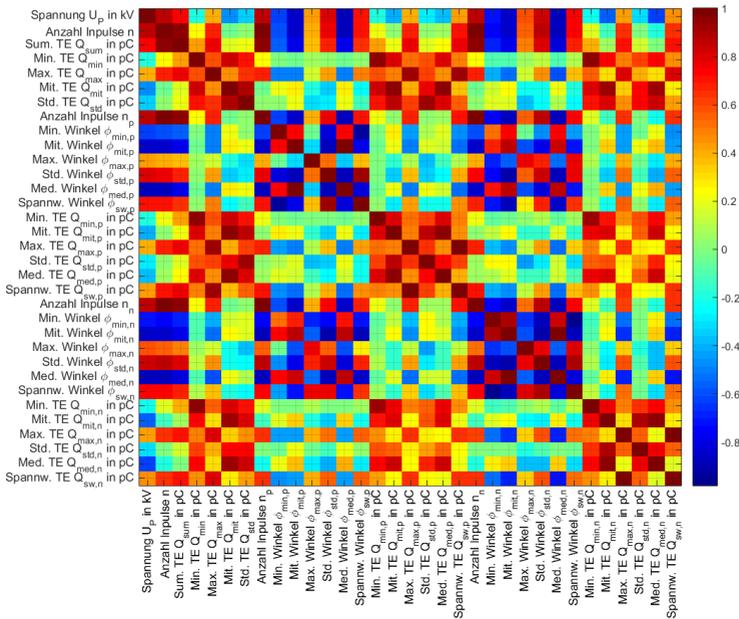


Abbildung 3.11: Korrelationskoeffizientenmatrix

der Parameter. Für die nachfolgenden Tests mit den Einzelparametern wurden die neuronalen Netze ausgeschlossen.

Ergebnisse der Einzeltests: Zur manuellen Prüfung wurden Streudiagramme der einzelnen Vergleichsparameter erstellt. Die Abbildungen 3.12 bis 3.44 stellen diese dar. Die Bewertung als Fehler erfolgt in Anlehnung an die Ausführungen aus Abschnitt 2.4.2.

Die Vergleichsparameter, aus denen die vorgegebene Reihenfolge erkennbar war, wurde als richtig bewertet, andernfalls als fehlerhaft. Das Ergebnis dieser manuellen Bewertung ist in Abbildung 3.45 zu sehen.

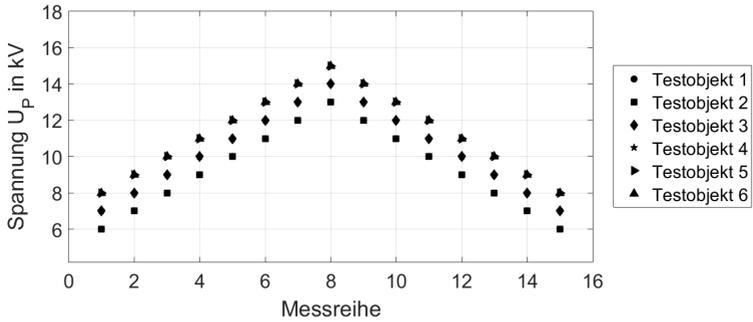


Abbildung 3.12: Parameter 1 – Prüfspannung U_P

Parameter 1: Prüfspannung U_P

Abbildung 3.12

Die Werte der Testobjekte 1/2, 3/4 sowie 5/6 liegen übereinander. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

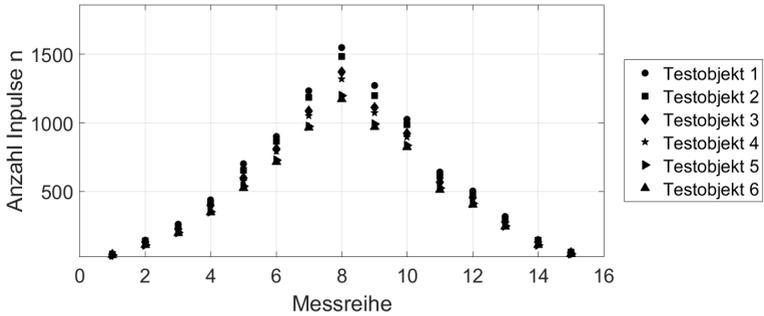


Abbildung 3.13: Parameter 2 – Anzahl der Impulse n

Parameter 2: Anzahl der Impulse n

Abbildung 3.13

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

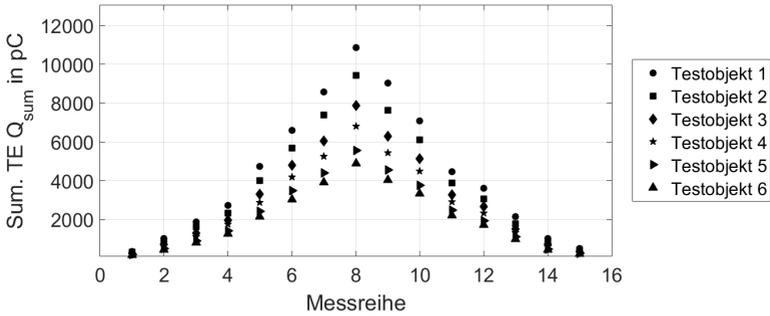


Abbildung 3.14: Parameter 3 – Summe der Teilentladungen Q_{sum}

Parameter 3: Summe der Teilentladungen Q_{sum}

Abbildung 3.14

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

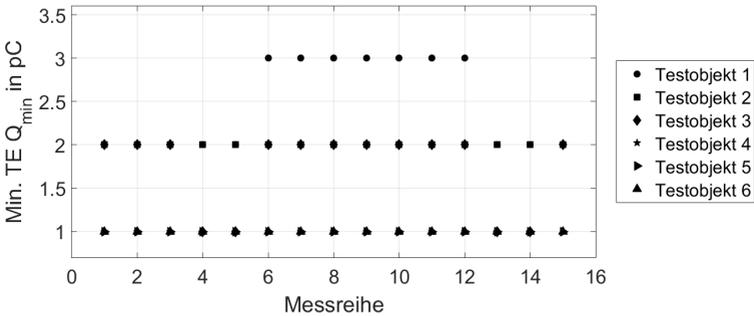


Abbildung 3.15: Parameter 4 – Minimum der Teilentladungen Q_{min}

Parameter 4: Minimum der Teilentladungen Q_{min}

Abbildung 3.15

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen. Es wird der Grundstörpegel dargestellt, der im Labor zum Messzeitpunkt vorlag.

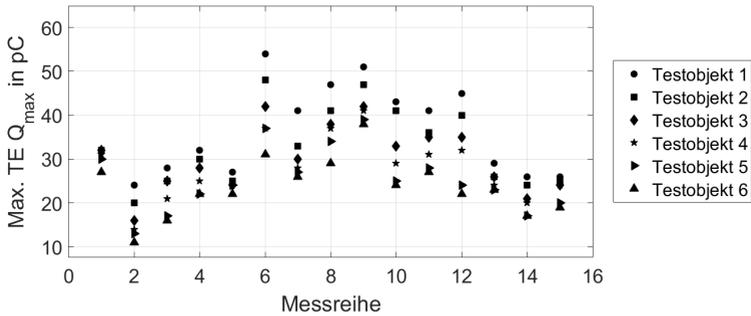


Abbildung 3.16: Parameter 5 – Maximum der Teilentladungen Q_{\max}

Parameter 5: Maximum der Teilentladungen Q_{\max}

Abbildung 3.16

Mit diesem Parameter ist eine ausreichende Differenzierung nicht möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

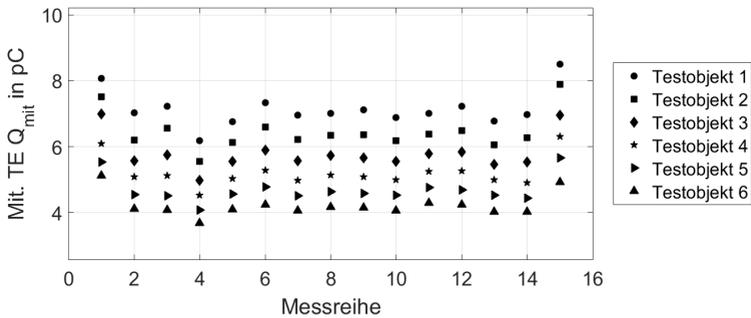


Abbildung 3.17: Parameter 6 – Mittelwert der Teilentladungen Q_{mit}

Parameter 6: Mittelwert der Teilentladungen Q_{mit}

Abbildung 3.17

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

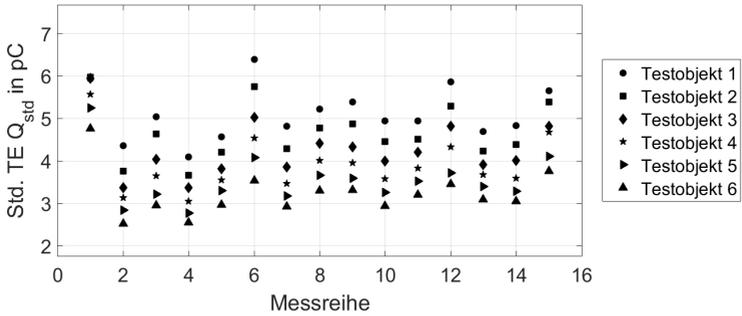


Abbildung 3.18: Parameter 7 – Standardabweichungen der Teilentladungen Q_{std}

Parameter 7: Standardabweichungen der Teilentladungen Q_{std}

Abbildung 3.18

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

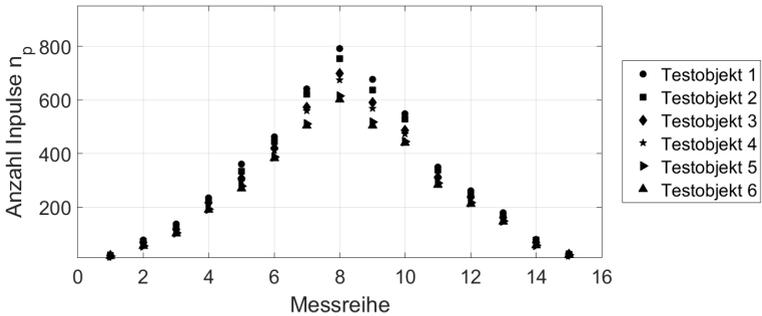


Abbildung 3.19: Parameter 8 – Anzahl der Impulse (positive Halbperiode) n_p

Parameter 8: Anzahl der Impulse (positive Halbperiode) n_p

Abbildung 3.19

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

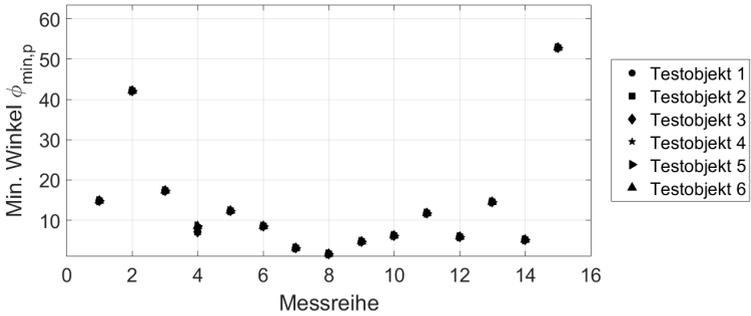


Abbildung 3.20: Parameter 9 – Minimum Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\min,p}$

Parameter 9: Minimum Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\min,p}$

Abbildung 3.20

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

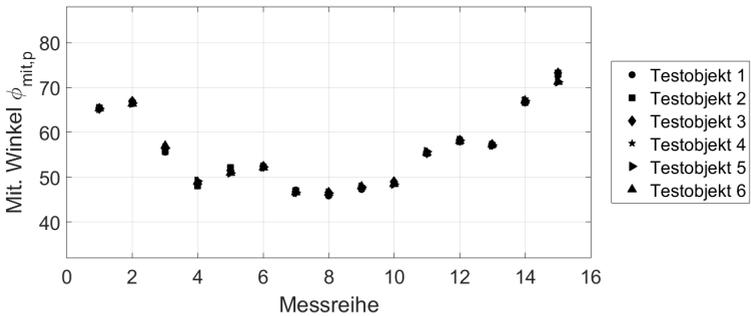


Abbildung 3.21: Parameter 10 – Mittelwert Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\text{mit},p}$

Parameter 10: Mittelwert Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\text{mit},p}$

Abbildung 3.21

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

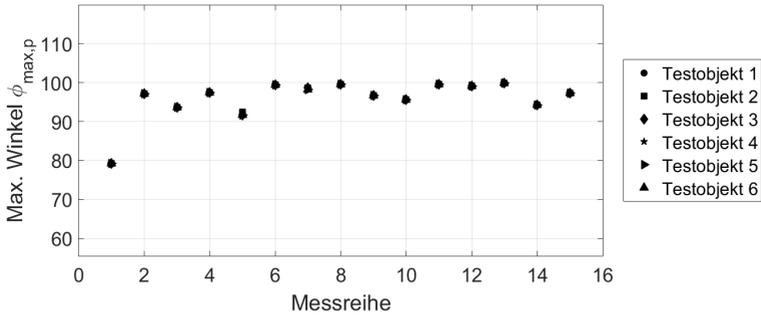


Abbildung 3.22: Parameter 11 – Maximum Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\max,p}$

Parameter 11: Maximum Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\max,p}$

Abbildung 3.22

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

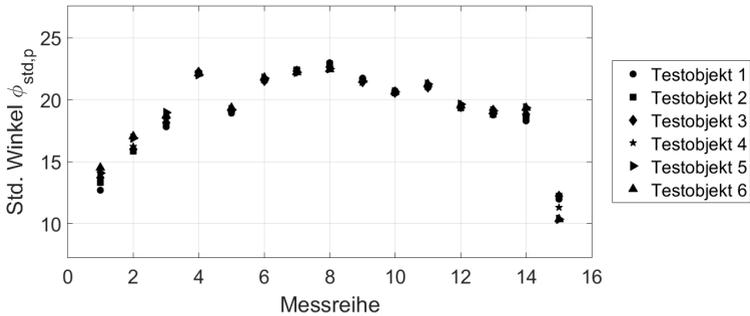


Abbildung 3.23: Parameter 12 – Standardabweichung Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\text{std},p}$

Parameter 12: Standardabweichung Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{\text{std},p}$

Abbildung 3.23

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

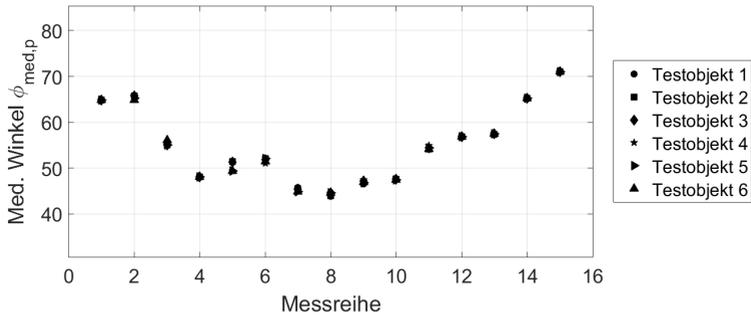


Abbildung 3.24: Parameter 13 – Median Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{med,p}$

Parameter 13: Median Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{med,p}$

Abbildung 3.24

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

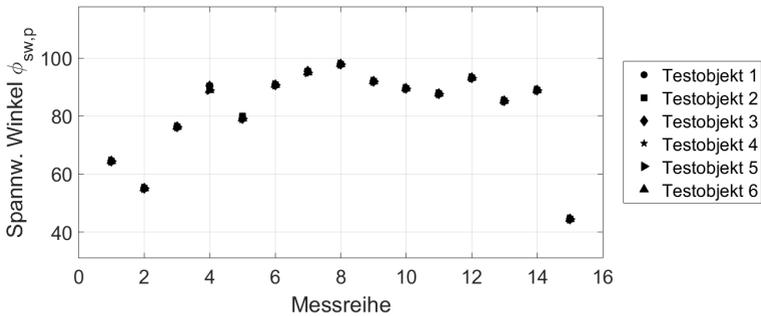


Abbildung 3.25: Parameter 14 – Spannweite Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{sw,p}$

Parameter 14: Spannweite Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{sw,p}$

Abbildung 3.25

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

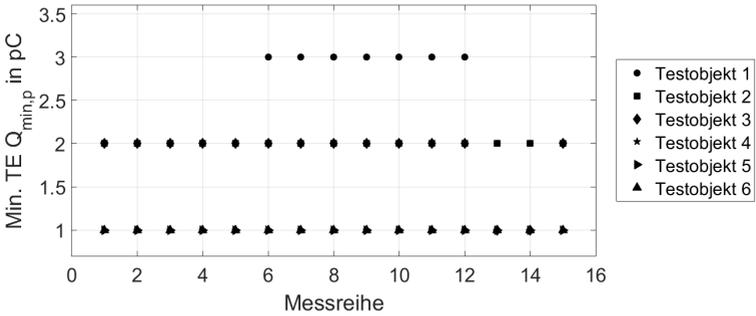


Abbildung 3.26: Parameter 15 – Minimum Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\min,p}$

Parameter 15: Minimum Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\min,p}$

Abbildung 3.26

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen. Es wird der Grundstörpegel dargestellt, der im Labor zum Messzeitpunkt vorlag.

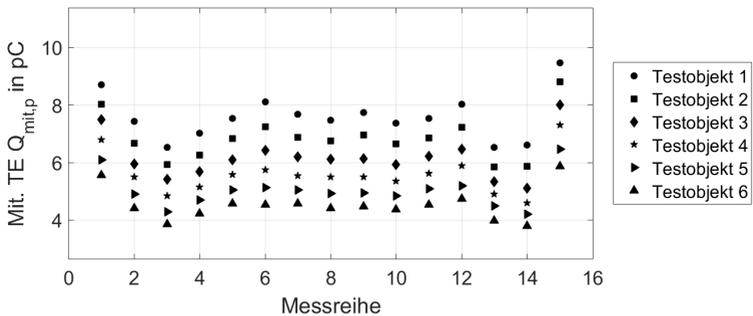


Abbildung 3.27: Parameter 16 – Mittelwert Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\text{mit},p}$

Parameter 16: Mittelwert Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\text{mit},p}$

Abbildung 3.27

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

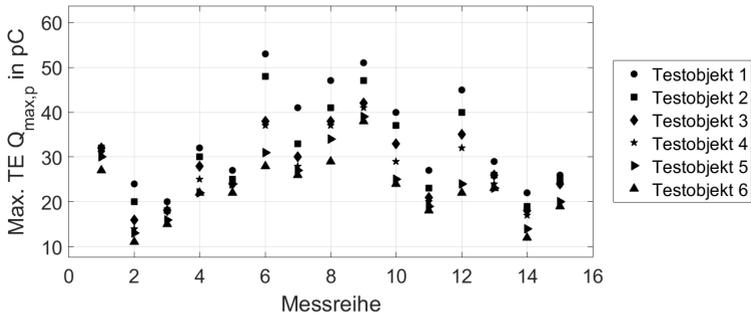


Abbildung 3.28: Parameter 17 – Maximum Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\max,p}$

Parameter 17: Maximum Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\max,p}$

Abbildung 3.28

Mit diesem Parameter ist eine ausreichende Differenzierung nicht möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

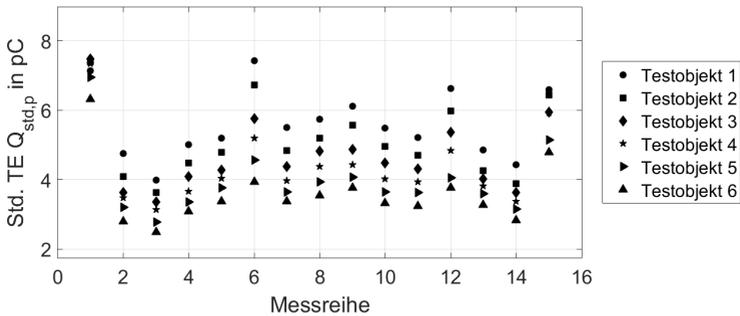


Abbildung 3.29: Parameter 18 – Standardabweichungen Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\text{std},p}$

Parameter 18: Standardabweichungen Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{\text{std},p}$

Abbildung 3.29

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

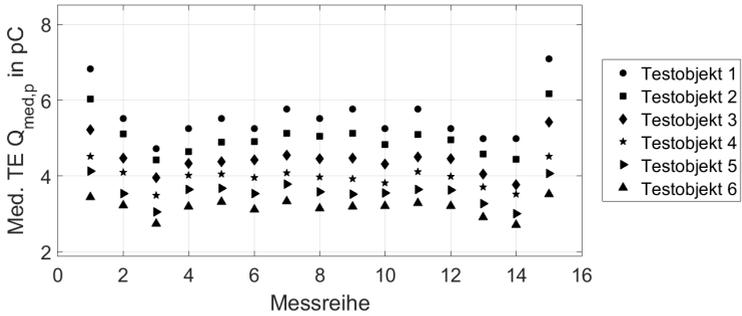


Abbildung 3.30: Parameter 19 – Median Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{med,p}$

Parameter 19: Median Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{med,p}$

Abbildung 3.30

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

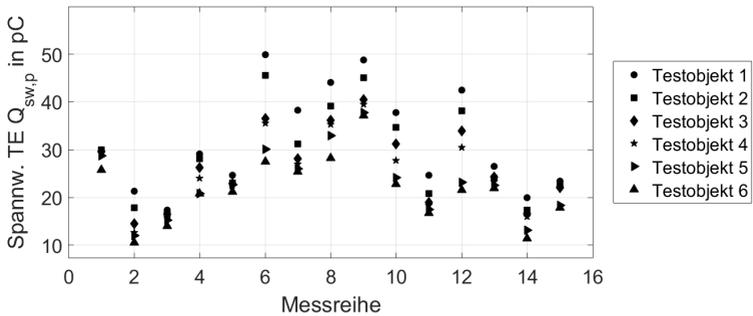


Abbildung 3.31: Parameter 20 – Spannweite Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{sw,p}$

Parameter 20: Spannweite Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{sw,p}$

