

BACHELOR THESIS  
Victor Cajus Kröger

# Teilentladungsmessung an Hochspannungskondensatoren aus Anpassnetzwerken der Hochfrequenzstationen des Linearbeschleunigers European XFEL

---

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and Electrical Engineering

Victor Cajus Kröger

Teilentladungsmessung an  
Hochspannungskondensatoren aus  
Anpassnetzwerken der Hochfrequenzstationen des  
Linearbeschleunigers European XFEL

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Pawel Buczek  
Zweitgutachter: Dr. -Ing. Michael Bousonville

Eingereicht am: 14. Februar 2023

**Victor Cajus Kröger**

## **Thema der Arbeit**

Teilentladungsmessung an Hochspannungskondensatoren aus Anpassnetzwerken der Hochfrequenzstationen des Linearbeschleunigers European XFEL

## **Stichworte**

Teilentladung, Teilentladungsmessung, Kondensator, Hochspannung

## **Kurzzusammenfassung**

Teilentladungen fungieren als Grundlage elektrischer Alterungsprozesse. Vermehrtes Auftreten von Teilentladungen kann daher zum beschleunigten Erreichen der Lebensdauer elektrischer Betriebsmittel führen. Bei adäquatem Verständnis der Messung von Teilentladungen sowie der Deutung der Messergebnisse kann beurteilt werden, wann ein Bauteil ausgetauscht werden muss, bevor es im Betrieb ausfällt.

Im Umfang dieser Arbeit soll eine klassische Teilentladungsmessung nach IEC 60270, an mehreren Hochspannungskondensatoren vorgenommen werden. Auf Basis der Messergebnisse wird die Qualität von neuen Kondensatoren, Kondensatoren aus dem Lagerbestand und gealterten Kondensatoren analysiert. Gemessen wird zwischen den kurzgeschlossenen Elektroden des Kondensators und dem leitfähigen Gehäuse. Dies soll Aufschluss über Fertigungsfehler innerhalb des Isolationsmaterials und alterungsbedingte Schäden liefern. Mit Hilfe der Erkenntnisse soll eine noch bessere Absicherung des Beschleunigerbetriebs ermöglicht werden.

Die Analyse der Messergebnisse hat gezeigt, dass Fehlstellen unterschiedlicher Beschaffenheit schon bei der Fertigung entstehen. Diese Fehlstellen führen bereits bei Spannungen von rund 20 Prozent der Betriebsspannung zum Auftreten von Teilentladungen.

An den schon betriebenen Kondensatoren konnten deutlich teilentladungsbedingte Alterungsprozesse nachgewiesen werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Auftreten von Teilentladungen zur Ausbildung von Electrical Trees geführt hat. Die Bildung und die anschließende Vergrößerung dieser sogenannten Bäumchenstruktur bewirken eine stückweise Überbrückung der Isolationsstrecke, bis es zum vollständigen Durchschlagen der Gesamtisolationsstrecke kommt.

Für eine Einschätzung der verbleibenden Restlebensdauer fehlen Erfahrungswerte, ohne jene die Messwerte nur wenig Aussagegehalt besitzen. Eine Restlebensdauerabschätzung ist erst umsetzbar, wenn einer der untersuchten Prüflinge im weiteren Betrieb ausfällt.

---

**Victor Cajus Kröger**

**Title of Thesis**

Partial discharge measurement on high-voltage capacitors from matching networks of the high-frequency stations of the linear accelerator European XFEL

**Keywords**

partial discharge, partial discharge measurement, capacitor, high-voltage

**Abstract**

Partial discharges are the basis of electrical aging processes. The repetitive occurrence of partial discharge events may therefore lead to accelerated deterioration of electrical appliances. With adequate understanding of measurements of partial discharges as well as their interpretation it's possible to predict when a component will need to be replaced before it fails in operation.

This thesis focuses on the standard partial discharge measurement of multiple high voltage capacitors according to IEC 60270. The quality of new capacitors, those which have been stored for a while and used capacitors were analysed based on the measurement results. The measurements were taken between the short-circuited electrodes of the capacitor and its casing. This should offer valuable clues to aging and manufacturing defects inside the insulation materials. These insights should ensure a continuous runtime of the accelerator.

The analysis of the measurement results showed defects of different constitution already occur during manufacturing. These defects lead to the occurrence of partial discharges at only around 20 percent of the operating voltage.

Aging processes caused by partial discharges could clearly be proven on the already used capacitors. The results point to the formation of electrical trees due to the occurrence of partial discharges. The formation and the subsequent enlargement of these so-called tree structures cause a partial bridging of the insulation section and eventually a total breakdown of the entire insulation.

Empirical value is missing for the accurate assessment of the remaining lifespan, without which the measurement results hold little significance. An assessment of the expectable remaining lifespan will only be possible when one of the examined units under test fails during future operation.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungen	xii
Glossar	xiii
<b>1 Kontext</b>	<b>1</b>
1.1 Standort . . . . .	1
1.2 Funktion des European XFEL . . . . .	1
1.3 Hochfrequenzsystem des European XFEL . . . . .	1
<b>2 Motivation und Kapitelübersicht</b>	<b>3</b>
2.1 Hintergrund der Arbeit . . . . .	3
2.2 Vorausgegangene Untersuchungen . . . . .	3
2.3 Thema der Arbeit . . . . .	4
<b>3 Einführung in Teilentladungen und Teilentladungsmessungen</b>	<b>6</b>
3.1 Teilentladungen . . . . .	6
3.1.1 Allgemeine Definition . . . . .	6
3.1.2 Teilentladungsarten und ihre Ursachen . . . . .	7
3.1.3 Analytisches Modell von Hohlraumentladungen . . . . .	12
3.1.4 Ablauf von Hohlraumentladungen . . . . .	13
3.1.5 Schädlichkeit von Hohlraumentladungen und Electrical Trees . . . . .	14
3.1.6 Messbare Alterungseffekte innerer Teilentladungen . . . . .	17
3.1.7 Problemstellung . . . . .	17
3.2 Teilentladungsmessung (allgemein) . . . . .	18
3.2.1 Einsatzgebiete . . . . .	18
3.2.2 Detektionsvarianten von Teilentladungen . . . . .	18

3.3	Teilentladungsmessung (elektrisch) . . . . .	19
3.3.1	Varianten der elektrischen Teilentladungsmessung . . . . .	19
3.3.2	Prüfspannungsformen . . . . .	20
3.3.3	Frequenzauswahl . . . . .	21
3.3.4	Messgröße der Teilentladungsmessung . . . . .	21
3.3.5	Abgeleitete Kenngrößen . . . . .	22
3.3.6	Stand der Normen . . . . .	23
3.3.7	Messaufbau und Kalibrierung . . . . .	24
3.3.8	Störeinflüsse . . . . .	25
3.3.9	Versuchstypen . . . . .	26
3.3.10	Interpretation von Teilentladungsmessgrößen . . . . .	28
3.3.11	Teilentladungsortung . . . . .	31
3.3.12	Lebensdauerabschätzung . . . . .	31
3.3.13	Problemlösungen . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Vorstellung des Hochspannungskondensators</b>	<b>36</b>
4.1	Der Hochspannungskondensator als Teil des Anpassnetzwerks . . . . .	36
4.2	Beschreibung des Kondensatoraufbaus . . . . .	38
4.3	Vorstellung des Isolationsmaterials . . . . .	39
4.4	Analyse möglicher Teilentladungsursachen . . . . .	41
4.5	Erkenntnisgewinn über Schäden am Hochspannungskondensator der HF-Station A11 . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Vorbereitung der Teilentladungsmessungen</b>	<b>43</b>
5.1	Teilentladungsmessequipment . . . . .	43
5.1.1	Leistungsparameter . . . . .	43
5.1.2	Darstellung der Messergebnisse . . . . .	44
5.1.3	Lokalisationstechnik . . . . .	45
5.2	Einstellungen am Messgerät . . . . .	47
5.3	Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung . . . . .	49
5.4	Prüffeld und Messaufbau . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Verifikation der Messung und deren Messwerte</b>	<b>52</b>
6.1	Vorfeldmessungen . . . . .	52
6.1.1	Bestimmung von Störeinflüssen . . . . .	52
6.1.2	Auslegung des Hysterese- und Spannungssteigerungsversuchs . . . . .	53
6.1.3	Statistische Streuung der Messergebnisse . . . . .	55