Abbildung 3.31

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

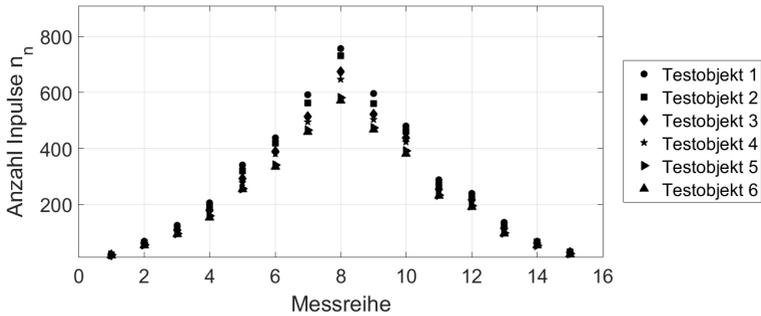


Abbildung 3.32: Parameter 21 – Anzahl der Impulse (negative Halbperiode) n_n

Parameter 21: Anzahl der Impulse (negative Halbperiode) n_n

Abbildung 3.32

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

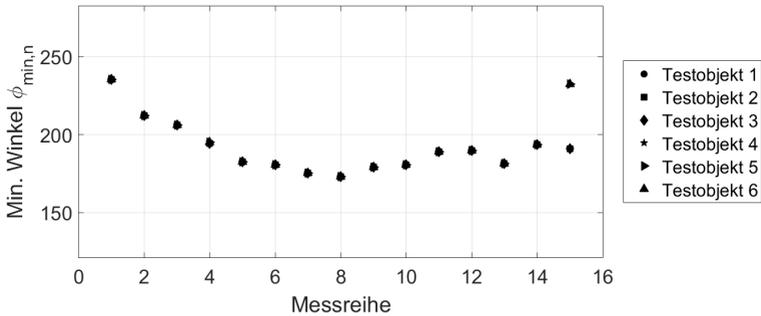


Abbildung 3.33: Parameter 22 – Minimum Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{\min,n}$

Parameter 22: Minimum Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{\min,n}$

Abbildung 3.33

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

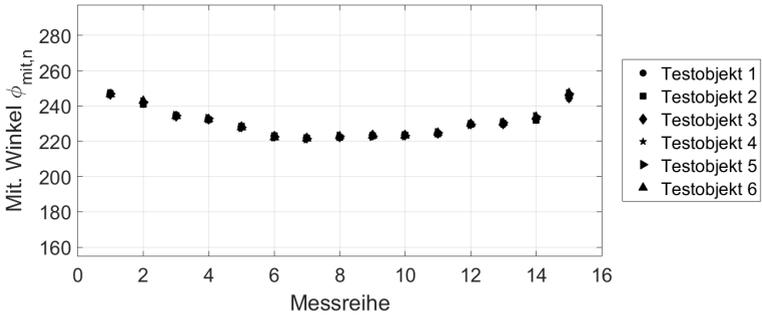


Abbildung 3.34: Parameter 23 – Mittelwert Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{mit,n}$

Parameter 23: Mittelwert Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{mit,n}$

Abbildung 3.34

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

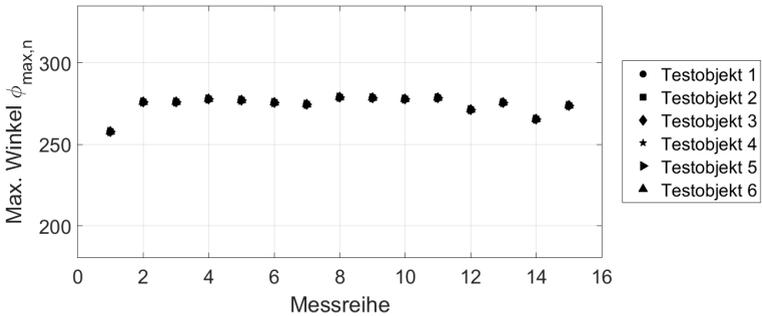


Abbildung 3.35: Parameter 24 – Maximum Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{max,n}$

Parameter 24: Maximum Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{max,n}$

Abbildung 3.35

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

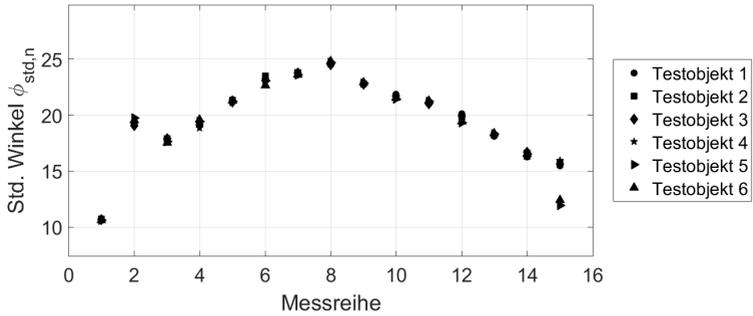


Abbildung 3.36: Parameter 25 – Standardabweichung Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{std,n}$

Parameter 25: Standardabweichung Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{std,n}$

Abbildung 3.36

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

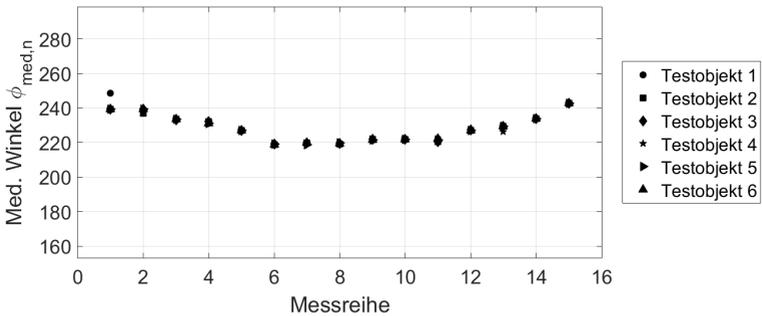


Abbildung 3.37: Parameter 26 – Median Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{med,n}$

Parameter 26: Median Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{med,n}$

Abbildung 3.37

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

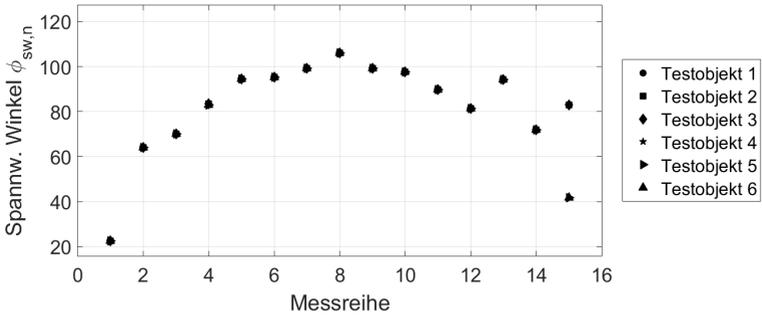


Abbildung 3.38: Parameter 27 – Spannwinkel (negative Halbperiode) $\phi_{sw,n}$

Parameter 27: Spannwinkel (negative Halbperiode) $\phi_{sw,n}$

Abbildung 3.38

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

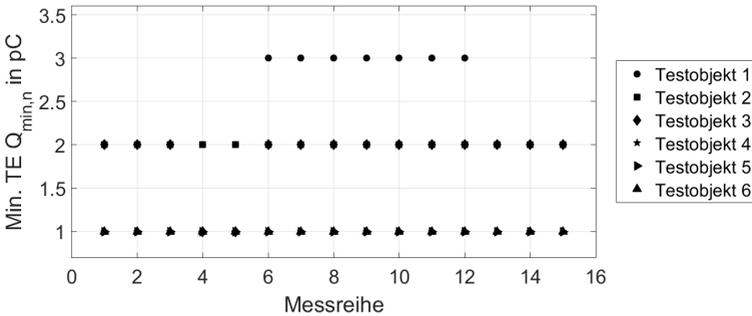


Abbildung 3.39: Parameter 28 – Minimum Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{min,n}$

Parameter 28: Minimum Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{min,n}$

Abbildung 3.39

Mit diesem Parameter ist keine Differenzierung möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen. Es wird der Grundstörpegel dargestellt, der im Labor zum Messzeitpunkt vorlag.

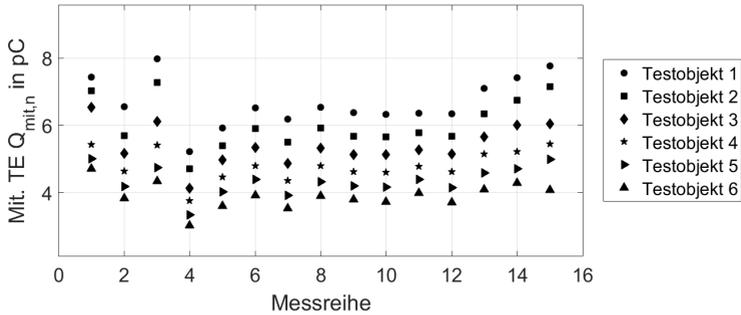


Abbildung 3.40: Parameter 29 – Mittelwert Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{mit,n}$

Parameter 29: Mittelwert Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{mit,n}$

Abbildung 3.40

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

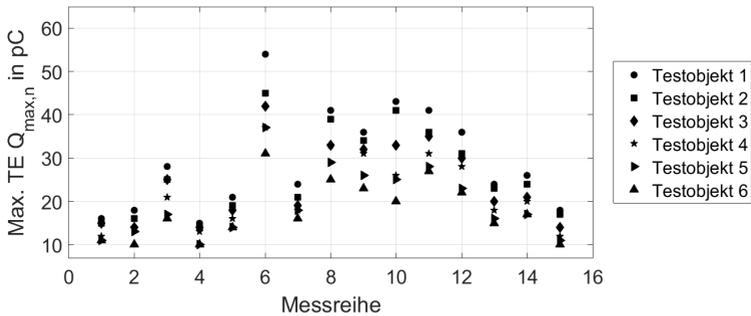


Abbildung 3.41: Parameter 30 – Maximum Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{max,n}$

Parameter 30: Maximum Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{max,n}$

Abbildung 3.41

Mit diesem Parameter ist eine ausreichende Differenzierung nicht möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als falsch angesehen.

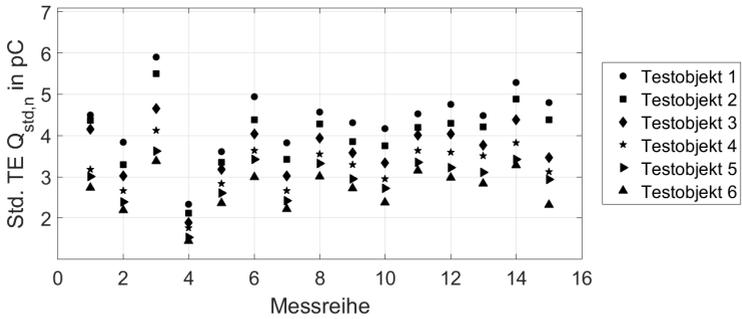


Abbildung 3.42: Parameter 31 – Standardabweichungen Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{std,n}$

Parameter 31: Standardabweichungen Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{std,n}$

Abbildung 3.42

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

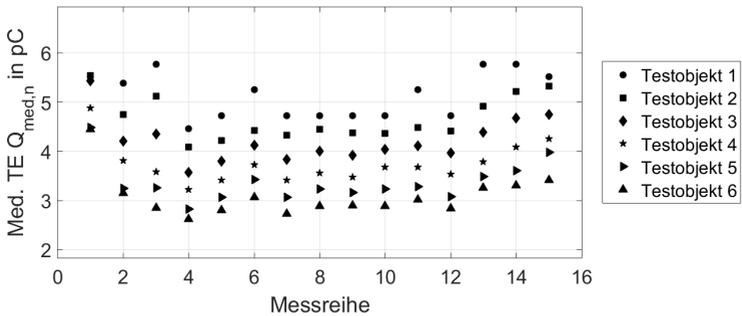


Abbildung 3.43: Parameter 32 – Median Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{med,n}$

Parameter 32: Median Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{med,n}$

Abbildung 3.43

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

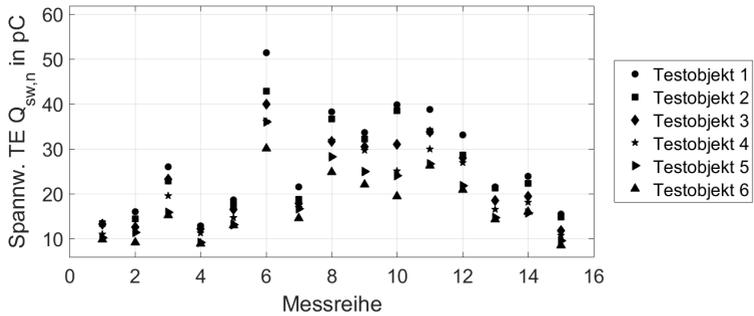


Abbildung 3.44: Parameter 33 – Spannweite Teilentladungen (negative Halbperiode)
 $Q_{sw,n}$

Parameter 33: Spannweite Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{sw,n}$

Abbildung 3.44

Mit diesem Parameter ist eine gute Differenzierung der Testobjekte möglich. Nach der Fehlerdefinition wird dieser Parameter als richtig angesehen.

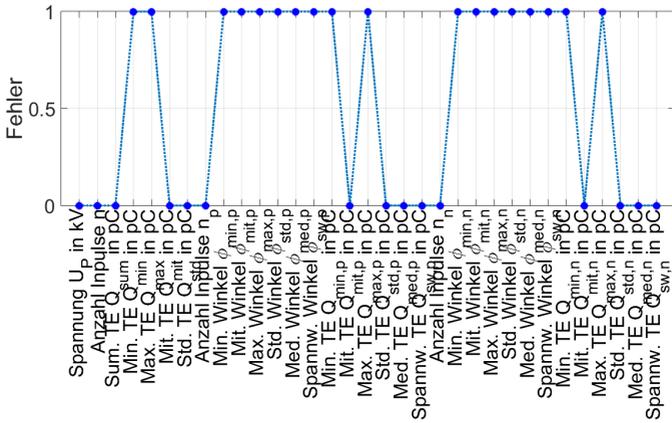


Abbildung 3.45: Fehler je Vergleichsparameter für die optische Kontrolle

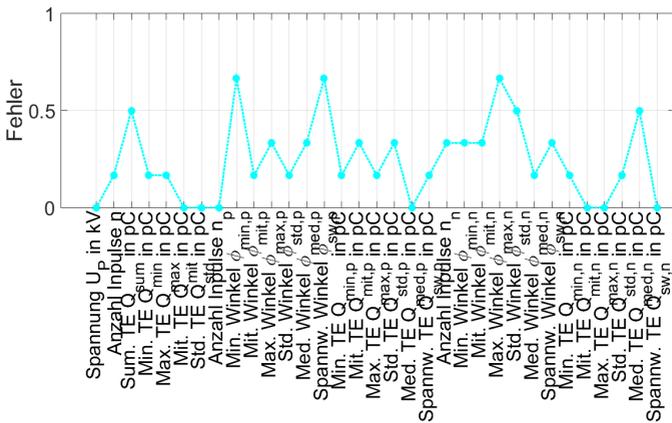


Abbildung 3.46: Fehler je Vergleichsparameter für den Bayes-Klassifikator

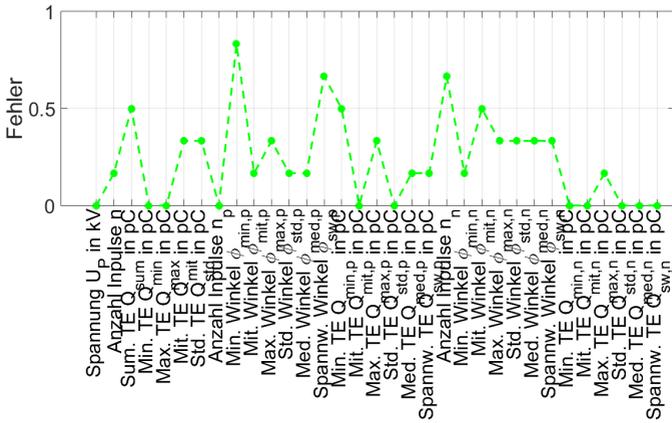


Abbildung 3.47: Fehler je Vergleichsparameter für den Entscheidungsbaum-Klassifikator

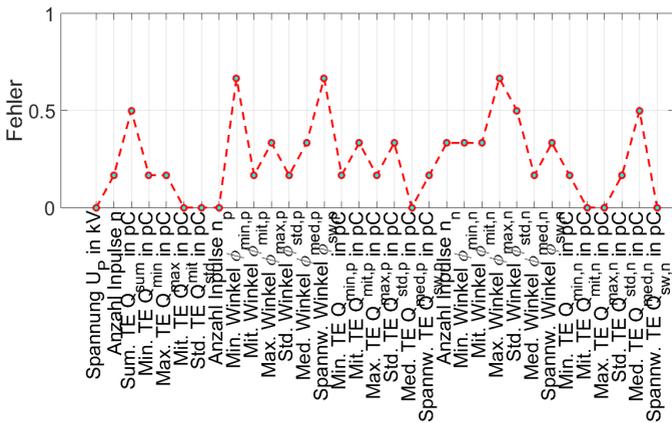


Abbildung 3.48: Fehler je Vergleichsparameter für den Nächster-Nachbar-Klassifikator

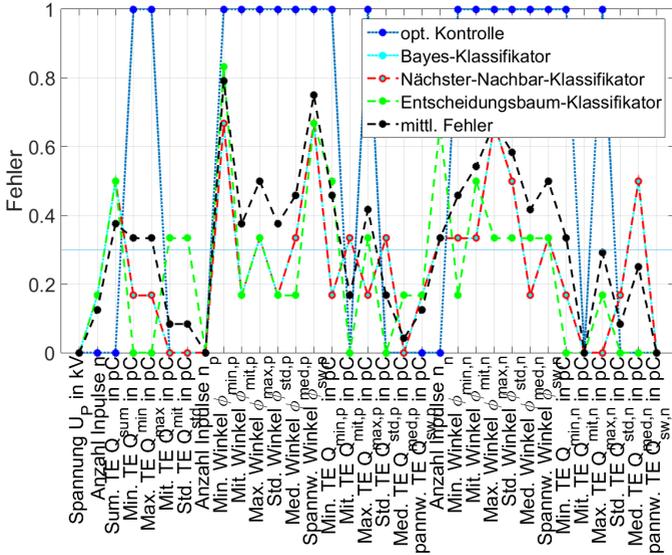


Abbildung 3.49: Fehler je Vergleichsparameter (aggregiert)

Die Prüfung der maschinellen Lernverfahren erfolgte automatisiert mit dem Softwarepaket [43] mit den verbliebenen drei Lernverfahren. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.46 bis 3.47 abgebildet. Die Fehler je Einzelparameter beim Bayes-Klassifikator und beim Nächster-Nachbar-Klassifikator sind gleich. In Abbildung 3.49 sind alle Ergebnisse der Einzeltests der Vergleichsparameter enthalten. Zudem sind ein mittlerer Fehler jedes Einzelparameters sowie eine akzeptierte Fehlergrenze von 30% eingetragen. Ein Einzelparameter mit einem Fehler von 0 bis 30% wird als akzeptabel bewertet.

3.2.3 Bestimmung des besten Lernverfahrens

Mittels Auswertung der Korrelationskoeffizientenmatrix (Abbildung 3.11) und der Einzelparameter mit einem Erkennungsfehler von unter 30% (Abbildung 3.49) sind die optimalen Vergleichsparameter ermittelt worden, die Tabelle 3.5 zusammenfasst. Abbildung 3.50 stellt die Korrelationskoeffizientenmatrix mit den optimalen Vergleichsparametern dar, die untereinander mit einem Korrelationskoeffizienten von größer 0,5 korrelieren.

Ein in Abschnitt 2.4.2 aufgeführtes Merkmal ist die Performance des Klassifizierungsvorgangs. Tabelle 3.6 stellt die Ausführungszeiten der automatisierten Tests der maschinellen Lernverfahren dar. Demzufolge ist mit Abstand der Nächster-Nachbar-Klassifikator am schnellsten und hinreichend zuverlässig. In der Implementierung des Nächster-Nachbar-Klassifikators durch das Softwarepaket [43] wird zudem ein Abstand zwischen dem zu bewertenden Objekt und dem nächsten Nachbarn ausgegeben, der als Güte des gefundenen Nachbarn bezeichnet werden kann.

3.2 Bestimmung der Garniturspezifikation durch Referenzvergleich

	Gesamtperiode	Positive Halbperiode		Negative Halbperiode	
Teilentladungspegel	1 Spannung U_p	–		–	
	2 Impulse n	8	Impulse n_p	21	Impulse n_n
	3 Summe Q_{sum}	–		–	
	–	–		–	
	–	–		–	
	6 Mittelwert Q_{mit}	16	Mittelwert $Q_{mit,p}$	29	Mittelwert $Q_{mit,n}$
	7 Standardabw. Q_{std}	18	Standardabw. $Q_{std,p}$	31	Standardabw. $Q_{std,n}$
Winkel	–	19	Median $Q_{med,p}$	32	Median $Q_{med,n}$
	–	20	Spannweite $Q_{sw,p}$	33	Spannweite $Q_{sw,n}$
	–	–		–	
	–	–		–	
	–	–		–	

Tabelle 3.5: optimale Vergleichsparameter

Maschinelle Lernverfahren	Ausführungszeit
Bayes-Klassifikator	371,75 s
Nächster-Nachbar-Klassifikator	5,16 s
Entscheidungsbaum-Klassifikator	139,54 s
Neuronale Netze	kein Ergebnis

Tabelle 3.6: Ausführungszeiten der maschinellen Lernverfahren

In der Praxis kann dieser Abstand dazu genutzt werden, den Grad der Bekanntheit der Muffe auszudrücken. Ist der Abstand zu groß, wird die Muffe als unbekannt eingestuft, geborgen und gemäß Kapitel 4 untersucht.

Schlussfolgerung: Das für diesen Fall beste maschinelle Lernverfahren ist der Nächster-Nachbar-Klassifikator. Von den zunächst 33 Vergleichsparametern haben sich 15 als effizient herauskristallisiert. Herausgefallen sind sämtliche Parameter, die einen Winkel beschreiben, sowie solche, die minimale Teilentladungen (Störpegel) und maximale Teilentladungen (eventuell Ausreißer) beschreiben.