6.1.4	Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis . . . . .	57
6.2	Teilentladungsmessung eines verschiedenartigen Kondensatorentyps . . . . .	58
6.2.1	Vorstellung des Vergleichskondensators . . . . .	58
6.2.2	Versuchsbeschreibung . . . . .	59
6.2.3	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Hauptmessung der Kondensatoren</b>	<b>66</b>
7.1	Versuchsbeschreibung . . . . .	66
7.2	Ziele der Messung . . . . .	66
7.3	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	68
7.3.1	Teilentladungsursache und Lokalisation . . . . .	68
7.3.2	Schädlichkeit der Defekte . . . . .	78
7.3.3	Alterungsgeschwindigkeit . . . . .	81
7.3.4	Restlebensdauerabschätzung . . . . .	82
7.3.5	Eignung des Messgerätes . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Fazit und Zusammenfassung</b>	<b>85</b>
	<b>Literatur</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Phasenaufgelöste TE-Muster zur Interpretationshilfe</b>	<b>90</b>
<b>B</b>	<b>Anleitungen</b>	<b>93</b>
B.1	Kalibrierung des Messsystems . . . . .	93
B.2	Vorgehen bei der Messung eines Kondensators . . . . .	95
<b>C</b>	<b>PRPD-Diagramme der Hauptmessung</b>	<b>97</b>
C.1	Alte Charge . . . . .	97
C.2	Neue Charge . . . . .	98
C.3	Betriebene Charge . . . . .	100
<b>D</b>	<b>Dokumentation des Aus- und Einbaus eines im Beschleuniger ver-</b>	
	<b>bauten Kondensators</b>	<b>102</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>104</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau einer HF-Station . . . . .	2
3.1	Arten von Teilentladungen . . . . .	6
3.2	Koronaeinsetz- und Durchschlagsspannung im inhomogenen Feld . . . . .	8
3.3	Existenzbereiche von Teilentladungen in luftisolierten Anordnungen . . . . .	9
3.4	Gleitentladungsanordnung mit tangential und normal gerichteter Feldbelastung des Isolators . . . . .	10
3.5	Zylinderkondensator mit Stirnkontaktierung der gegeneinander versetzt geschichteten Kondensatorplatten . . . . .	10
3.6	Ausbildung von Electrical Trees in Polyethylen bei 10 kV, 12 kV und 15 kV bei einer Spitze-Platte-Anordnung . . . . .	12
3.7	Ersatzschaltbild einer inneren Teilentladung . . . . .	13
3.8	Spannungsverläufe bei inneren Teilentladungen . . . . .	14
3.9	Schädigungsverlauf von Teilentladungen . . . . .	16
3.10	Inhomogenitäten in festen Isolationsmaterialien . . . . .	17
3.11	Norm Prüfaufbau der Teilentladungsmessung . . . . .	24
3.12	Norm Prüfaufbau einer Kalibrierung . . . . .	25
3.13	Ablauf eines Hystereseversuchs . . . . .	27
3.14	Ablauf eines Spannungssteigerungsversuch . . . . .	27
3.15	Charakteristische Kurvenverläufe der Teilentladungsintensität in Abhängigkeit der angelegten Spannung . . . . .	29
3.16	PRPD-Pattern einer Teilentladung in einem Hohlraum . . . . .	31
3.17	Inverse Power Law original und abgewandelt nach Sumreder . . . . .	34
4.1	Schaltplan des Anpassnetzwerks . . . . .	36
4.2	Frontansicht eines Anpassnetzwerks . . . . .	37
4.3	Innerer Aufbau des Hochspannungskondensators . . . . .	38
4.4	Messaufbau und Aufbau der Polyurethanprobe . . . . .	40
4.5	Ansicht des beschädigten Kondensators der HF-Station A11 . . . . .	42

5.1	Darstellung eines vom Messsystem erstellten PRPD-Diagramms . . . . .	45
5.2	Partial Discharge Site Location Technik . . . . .	46
5.3	Definition der Messbandbreite gemäß IEC 60270 . . . . .	49
5.4	Anschlussplan des Teilentladungsmesssystems . . . . .	50
6.1	Verlauf des Hysterese- und Spannungssteigerungsversuchs . . . . .	53
6.2	Vergleichskondensator im Versuchsaufbau . . . . .	59
6.3	PRPD-Diagramm des ersten Vergleichskondensators von 2 kV bis 4 kV . .	61
6.4	PRPD-Diagramm des ersten Vergleichskondensators von 2 kV bis 10 kV .	61
6.5	PRPD-Diagramm des zweiten Vergleichskondensators von 2 kV bis 4 kV .	62
6.6	PRPD-Diagramm des zweiten Vergleichskondensators von 2 kV bis 10 kV .	63
6.7	PRPD-Diagramm des Kondensators SN32 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	63
6.8	PRPD-Diagramm des Kondensators SN32 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	64
7.1	PRPD-Diagramm des Kondensators SN29 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	68
7.2	PRPD-Diagramm des Kondensators SN31 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	69
7.3	PRPD-Diagramm des Kondensators SN34 von 2 kV bis 5 kV . . . . .	70
7.4	PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	70
7.5	PRPD-Diagramm des Kondensators SN36 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	71
7.6	PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 3 kV . . . . .	71
7.7	PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 von 2 kV bis 7 kV . . . . .	71
7.8	PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	72
7.9	PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 5 kV . . . . .	73
7.10	PRPD-Diagramm des Kondensators SN02 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	73
7.11	PRPD-Diagramm des Kondensators SN18 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	74
7.12	PRPD-Diagramm des Kondensators SN11 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	74
7.13	PRPD-Diagramm des Kondensators SN16 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	74
7.14	PRPD-Diagramm des Kondensators SN17 von 2 kV bis 4 kV . . . . .	75
7.15	PRPD-Diagramm des Kondensators SN19 von 2 kV . . . . .	75
A.1	Charakteristische PRPD-Diagramme zur Interpretationshilfe . . . . .	92
B.1	Anschlussplan für die Kalibrierung des Teilentladungsmesssystems . . . .	94
C.1	PRPD-Diagramm des Kondensators SN29 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	97
C.2	PRPD-Diagramm des Kondensators SN30 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	97
C.3	PRPD-Diagramm des Kondensators SN31 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	98
C.4	PRPD-Diagramm des Kondensators SN32 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	98