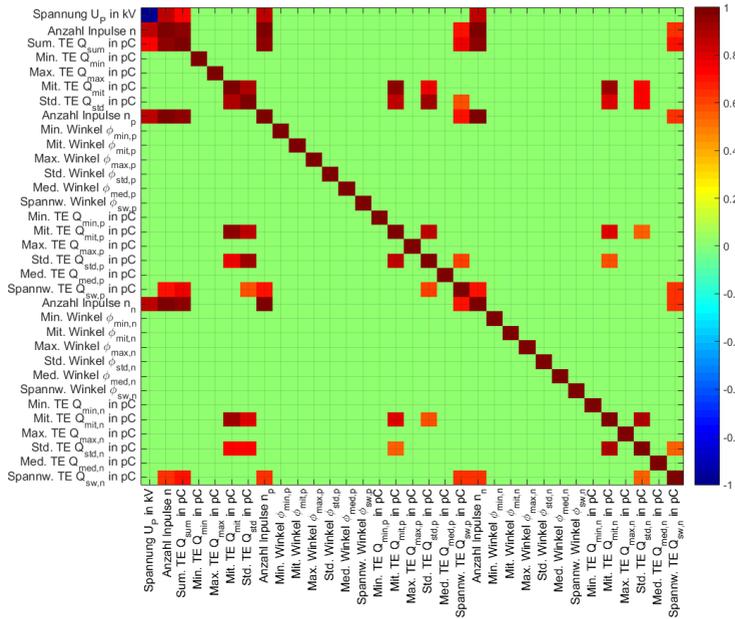


Abbildung 3.50: optimale Korrelationskoeffizientenmatrix

4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen

In diesem Kapitel wird ein Schadensakkumulationstest vorgestellt, mit dem Schadensakkumulationen in einer Muffe detektiert werden können. Abbildung 4.1 zeigt die Einordnung des Schadensakkumulationstests in das Vorgehensschema. Für den Schadensakkumulationstest wurde zunächst die Schadensakkumulation simuliert. Auf Basis dieser Simulation erfolgte ein Vortest, dessen Ziel darin bestand, das Simulationsmodell zu verifizieren. Nach dem erfolgreichen Vortest wurde der Schadensakkumulationstest auf verschiedene Muffen unterschiedlicher Spezifikationen und Fehler angewendet. Als Ergebnisse der Schadensakkumulationstests stehen die jeweiligen Alterungsfaktoren und die Einordnung in ein Ampelsystem nach Schreiter [23].

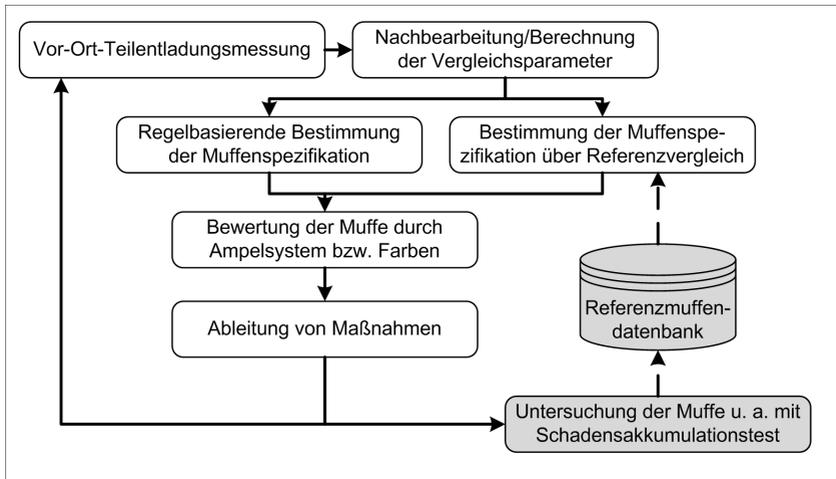


Abbildung 4.1: Einordnung des Schadensakkumulationstests in das Vorgehensschema

Basis des Schadensakkumulationstests bildet die Aufzeichnung einer realen Online-Teilentladungsmessung. Abbildung 4.2 veranschaulicht einen Ausschnitt aus einer realen Online-Teilentladungsmessung [75]. Die x -Achse zeigt die Länge des Kabels l_K mit den Muffen (gelbe Markierungen) an, die y -Achse den zeitlichen Verlauf und die z -Achse die scheinbare Ladung Q_S .

Bei 523 m befindet sich eine teilentladungsbehaftete Muffe. Bis zur Hälfte der Aufzeichnung sind wenige Teilentladungen mit einem konstanten Pegel zu erkennen. Nach der halben Zeit steigt die scheinbare Ladung sprunghaft an und dann kontinuierlich bis zum Ausfall weiter.

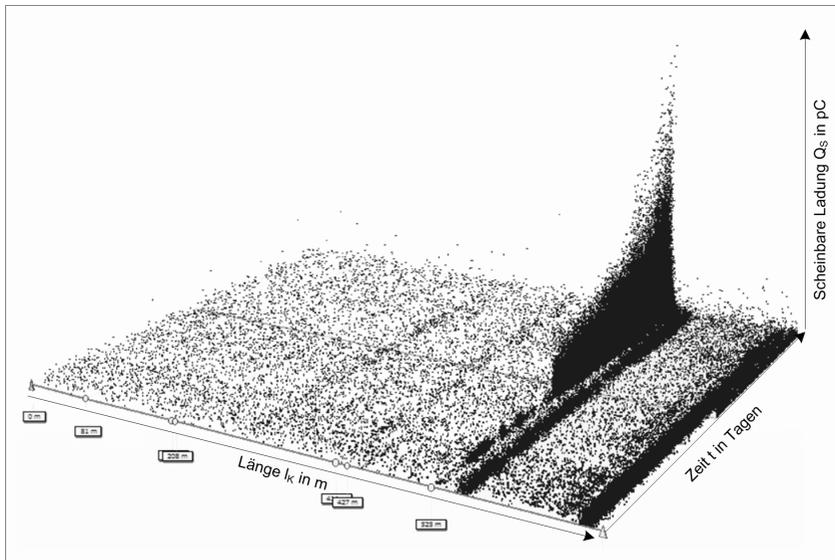


Abbildung 4.2: Online-Teilentladungsmessung [75]

4.1 Simulation des Schadensakkumulationstests

Für die Simulation eines Schadensakkumulationstests wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Die Teilentladungseinsetzspannung U_e folgt dem Invers-Power-Gesetz nach Gleichung 2.10. Der Anfangswert der Teilentladungseinsetzspannung U_e soll bei $1,6 \cdot U_0$ liegen.
2. Eine thermische Alterung nach Gleichung 2.9 wird ausgeschlossen.
3. Die Simulation basiert auf realen Messwerten bzw. Messreihen der umgesetzten Entladeleistung P_{Dis} .
4. Zudem soll das in Abbildung 4.2 gezeigte Verhalten, dass an einer Muffe zunächst keine oder nur geringe Teilentladungen detektiert werden und dann spontan die Teilentladungsintensität steigt, simuliert werden.

$$U_e(t) = k_1 \cdot t^m + U_e(t=0) \quad (4.1)$$

$$t = \sqrt[m]{\frac{U_e(t=0) - U_e(t)}{-k_1}} \quad (4.2)$$

Die mathematische Herleitung der Gleichungen 4.1 bzw. 4.2 aus dem allgemeinen Invers-Power-Gesetz nach Gleichung 2.10 ist im Anhang B beschrieben.

Beispiel 4

Das Ergebnis nach dem vorgenannten Punkt 1 illustriert Abbildung 4.3. Die Einsetzspannung zum Zeitpunkt $t = 0$, $U_e(t=0)$ liegt bei 11,85 kV und sinkt mit dem inversen Alterungsfaktor $m = 0,15$ bzw. nach Gleichung B.12 mit dem Alterungsfaktor $n = -6,66$. Für die Konstante k_1 wurde der Wert $-1,7$ festgelegt. Die Gleichungen 4.1 und 4.2 stellen diesen Sachverhalt dar.

$$U_e = -1,7 \cdot t^{0,15} + 11,85 \quad (4.3)$$

$$t = \frac{0,15 \sqrt[6]{6 - 11,85}}{-1,7} \quad (4.4)$$

$$t = 3,784 \text{ min} \quad (4.5)$$

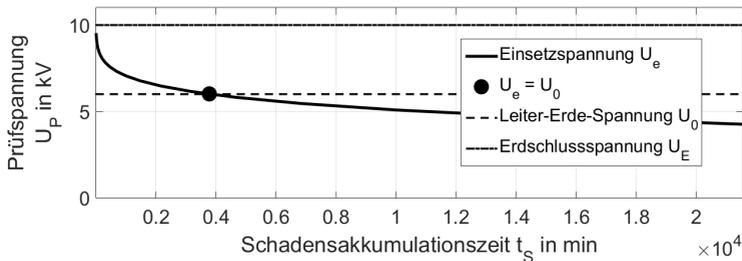


Abbildung 4.3: Simulation der Einsetzspannung U_e

Einsetzen der vorgenannten Werte in Gleichung 4.1 ergibt Gleichung 4.3 und damit den Verlauf der Einsetzspannung nach Abbildung 4.3. Den Zeitpunkt, an dem die Einsetzspannung U_e unter die Leiter-Erde-Spannung U_0 sinkt, erhält man durch Umstellen der Gleichung 4.1 zu Gleichung 4.2 und Einsetzen nach Gleichung 4.4. Mit den gewählten Parametern sinkt nach $3,784 \text{ min}$ die Einsetzspannung U_e unter die Leiter-Erde-Spannung U_0 bei einer Prüfspannung $U_{P,50}$ größer als die Einsetzspannung U_e .

Für die Simulation des Muffenverhaltens nach Abbildung 4.2 wurde von einer realen Messung ausgegangen. Mit dem in Abschnitt 3.2.1 konzipierten Spannungstest wurde zudem die Entladeleistung P_{DIS} nach [36] als Funktion der Prüfspannung U_P aufgezeichnet. In Abbildung 4.4 sind die Messwerte als blaue Punkte gekennzeichnet. Die Messwerte wurden auf Basis der Gleichung 4.6 angepasst (blau durchgezogene Kurve). Geprüft wurden Gleichungen auf Basis einer Exponentialfunktion und einer Potenzfunktion. Potenzfunktionen ergaben mit den vorliegenden Messwerten den geringsten Fehler der Regression R_M .

$$P_{\text{Dis},0} = k_2 \cdot U^{k_3} + k_4 \quad (4.6)$$

$$P_{\text{Dis},1} = (k_2 \cdot U^{k_3} + k_4) \cdot k_5 \cdot t^{k_6} \quad (4.7)$$

$$P_{\text{Dis},n} = (k_2 \cdot U^{k_3} + k_4) \cdot (k_5 \cdot t^{k_6})^n \quad (4.8)$$

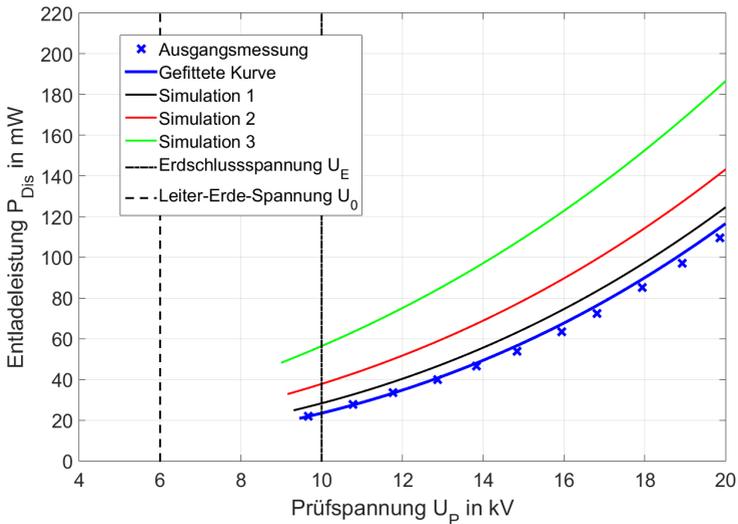


Abbildung 4.4: Simulation der Entladeleistung P_{Dis} bezogen auf die Spannung

Gemäß den Annahmen steigt die Entladeleistung P_{Dis} bei einer Prüfspannung $U_{P,50}$ größer als die Einsatzspannung U_E ebenfalls nach einer Potenzfunktion. Somit ergibt sich für die erste Simulation nach Gleichung 4.7 die schwarze Kurve in Abbildung 4.4. Für n Simulationen ergibt sich die Gleichung 4.8 sowie die rote ($n=2$) und grüne ($n=3$) Kurve in Abbildung 4.4. Die Werte der Einsatzspannung U_E entsprechen dem Beispiel auf Seite 99.

Beispiel 5

Für die Simulation nach der Gleichung 4.8, dargestellt in den Abbildungen 4.4 bis 4.6, wurden folgende Konstanten angenommen:

Angepasste Konstanten aus Messung: $k_2 = 0,05; k_3 = 2,5; k_4 = 2,5$

Abgeleitete Konstanten aus Abbildung 4.2: $k_5 = 1,1; k_6 = 0,25$

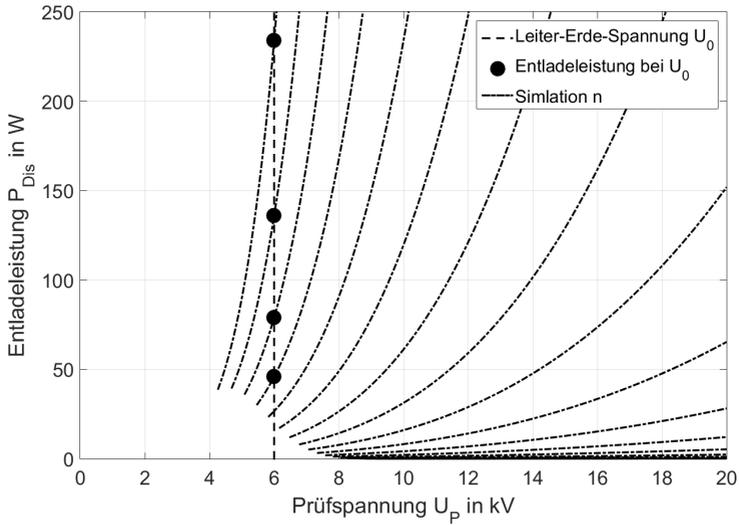


Abbildung 4.5: Erweiterte Simulation der Entladeleistung P_{DiS} bezogen auf die Spannung

Weitere Simulationen für $n \leq 21$ sind in Abbildung 4.5 enthalten. Die Kurven beginnen mit der zuvor simulierten Einsatzspannung U_e . Zu dem im Beispiel auf Seite 99 berechneten Zeitpunkt unterschreitet die Einsatzspannung U_e die Leiter-Erde-Spannung U_0 . In Abbildung 4.5 sind die jeweiligen Entladeleistungen P_{DiS} der Leiter-Erde-Spannung U_0 markiert. Die Markierungen wurden in Abbildung 4.6 in Form der Entladeleistung P_{DiS} als Funktion der Zeit t übernommen. Es ist ersichtlich, dass die Entladeleistung P_{DiS} nach [36] dem Verlauf der Aufzeichnung der scheinbaren Ladung Q_s in Abbildung 4.2 folgt.

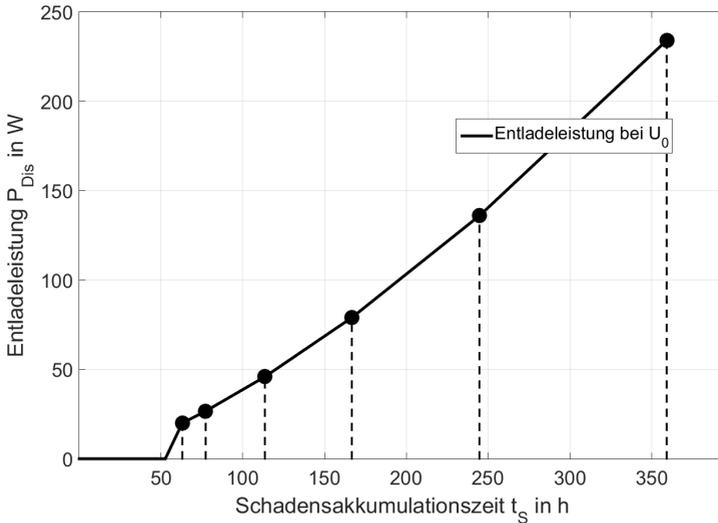


Abbildung 4.6: Simulation der Entladeleistung P_{Dis} bezogen auf die Zeit

4.2 Vortest zum Schadensakkumulationstest

Im Hochspannungslabor der TU Chemnitz wurde an einer Muffe der Vortest, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, durchgeführt. Für die Beanspruchung wurde eine Prüfspannung $U_{T,50}$ von $8 \times U_0$ gewählt, um möglichst in überschaubarer Zeit ein Ergebnis zu erzielen. Die Muffe sollte mindestens drei Alterungszyklen durchlaufen, um eine Schadensakkumulation sicher zu erkennen.

Mit dem Vortest wurden folgende Erkenntnisse erlangt:

Bei Beanspruchung des Prüflings mit $8 \times U_0$ wurde Schaden akkumuliert. Diese Schadensakkumulation zeigte sich im Sinken der Einsatzspannung U_e und in einer höheren Entladeleistung P_{Dis} .

Während der Schadensakkumulation wurde ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt. Diese führte zum Temperaturanstieg an der Teilentladungsstelle. Der Einfluss des Temperaturanstiegs auf die Ergebnisse konnte mit diesem Vortest nicht bestimmt werden.

In der ersten TE-Messung sind auch Teilentladungen eines Endverschlusses gemessen worden. Dieser ist infolgedessen durchgeschlagen. Die entsprechende Messreihe kann daher nicht gewertet werden.

Somit kann festgehalten werden, dass die Einsatzspannung U_e der Indikator ist, anhand dessen eine Alterung bzw. eine Schadensakkumulation quantifiziert werden kann. Die in der Simulation (Abbildung 4.3) dargestellten Ergebnisse können mit den Ergebnissen des Vortests (Abbildung 4.8) bestätigt werden. Die Einsatzspannung folgt dem Invers-Power-Gesetz (Abbildung 4.9).

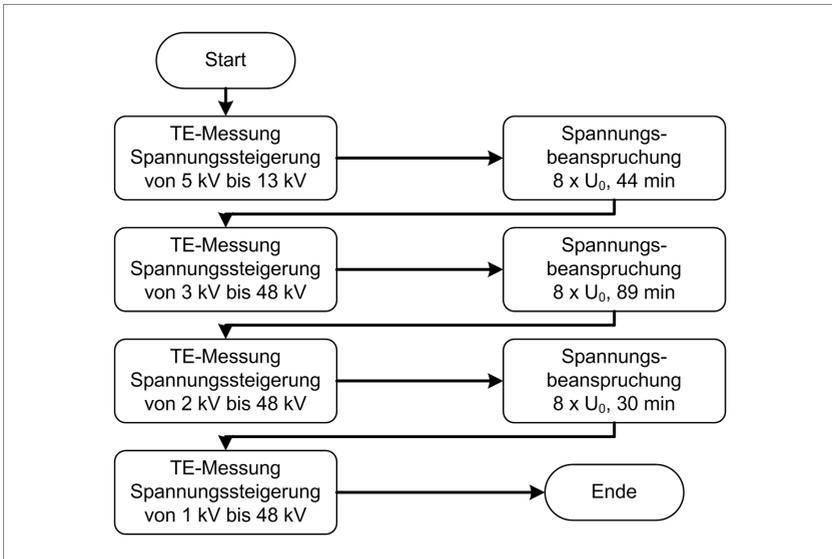


Abbildung 4.7: Ablauf des durchgeführten Vortests

4.3 Durchführung

Für die Durchführung des Schadensakkumulationstests sind folgende Randbedingungen zwingend einzuhalten:

Zum einen muss die Temperatur konstant gehalten werden. Zum anderen sollte die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck bzw. der Druck, der auf die Muffe lastet, konstant sein.

Auf diese Weise wird eine thermische Alterung nach dem Arrheniusgesetz ausgeschlossen, sodass eine Beanspruchung ausschließlich nach dem Invers-Power-Gesetz erfolgt. Der Ablauf des Schadensakkumulationstests ist in Abbildung 4.10 skizziert. Er besteht aus einem Wechsel aus Teilentladungsmessungen und Beanspruchungen mit einer Prüfspannung $U_{P,50}$.

Für die Beanspruchung wurde eine Prüfspannung $U_{P,50}$ in Höhe von $1,7 \times U_0$ und mit einer Frequenz von 50 Hz gewählt. Für die Dauer der Einwirkung wurden zunächst fünf Beanspruchungen mit 120 min festgelegt. Im Weiteren wurden zwei Beanspruchungen mit 300 min durchgeführt. Den Messaufbau während der Alterung illustriert Abbildung 4.11.