C.5	PRPD-Diagramm des Kondensators SN34 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	98
C.6	PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	99
C.7	PRPD-Diagramm des Kondensators SN36 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	99
C.8	PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	99
C.9	PRPD-Diagramm des Kondensators SN02 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	100
C.10	PRPD-Diagramm des Kondensators SN11 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	100
C.11	PRPD-Diagramm des Kondensators SN16 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	100
C.12	PRPD-Diagramm des Kondensators SN17 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	101
C.13	PRPD-Diagramm des Kondensators SN18 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	101
C.14	PRPD-Diagramm des Kondensators SN19 von 2 kV bis 10 kV . . . . .	101

# Tabellenverzeichnis

5.1	Leistungskennwerte des Prüfspannungsgenerators unter Verwendung einer VLF-Sinusspannung von 0,1 Hz . . . . .	43
5.2	Erklärung der Anschlussplankomponenten des Messaufbaus	51
6.1	Ergebnisse der Teilentladungseinsetzspannungen und Teilentladungsaussetzspannungen im Umfang der ersten Testmessung . . . . .	54
6.2	Standardabweichung der Impulswiederholrate und der Spitzendurchschnittsentladung in Abhängigkeit der Messungen an Kondensator SN32 . . . . .	56
6.3	Mittelwerte der Impulswiederholrate und Spitzendurchschnittsentladung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur aus sechs Messungen . . . . .	57
6.4	Spitzendurchschnittsentladungen und Impulswiederholraten aus der Vorfeldmessung . . . . .	65
7.1	Verhältnis aus Teilentladungsaussetzspannung und Teilentladungseinsetzspannung in Abhängigkeit des untersuchten Kondensators . . . . .	76
7.2	Vergleich der Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen	78
7.3	Vergleich der Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen	78
7.4	Anzahl an Teilentladungs-Events und maximale Teilentladungsintensität	80
7.5	Anzahl an Teilentladungs-Events und maximale Teilentladungsintensität der bereits betriebenen Kondensatoren . . . . .	81
7.6	Referenz- und Grenzwerte der Spitzendurchschnittsentladung und der Impulswiederholfrequenz . . . . .	83
B.1	Erklärung der Anschlussplankomponenten des Messaufbaus bei einer Kalibrierung . . . . .	94

# Abkürzungen

**APN** Anpassnetzwerk.

**DESY** Deutschen Elektronen-Synchrotron.

**ESB** Ersatzschaltbild.

**European XFEL** European X-Ray Free-Electron Laser.

**GIS** Gasisolierte Schaltanlagen.

**HF** Hochfrequenz.

**HV** High Voltage.

**IPL** Inverse Power Law.

**PDEV** Partial Discharge Exception Voltage.

**PDIV** Partial Discharge Interception Voltage.

**PRPD** Phase Resolved Partial Discharge.

**TEA** Teilentladungsaussetzspannung.

**TEE** Teilentladungseinsetzspannung.

**TEI** Teilentladungsintensität.

**VLf** Very Low Frequency.

# Glossar

**Anpassnetzwerk** Ein Netzwerk, das in der Hochfrequenztechnik für die Anpassung der Quellimpedanz oder die Lastimpedanz an den Wellenwiderstand einer Leitung verwendet wird. Hierdurch werden Leitungsreflexionen vermieden.

**Bunch** Als Paket oder auch als Wolke bezeichnete Gruppe aus einer Vielzahl geladener Teilchen.

**Cluster-Wolke** Zusammenhängende Häufung von Teilentladungs-Events innerhalb eines phasenaufgelösten Diagramms über einem begrenzten Bereich der Prüfspannungsphase.

**Feldsteuerung** Maßnahmen, die dazu dienen lokale Feldstärken so weit zu senken, dass sie unter der elektrischen Festigkeit des eingesetzten Isolationsmaterials liegen [9].

**Hochfrequenz** Hochfrequenz bezeichnet den Frequenzbereich, elektromagnetischer Wellen, Schwingungen und Wechselströme, deren Frequenzen im Bereich zwischen 10 kHz bis 300 MHz und im weitesten Sinne 300 GHz liegen [4].

**Kavität** Hohlraumresonatoren, die zur Beschleunigung geladener Teilchen mittels elektromagnetischer Felder genutzt werden.

**Klystron** Elektronenröhre zur Verstärkung eines Hochfrequenzsignals. Hierzu wird ein Elektronenstrahl mit dem zu verstärkenden Hochfrequenzsignal zeitlich moduliert.

**Linearbeschleuniger** Beschleunigt Teilchen auf gerader Strecke.

**Modulator** Bezeichnet hier eine elektrische Anlage, die aus einer Dreiphasenwechselspannung eine gepulste Rechteckspannung moduliert.

**Pulstransformator** Ein Transformator, der speziell für den Betrieb mit einer gepulsten Spannung ausgelegt ist. Die Induktivität der Primärwicklung wird durch eine tertiäre Wicklung entmagnetisiert. Dadurch bleibt der Transformator stets im linearen Bereich der Magnetisierungskurve.

**Supraleitend** Als „supraleitend“ werden Leiter bezeichnet, die keinen elektrischen Widerstand besitzen. Der supraleitende Zustand wird dabei häufig durch Herunterkühlen des Leiters erzielt, beispielsweise mit tiefkaltem Helium.

**Triaxialkabel** Ein aus drei konzentrisch angeordneten Leitern bestehendes Kabel.

**Undulator** Ein Gerät, das in Elektronenbeschleunigern zum Einsatz kommt. Undulatoren bestehen aus in ihrer Polarität abwechselnd angeordneten Elektro- oder Permanentmagneten. Diese bringen die Elektronen des Elektronenstrahl auf einen Slalomkurs. Durch die seitliche Bewegung der fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Teilchen werden diese zur Aussendung von Synchrotronstrahlung angeregt.

**Wellenanpassung** Maßnahme, um in der Hochfrequenztechnik eine Quellimpedanz oder Lastimpedanz an die Impedanz einer Leitung anzupassen, sodass Reflexionen auf der Leitung vermieden werden.

# 1 Kontext

## 1.1 Standort

Der von Schenefeld, Schleswig-Holstein, bis nach Hamburg, Bahrenfeld reichende European X-Ray Free-Electron Laser (European XFEL) ist eine Röntgenlaser-Forschungseinrichtung. Hier wird mit Hilfe eines Linearbeschleunigers Röntgenstrahlung erzeugt. Dies geschieht in enger Zusammenarbeit mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), auf dessen Gelände der Startpunkt des Beschleunigers liegt.

## 1.2 Funktion des European XFEL

Um die Röntgenstrahlung zu erzeugen, generiert und beschleunigt der Linearbeschleuniger zuerst einen Elektronenstrahl. Dieser besteht aus einzelnen Elektronenwolken, sogenannten Bunchen, mit äquidistantem Abstand. Dieser Strahl wird durch Undulatoren auf einen Slalomkurs gezwungen. Dabei entstehen Röntgenblitze, deren elektromagnetische Wellen im Gleichtakt schwingen, so wie es bei Laserstrahlen der Fall ist. Der Röntgenlaser dient den Wissenschaftlern schließlich als Mikroskop, mit dem dreidimensionale Bilder von beispielsweise chemischen Reaktionen, Biomolekülen oder Zellstrukturen aufgenommen werden können [8].

## 1.3 Hochfrequenzsystem des European XFEL

Für die Beschleunigung der Elektronen wird Hochfrequenz (HF) mit hoher Leistung benötigt. Die in Supraleitende Hohlraumresonatoren (Kavitäten) eingespeiste Hochfrequenz bildet eine stehende Welle innerhalb des Resonators. Das elektrische Feld dieser elektromagnetischen Welle treibt die Bunche des Elektronenstrahls vor sich her.

Die Hochfrequenz, für die Kavitäten, wird von Elektronenröhren (Klystrons) erzeugt. Hierbei handelt es sich um Hochfrequenzverstärker, die im hier betrachteten Fall ein 1,3 GHz Eingangssignal mit 100 W Leistung auf typischerweise 5 MW verstärken. Dies geschieht im Pulsbetrieb, da die Beschleunigermodule nicht für eine permanente Belastung mit 5 MW ausgelegt sind. Im XFEL wird daher nur zehnmal pro Sekunde, für 1,4 ms Hochfrequenzleistung erzeugt. Die Klystrons arbeiten mit einer Spannung bis zu 120 kV, die ebenfalls eine Taktrate von 10 Hz aufweist.

Zur Erzeugung des 120 kV Pulses bedarf es einer mehrstufigen Prozedur. Vorerst muss von einem Modulator ein kleinerer 10 kV Rechteckpuls außerhalb des Beschleunigertunnels erzeugt werden. Dieser Rechteckpuls wird anschließend über bis zu 1,7 km lange Triaxialkabel in den Beschleunigertunnel geleitet und dort mit einem Pulstransformator auf 120 kV hochtransformiert.

An der Schnittstelle zwischen Triaxialkabel und Pulstransformator ist zur Impuls- und Wellenanpassung ein Anpassnetzwerk (APN) verbaut. Es befindet sich im Gehäuse des Pulstransformators, siehe Abbildung 1.1. Das Anpassnetzwerk kompensiert die Zeitkonstante aus der Induktivität des Pulstransformators und der auf die Primärseite transformierten Impedanz des Klystrons. Das Anpassnetzwerk besteht dazu aus einem RC-Netzwerk. Durch die Impulsanpassung kann der Spannungspuls, trotz der hohen Induktivität des Transformators unverzerrt auf die Sekundärseite übersetzt werden. Sobald der Kondensator vollständig geladen ist verliert das Anpassnetzwerk seine Wirkung. Zusätzlich zur Impulsanpassung realisiert das Anpassnetzwerk auch die Wellenanpassung der Lastimpedanz an den Wellenwiderstand der Triaxialkabel. Die Impedanz aus Anpassnetzwerk und Transformator, mit lastseitig angeschlossenem Klystron entspricht dazu der Impedanz der parallelgeschalteten Triaxialkabel.

Im Umfang dieser Arbeit wird der Kondensator des Anpassnetzwerkes näher analysiert.

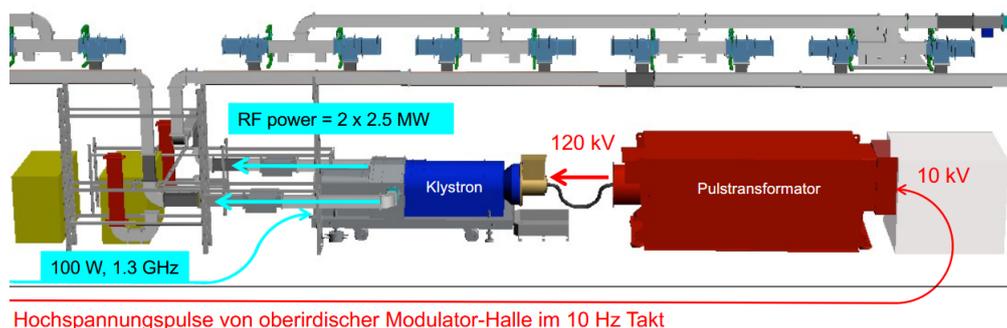


Abbildung 1.1: Aufbau einer HF-Station [6]

## 2 Motivation und Kapitelübersicht

### 2.1 Hintergrund der Arbeit

Grund für die nähere Analyse des im APN lokalisierten Pulscondensators ist der Ausfall des APN einer der insgesamt 26 Hochfrequenzstationen des European XFEL am 14. Juni 2021. Diese wurde nach Unregelmäßigkeiten im Modulatorausgangsstromverlauf aufgrund von Überstrom automatisch abgeschaltet. Beim Wiedereinschalten des Modulators zeigte sich, dass die Spannungs- und Strompulsform im Bereich der Anstiegszeit vom Standardpuls abwich. Anstelle eines annähernd linearen Anstiegs kam es ungefähr ab der Hälfte der Pulsanstiegszeit zu stark wellenförmigen Spannungsverläufen.

### 2.2 Vorausgegangene Untersuchungen

Erste Untersuchungen haben ergeben, dass mehrere Widerstände des APN durch thermische Überlast zerstört wurden. Zudem konnte mithilfe eines Isolationsmessgeräts festgestellt werden, dass einer der Pole des Pulscondensators eine leitfähige Verbindung zum Gehäuse und damit zum Erdpotential besitzt.

In einer darauffolgenden umfangreichen Analyse zur Ermittlung des Fehlerursprungs trat zutage, dass ausschließlich der Pulscondensator als Fehlerursprung infrage kommt [13]. Dessen ungeachtet offenbarte sich, dass innerhalb des als Isolationsmaterials verwendeten Gießharzes Lufteinschlüsse existierten. Die Größe der Lufteinschlüsse variierte dabei zwischen einigen Millimetern bis hin zu wenigen Zentimetern.

Eine Stichprobenmessung des Verlustfaktors  $\tan \delta$  an mehreren gleichlang betriebenen Kondensatoren und Kondensatoren aus dem Lagerbestand erbrachte keine feststellbaren Unregelmäßigkeiten untereinander. Auch eine Kapazitätsmessung, die im selben Zuge durchgeführt wurde, konnte keinen Hinweis auf einen möglichen Defekt geben. Es wird

daher angenommen, dass sich weder durch eine Verlustfaktormessung noch durch eine Kapazitätsmessung, konkrete Aussagen über lokale Schwachstellen in der Isolation oder Alterungseffekte treffen lassen.

Gegenüber der Verlustfaktormessung stellt die Teilentladungsmessung ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Isolationsqualität dar. Sie erlaubt weitaus detailliertere Aussagen über die Beschaffenheit von Isolationsstrecken. Diese Messung erweist sich als besonders aufschlussreich, da Lufteinschlüsse, wie sie im Gießharz entdeckt wurden, die Ausbildung isolationsschädigender Teilentladungen begünstigen. Diese können, wie in Unterkapitel 3.1 beschrieben, bei häufigem Auftreten über längere Zeit zum Durchschlagen der Isolation führen [14].

### 2.3 Thema der Arbeit

Im Rahmen dieser Studie soll ein Verständnis dahin gehend aufgebaut werden, was Teilentladungen sind und inwiefern sich mithilfe des Teilentladungsmessgeräts Defekte in einer Kondensatorisolation ermitteln lassen. Zudem soll herausgefunden werden, ob sich auf Basis der Messergebnisse eine Aussage über die Art und die Schädlichkeit der Teilentladungen treffen lässt. Darüber hinaus soll ermittelt werden, ob dadurch dann auch ein bevorstehender Ausfall mit hinreichender Sicherheit vorhergesagt werden kann.