Die Prüfspannung $U_{P,0,1}$ wurde mit einem industriellen Prüfgerät bereitgestellt. Die Prüffrequenz war 0,1 Hz. Die Prüfspannung wurde in 0,5-kV-Schritten von $0,33 \times U_0$ (1,5 kV) bis $1,7 \times U_0$ (10,0 kV) erhöht. Die Beanspruchung je Schritt hat 60 s gedauert. Die Spannungssteigerung wurde je Teilentladungsmessung siebenmal wiederholt. Die Spannungssteigerung verfolgte den Zweck der Feststellung der Einsatzspannung U_e . Als Messwertaufnehmer

4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen

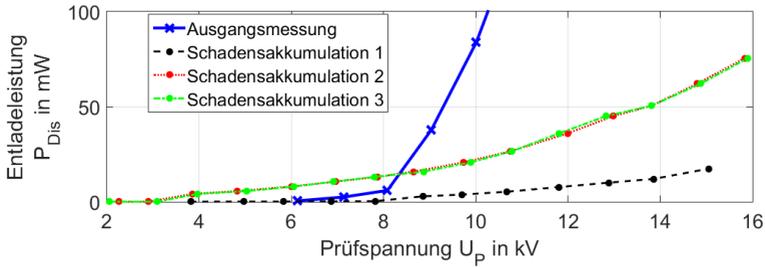


Abbildung 4.8: Entladeleistung P_{Dis} in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{P,50}$

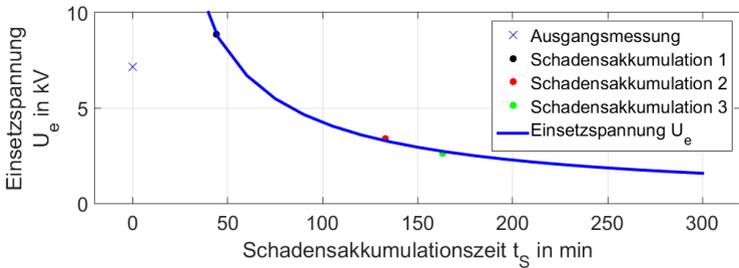


Abbildung 4.9: Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_s

diente ein HFCT¹ und zur Darstellung ein digitales Speicheroszilloskop (DSO). Begleitend zur Messung wurde eine Verlustfaktormessung $\tan \delta$ durchgeführt. Bei jeder Spannungssteigerung wurde pro Spannungsstufe dreimal der Verlustfaktor bestimmt. Abbildung 4.12 zeigt den Messaufbau.

Damit stehen für die Auswertung die Parameter Einsetzspannung U_e , Verlustfaktor $\tan \delta$, Kapazität C und Widerstand R zur Verfügung. Für die Einsetzspannung stehen pro Teilentladungsmessung sieben Messwerte zur Verfügung. Für den Verlustfaktor, die Kapazität und den Widerstand sind 21 Messwerte pro Spannungsstufe (insgesamt 18 Spannungsstufen) erfasst. Die hohe Anzahl von 378 Messwerten pro Messung verbessert die statistische Sicherheit wesentlich.

Als Auswertungsmethoden werden die statistischen Lageparameter, wie Mittelwert \bar{x} , Standardabweichung s und Median \bar{x} , sowie die weitergehenden Parameter, wie Quantile $Q_{(p)}$, Schiefe ν und Wölbung ω , geprüft.

Zur Segmentierung der Messwerte stehen die maschinellen Lernverfahren Clustering (Clusteranalyse) und die Assoziationsregeln nach Abbildung 2.13 im Abschnitt 2.4 zur Auswahl.

¹HFCT - high frequency current transformer

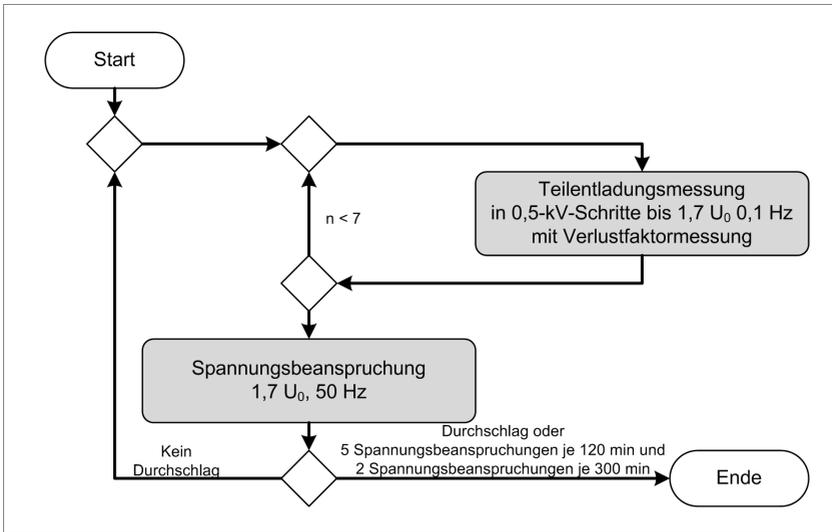


Abbildung 4.10: Ablauf des Schadensakkumulationstests

4.4 Ergebnisse

Zur Interpretation der Messergebnisse wurde auf Verfahren des unüberwachten Lernens, wie im Abschnitt 2.4.1 beschrieben, zurückgegriffen. Wie in Abbildung 2.13 (Seite 46) ersichtlich teilt sich das unüberwachte Lernen in die Clusteranalyse (Clustering) und in Assoziationsregeln. Die Outlier-Detection musste angesichts homogener Messergebnisse nicht angewendet werden. Die Anwendung der Assoziationsregeln führte zu einem Modell, das als subjektiv bezeichnet werden muss, und ist daher ebenfalls nicht weiter verfolgt worden.

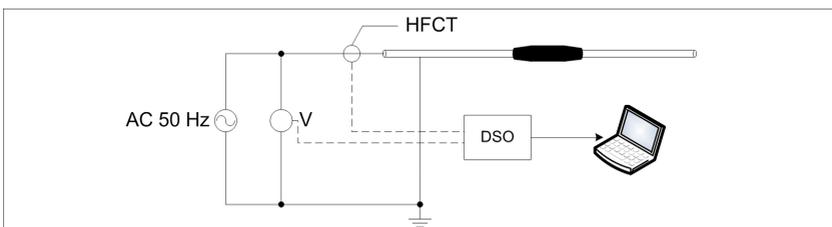


Abbildung 4.11: Messaufbau während der Schadensakkumulation

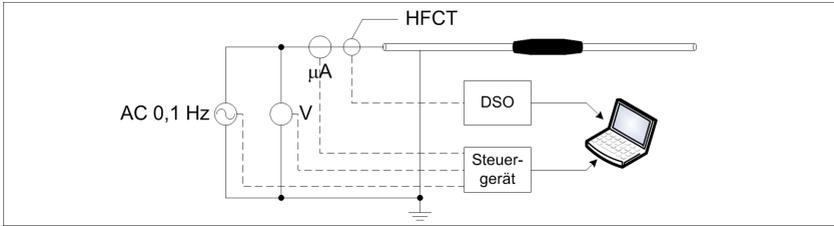


Abbildung 4.12: Messaufbau der Teilentladungsmessung

Zur Anwendung kam die Clusteranalyse aus dem Softwarepaket [43]. Um die Messwerte der einzelnen Parameter (Einsetzspannung U_e , Verlustfaktor $\tan \delta$, Kapazität C und Widerstand R) vergleichbar zu machen, wurden diese auf ihrem Mittelwert gleich null $\bar{x} = 0$ normiert und dann als relative Abweichung der Einsetzspannung ΔU_r , relative Abweichung des Verlustfaktors $\Delta \tan \delta_r$, relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r bezeichnet.

Als statistischer Lageparameter mit der größten Signifikanz hat sich die Schiefe ν herausgestellt. Die Schiefe ν wurde über alle Messwerte aller Beanspruchungen ermittelt, sodass eine eindeutige steigende, fallende oder neutrale Tendenz abgeleitet werden konnte. Definiert wurde die steigende Tendenz mit einer Schiefe von $\nu \leq -1$, die fallende Tendenz mit der Schiefe von $\nu > 1$ und die neutrale Tendenz mit einer Schiefe im Wertebereich $-1 < \nu \leq 1$.

In der Tabelle A.2 sind die Schiefen (ν_U , ν_C , ν_R und $\nu_{\tan \delta}$) und ihre Zuordnungen zu Clustern ersichtlich. Zudem können in Tabelle A.2 die Zuordnung der untersuchten Muffen zu den Alterungstypen und deren Bildung nachvollzogen werden.

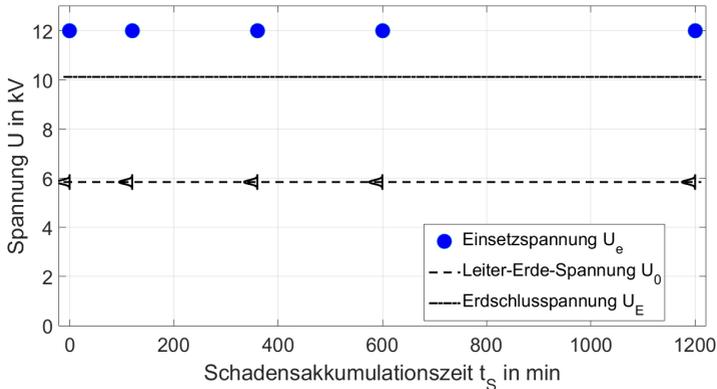
Alterungstyp	ν_U	ν_C	ν_R	$\nu_{\tan \delta}$
1	neutral	neutral	steigend	neutral
2	neutral	neutral	neutral	neutral
3	fallend	neutral	steigend	fallend
4	steigend	neutral	steigend	fallend
5	steigend	steigend	fallend	steigend/neutral

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Alterungstypen bezogen auf die jeweiligen Schiefen ν

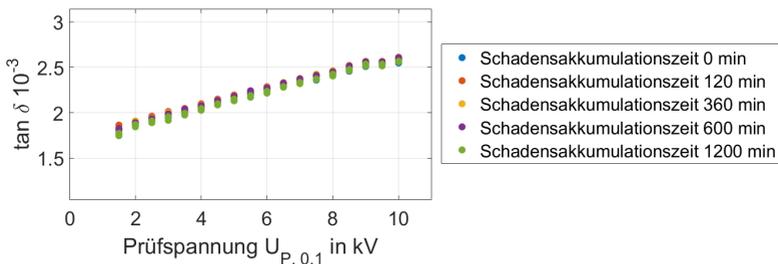
Mittels Clusteranalyse wurden fünf Cluster ermittelt, die in Tabelle 4.1 mit dem jeweiligen statistischen Lageparameter der Schiefe ν zusammengefasst sind. Eine Erläuterung der einzelnen Cluster und deren physikalisch-elektrische Interpretation folgen in den nächsten Abschnitten.

4.4.1 Alterungstyp 01

Die Alterung der Muffen nach dem Alterungstyp 01 erfolgt auf Basis der "normalen" langsamen Alterung. Die Muffe hat keine Fehler, die zu Teilentladungen führen². Der Alterungsfaktor $n \approx 20$ konnte mit diesem kurzen Alterungstest nicht ermittelt werden und stützt sich auf Werte aus der Literatur (z. B. [76]).



(a) Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_s



(b) Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{P,0,1}$

Abbildung 4.13: Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$

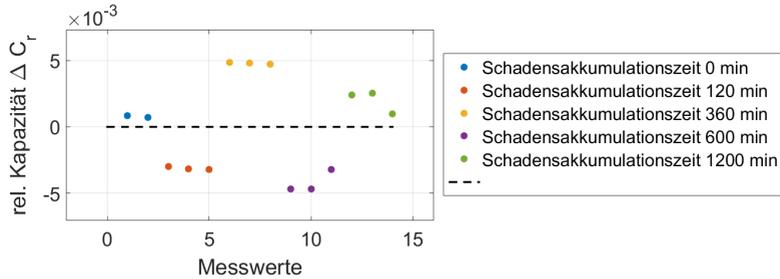
In Abbildung 4.13a werden die Leiter-Erde-Spannung $U_0 = 6 \text{ kV}$ mit der Standardabweichung $s = 80 \text{ V}^3$ sowie die Beanspruchung mit der Prüfspannung $U_{P,50} = 1,7 \cdot U_0$ und Teilentladungs-einsetzspannung U_e als pauschaler Wert in Höhe von $2 \times U_0$ in Bezug zur Alterung dargestellt. In Abbildung 4.13b folgt der Verlustfaktor $\tan \delta$ der Prüfspannung $U_{P,0,1}$. Aus den dicht übereinander liegenden Punkten

²Bei Teilentladungen, die unter dem Störpegel liegen, sind Fehlinterpretationen möglich.

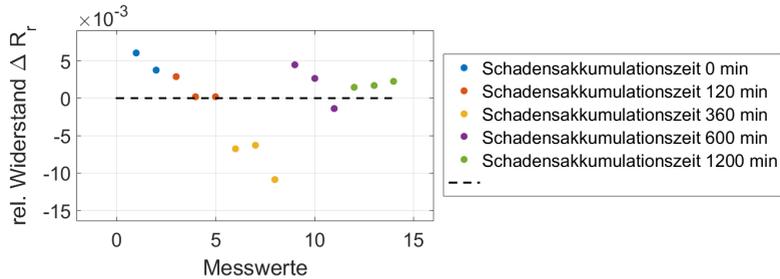
³Die Standardabweichung wurde nach IEC 50160 ermittelt.

4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen

erkennt man, dass der Verlustfaktor $\tan \delta$ unverändert ist. Aus dieser Erkenntnis und der Kenntnis, dass keine Teilentladungen detektiert wurden, ist zu schlussfolgern, dass kein Schaden akkumuliert wurde.



(a) relative Kapazitätsabweichung ΔC_r – Schiefe $\nu_C = 0,063$



(b) relative Widerstandsabweichung ΔR_r – Schiefe $\nu_R = -1,038$

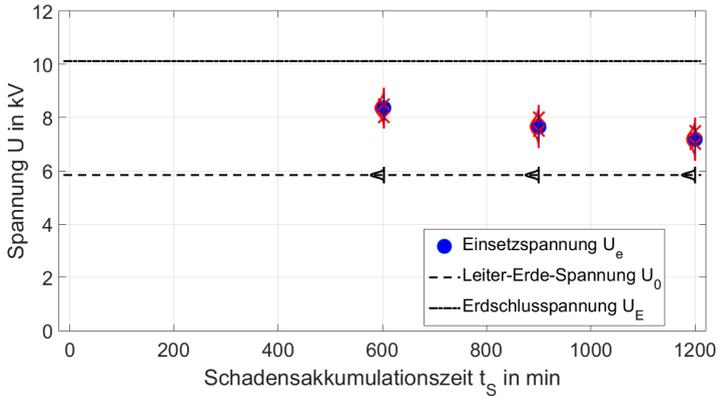
Abbildung 4.14: Alterungstyp 01 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$

Die Schiefe ν_C der relativen Kapazitätsabweichung ΔC_r (Abbildungen 4.14a) rangiert im Bereich $-1 < \nu \leq 1$ und ist somit neutral. Die relative Widerstandsabweichung ΔR_r (Abbildung 4.14b) besitzt eine Schiefe ν_R von $\nu \leq -1$ und ist damit steigend.

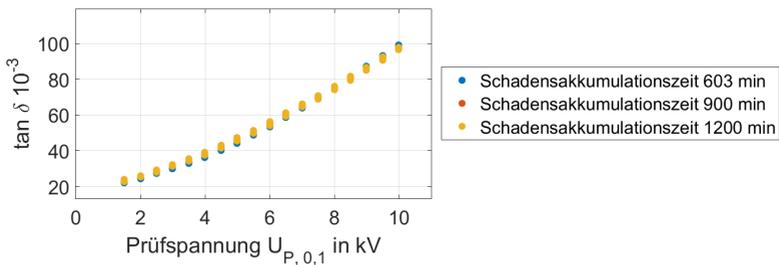
Nicht abgebildet, jedoch aus Tabelle 4.1 ersichtlich, sind die Schiefe der Einsatzspannung ν_U und die Schiefe des Verlustfaktors $\nu_{\tan \delta}$ bezogen auf die Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$ ebenfalls neutral.

4.4.2 Alterungstyp 02

Muffen des Alterungstyps 02 altern beschleunigt mit einem Alterungsfaktor von $n \approx 10$. Die Muffe hat Fehler, die zu stabilen Teilentladungen führen. Anzahl und Art der Fehler werden über die Referenzmuffe ermittelt (Abschnitt 3.2).



(a) Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_S



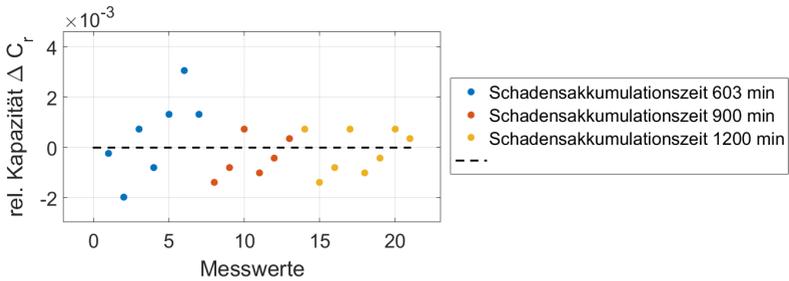
(b) Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{P,0,1}$

Abbildung 4.15: Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$

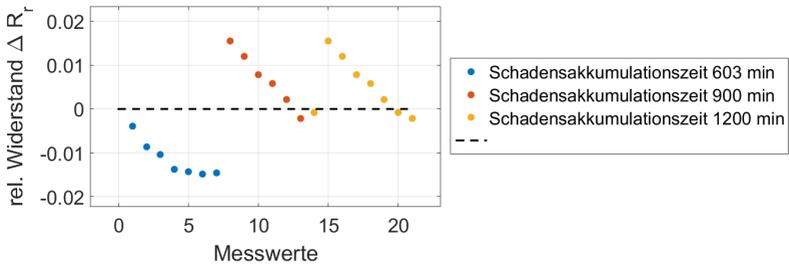
In Abbildung 4.15a werden die Leiter-Erde-Spannung $U_0 = 6 \text{ kV}$ mit der Standardabweichung $s = 80 \text{ V}$ sowie die Beanspruchung mit der Prüfspannung $U_{P,50} = 1,7 \cdot U_0$ und die Teilentladungseinsetzspannung U_e für 603, 900 und 1200 min sowie die jeweilige Standardabweichung s in Bezug zur Schadensakkumulationszeit t_S dargestellt.

In der Abbildung 4.15b folgt der Verlustfaktor $\tan \delta$ der Prüfspannung $U_{P,0,1}$. Die dicht übereinander liegenden Punkte signalisieren, dass es keine Veränderungen des Verlustfaktors $\tan \delta$ gab.

4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen



(a) relative Kapazitätsabweichung ΔC_r – Schiefe $\nu_C = 0,596$



(b) relative Widerstandsabweichung ΔR_r – Schiefe $\nu_R = -0,075$

Abbildung 4.16: Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$

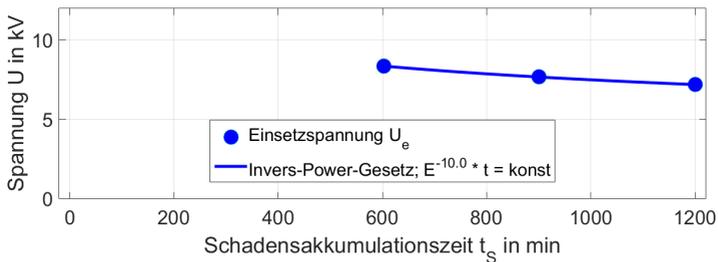


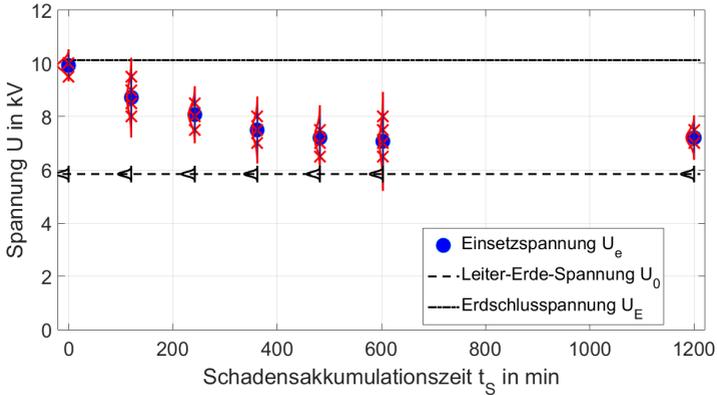
Abbildung 4.17: Alterungstyp 02 – Einsetzspannung U_e nach dem Invers-Power-Gesetz

Die relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und die relative Widerstandsabweichung ΔR_r sind in den Abbildungen 4.16a und 4.16b wiedergegeben. Beide Schiefen ν_C und ν_R liegen im Bereich $-1 < \nu \leq 1$ und sind somit neutral. Nicht abgebildet, jedoch aus Tabelle 4.1 ersichtlich, sind die Schiefe der Einsetzspannung ν_U und die Schiefe des Verlustfaktors $\nu_{\tan \delta}$ bezogen auf die Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$ ebenfalls neutral.

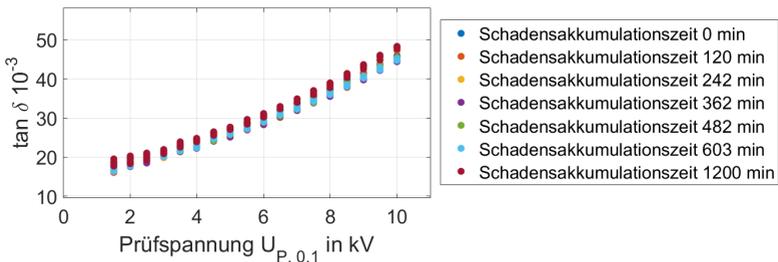
Gemäß der Herleitung in Abschnitt B wurde die Einsetzspannung U_e als Funktion der Zeit t angepasst und der Alterungsfaktor berechnet. Abbildung 4.17 illustriert den Verlauf.

4.4.3 Alterungstyp 03

Die Muffen des Alterungstyps 03 altern schneller als Muffen des Alterungstyps 02. Der Alterungsfaktor liegt hier zwischen $n \approx 5$ und $n \approx 7$. Das heißt, eine Muffe dieses Typs besitzt entweder mehr und/oder größere Teilentladungsstellen als Muffen des Alterungstyps 02. Die Teilentladungen sind stabil. Anzahl und Art der Fehler, die zu Teilentladungen führen, werden über die Referenzmuffe ersichtlich.