Zu diesem Zweck sollen Grenzwerte herausgearbeitet werden, auf deren Basis eine Restlebensdauerabschätzung möglich ist. So soll in Zukunft eine noch bessere Absicherung des Beschleunigerbetriebs gewährleistet werden.

Einleitend werden Teilentladungen und ihrer Messung beleuchtet. Dies soll auch fachfremden Lesern die Möglichkeit geben, die Ergebnisse dieser Abhandlung zu verstehen und beurteilen zu können. Es folgt eine Beschreibung des untersuchten Hochspannungskondensators. Ergänzend wird das Netzwerk beschrieben, in dem der Kondensator verbaut ist. Damit soll eine Brücke zwischen der in der Einleitung geschilderten groben Übersicht des technischen Gesamtsystems und der Detailansicht geschlagen werden. Weiterführend wird die Vorbereitung der Teilentladungsmessung erläutert. Dabei wird auf den Messaufbau, das Messgerät, Einstellungen am Messgerät, den Kalibriervorgang, aber auch auf die Ziele und den Ablauf der Messung eingegangen. Darüber hinaus werden getätigte Vorfeldmessungen veranschaulicht. Diese liefern relevante Anhaltspunkte über den Erwartungswert einer Teilentladungsmessung an Hochspannungskondensatoren. Des Weiteren wird dargestellt, welche Faktoren untersucht wurden, um dessen Auswirkungen auf

das Ergebnis der Messung zu evaluieren. Anschließend sind dann die Ergebnisse der darauffolgenden Hauptuntersuchung in Hinblick auf die Zielsetzung der Messung und dieser Arbeit diskutiert. Im letzten Kapitel findet sich eine Zusammenfassung der Erkenntnisse dieser Studie.

# 3 Einführung in Teilentladungen und Teilentladungsmessungen

## 3.1 Teilentladungen

### 3.1.1 Allgemeine Definition

Teilentladungen (TE) sind Entladungen, die nur einen Teil der Isolationsstrecke betreffen und nicht sofort zum Durchschlag führen [14]. Sie können in allen Arten elektrischer Isoliersysteme auftreten, also in festen, flüssigen sowie auch in gasförmigen Isolationsmedien.

Unter dem Überbegriff „Teilentladungen“ sind verschiedene Entladungsarten zu verstehen. Grundsätzlich wird zwischen inneren (internen) und äußeren (externen) TE unterschieden. Abbildung 3.1 ist eine Übersicht über die unterschiedlichen Typen zu entnehmen.



Abbildung 3.1: Arten von Teilentladungen [21]

Im Zusammenhang mit TE finden sich in der Literatur häufig die Begriffe Spitze-Platte-Anordnung, Nadel-Platte-Anordnung, Platte-Platte-Anordnung, seltener auch Stab-Platte- oder Kugel-Platte-Anordnungen (siehe auch Abbildung 3.2). Die Geometrie der Elektro-

den bestimmt dabei den Homogenitätsgrad des Feldes, der für die Bildung der jeweiligen Typen von TE-Arten ist [5][7]. Dieser Zusammenhang wird in Abschnitt 3.1.2 erläutert.

#### 3.1.2 Teilentladungsarten und ihre Ursachen

Maßgeblich für die Art der TE sind die äußerlich angelegte Form der Betriebsspannung, die Schlagweite sowie die vorherrschende Elektrodengeometrie, die den Homogenitätsgrad  $\eta$  des elektrischen Feldes bestimmt.

#### **Koronaentladung**

Für eine Koronaentladung bedarf es eines stark inhomogenen Feldes, so wie es in einer Spitze-Platte Anordnung entsteht (siehe Abbildung 3.2). Hierbei treten an der spitzen Elektrode hohe Feldstärken auf, die dann zu Koronaentladungen führen, sobald die Zündbedingung erfüllt ist [14].

Für ein relevantes Auftreten von Koronaentladungen muss die Koronaeinsatzspannung  $U_e$  möglichst deutlich niedriger liegen als die Durchschlagsspannung  $U_d$  liegen, wie es nur bei stark inhomogenen Feldern der Fall ist. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 3.2 deutlich. Daraus geht hervor, dass sich bei zunehmender Homogenität des elektrischen Feldes Koronaeinsatz- und Durchschlagsspannung einander immer stärker annähern. Ab dem Homogenitätsgrad, ab dem die Koronaeinsatz- und Durchschlagsspannung identisch sind kommt es bei Erreichen der Koronaeinsatzspannung zum sofortigen Durchschlag und nicht zu den drei ineinander überlaufenden typischen Entladungsformen, wie dies Abbildung 3.3 veranschaulicht ist.

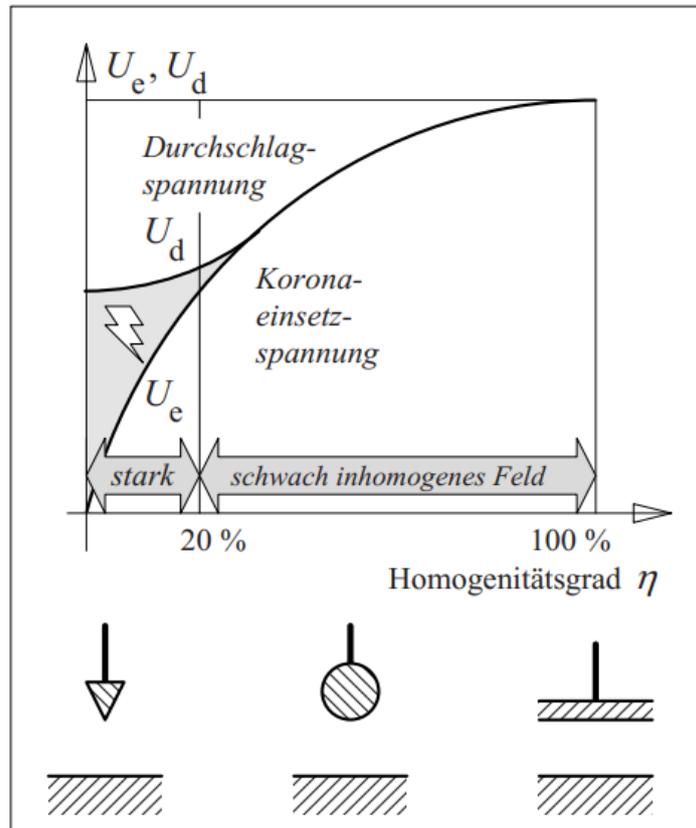


Abbildung 3.2: Koronaeinsetz- und Durchschlagsspannung im inhomogenen Feld [14]

Bei niedrigen Spannungen bilden sich dabei zuerst Glimmentladungen, dann Streamer-Entladungen (auch als Büschelentladungen bezeichnet) aus, bevor schließlich Leader-Entladungen entstehen. Der Zusammenhang zwischen dem Existenzbereich der drei Entladungsformen, dem Elektrodenabstand (auch als Schlagweite bezeichnet) sowie der notwendigen Durchschlags- und Einsetzspannungen ist in Abbildung 3.3 veranschaulicht. Die Unterschiede zwischen dem Spannungsverlauf bei Annahme einer positiven Elektrode und einer negativen Elektrode resultieren aus den grundsätzlich verschiedenen physikalischen Mechanismus, die dem Entladungseinsatz zugrunde liegen. Küchler liefert hierzu in seinem Werk „Hochspannungstechnik Grundlagen-Technologie-Anwendungen“ eine ausführliche Erklärung [14].

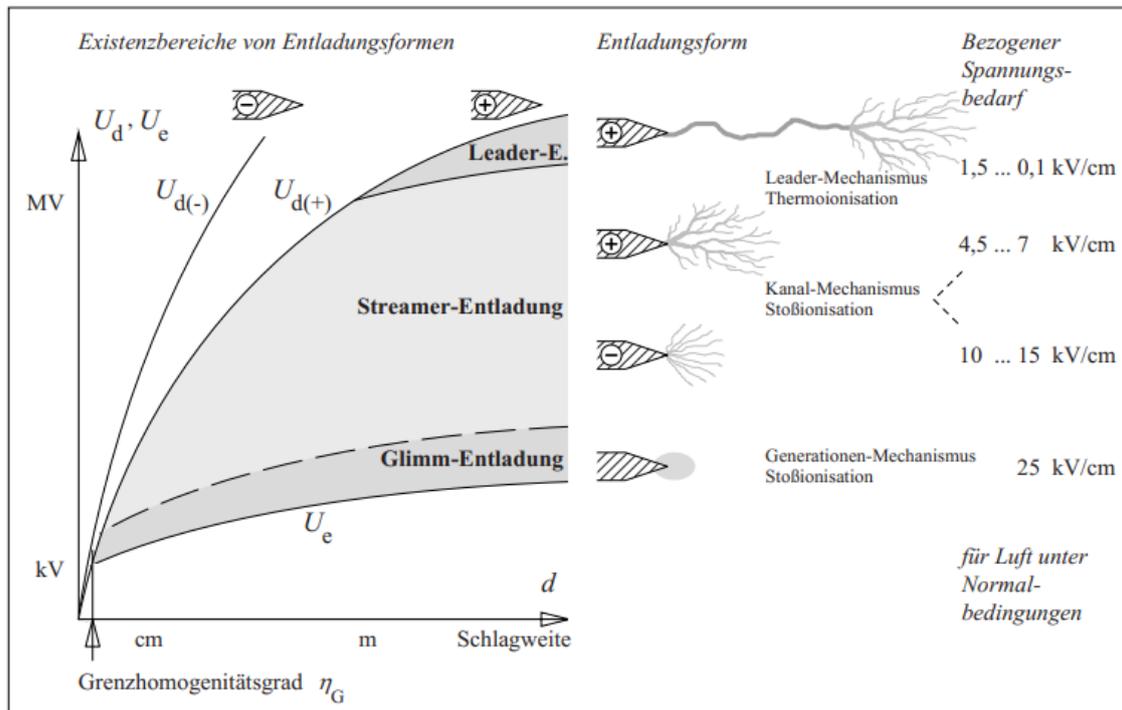


Abbildung 3.3: Existenzbereiche von TE in luftisolierten Spitze-Platte-Anordnungen (schematisch): Einsatz- und Durchschlagspannung als Funktion der Schlagweite für positive und negative Spitzen (links); Entladungsformen und der darauf bezogene Spannungsbedarf (rechts) [14]

### Oberflächenentladung

Oberflächenentladungen, auch als Gleitentladungen bezeichnete TE, entstehen an Übergängen geschichteter Materialien. Beispiele sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Links im Bild sorgt eine spitz auslaufende Elektrode für hohe Feldstärken an der Grenzfläche. Rechts im Bild sorgt eine sich gekrümmt ablösende Elektrode für eine Feldverdrängung, welche zu einer Feldkonzentration in dem Punkt führt, in dem sich die drei geschichteten Materialien (Elektrode, Isolator, Luft) treffen. Dieser Punkt wird auch als Tripel-Punkt bezeichnet. Von diesem Punkt aus können schon bei niedrigen Spannungen Glimm-Entladungen entstehen, die sich mit steigender Spannung zu vollständigen Oberflächenentladungen ausweiten. Die Entladung ergibt sich dabei immer parallel zum geschichteten Material [14].

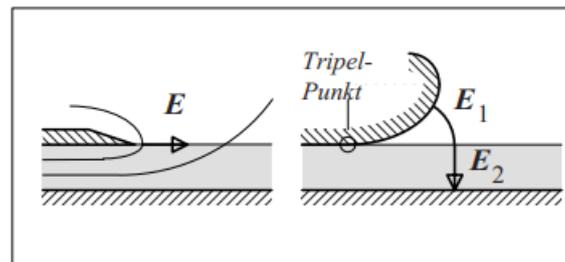


Abbildung 3.4: Gleitentladungsanordnung mit tangential und normal gerichteter Feldbelastung des Isolators [14]

Oberflächenentladungen treten beispielsweise in Zylinderkondensatoren an den Grenzflächen des geschichteten Kondensatormaterials aus Metallfolie oder metallisierter Folie sowie dem Isolationsmaterial auf (siehe Abbildung 3.5).

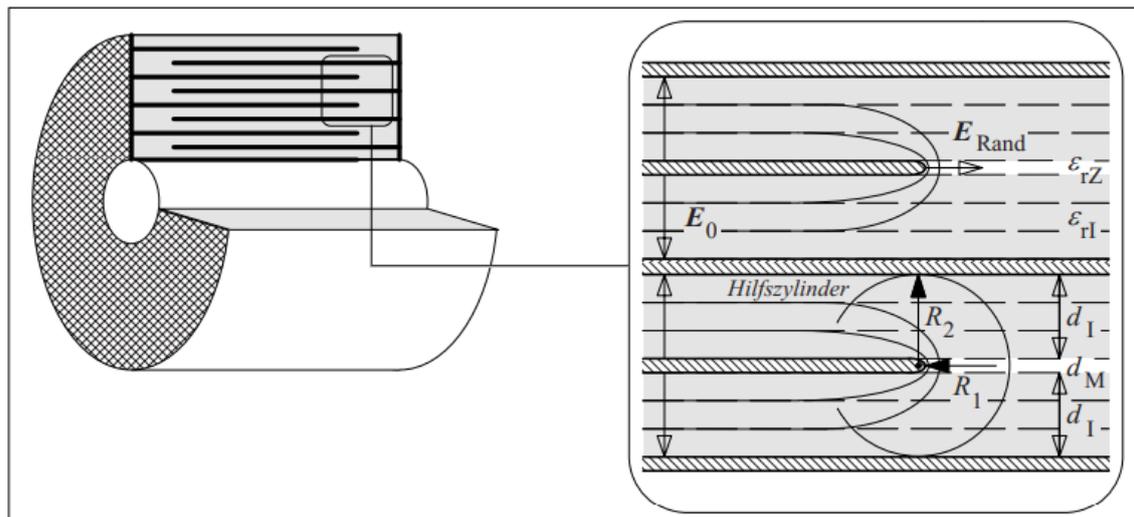


Abbildung 3.5: Zylinderkondensator mit Stirnkontaktierung der gegeneinander versetzt geschichteten Kondensatorplatten [14]

Oberflächenentladungen weisen, ebenso wie Koronaentladungen, die drei Entladungsstufen Glimmen, Streamer und Leader auf. Die Länge der Leader-Entladung hängt dabei von der Höhe der Spannung ab und steigt bei Wechselspannungsbelastung über den Verlauf der Sinushalbwellen vom Nulldurchgang bis zum Scheitelwert an. Oberflächenentladungen lassen sich daher anhand der damit einhergehenden, sich erhöhenden Entladungsintensität im Phase Resolved Partial Discharge Pattern (PRPD-Pattern), auch als PRPD-

Diagramm oder TE-Muster bezeichnet, adäquat identifizieren (siehe auch Anhang A) [1][14]. PRPD-Diagramme werden in Unterkapitel 3.2 beleuchtet.