(a) Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_S



(b) Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{P,0,1}$

Abbildung 4.18: Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$

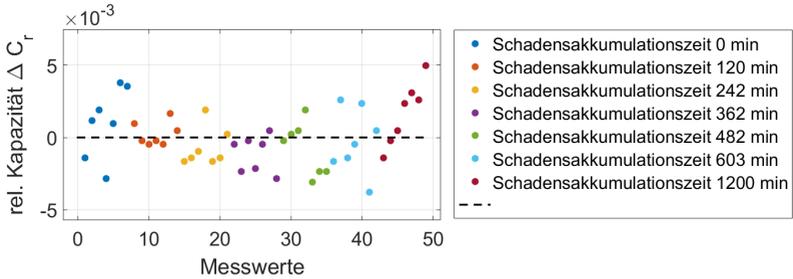
In Abbildung 4.18a werden die Leiter-Erde-Spannung $U_0 = 6\text{ kV}$ mit der Standardabweichung $s = 80\text{ V}$ sowie die Beanspruchung mit der Prüfspannung $U_{P,50} = 1,7 \cdot U_0$ abgebildet. Zudem ist die Teilentladungseinsetzspannung U_e mit der jeweiligen Standardabweichung s in Bezug zur Schadensakkumulationszeit t_S zu sehen. Anscheinend nimmt die Teilentladungseinsetzspannung U_e kontinuierlich ab.

In Abbildung 4.18b folgt der Verlustfaktor $\tan \delta$ der Prüfspannung $U_{P,0,1}$. Aus den dicht übereinander liegenden Punkten ist ersichtlich, dass sich der Verlustfaktor $\tan \delta$ nicht verändert hat.

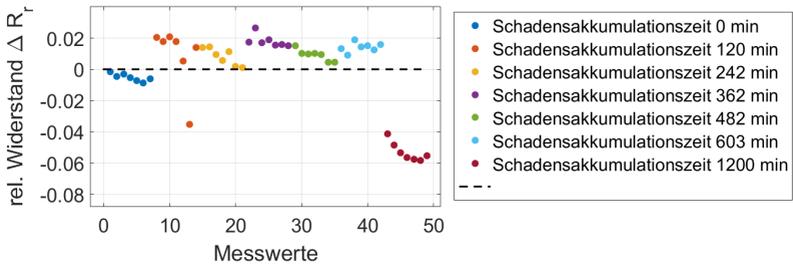
Die relative Kapazitätsabweichung ΔC_r ist in Abbildung 4.19a veranschaulicht. Die Schiefe ν_C der Kapazität liegt im Bereich $-1 < \nu \leq 1$ und ist damit neutral. Die relative Widerstandsabweichung ΔR_r (Abbildung 4.19b) besitzt eine Schiefe ν_R von $\nu \leq -1$ und ist damit steigend. Die Schiefe der Einsetzspannung ν_U (Tabelle 4.1) ist neutral und die Schiefe des Verlustfaktor $\nu_{\tan \delta}$ fallend.

Abbildung 4.20 verdeutlicht den fallenden Verlauf der Einsetzspannung U_e in Bezug zur Zeit t .

4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen



(a) relative Kapazitätsabweichung ΔC_r – Schiefe $\nu_C = 0,362$



(b) relative Widerstandsabweichung ΔR_r – Schiefe $\nu_R = -1,484$

Abbildung 4.19: Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{ kV}$

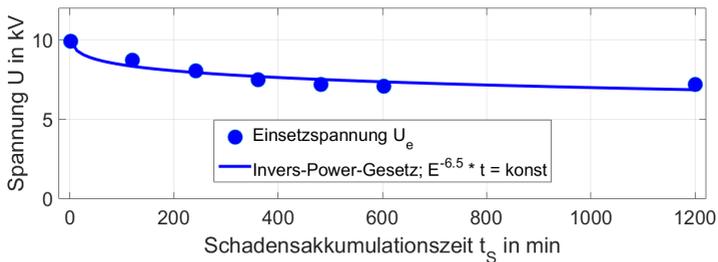
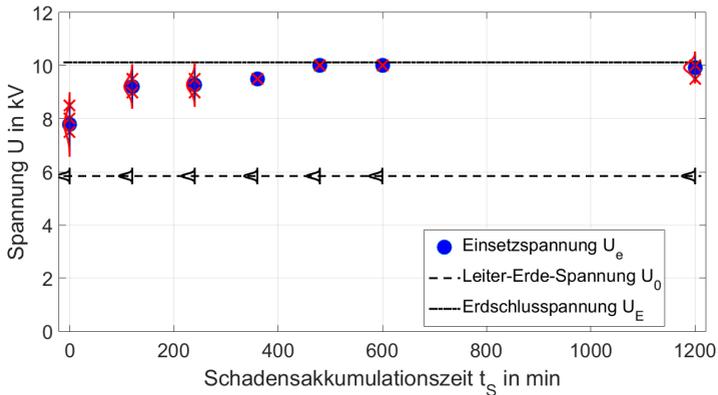
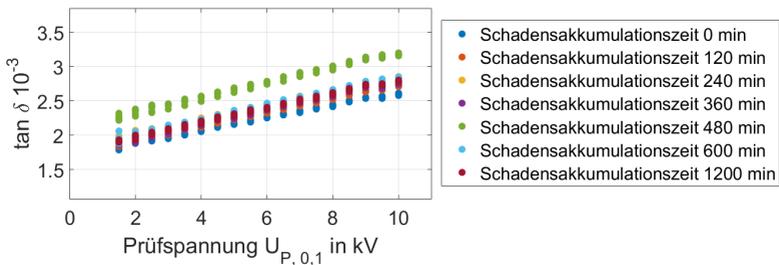


Abbildung 4.20: Alterungstyp 03 – Einsatzspannung U_e nach dem Invers-Power-Gesetz

4.4.4 Alterungstyp 04

Muffen des Alterungstyps 04 folgen hinsichtlich der Teilentladungseinsetzspannung U_e und des Verlustfaktors $\tan \delta$ keinem einheitlichen Trend. Eine nachträgliche Öffnung der Muffen ergab unter anderem, das am Übergang zwischen Kabelmantel (1) und Außenschlauch (13) (Bezeichnungen aus Abbildung 2.2 Seite 29) Feuchtigkeit und damit Ladungsträger eingedrungen waren. Diese bewirken insofern ein Wechselspiel aus Feuchtigkeit, Teilentladungen und Verlustfaktor, als hohe Feuchtigkeit einen hohen Verlustfaktor sowie hohe Einsetzspannung und vice bewirkt. Die Teilentladungen sind instabil.

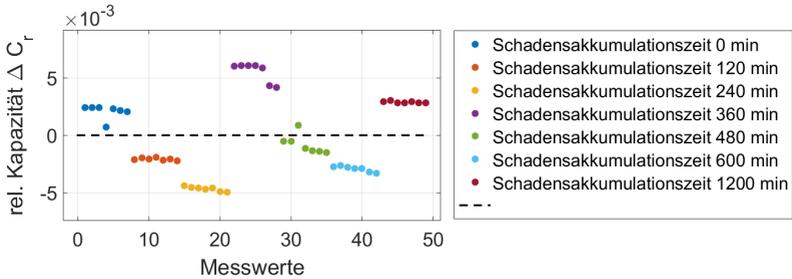
(a) Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_s (b) Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{P,0,1}$ Abbildung 4.21: Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$

Die Leiter-Erde-Spannung $U_0 = 6 \text{ kV}$ mit der Standardabweichung $s = 80 \text{ V}$ sowie die Beanspruchung mit der Prüfspannung $U_{P,50} = 1,7 \cdot U_0$ visualisiert Abbildung 4.21a. Zudem ist die Teilentladungseinsetzspannung U_e mit der jeweiligen Standardabweichung s eingezeichnet. Zu sehen ist, dass die

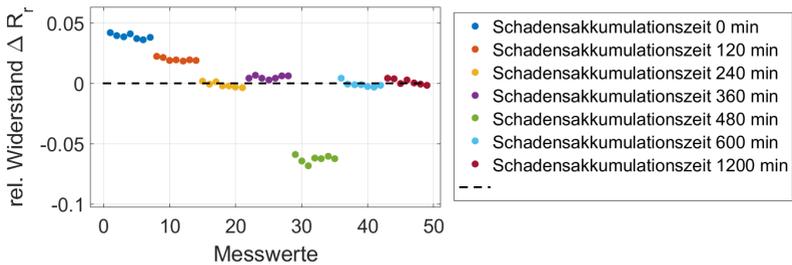
4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen

Teilentladungseinsetzspannung U_e ansteigt und im Weiteren wieder abfällt. Die Standardabweichung s der Teilentladungseinsetzspannung U_e verringert sich mit zunehmender Alterung.

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ (Abbildung 4.21b) steigt zunächst an und fällt dann wieder ab. Die relative Widerstandsabweichung ΔR_r (Abbildung 4.22b) folgt ebenfalls diesem Verlauf.



(a) relative Kapazitätsabweichung ΔC_r – Schiefe $\nu_C = 0,278$



(b) relative Widerstandsabweichung ΔR_r – Schiefe $\nu_R = -1,056$

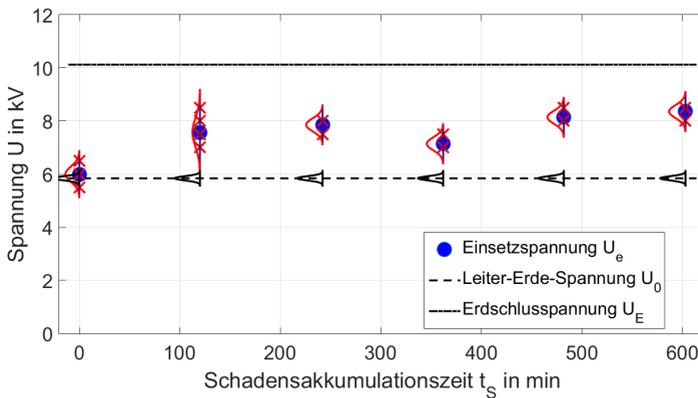
Abbildung 4.22: Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0 \text{ kV}$

Aus Abbildung 4.22a geht hervor, dass während der gesamten Beanspruchung mit der Prüfspannung $U_{P,0,1}$ die relative Kapazitätsabweichung ΔC_r konstant bleibt.

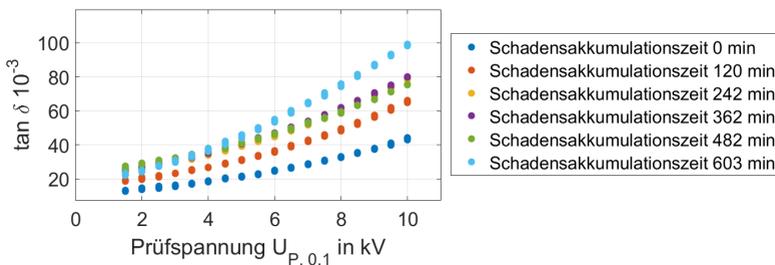
4.4.5 Alterungstyp 05

Charakteristisch für Muffen des Alterungstyps 05 ist zum einen, dass sich die Teilentladungseinsetzspannung U_e (Abbildung 4.23a) nicht einheitlich verhält, und zum anderen, dass die Prüfspannung $U_{P,50} = 1,7 \cdot U_0$ den Verlustfaktor $\tan \delta$ (Abbildung 4.23b) beeinflusst. Anscheinend bewirkt die niedrige Energie der Teilentladungen eine Veränderung der Muffengeometrie. Die relative Kapazitätsabweichung ΔC_r (Abbildung 4.24a) steigt und die relative Widerstandsabweichung ΔR_r (Abbildung 4.24b) fällt. Die Teilentladungen sind instabil.

Von den in einer Muffe verbauten Materialien ist nur das Füllband in der Lage, sich unter geringer Energiewirkung zu verändern. Die nachträgliche Öffnung ermittelte eine farbliche Veränderung und eine Veränderung der Viskosität des Füllbands.



(a) Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_s



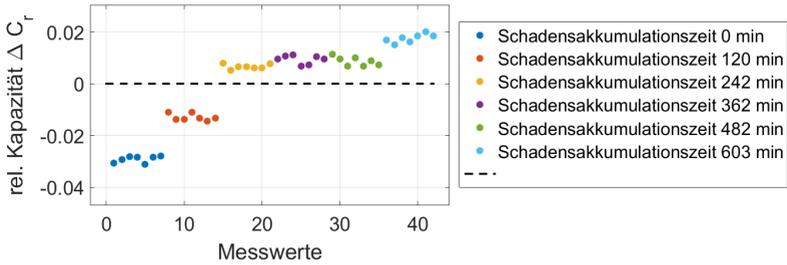
(b) Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{P,0,1}$

Abbildung 4.23: Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$

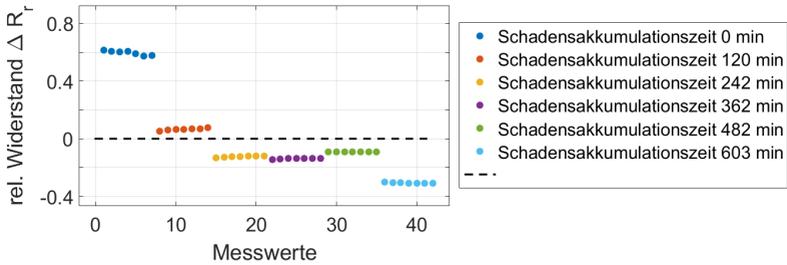
Die Inhalte der Abbildungen 4.23a bis 4.24b folgen dem einheitlichen Vorgehen wie z. B. im Abschnitt

4 Schadensakkumulation an teilentladungsbehafteten Muffen

4.4.4.



(a) relative Kapazitätsabweichung ΔC_r – Schiefe $\nu_C = -0,799$



(b) relative Widerstandsabweichung ΔR_r – Schiefe $\nu_R = 1,245$

Abbildung 4.24: Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0 \text{ kV}$

Schlussfolgerung: Die Auswertung der Schadensakkumulationstests hat fünf Alterungstypen mit charakteristischen Eigenschaften hervorgebracht. Zwecks Ermittlung der Anzahl von Alterungstypen und Zuordnung von Muffen zu den Alterungstypen ist die Clusterung auf Basis der Schiefen optimal. Die Schiefen sind aus den Parametern relative Abweichung der Einsetzspannung ΔU_r , relative Abweichung des Verlustfaktors $\Delta \tan \delta_r$, relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r zu ermitteln.

Grundsätzlich gilt für die Alterungstypen 02 und 03, dass nach dem Absinken der Einsetzspannung U_e unter die Leiter-Erde-Spannung U_0 ein Ausfall nicht mehr zu verhindern ist und eine Auswechslung erfolgen sollte.

5 Anwendung des Vorgehensschemas

5.1 Vor-Ort-Messung

Die in den Kapiteln 3 und 4 hergeleiteten Algorithmen wurden anhand einer Vor-Ort-Messung verifiziert. Das Kabel verläuft von der Netzstation 5345 zur Netzstation 5349 und besteht aus zwei Kabelabschnitten mit einer verbindenden Muffengruppe (Abbildung 5.1). Bei der Messung sind insofern die Muffen der Leiter L1 und L3 aufgefallen, als sie Teilentladungen mit einer Einsetzspannung U_e in Höhe von 7,7 kV (Muffe L1) und 6,1 kV (Muffe L3) aufwiesen. Zur weiteren Identifizierung wurde die Muffe L1 mit M_17 und die Muffe L3 als M_18 bezeichnet.

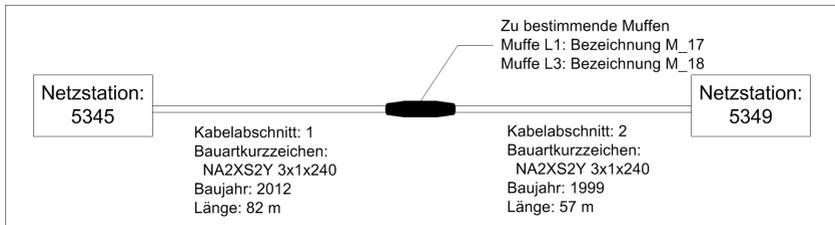


Abbildung 5.1: Verifizierung vor Ort

Für die Nachuntersuchung (Abschnitt 5.4) wurden die Muffen geborgen und der weiteren Untersuchung zugeführt.

5.2 Regelbasierende Bestimmung

Die regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation erfolgt nach dem Algorithmus aus Unterkapitel 3.1. Von beiden Kabelabschnitten sind die Kabelbauart (VPE-VPE) und das Baujahr (2012/1999) bekannt. Insofern kann die Bestimmung nach Abbildung 3.6 Fall 2 (Seite 67) erfolgen. Nach dem Vergleich mit der Tabelle A.1 (Seite 135) konnte die Garniturspezifikation "VPE-VPE 3" mit hundertprozentiger Sicherheit bestimmt werden.

5.3 Bestimmung durch Referenzvergleich

Gemäß dem Test nach Abbildung 3.8 (Seite 71) wurden die Teilentladungen bei Durchfahren der Spannungsrampe aufgezeichnet. Abbildung 5.2 für die Muffe M_17 und Abbildung 5.3 für die Muffe M_18 veranschaulichen die jeweiligen Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramme für die gemessenen Prüfspannungen U_p .

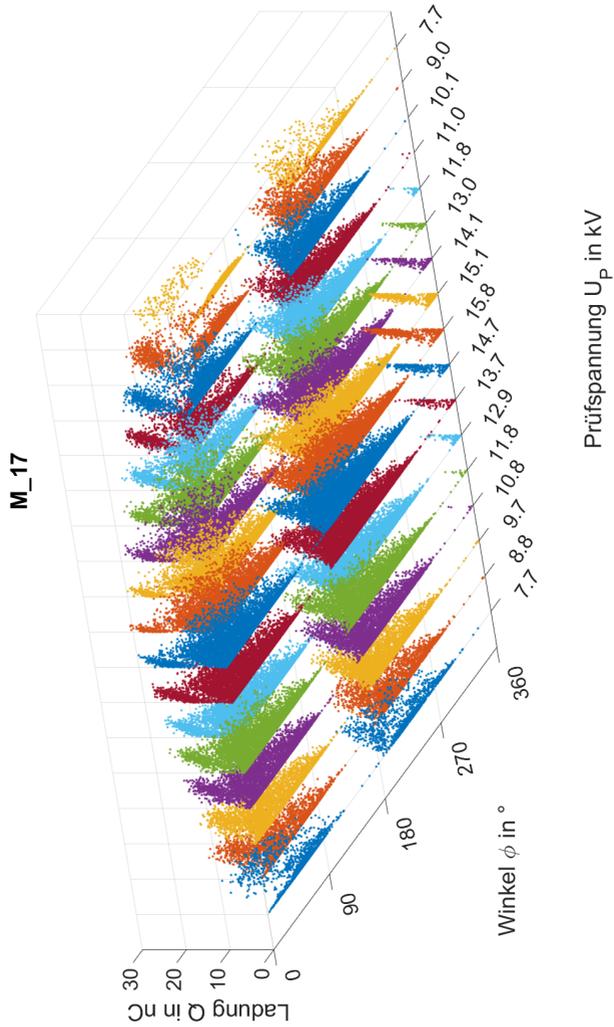


Abbildung 5.2: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm für alle Prüfspannungen U_P gemessen an der Muffe M_17

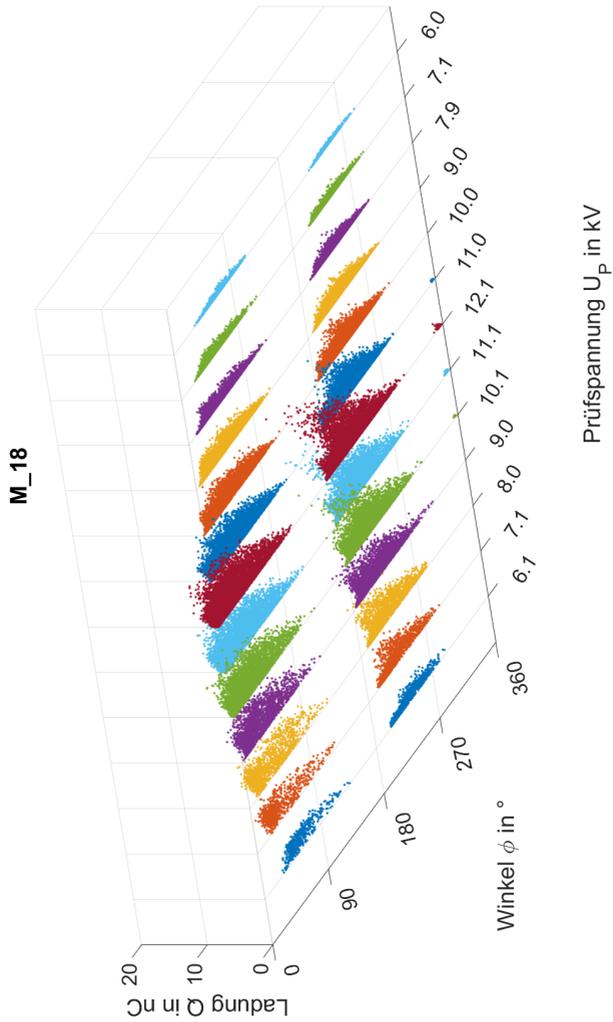


Abbildung 5.3: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm für alle Prüfspannungen U_P gemessen an der Muffe M_18

5 Anwendung des Vorgehensschemas

Jede Messreihe der Muffen M_17 und M_18 betreffend wurden die optimalen Vergleichsparameter nach Tabelle 3.5 (Seite 95) be- und in eine Grauwertmatrix zur Texturerkennung umgerechnet. Die Grauwertmatrizen W für die Muffen M_17 und M_18 zeigen die Gleichungen 5.1 und 5.2.

$$W_{M_{17}} = \begin{bmatrix} 14 & 11 & 18 & 6 & 14 & 2 & 3 & 5 \\ 15 & 1 & 6 & 3 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 21 & 5 & 2 & 4 & 1 & 1 & 3 & 1 \\ 5 & 6 & 3 & 1 & 2 & 2 & 1 & 3 \\ 5 & 1 & 8 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 \\ 4 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 4 & 1 & 0 & 2 & 4 & 2 & 5 & 8 \\ 5 & 1 & 0 & 2 & 1 & 2 & 8 & 6 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$W_{M_{18}} = \begin{bmatrix} 27 & 10 & 6 & 8 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 7 & 11 & 8 & 4 & 3 & 3 & 2 & 3 \\ 12 & 1 & 3 & 3 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 4 & 8 & 4 & 6 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 4 & 6 & 1 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

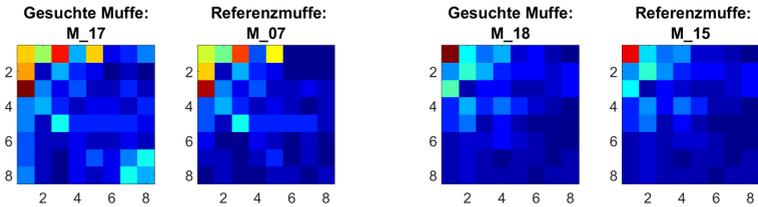
Mit dem Nächster-Nachbar-Klassifikator, dem optimalen maschinellen Lernverfahren, wurde auf Basis des Softwarepakets [43] die jeweilige Referenzmuffe ermittelt.