#### **Hohlraumentladungen**

Hohlraumentladungen können in flüssigen oder festen Isolationsmaterialien auftreten. Hohlräume können beispielsweise durch den Einschluss von Gasen während des Fertigungsprozesses oder die Bildung von Blasen in flüssigen Isolationsmedien entstehen. Bei Hohlraumentladungen kommt es aufgrund der annähernd homogenen Feldverteilung nicht zu TE-formen wie Glimmentladungen, Streamer-Entladung oder Leader-Entladungen, sondern zum sofortigen Durchschlagen der gasgefüllten Isolationsstrecke. Hohlraumentladungen treten bei Wechselspannungsbelastung vermehrt im Bereich der Nulldurchgänge der Wechselspannung auf, da dort die Spannungsänderung  $\frac{dU}{dt}$  gerade am höchsten ist und können darüber anhand des PRPD-Musters erkannt werden (siehe auch Anhang A). Die Folgen von Hohlraumentladungen werden in Abschnitt 3.1.5 erläutert.

#### **Electrical Treeing (Bäumchenbildung)**

Bäumchenbildung, häufig auch als Electrical Treeing bezeichnet, tritt in festen Isolationsmedien auf. Damit sich ein Electrical Tree ausbilden kann, muss innerhalb des Isolationsmaterials eine hohe Inhomogenität des Feldes herrschen. Dies ist unter anderem der Fall, wenn Fremdkörper im Isolationsmaterial eingeschlossen sind (siehe Abbildung 3.10). Ist die Feldstärke an der Spitze der Inhomogenität höher als die Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmaterials, bildet sich ein Ionisationskanal, der in Richtung des Feldes gerichtet ist und ein Teilstück der Isolationsstrecke durchschlägt. Von der Spitze des gebildeten Kanals ausgehend, setzt sich die Ausbildung von Durchschlagskanälen fort. Dieser Prozess wiederholt sich mehrfach und führt zu der typischen Baumstruktur. Wie TE in Hohlräumen fester Isolationsmedien zur Ausbildung von Electrical Trees führen, wird in Abschnitt 3.1.5 veranschaulicht. Ein Beispiel für Electrical Trees in einem festen Isolationsmaterial ist Abbildung 3.6 zu entnehmen.

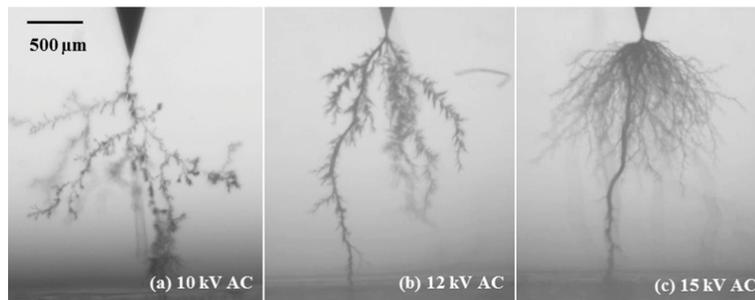


Abbildung 3.6: Ausbildung von Electrical Trees in Polyethylen bei 10 kV, 12 kV und 15 kV bei einer Spitze-Platte-Anordnung [22]

Das Aussehen der entstehenden Baumstruktur wird durch das Verhältnis aus angelegter Spannung und der Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmaterials beeinflusst. Die benötigte Zeitdauer, für einen vollständigen Durchschlag sinkt mit steigender Spannung.

### 3.1.3 Analytisches Modell von Hohlräumentladungen

Über das analytische Modell lässt sich bildhaft der Wirkungsmechanismus von Hohlräumentladungen innerhalb einer Fehlstelle erklären. In der Realität finden sich dann meist mehrere Fehlstellen innerhalb der Isolationsstrecke, sodass sich die TE überlagern. Mit hin kann über die von außen messbare Größe (den Nachladestrom, siehe Abschnitt 3.3.4) keine Aussage, über die meist komplexen Geometrien der einzelnen Fehlstellen getroffen werden.

Analytisch können TE bei Wechselspannungsbetrachtung durch ein einfaches kapazitives Ersatzschaltbild (ESB) beschrieben werden (siehe auch Abbildung 3.7) [14]. Das ESB ergibt sich aus der Annahme, dass das Verhalten der Fehlstelle in diesem Fall durch das dielektrische Verschiebungsfeld dominiert wird. Es kann durch eine Serienschaltung aus Kondensatoren beschrieben werden. Bei Gleichspannungsbetrachtung wäre ein stationäres Strömungsfeld anzunehmen, das durch eine Serienschaltung aus Widerständen erklärt werden kann [14].

Das ESB ist in Abbildung 3.7 veranschaulicht.

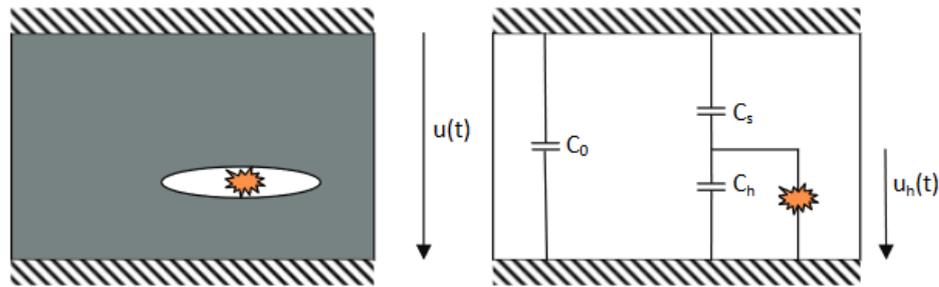


Abbildung 3.7: Ersatzschaltbild einer inneren Teilentladung [17]

Die Kapazität  $C_0$  spiegelt die Gesamtkapazität des Dielektrikums wieder. Die an ihr anliegende Spannung  $u(t)$  entspricht der von außen angelegten Betriebsspannung. Die Teilkapazitäten aus der Fehlstellenkapazität  $C_h$  und der Kapazität  $C_s$  des restlichen homogenen Dielektrikums bilden zusammen eine Serienschaltung. Die Gesamtspannung teilt sich ungleich auf die beiden Kondensatoren entsprechend einem kapazitiven Spannungsteiler auf. Die kleinste Kapazität wird mit der größten Spannung belastet. Die Größenverhältnisse zwischen  $C_s$  und  $C_h$  lassen sich wie folgt beschreiben:

$$C_h \ll C_s \quad (3.1)$$

### 3.1.4 Ablauf von Hohlraumentladungen

Der Ablauf einer TE-Aktivität in einem Hohlraum, siehe Abbildung 3.7, bei Anlegen einer sinusförmigen Spannung  $u(t)$ , kann wie folgt beschrieben werden:

1. Die von außen angelegte Betriebsspannung  $u(t)$  entspricht der Spannung an  $C_0$  und auch der Spannung über der Reihenschaltung aus  $C_s$  und  $C_h$ . Die Spannung steigt nun an, bis die Zündspannung  $U_Z$ , zur Überbrückung der Isolationsstrecke in  $C_h$  erreicht ist. Daraufhin kommt es zu einer TE. Diese hält an, bis die Spannung auf die Löschespannung  $U_L$  zusammengebrochen ist. Die Nachladung der Hohlraumkapazität  $C_h$  erfolgt anschließend über  $C_s$ . Dieser Vorgang wird auch als Spannungsverschiebung  $\Delta U = U_Z - U_L$  bezeichnet.
2. Der Ladevorgang der Hohlraumkapazität  $C_h$  beginnt daraufhin wieder von Neuem und kann sich bis zum Erreichen des Spitzenwerts der Spannung mehrfach wiederholen. Sobald sich die äußerlich angelegte Spannung ihrem Scheitelpunkt nähert, nimmt die Ladungsgeschwindigkeit der Hohlraumkapazität ab und der Einsatz der TE verzögert sich.