Für die Muffe M_17 wurde die Referenzmuffe M_07 berechnet. Die Referenzmuffe für die Muffe M_18 ist M_15.

Der Nächster-Nachbar-Klassifikator gibt über das vorgenannte Ergebnis hinaus noch eine Distanz als Maß für die Güte der Klassifizierung an. Die Distanz der Muffe M_17 zur Referenzmuffe M_07 beträgt 16,882. Die Distanz zwischen den Muffen M_18 und M_15 beläuft sich auf 4,786. Die Referenz ist zur Muffe M_18 besser. Die Gleichungen 5.3 und 5.4 zeigen die Grauwertmatrizen W der Referenzmuffen. Die Darstellung der eingefärbten Grauwertmatrizen erfolgt in Abbildung 5.4. Der optische Vergleich der Muffen M_17 und M_07 in Abbildung 5.4a lässt einen größeren Farbunterschied als in Abbildung 5.4b für die Muffen M_18 und M_15 erkennen, welches der visuelle Ausdruck der zuvor genannten Distanz ist.

$$W_{M_{07}} = \begin{bmatrix} 12 & 10 & 17 & 4 & 13 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 1 & 6 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & 5 & 2 & 4 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 4 & 6 & 3 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 4 & 1 & 8 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$W_{M_{15}} = \begin{pmatrix} 24 & 9 & 6 & 7 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 7 & 11 & 7 & 4 & 3 & 3 & 2 & 3 \\ 10 & 1 & 3 & 2 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 4 & 7 & 3 & 6 & 4 & 1 & 1 & 0 \\ 4 & 6 & 1 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$



(a) Muffe M_17 mit Referenzmuffe M_07

(b) Muffe M_18 mit Referenzmuffe M_15

Abbildung 5.4: Verifizierung gesuchter Muffen

Ebenfalls zum optischen Vergleich dienen die Abbildungen 5.5 bis 5.8, um anhand eines Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramms Ähnlichkeiten für jede Muffe und eine Messreihe zu bestimmen. Die Höhe der Prüfspannung $U_{P,50}$ betrug 10 kV. Die Beanspruchungsdauer lag bei 10 s. Die Muffen M_17 und M_07 sowie M_18 und M_15 sind sich jeweils ähnlich.

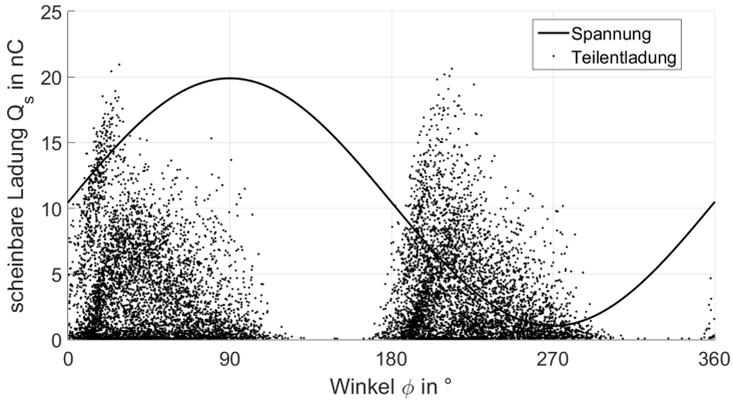


Abbildung 5.5: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_17 für die Messreihe 5

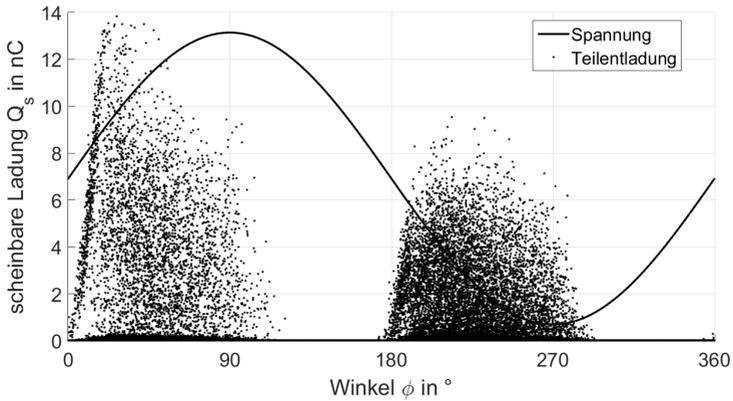


Abbildung 5.6: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_07 für die Messreihe 5

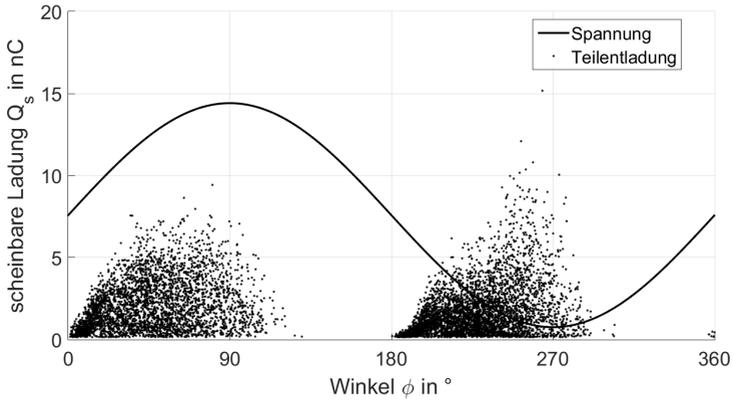


Abbildung 5.7: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_18 für die Messreihe 5

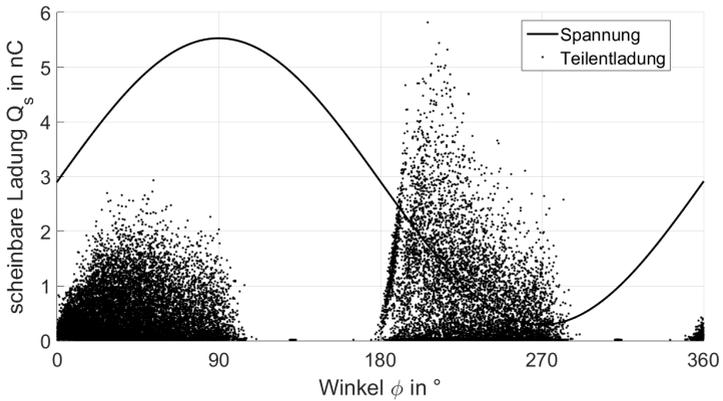


Abbildung 5.8: Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_15 für die Messreihe 5

5.4 Nachuntersuchung

Folgende Merkmale der Referenzmuffen sind in der Referenzmuffendatenbank vermerkt:

M_07:

- Fehler: Isolierkörper unzureichend geschrumpft, Teilentladungsstelle hat keine Verbindung zur Erde oder zum Leiter, Einsetzspannung U_e geringfügig größer als die Aussetzspannung U_a , daraus folgt eine kleine Hohlstelle.
- Alterungstyp 03.
- Alterungsfaktor $\approx 5 - 7$.

M_15:

- Fehler: Mastikband mit Hohlraum montiert, Teilentladungsstelle hat keine Verbindung zur Erde oder zum Leiter, Einsetzspannung U_e und Aussetzspannung U_a sind nahezu gleich groß, daraus folgt eine kleinere Hohlstelle.
- Alterungstyp 05, mit fortschreitender Alterung Wechsel zum Alterungstyp 02.
- Alterungsfaktor ≈ 10 .



(a) Muffe M_17: Isolierkörper



(b) Muffe M_18: Isolierkörper



(c) Muffe M_18: Verbinder

Abbildung 5.9: Nachuntersuchung der Muffen

Die Nachuntersuchung der Muffen M_17 und M_18 ergab Folgendes:

M_17:

- Garniturspezifikation: VPE-VPE 3.
- Fehler: Isolierkörper unzureichend geschrumpft (Abbildung 5.9a).
- Einsetzspannung U_e und Aussetzspannung U_a sind nahezu gleich groß (Legende in Abbildung 5.2).
- Hohlraum vorgefunden.

M_18:

- Garniturspezifikation: VPE-VPE 3.
- Fehler: Mastikband unzureichend montiert.
- Teilentladungsspuren am Übergang vom Verbinder zur Isolierung.
- Einsetzspannung U_e und Aussetzspannung U_a sind nahezu gleich groß (Legende in Abbildung 5.3).

Die Nachuntersuchung der Muffen M_17 und M_18 ergab, dass die bestimmten Referenzmuffen M_07 bzw. M_15 in den wesentlichen Eigenschaften Garniturspezifikation, Fehler, Einsetzspannung U_e im Größenverhältnis zur Aussetzspannung U_a hinreichend genau übereinstimmen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Schwerpunkt dieser Arbeit bildeten Untersuchungen zur Bestimmung der Charakteristik teilentladungs-behafteter Mittelspannungskabelmuffen auf Basis diagnostischer Messwerte und Betriebsmitteldaten. Zu diesem Zweck und mit Blick auf die spätere Anwendbarkeit wurde ein Vorgehensschema entwickelt und in den einzelnen Teilen der Arbeit methodisch untersetzt.

Zusammenfassung: Im ersten Teil der Arbeit wird auf die konstruktiven Bestandteile einer Muffe eingegangen und diagnostische Verfahren erläutert.

Es wird besonders auf die Teilentladungsdiagnostik eingegangen, um Grenzen aufzuzeigen, da in einer teilentladungsbehafteten Mittelspannungskabelmuffe von multiplen Teilentladungsstellen ausgegangen werden muss.

Darlegungen zur Texturerkennung und Grauwertmatrix sowie zu maschinellen Lernverfahren folgen. Die maschinellen Lernverfahren werden in Verfahren der Klassifizierung und des Clusterings sowie der Bewertung von Klassifikationen differenziert. Die Beschreibung der Kabelsystemalterung schließt sich an. Der erste Teil wird mit betriebswirtschaftlichen Überlegungen abgeschlossen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die Schritte des Vorgehensschemas "Regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation" und "Bestimmung der Garniturspezifikation durch Referenzvergleich" untersucht. Die regelbasierende Bestimmung der Garniturspezifikation erfolgt mithilfe statistischer Verfahren der deskriptiven und induktiven Statistik. Als Datenquellen dienen die bei einem Netzbetreiber typischen Datensysteme, wie das kaufmännische System und das grafische Informationssystem. Ergebnis dieser Untersuchung ist die Bestimmung einer Muffenspezifikation und deren Wahrscheinlichkeit. Die Bestimmung der Garniturspezifikation über den Referenzvergleich ist der zweite untersuchte Schritt des Vorgehensschemas. Hierzu wird zunächst ein Spannungstest entworfen, nachdem alle teilentladungsbehafteten Muffen gemessen wurden. Dieser Spannungstest sieht eine steigende Rampe bis zum Wert der Einsetzspannung plus Leiter-Erde-Spannung und eine fallende Rampe bis zur Aussetzspannung vor. Während des Tests werden alle Teilentladungen mit Pegel, Spannung und Phasenwinkel aufgezeichnet und daraus je Spannung ein Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm abgeleitet und mithilfe von 33 Vergleichsparametern der deskriptiven Statistik beschrieben. Anschließend werden auf Basis der Klassifikationsverfahren die optimalen Vergleichsparameter bestimmt. Sie basieren ausschließlich auf Parametern, die Teilentladungen beschreiben, und auf Parametern der Spannung. Insgesamt sind 15 Vergleichsparameter optimal. Zudem wird das optimale Klassifikationsverfahren bestimmt. Als hinreichend genau stellen sich dabei der Bayes-Klassifikator und der Nächster-Nachbar-Klassifikator heraus. Die Ausführungszeit der Klassifizierung ist beim Nächster-Nachbar-Klassifikator wesentlich kürzer, sodass dieser das für den hier besprochenen Fall optimale Klassifikationsverfahren darstellt.

Im dritten Teil und untersuchten Schritt des Vorgehensschemas "Erweiterung der Referenzmuffendatenbank durch Nachuntersuchung und Schadensakkumulationstest" wird im Kern ein Schadensakkumulationstest entwickelt und durchgeführt. Für den Schadensakkumulationstest wird zunächst eine Simulation entwickelt und mit einer Teilentladungs-Online-Messung verifiziert. Überdies wird ein Vortest entwickelt und an einer Muffe durchgeführt. Der Vortest besteht aus einem Wechsel von Teilentladungsmessungen mit einer Spannungsrampe und Schadensakkumulationen. Die Schadensakkumulationen erfolgen mit der achtfachen Leiter-Erde-Spannung und unterschiedlichen Zeiten. Im Ergebnis akkumuliert der Vortest Schaden, wenngleich ein thermischer Einfluss existiert, der nicht quantifiziert werden kann. Nach den Ergebnissen der Vortests wird ein Schadensakkumulationstest

erstellt, der aus Messungen der Teilentladungen und des Verlustfaktors während des Durchlaufens einer Spannungsrampe mit einer Frequenz von 0,1 Hz besteht und Schadensakkumulation in Form einer Spannungsbeanspruchung in Höhe der Nennspannung und einer Frequenz von 50 Hz realisiert. Die Messergebnisse werden über ein Clusterverfahren in fünf Alterungstypen eingeteilt. An Muffen des Alterungstyps 01 finden während der Spannungsbeanspruchung keine Schadenakkumulationen statt. Diese Muffen sind richtig montiert oder mögliche Teilentladungen liegen unter dem Störpegel. Muffen der Alterungstypen 02 und 03 akkumulieren Schaden. Diese weisen unterschiedliche Fehler auf und altern mit divergierendem Faktor. Alle Muffen der Alterungstypen 01 bis 03 haben die Gemeinsamkeit, dass sich der Verlustfaktor nicht ändert und somit von stabilen und reproduzierbaren Teilentladungen ausgegangen werden kann. Bei den Muffen der Alterungstypen 04 und 05 ändert sich der Verlustfaktor. Demnach sind die Teilentladungen instabil, da sich mit der Änderung des Verlustfaktors der Widerstand und eventuell die Kapazität ändern.

Der vierte Teil der Arbeit wendet das Vorgehensschema mit den ermittelten Parametern und Methoden auf ein reales Kabel mit zwei teilentladungsbehafteten Muffen an. Dabei kann nachgewiesen werden, dass mit den ermittelten Parametern und Methoden die richtige Garniturspezifikation sowie die richtige Referenzmuffe identifiziert werden.

Im Rahmen vorliegender Arbeit werden 32 Muffen aus drei Garniturspezifikationen analysiert. Alle Werte der 32 Muffen werden zur Ermittlung der Parameter und des maschinellen Lernverfahrens nach Abschnitt 3.2 verwendet. Der Schadensakkumulationstest nach Kapitel 4 wird an acht Muffen aus zwei Garniturspezifikationen durchgeführt.

Ausblick: Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Garniturspezifikationen mit typischen Fehlern exemplarisch untersucht. Die Ausweitung der Untersuchungen auf weitere Garniturspezifikationen kann eine der nächsten Aufgaben sein.

Im Weiteren sollte auf Basis dieser Erkenntnisse ein Feldtest entwickelt werden, um in einer Vor-Ort-Messung den Alterungsfaktor bestimmen zu können.

Auch der Nächster-Nachbar-Klassifikator kann auf diesen speziellen Fall hin optimiert werden.

Zuletzt kann auch eine algorithmische Bestimmung der Zeit, zwischen dem Absinken der Einsatzspannung unter die Leiter-Erde-Spannung in Abhängigkeit von der Garniturspezifikation und in Abhängigkeit von den Fehlern, die zu Teilentladungen führen, erfolgen.

Anhang

A Datentabellen

Spezifikation	VPE- PE 1	VPE- VPE 1	VPE- PE 2	VPE- VPE 2	VPE- PE 3	VPE- VPE 3	Summe
1999	0,037	0,073	0,000	0,000	0,000	0,000	0,110
2000	0,053	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,120
2001	0,082	0,045	0,000	0,000	0,000	0,000	0,127
2002	0,043	0,064	0,000	0,000	0,000	0,000	0,106
2003	0,035	0,048	0,000	0,000	0,000	0,000	0,084
2004	0,015	0,027	0,009	0,009	0,000	0,000	0,060
2005	0,000	0,000	0,022	0,060	0,000	0,000	0,083
2006	0,000	0,000	0,008	0,027	0,000	0,000	0,035
2007	0,000	0,000	0,003	0,005	0,000	0,000	0,008
2008	0,000	0,000	0,014	0,027	0,000	0,000	0,041
2009	0,000	0,000	0,026	0,016	0,000	0,000	0,042
2010	0,000	0,000	0,021	0,029	0,000	0,000	0,050
2011	0,000	0,000	0,009	0,005	0,036	0,037	0,086
2012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,018	0,025
2013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,017	0,025
Summe	0,265	0,324	0,111	0,178	0,049	0,072	1,000

Tabelle A.1: Relative Häufigkeit der Muffen je Spezifikation und Jahr

Muffe	Alterungstyp	ν_U	Cluster U_e	ν_C	Cluster C	ν_R	Cluster R	$\nu_{\tan\delta}$	Cluster $\tan\delta$
Muffe 31	3	-1,321	3	0,278	3	-1,056	2	1,075	3
Muffe 33	3	-0,872	3	0,031	3	-1,057	2	1,188	3
Muffe 35	1	0,000	2	0,063	3	-1,038	2	-0,229	2
Muffe A	1	0,000	2	0,061	3	-1,021	2	-0,212	2
Muffe B	4	1,013	1	0,362	3	-1,484	2	1,383	3
Muffe C	5	-0,922	3	-1,155	1	1,530	3	-0,679	1
Muffe C1	5	-0,914	3	-0,799	2	1,245	3	-0,394	2
Muffe C2	2	0,217	2	0,596	3	-0,075	1	-0,193	2

Tabelle A.2: Clustering der Alterungstypen

B Herleitung Schadensakkumulation

Gleichungen B.1 bis B.4 nach [12] bzw. [54]

$$A(E) = k_e \cdot E^n; E = S \quad (\text{B.1})$$

$$C(d) = A(S) \cdot t \quad (\text{B.2})$$

$$L(S) = t = \frac{C(d)}{A(S)} \quad (\text{B.3})$$

$$L(S) = t = \frac{1}{k_e \cdot E^n} = \frac{1}{k_e} \cdot E^{-n}; \frac{1}{k_e} = k_{IPG} \quad (\text{B.4})$$

$$k_{IPG} = E^n \cdot t = \text{konst} \quad (\text{B.5})$$

$$y = a \cdot x^b + c \quad (\text{B.6})$$

$$U_e = k_1 \cdot t^m + U_{e(t=0)} \quad (\text{B.7})$$

$$-k_1 \cdot t^m = U_{e(t=0)} - U_e \quad (\text{B.8})$$

$$t = \sqrt[m]{\frac{U_{e(t=0)} - U_e}{-k_1}}; E = \frac{U}{l} \quad (\text{B.9})$$

$$t = \sqrt[m]{\frac{(E_{e(t=0)} - E_e) \cdot l}{-k_1}} = \sqrt[m]{\frac{E_{e(t=0)} - E_e}{-\frac{k_1}{l}}} \quad (\text{B.10})$$

$$t = \frac{(E_{e(t=0)} - E_e)^{\frac{1}{m}}}{\left(-\frac{k_1}{l}\right)^{\frac{1}{m}}}; \left(-\frac{k_1}{l}\right)^{\frac{1}{m}} = k_e \quad (\text{B.11})$$

$$-n = \frac{1}{m} \quad (\text{B.12})$$

$$t = \frac{(E_{e(t=0)} - E_e)^{-n}}{k_e}; \frac{1}{k_e} = k_{IPG} \quad (\text{B.13})$$

$$k_{IPG} = (E_{e(t=0)} - E_e)^n \cdot t = \text{konst} \quad (\text{B.14})$$

C Datenmodell Garniturspezifikationen

Zur Beschreibung des Datenmodells wird die Beschreibungssprache Unified Modeling Language (vereinheitlichte Modellierungssprache – UML) genutzt.

Anlage C.1 stellt die Anwendungsfälle (Akteure und Anforderungen) dar. Als Akteure wurden der Diagnoseingenieur und der Messtechniker identifiziert. Diesen sind die verschiedenen Anwendungsfälle, d. h. die Anforderungen an das System, zugeordnet.

Das Datenmodell ist in der Anlage C.2 und C.3 in Form von Klassendiagrammen mit den Elementen Klassen und Beziehungen spezifiziert.

C.1 Anwendungsfälle

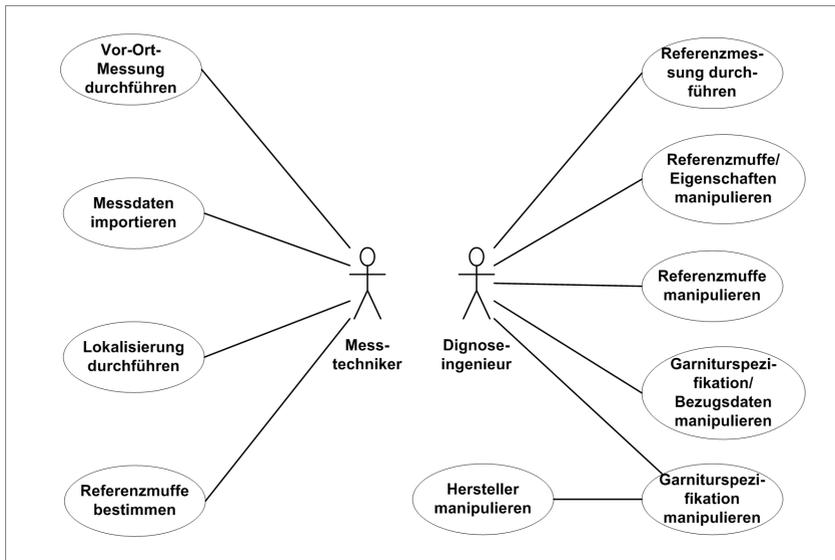


Abbildung C.1: Anwendungsfalldiagramm

C.2 Garniturspezifikation

C.2.1 Grundmodell

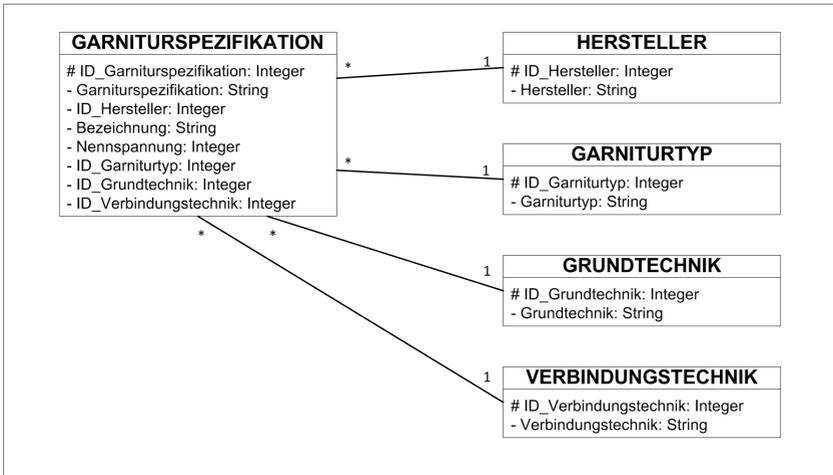


Abbildung C.2: Garniturspezifikation Grundmodell

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Garniturspezifikation	ganze Zahl	ja	–
Garniturspezifikation	Text	nein	neutraler Bezeichner
ID_Hersteller	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle HERSTELLER
Bezeichnung	Text	ja	Hersteller- Bezeichnung
Nennspannung	ganze Zahl	ja	–
ID_Garniturstyp	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GARNITURTYP
ID_Grundtechnik	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GRUNDTECHNIK
ID_Verbindungstechnik	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle VERBINDUNGSTECHNIK

Tabelle C. 1: Klasse GARNITURSPEZIFIKATION

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Hersteller	ganze Zahl	ja	–
Hersteller	Text	ja	Bezeichner

Tabelle C.2: Klasse HERSTELLER

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Garniturtyp	ganze Zahl	ja	–
Garniturtyp	Text	ja	Bezeichner ¹

Tabelle C.3: Klasse GARNITURTYP

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
id_Grundtechnik	ganze Zahl	ja	–
str_Grundtechnik	Text	ja	Bezeichner ²

Tabelle C.4: Klasse GRUNDTECHNIK

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Verbindungstechnik	ganze Zahl	ja	–
Verbindungstechnik	Text	ja	Bezeichner ³

Tabelle C.5: Klasse VERBINDUNGSTECHNIK

¹Werte: Endverschluss, Verbindungsmuffe, Übergangsmuffe, Endmuffe.

²Werte: Wickeltechnik, Vergusstechnik (warm, kalt), Schrumpftechnik (warm, kalt), Aufschiebetechnik.

³Werte: Pressen, Schrauben, Löten, Schweißen.

C.2.2 Anschlüsse

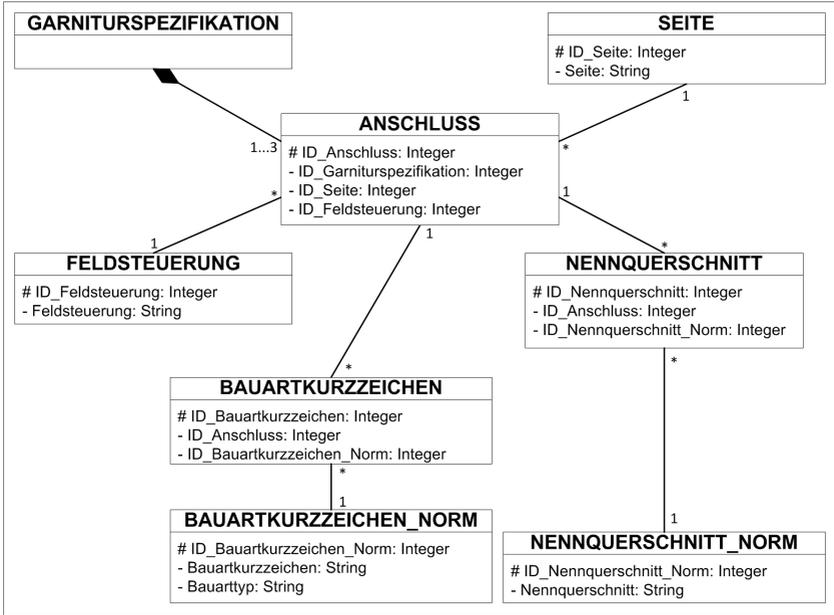


Abbildung C.3: Garniturspezifikation Anschlüsse

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Anschluss	ganze Zahl	ja	-
ID_Garniturspezifikation	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GARNITURSPECIFIKATION
ID_Seite	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle SEITE
ID_Feldsteuerung	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle FELDSTEUERUNG

Tabelle C.6: Klasse ANSCHLUSS

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Feldsteuerung	ganze Zahl	ja	–
Feldsteuerung	Text	ja	Bezeichner ⁴

Tabelle C.7: Klasse FELDSTEUERUNG

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Seite	ganze Zahl	ja	–
Seite	Text	ja	Bezeichner ⁵

Tabelle C.8: Klasse SEITE

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Bauartkurzzeichen_Norm	ganze Zahl	ja	–
Bauartkurzzeichen_Norm	Text	ja	Bezeichner
BauartTyp	Text	ja	Bezeichner ⁶

Tabelle C.9: Klasse BAUARTKURZZEICHEN_NORM

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Bauartkurzzeichen	ganze Zahl	ja	–
ID_Anschluss	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle ANSCHLUSS
ID_Bauartkurzzeichen_Norm	ganze Zahl	ja	Verweis zur BAUARTKURZZEICHEN_NORM

Tabelle C.10: Klasse BAUARTKURZZEICHEN

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Nennquerschnitt_Norm	ganze Zahl	ja	–
Nennquerschnitt_Norm	Text	ja	Bezeichner ⁷

Tabelle C.11: Klasse NENNQUERSCHNITT_NORM

⁴Werte: geometrisch, kapazitiv, refraktiv, resistiv, nicht linear.

⁵Werte: Seite A (Endverschlüsse, Endmuffen), Seite B (Verbindungs-Übergangsmuffen), Seite C (Abzweigmuffen)

⁶Werte: MASSE, PE, VPE, Öl.

⁷ $3 \times 1 \times 240 \text{ mm}^2$.

C Datenmodell Garniturspezifikationen

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Nennquerschnitt	ganze Zahl	ja	–
ID_Anschluss	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle ANSCHLUSS
ID_Nennquerschnitt_Norm	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle NENNQUERSCHNITT _NORM

Tabelle C.12: Klasse NENNQUERSCHNITT

C.2.3 Bezug

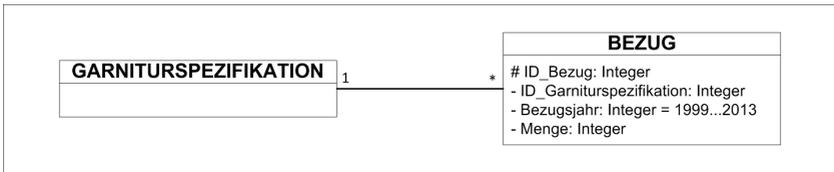


Abbildung C.4: Garniturspezifikation Bezug

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Bezug	ganze Zahl	ja	-
ID_Garniturspezifikation	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GARNITURSPEZIFIKATION
Bezugsjahr	ganze Zahl	ja	1999 ... 2013
Menge	ganze Zahl	ja	

Tabelle C.13: Klasse BEZUG

C.3 Garnitur

C.3.1 Status, Alterungstyp, Eigenschaften

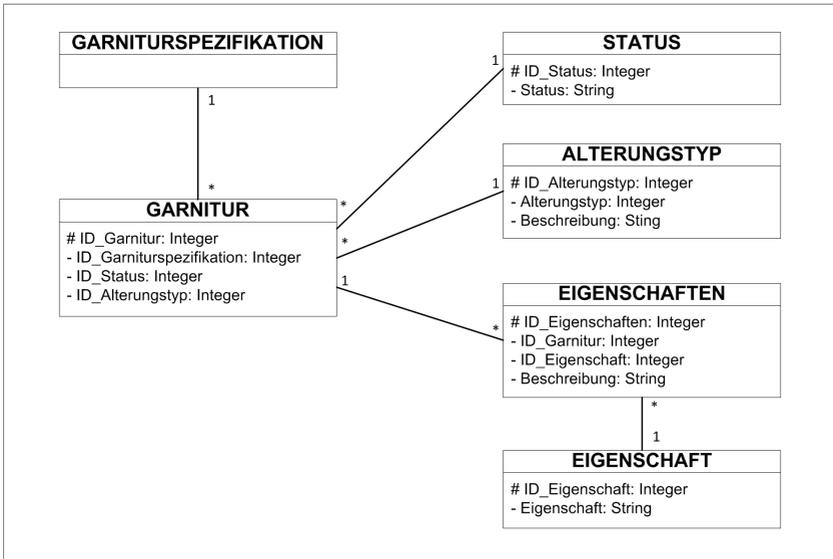


Abbildung C.5: Garnitur – Status, Alterungstyp, Eigenschaften

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Garnitur	ganze Zahl	ja	–
ID_Garniturspezifikation	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GARNITURSPEZIFIKATION
ID_Status	Text	ja	Verweis zur Tabelle STATUS
ID_Alterungstyp	Text	ja	Verweis zur Tabelle ALTERUNGSTYP

Tabelle C.14: Klasse GARNITUR

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Status	ganze Zahl	ja	–
Status	Text	ja	Wert ⁸

Tabelle C.15: Klasse STATUS

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Alterungstyp	ganze Zahl	ja	–
Alterungstyp	ganze Zahl	ja	Bezeichner ⁹
Beschreibung	Text	nein	

Tabelle C.16: Klasse ALTERUNGSTYP

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Eigenschaft	ganze Zahl	ja	–
Eigenschaft	Text	ja	Bezeichner ¹⁰

Tabelle C.17: Klasse EIGENSCHAFT

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Eigenschaften	ganze Zahl	ja	–
UD_Garnitur	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GARNITUR
id_Eigenschaft	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle EIGENSCHAFT

Tabelle C.18: Klasse EIGENSCHAFTEN

⁸Werte: Garnitur in Betrieb, Garnitur außer Betrieb, Referenz.

⁹Werte: 00 – nicht bewertet, Alterungstypen 01 bis 05.

¹⁰Liste wie: Teilentladungsart, gefundene Fehler, evt. Monteur, evt. Montagefirma etc.

C.3.2 Vergleichsparameter

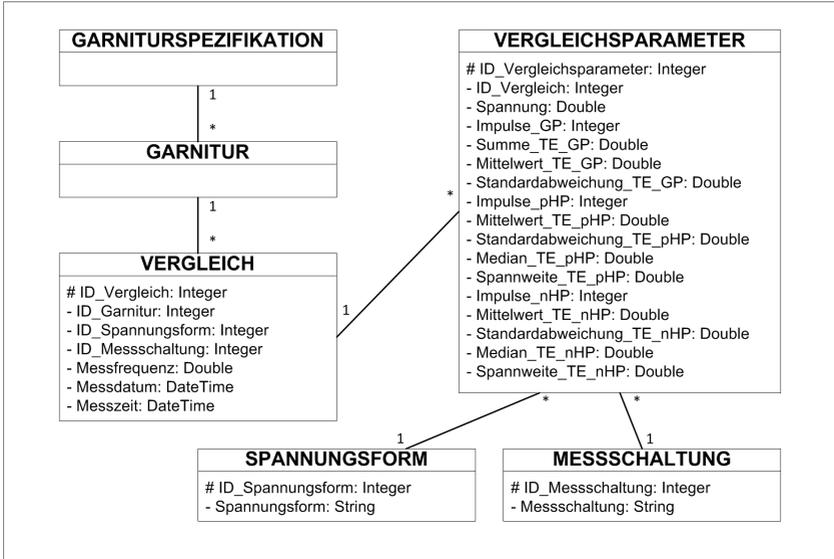


Abbildung C.6: Garnitur Vergleichsparameter

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Vergleich	ganze Zahl	ja	-
ID_Garnitur	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle GARNITUR
ID_Spannungsform	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle SPANNUNGSFORM
ID_Messschaltung	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle MESSSCHALTUNG
Messfrequenz	Gleitkommazahl	ja	Messfrequenz in Hz
Messdatum	Datum	ja	Tag der Messung
Messzeit	Zeit	ja	Uhrzeit der Messung (Ende)

Tabelle C.19: Klasse VERGLEICH

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Vergleichsparameter	ganze Zahl	ja	–
ID_Vergleich	ganze Zahl	ja	Verweis zur Tabelle VERGLEICH
Spannung	Gleitkommazahl	ja	Spannung in kV
Impulse_GP ¹¹	ganze Zahl	ja	Impulse in kPDs/s
Summe_TE_GP	ganze Zahl	ja	Ladungssumme in pC/s
Mittelwert_TE_GP	Gleitkommazahl	ja	mitt. Ladung in pC
Standardabweichung_TE_GP	Gleitkommazahl	ja	Std.-abweichung der Ladung in pC
Impulse_pHP	ganze Zahl	ja	Impulse in kPDs/s
Mittelwert_TE_pHP	Gleitkommazahl	ja	mitt. Ladung in pC
Standardabweichung_TE_pHP	Gleitkommazahl	ja	Std.-abweichung der Ladung in pC
Median_pHP	Gleitkommazahl	ja	Median in pC
Spannweite_pHP	Gleitkommazahl	ja	Spannweite in pC
Impulse_nHP	ganze Zahl	ja	Impulse in kPDs/s
Mittelwert_TE_nHP	Gleitkommazahl	ja	mitt. Ladung in pC
Standardabweichung_TE_nHP	Gleitkommazahl	ja	Std.-abweichung der Ladung in pC
Median_nHP	Gleitkommazahl	ja	Median in pC
Spannweite_nHP	Gleitkommazahl	ja	Spannweite in pC

Tabelle C.20: Klasse VERGLEICHSPARAMETER

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Spannungsform	ganze Zahl	ja	–
Spannungsform	Text	ja	Bezeichner ¹²

Tabelle C.21: Klasse SPANNUNGSFORM

Attribut	Typ	Erforderlich	Beschreibung
ID_Messschaltung	ganze Zahl	ja	–
Messschaltung	Text	ja	Bezeichner ¹³

Tabelle C.22: Klasse MESSSCHALTUNG

¹¹ TE - Teilentladung, GP - Gesamtperiode, pHP - positive Halbperiode, nHP - negative Halbperiode.

¹²Werte: Sinus, Rechteck-Cosinus, DAC.

¹³Werte: nach IEC 60270, HFCT etc.

Literaturverzeichnis

- [1] ENWG: *Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist.*, 2014.
- [2] BUNDESNETZAGENTUR, BUNDESKARTELLAMT: *Monitoringbericht 2013, Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB, Stand Juni 2014.* http://www.bundernetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2013/131217_Monitoringbericht2013.pdf. Abgerufen am 24.11.2014.
- [3] FESER, K.: *Diagnostik für Isoliersysteme der elektrischen Energietechnik: Entwicklungstendenzen.* In: KÄRNER, HERMANN (Herausgeber): *Isoliersysteme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen*, Band 40 der Reihe *ETG-Fachbericht*, Seiten 143–154. VDE-Verl., Berlin, 1992.
- [4] MERSCHEL, F.: *Kabelhandbuch.* EW Medien und Kongresse, Frankfurt am Main, Berlin, 8. Auflage, 2012.
- [5] KLIESCH, M.; MERSCHEL, F.: *Starkstromkabelanlagen*, Band 1 der Reihe *Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze.* VDE-Verl., Berlin, 2. Auflage, 2010.
- [6] HAMPTON, N.: *Historical overview of medium and high voltage cables.* <http://www.neetrac.gatech.edu/publications.html>. Abgerufen am 24.11.2014.
- [7] HAUSCHILD, W.; LEMKE, E.: *High-voltage test and measuring techniques.* Springer, Berlin, New York, 2014.
- [8] PETZOLD, F.; BEIGERT, M.: *Vor-Ort TE-Diagnose an Energiekabeln mit Oscillating voltage.* In: GOCKENBACH, ERNST (Herausgeber): *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel/Vorträge der ETG-Fachtagung vom 19. bis 20. September 2006 in Kassel*, Band 104 der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2006.
- [9] PETZOLD, F.; BEIGERT, M.; GULSKI E.; OETJEN H.: *On Site PD-Diagnosis of Power Cables using the Oscillating Voltage Method.* In: IEEE (Herausgeber): *Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE 11th International Conference.* 2006.
- [10] WESTER, F. J.; GULSKI, E.; SMIT J.; SEITZ P. N.: *Experiences from on-site PD measurements using oscillating wave test system.* In: IET (Herausgeber): *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 23. - 27. August 1999*, Band 467 der Reihe *Conference Publication*, Seiten 196–199. [Institution of Electrical Engineers], [London], 1999.
- [11] WESTER, F. J.: *Condition assessment of power cables using partial discharge diagnosis at damped AC voltages.* Doktorarbeit, Technische Universität Delft, Delft, 2004.
- [12] MLADENOVIC, I.: *Determination of the Remaining Lifetime of Paper Insulated Lead Cables based on the Diagnostics of Patial Discharges and the Dissipation Factor: Bestimmung der Restlebensdauer von Papier-Masse-Kabeln mit Bleimantel auf Grundlage einer Teilentladungs- und Verlustfaktordiagnostik.* Doktorarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, 2013.

- [13] SCHUCHARDT, M.: *Entwicklung eines Diagnosekonzeptes für Mittelspannungskabelanlagen mit Massekabeln*. Doktorarbeit, Technischen Universität Berlin, Berlin, 2013.
- [14] EISEMANN, D.; HENNINGSEN, C.-G.; GEYER W.; KALKNER W.; KUMM T.: *Untersuchungen zum dielektrischen Verhalten von Mittelspannungskabelgarnituren*. In: KINDERSBERGER, JOSEF (Herausgeber): *Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen*, Band 112, CD-ROM der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2008.
- [15] EISEMANN, D.; REICH, U.; KALKNER W.; HAYESS R.; KUMM T.: *Bewertungsverfahren von diagnostischen Messungen zur Bestimmung des Ausfallsrisikos für kunststoffisolierte Mittelspannungskabelstrecken*. In: KREUSEL, J. (Herausgeber): *Internationaler ETG-Kongress 2009*, Band 118/119, CD-ROM der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2009.
- [16] BORLINGHAUS, A.: *Schwachstellen im Verteilnetz aufspüren*. In: CICHOWSKI, R.-R. (Herausgeber): *Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze 2013*. EW Medien und Kongresse, 2012.
- [17] KREUGER, F. H.; GULSKI, E.; KRIVDA A.: *Classification of partial discharges*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(6):917–931, 1993.
- [18] GULSKI, E.; KRIVDA, A.: *Neural networks as a tool for recognition of partial discharges*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(6):984–1001, 1993.
- [19] SAHOO, N. C.; SALAMA, M. M. A.; BARTNIKAS R.: *Trends in partial discharge pattern classification: a survey*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(2):248–264, 2005.
- [20] BELKOV, A.; KOLTUNOVICZ, W.; OBRALIC A.; PLATH R.: *Advances approach for automatic PRPD pattern recognition in monitoring of HV assets*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18:216–220, 2010.
- [21] OBRALIC, A.; BELKOV, A.: *Automatisches PRPD Mustererkennungsverfahren bei TE- Monitoring an rotierenden Maschinen*. In: ENERGIETECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE (ETG) (Herausgeber): *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2012*. VDE-Verl., Berlin, 2012.
- [22] BÖTTCHER, S.: *Handlungsempfehlung für die Inbetriebnahme-Prüfung von Mittelspannungskabeln*. In: CICHOWSKI, R.-R. (Herausgeber): *Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze 2013*. EW Medien und Kongresse, 2012.
- [23] SCHREITER, F.; SCHUFFT, W.: *Bewertung der Schadenakkumulation von kunststoffisolierten Mittelspannungskabel*. In: GOCKENBACH, E. (Herausgeber): *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel-Vorträge der ETG-Fachtagung vom 19. bis 20. September 2006 in Kassel*, Band 104 der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2006.
- [24] NORM: *DIN VDE 0278-629-1, Prüfanforderungen für Kabelgarnituren für Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 3,6/6(7,2) kV bis 20,8/36(42) kV - Teil 1: Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung*, 2009.
- [25] NORM: *DIN VDE 0278-629-2, Prüfanforderungen für Kabelgarnituren für Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 3,6/6(7,2) kV bis 20,8/36(42) kV - Teil 2: Kabel mit massegetränkter Papierisolierung*, 2009.
- [26] KLOCKHAUS, H.; MERSCHEL, F.; WANSER G.: *Abschluss- und Verbindungstechnik bei Starkstromkabeln*. Verl.- und Wirtschaftsges. der Elektrizitätswerke VVEW, Frankfurt am Main, 2. Auflage, 1995.
- [27] 3M DEUTSCHLAND, GMBH: *Lösungen für Energienetze*. http://solutions.3mdeutschland.de/wps/portal/3M/de_DE/EU_ElectricalMarkets/Home/SolutionsFor/Utilities/, 2015, zuletzt geprüft am: 12.10.2015.

- [28] HÖHNE, GMBH: *Produkte - Mittelspannungsgarnituren - Verbindungs-/ Abzweiggnituren 10-42 kV*. <http://www.hoehne.de/produkte/cat/mittelspannungsgarnituren/>, 2015, zuletzt geprüft am: 12.10.2015.
- [29] PFISTERER, HOLDING AG: *Produkte und Services - Kabelsysteme*. <http://de.pfisterer.com/cocs-kategorien.php?coc=10>, 2015, zuletzt geprüft am: 12.10.2015.
- [30] CELLPACK, GMBH: *Cellpack Technologien und Produkte*. <http://electricalproducts.cellpack.com/de/technologien-produkte/>, 2015, zuletzt geprüft am: 12.10.2015.
- [31] TYCO ELECTRONICS, CORPORATION: *Energetechnische Produkte - Kabelgarnituren*. <http://www.te.com/deu-de/plp/joints-spllices/Y30aJ.html?q=&n=41710&type=products&sampleCheckboxEnabled=false>, 2015, zuletzt geprüft am: 12.10.2015.
- [32] SCHREITER, F.; SCHUFFT, W.: *Konzeption und Applikation eines Vor-Ort-Prüfsystems zur Bewertung der Isolationsreserven von Mittelspannungs-Kabelsystemen*. In: *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*, Band 87 der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2002.
- [33] KÜCHLER, A.: *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, Band 3., neu bearb. und erw. Aufl. Springer, Berlin, New York, 2009.
- [34] SCHUFFT, W.; BACKES, J.: *Taschenbuch der elektrischen Energietechnik: Mit 102 Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München, 2007.
- [35] PORZEL, R.; NEUDERT, E.; STURM M.: *Diagnostik der elektrischen Energietechnik: Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln*. expert-Verl., Renningen-Malmsheim, 1996.
- [36] NORM: *DIN EN 60270, Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen*, 2000.
- [37] HOOF, M.: *Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren der Teilentladungsdiagnostik*. Doktorarbeit, Univ.-Gesamthochschule, Siegen, 1997.
- [38] HABERÄCKER, P.: *Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen ; mit 26 Übungen und 29 PASCAL-Algorithmen*. Hanser-Studienbücher. Hanser, München [u. a.], 4. Auflage, 1991.
- [39] HABERÄCKER, P.: *Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*. Hanser, München [u. a.], 1995.
- [40] JÄHNE, B.: *Technische Bildverarbeitung - maschinelles Sehen*. Springer, Berlin, New York, 1996.
- [41] KREYSS, J.; BÄSSMANN, H.: *Bildverarbeitung Ad Oculos*. Springer, Berlin, New York, 1998.
- [42] DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK D. G.: *Pattern classification*. Wiley, New York, 2. Auflage, 2001.
- [43] THE MATHWORKS, INC: *Statistics and Machine Learning Toolbox*. [ht tp://de.mathworks.com/help/stats/index.html](http://de.mathworks.com/help/stats/index.html), 2015, zuletzt geprüft am: 02.04.2015.
- [44] KELLER, H.: *Maschinelle Intelligenz: Grundlagen, Lernverfahren, Bausteine intelligenter Systeme*. Computational intelligence. Vieweg, Braunschweig, 2000.
- [45] GÖRZ, G.: *Einführung in die künstliche Intelligenz*. Addison-Wesley, Bonn, Paris, 1. Auflage, 1993.
- [46] RUSSELL, S.; CANNY, J. F.: *Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz*. Informatik. Pearson Studium, München, Boston, 1. Auflage, 2004.

- [47] NILSSON, N. J.: *The quest for artificial intelligence: A history of ideas and achievements*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2010.
- [48] TÖNNIES, K.-D.: *Grundlagen der Bildverarbeitung*. Informatik : Bildverarbeitung. Pearson Studium, München, Boston, 2005.
- [49] TOENNIES, K.-D.: *Guide to Medical Image Analysis: Methods and Algorithms*. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. Springer, Berlin, New York, 2012.
- [50] ESTER, M.; SANDER, J.: *Knowledge discovery in databases: Techniken und Anwendungen*. Springer, Berlin, New York, 2000.
- [51] CLARKE, B. S.; FOKOUE, E.; ZHANG H. H.: *Principles and theory for data mining and machine learning*. Springer series in statistics. Springer, Dordrecht, New York, 2009.
- [52] ALPAYDIN, E.: *Introduction to machine learning*. Adaptive computation and machine learning. MIT Press, Cambridge, 2. Auflage, 2010.
- [53] MARSLAND, S.: *Machine learning: An algorithmic perspective*. Chapman & Hall/CRC machine learning & pattern recognition series. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, 2009.
- [54] SUMEREDER, C.: *Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik*, Band 3 der Reihe *OVE-Schriftenreihe für Habilitationen und Dissertationen*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Wien, 2. Auflage, 2010.
- [55] NEETRAC.: *Diagnostic Testing of Underground Cable Systems (Cable Diagnostic Focused Initiative)*. http://www.ece.gatech.edu/research/NEETRAC/publications/CDFI_Phase_1_Final-Report.pdf. Abgerufen am 24.11.2014.
- [56] SIMONI, L.: *A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-16(4):277–289, Aug 1981.
- [57] HARTLER, G.: *Parameter Estimation for the Arrhenius Model*. IEEE Transactions on Reliability, 35(4):414–418, Oct 1986.
- [58] NELSON, W.: *Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data with the Inverse Power Law Model*. IEEE Transactions on Reliability, R-21(1):2–11, Feb 1972.
- [59] NELSON, W.: *Accelerated Life Testing - Step-Stress Models and Data Analyses*. IEEE Transactions on Reliability, R-29(2):103–108, June 1980.
- [60] NELSON, W.: *Analysis of Accelerated Life Test Data-Least Squares Methods for the Inverse Power Law Model*. IEEE Transactions on Reliability, R-24(2):103–107, June 1975.
- [61] FREITAG, C.; MLADENOVIC, I.; WEINDL C.: *Verlustfaktormessung an Mittelspannungskabeln bei Netzfrequenz*. In: ENERGIETECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE (ETG) (Herausgeber): *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2012*. VDE-Verl., Berlin, 2012.
- [62] MLADENOVIC, I.; WEINDL, C.: *Analyse des Alterungsverhaltens von MS-Papier-Massekabeln unterschiedlicher Generationen anhand der Rückkehrspannung*. In: ENERGIETECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE (ETG) (Herausgeber): *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2012*. VDE-Verl., Berlin, 2012.
- [63] WEINDL, C.; MLADENOVIC, I.: *Bestimmung von Restlebensdauer von Massekabeln anhand einer Teilentladungs- und $\tan \delta$ Diagnostik*. In: KREUSEL, J. (Herausgeber): *Internationaler ETG-Kongress 2009*, Band 118/119, CD-ROM der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2009.

- [64] WÖHE, G.; DÖRING, U.: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. F. Vahlen, München, 17. Auflage, ©1990.
- [65] WOLL, A.: *Wirtschaftslexikon*. R. Oldenbourg, München, 6. Auflage, ©1992.
- [66] BUSSE, T.: *Erfahrungen mit Inbetriebnahmeprüfungen unter besonderer Berücksichtigung der begleitenden TE-Messung*. FNN-Fachkongress Netztechnik 2015, Nürnberg, 02.12.-03.12.2015.
- [67] STREHL, T.: *Erfahrungen aus Vor-Ort Einsätzen mit der DAC-Prüfung und begleitender TE-Messung in China*. FNN-Fachkongress Netztechnik 2015, Nürnberg, 02.12.-03.12.2015.
- [68] ZIEGLER, S.: *Erfahrungen und Ergebnisse von TE-Messungen an Mittelspannungskabeln vor Ort mit 50 Hz AC*. FNN-Fachkongress Netztechnik 2015, Nürnberg, 02.12.-03.12.2015.
- [69] KAUERMANN, G.; KÜCHENHOFF, H.: *Stichproben: Methoden und praktische Umsetzung mit R*. Stichproben, 2011.
- [70] STENGER, H.: *Stichproben*. Physica-Verlag HD, Heidelberg, 1986.
- [71] VDE: *VDE-AR-N 4201, VDE-Anwendungsregel Netzdokumentation*, 2010.
- [72] THE MATHWORKS, INC: *Curve Fitting Toolbox*. <http://de.mathworks.com/help/curvefit/index.html>, 2015, zuletzt geprüft am: 02.04.2015.
- [73] HUNOLD, S.; SCHUFFT, W.: *Ein Beitrag zur Ermittlung des verbleibenden Isoliervermögens teilentladungsbehalteter Mittelspannungskabelmuffen*. In: ENERGIETECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE (ETG) (Herausgeber): *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2012*. VDE-Verl., Berlin, 2012.
- [74] HUNOLD, S.; SCHUFFT, W.: *Ein Beitrag zur Übertragung von Teilentladungsmessergebnissen von gebräuchlichen Prüfspannungen auf Betriebsspannung am Beispiel von Mittelspannungskabelmuffen*. In: LEIBFRIED, T. (Herausgeber): *Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen*, Band 140 der Reihe *ETG-Fachbericht*. VDE-Verl., Berlin, 2013.
- [75] DNV GL SOFTWARE, HEADQUARTERS: *Smart Cable Guard*. <http://www.dnvkema.com/services/advisory/ope/asset/condition/scgl/>, 2015, zuletzt geprüft am: 04.05.2015.
- [76] VOGELANG, R.; GRAMESPACHER, H.; FREILINGER M.: *Application Guide for High Voltage Accessories*. Brugg Cables Academy, Brugg, 1. Auflage, 2012.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorgehensschema zur Beurteilung einer teilentladungsbehafteten Muffe	25
2.1	Schnitt einer Übergangsmuffe von Massekabel auf VPE-Kabel	28
2.2	Schnitt einer Verbindungsmuffe für VPE-Kabel	29
2.3	Prüf- und Diagnoseverfahren zur Zustandsbewertung von Mittelspannungskabeln [32]	34
2.4	Unterscheidung von Teilentladungen an typischen Modellanordnungen [35, S. 63]	35
2.5	Standardmesskreis nach IEC 60270 [35, S. 66], [36, S. 22, Bild 1a]	37
2.6	Prinzip der Teilentladungsart [35, S. 138]	38
2.7	Teilentladungs-Mapping-Diagramm (Quelle: BAUR-Software, eigene Vor-Ort Messung)	39
2.8	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm für unterschiedliche Teilentladungsstellen [33, S. 251]	41
2.9	PSA-Diagramme für unterschiedliche Teilentladungsstellen [37, S. 55]	42
2.10	Charakteristische Kurven der Teilentladungsintensität über der Spannung [33, S. 252]	43
2.11	Berechnung einer Grauwertmatrix (Prinzip)	44
2.12	Einordnung des maschinellen Lernens	45
2.13	Übersicht und Strukturierung maschineller Lernverfahren	46
2.14	Ageing [54, S. 166]	49
2.15	Typische Alterung eines Kabelsystems ([55, S. 38])	50
2.16	Lebensdauerband [54, S. 173] [55, S. 39] und Lebensdauerverbrauch [54, S. 177]	51
2.17	Zeitverlauf diagnostische Kosten	57
2.18	Fehler in einer Warmschumpfgarnitur (Bild einer Röntgen-Computertomografie)	57
3.1	Einordnung der regelbasierenden Bestimmung der Garniturspezifikation in das Vorgehensschema	61
3.2	Relative Häufigkeit der Muffen je Spezifikation und Jahr	63
3.3	Muffenbestand und Gesamtlänge	64
3.4	Muffenbestand und Anzahl der Kabelabschnitte	64
3.5	Muffenbestand und durchschnittliche Leiterlänge	65
3.6	Fälle der Bestimmung der Garniturspezifikation über Wissen	67
3.7	Einordnung der Garniturspezifizierung durch Referenzvergleich in das Vorgehensschema	69
3.8	Spannungstest nach [74], Frequenz der Prüfspannung U_P : 50 Hz, Spannungsebene: 6/10 (12) kV	71
3.9	Vergleichsparameter im Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm	72
3.10	Eingefärbte Grauwertmatrizen von sechs Referenzmuffen	73
3.11	Korrelationskoeffizientenmatrix	74
3.12	Parameter 1 – Prüfspannung U_P	75
3.13	Parameter 2 – Anzahl der Impulse n	75
3.14	Parameter 3 – Summe der Teilentladungen Q_{sum}	76
3.15	Parameter 4 – Minimum der Teilentladungen Q_{min}	76
3.16	Parameter 5 – Maximum der Teilentladungen Q_{max}	77
3.17	Parameter 6 – Mittelwert der Teilentladungen Q_{mit}	77
3.18	Parameter 7 – Standardabweichungen der Teilentladungen Q_{std}	78
3.19	Parameter 8 – Anzahl der Impulse (positive Halbperiode) n_p	78
3.20	Parameter 9 – Minimum Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{min,p}$	79

3.21	Parameter 10 – Mittelwert Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{mit,p}$	79
3.22	Parameter 11 – Maximum Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{max,p}$	80
3.23	Parameter 12 – Standardabweichung Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{std,p}$	80
3.24	Parameter 13 – Median Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{med,p}$	81
3.25	Parameter 14 – Spannweite Winkel (positive Halbperiode) $\phi_{sw,p}$	81
3.26	Parameter 15 – Minimum Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{min,p}$	82
3.27	Parameter 16 – Mittelwert Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{mit,p}$	82
3.28	Parameter 17 – Maximum Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{max,p}$	83
3.29	Parameter 18 – Standardabweichungen Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{std,p}$	83
3.30	Parameter 19 – Median Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{med,p}$	84
3.31	Parameter 20 – Spannweite Teilentladungen (positive Halbperiode) $Q_{sw,p}$	84
3.32	Parameter 21 – Anzahl der Impulse (negative Halbperiode) n_n	85
3.33	Parameter 22 – Minimum Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{min,n}$	85
3.34	Parameter 23 – Mittelwert Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{mit,n}$	86
3.35	Parameter 24 – Maximum Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{max,n}$	86
3.36	Parameter 25 – Standardabweichung Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{std,n}$	87
3.37	Parameter 26 – Median Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{med,n}$	87
3.38	Parameter 27 – Spannweite Winkel (negative Halbperiode) $\phi_{sw,n}$	88
3.39	Parameter 28 – Minimum Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{min,n}$	88
3.40	Parameter 29 – Mittelwert Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{mit,n}$	89
3.41	Parameter 30 – Maximum Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{max,n}$	89
3.42	Parameter 31 – Standardabweichungen Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{std,n}$	90
3.43	Parameter 32 – Median Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{med,n}$	90
3.44	Parameter 33 – Spannweite Teilentladungen (negative Halbperiode) $Q_{sw,n}$	91
3.45	Fehler je Vergleichsparameter für die optische Kontrolle	92
3.46	Fehler je Vergleichsparameter für den Bayes-Klassifikator	92
3.47	Fehler je Vergleichsparameter für den Entscheidungsbaum-Klassifikator	93
3.48	Fehler je Vergleichsparameter für den Nächter-Nachbar-Klassifikator	93
3.49	Fehler je Vergleichsparameter (aggregiert)	94
3.50	optimale Korrelationskoeffizientenmatrix	96
4.1	Einordnung des Schadensakkumulationstests in das Vorgehensschema	97
4.2	Online-Teilentladungsmessung [75]	98
4.3	Simulation der Einsetzspannung U_e	99
4.4	Simulation der Entladeleistung P_{Dis} bezogen auf die Spannung	100
4.5	Erweiterte Simulation der Entladeleistung P_{Dis} bezogen auf die Spannung	101
4.6	Simulation der Entladeleistung P_{Dis} bezogen auf die Zeit	102
4.7	Ablauf des durchgeführten Vortests	103
4.8	Entladeleistung P_{Dis} in Abhängigkeit von der Prüfspannung $U_{p,50}$	104
4.9	Einsetzspannung U_e in Abhängigkeit von der Schadensakkumulationszeit t_S	104
4.10	Ablauf des Schadensakkumulationstests	105
4.11	Messaufbau während der Schadensakkumulation	105
4.12	Messaufbau der Teilentladungsmessung	106
4.13	Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$	107
4.14	Alterungstyp 01 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{p,0,1} = 10,0kV$	108
4.15	Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$	109
4.16	Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{p,0,1} = 10,0kV$	110
4.17	Alterungstyp 02 – Einsetzspannung U_e nach dem Invers-Power-Gesetz	110

4.18	Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$	112
4.19	Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$	114
4.20	Alterungstyp 03 – Einsetzspannung U_e nach dem Invers-Power-Gesetz	114
4.21	Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$	115
4.22	Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$	116
4.23	Alterungstyp 01 – Einsetzspannung U_e und Verlustfaktor $\tan \delta$	117
4.24	Alterungstyp 02 – relative Kapazitätsabweichung ΔC_r und relative Widerstandsabweichung ΔR_r jeweils bei der Prüfspannung $U_{P,0,1} = 10,0\text{kV}$	118
5.1	Verifizierung vor Ort	121
5.2	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm für alle Prüfspannungen U_P gemessen an der Muffe M_17	122
5.3	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm für alle Prüfspannungen U_P gemessen an der Muffe M_18	123
5.4	Verifizierung gesuchter Muffen	125
5.5	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_17 für die Messreihe 5	126
5.6	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_07 für die Messreihe 5	126
5.7	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_18 für die Messreihe 5	127
5.8	Amplituden-Phasen-Häufigkeitsdiagramm der Muffe M_15 für die Messreihe 5	127
5.9	Nachuntersuchung der Muffen	128
C.1	Anwendungsfalldiagramm	139
C.2	Garniturspezifikation Grundmodell	140
C.3	Garniturspezifikation Anschlüsse	142
C.4	Garniturspezifikation Bezug	145
C.5	Garnitur – Status, Alterungstyp, Eigenschaften	146
C.6	Garnitur Vergleichsparameter	148

Tabellenverzeichnis

2.1	Typische Modellanordnungen mit korrespondierenden typischen Teilentladungsbildern	43
2.2	Eigenschaften der Güte eines Klassifikators	48
2.3	Bewertungsmethoden	48
2.4	Kostenbeispiel	56
2.5	Mögliche Fehler je Garniturspezifikation	58
3.1	Diverse Zusammenhänge mit dem Bestand von Muffen	66
3.2	Testparameter	70
3.3	Vergleichsparameter (alle Parameter auf die Referenzzeit $T_{\text{ref}} = 10\text{s}$ bezogen)	70
3.4	Maschinelle Lernverfahren	72
3.5	optimale Vergleichsparameter	95
3.6	Ausführungszeiten der maschinellen Lernverfahren	95
4.1	Eigenschaften der Alterungstypen bezogen auf die jeweiligen Schiefen ν	106
A.1	Relative Häufigkeit der Muffen je Spezifikation und Jahr	135
A.2	Clustering der Alterungstypen	136
C.1	Klasse GARNITURSPECIFIKATION	140
C.2	Klasse HERSTELLER	141
C.3	Klasse GARNITURTYP	141
C.4	Klasse GRUNDTECHNIK	141
C.5	Klasse VERBINDUNGSTECHNIK	141
C.6	Klasse ANSCHLUSS	142
C.7	Klasse FELDSTEUERUNG	143
C.8	Klasse SEITE	143
C.9	Klasse BAUARTKURZZEICHEN_NORM	143
C.10	Klasse BAUARTKURZZEICHEN	143
C.11	Klasse NENNQUERSCHNITT_NORM	143
C.12	Klasse NENNQUERSCHNITT	144
C.13	Klasse BEZUG	145
C.14	Klasse GARNITUR	146
C.15	Klasse STATUS	147
C.16	Klasse ALTERUNGSTYP	147
C.17	Klasse EIGENSCHAFT	147
C.18	Klasse EIGENSCHAFTEN	147
C.19	Klasse VERGLEICH	148
C.20	Klasse VERGLEICHSPARAMETER	149
C.21	Klasse SPANNUNGSFORM	149
C.22	Klasse MESSSCHALTUNG	149

Thesen

1. Die Anzahl der Garnituren einer Spezifikation kann auf Basis des kaufmännischen Systems und anderer Quellen, wie Lieferantenangaben, für die letzten zehn Jahre sicher bestimmt werden.
2. Unter Zuhilfenahme des grafischen Informationssystems kann die Menge der weiter zurückliegenden Jahre qualifiziert geschätzt und die Mengen der letzten zehn Jahre verifiziert werden.
3. Ausgangspunkt der Bestimmung der Garniturspezifikation durch Referenzvergleich ist ein definierter Spannungstest, bei dem jede Teilentladung mit mindestens ihrer Ladung, dem Phasenwinkel und der momentanen Spannung aufgezeichnet wird.
4. Aus den aufgezeichneten Teilentladungen werden PRPD-Diagramme erzeugt und statistisch ausgewertet. Unter den 33 Parametern der statistischen Vermessung sind 15 von wesentlicher Bedeutung.
5. Ein weiterer Schritt zur Reduzierung der Einzelwerte der 15 wesentlichen Parameter ist die Bildung einer Grauwertmatrix. Sie setzt die Skalierung der Parameter in den Wertebereich von 1 bis 8 voraus.
6. Das beste maschinelle Lernverfahren zum Vergleich von Grauwertmatrizen ist die Nächster-Nachbar-Methode.
7. Teilentladungsbehaftete Muffen altern schneller als Muffen ohne Fehler. Das Altern zeigt sich in einer Abnahme der Teilentladungseinsetzspannung und in einer Zunahme der Entladeleistung bei einer Spannung wie der Leiter-Erde-Spannung.
8. Anhand der durchgeführten Alterungen und Messungen wurden fünf Alterungstypen identifiziert. Für die Identifizierung der Alterungstypen wurde das maschinelle Lernverfahren des Clustering angewendet.
9. Garnituren des Alterungstyps 01 altern mit einem ähnlichen Alterungsfaktor wie das sie umgebende Kabelsystem.
10. Garnituren der Alterungstypen 02 und 03 altern aufgrund der zu Teilentladungen führenden Fehler beschleunigt. Ein Einfluss anderer Fehler besteht nicht. Der Alterungsfaktor liegt zwischen 5 und 10.
11. An Garnituren der Alterungstypen 04 und 05 kann kein Alterungsfaktor bestimmt werden, da die Kombination mit nicht zu Teilentladungen führenden Fehlern gegenläufige Effekte zwischen dem Verlustfaktor und der Entladeleistung bewirkt.