3. Die beim Erreichen des Scheitelwerts, der Betriebsspannung gezündete TE entlädt den Kondensator bis zu seiner Löschspannung. Da die Spannung  $u(t)$  nun wieder sinkt, muss auch die Spannung an  $u_h(t)$  und  $u_s(t)$  fallen. Da die Kapazität  $C_h$  jedoch bereits annähernd entladen ist, liegt an ihr bereits vor Erreichen des Nulldurchgangs von  $u(t)$ , eine negative Spannung an. Sobald die negative Spannung an  $C_h$ , dem Wert der negativen Zündspannung entspricht, kommt es erneut zum TE-Einsatz, der sich wiederum bis zum Erreichen des Scheitelwerts von  $u(t)$  mehrmals wiederholen kann.

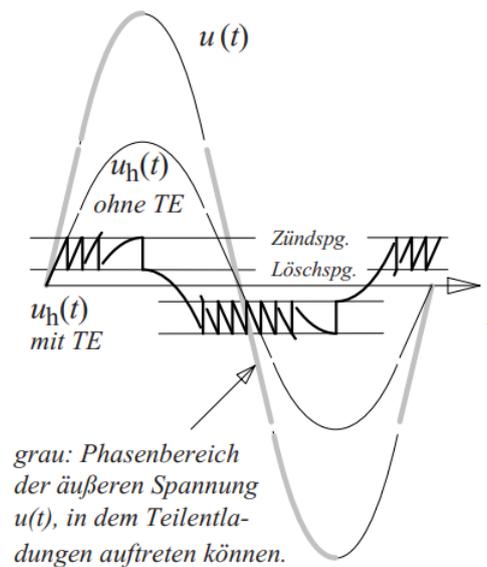


Abbildung 3.8: Spannungsverläufe bei inneren Teilentladungen [14]

Insbesondere zu den Zeitpunkten, zu denen die Spannungsänderung  $\frac{dU}{dt}$  am größten ist, kommt es zum häufigen TE-Einsatz. Dies leitet sich daraus ab, dass in einem solchen Fall die Kapazität  $C_h$  besonders schnell und damit besonders häufig in kurzer Zeit auf die Zündspannung  $U_Z$  aufgeladen werden kann.

### 3.1.5 Schädlichkeit von Hohlrumentladungen und Electrical Trees

Teilentladungen in Hohlräumen sind die schädlichste Art von TE, da sie zur Ausbildung von Electrical Trees führen können. Dabei hängt die Schädlichkeit von TE in Hohlräumen grundsätzlich von zwei Faktoren ab. Diese sind der Energieumsatz  $W_{TE}$  einer TE und die Impulswiederholffrequenz  $N$ .

Die bei einer TE umgesetzte Energie lässt sich dabei wie folgt beschreiben:

$$W_{\text{TE}} = \frac{1}{2} \cdot q_{\text{mess}} \cdot \Delta U_{\text{hub}} \quad (3.2)$$

Dabei entspricht  $\Delta U_{\text{hub}}$  dem Spannungshub zwischen zwei aufeinander folgenden TE innerhalb eines Hohlraums [14]. Da Isolationsmaterialien in der Praxis häufig über eine Mehrzahl an Fehlstellen verfügen, ist eine Zuordnung von gemessenen TE-Impulsen zu einem bestimmten Hohlraum meist nicht möglich. Dennoch kann die Berechnung des Energieumsatzes bei Durchführung eines isolierten Experiments zur Klassifizierung der Standhaftigkeit von Isolationsmaterialien herangezogen werden. Ebenfalls ist die Berechnung verwertbar, wenn eindeutig ermittelt werden konnte, dass nur eine Fehlstelle im untersuchten Isolationsmaterial existiert.

Zur Einschätzung der Schädlichkeit von TE durch erosive Alterung ist das Produkt aus TeE-Intensität und Impulswiederholfrequenz ein probates Referenzkriterium. Mit der Gleichung 3.3 wurde der Referenzwert für empfindliche organische Isolationsmedien bestimmt. Es gilt, dass TE bis zu einer Höhe von 33 pC/s nicht schädlich sind [14].

$$N \cdot q_{\text{mess}} = 2 \text{ nC/min} = 33 \text{ pC/s} \quad (3.3)$$

Der Zusammenhang gilt sowohl für Wechsel- als auch für Gleichspannung [14].

Vereinfacht kann die durch den Energieumsatz der TE bewirkte Alterung am Beispiel eines Gaseinschlusses innerhalb einer Kabelisolierung erklärt werden. Der mit der elektrischen Alterung einhergehende Schädigungsverlauf ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Dabei bedingten TE in einem Gaseinschluss eine schrittweise Erosion der Isolierung, die letztlich zu deren Durchschlagen führte.

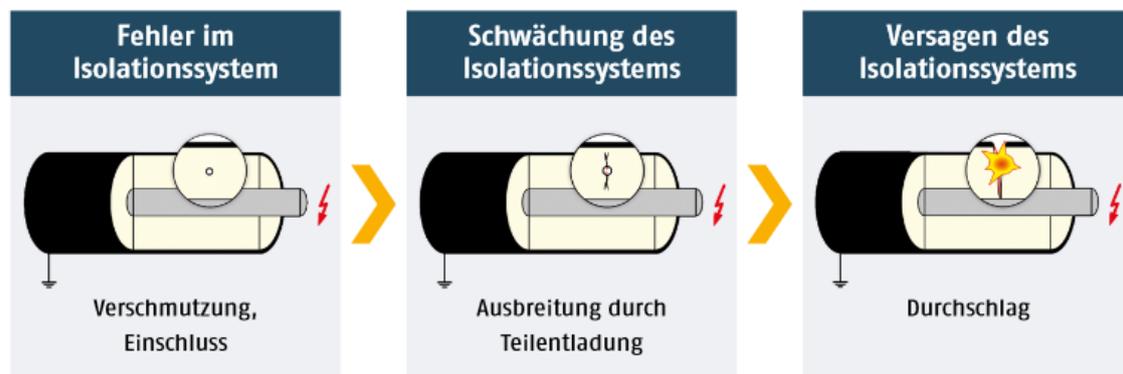
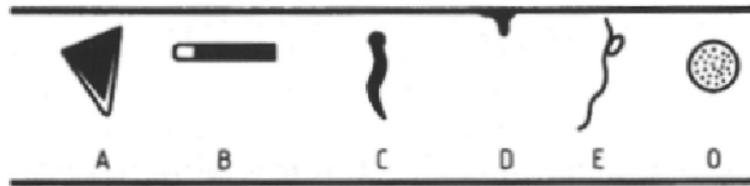


Abbildung 3.9: Schädigungsverlauf von Teilentladungen [20]

Detailliert kann der Schädigungsverlauf in festen Isolationssystemen wie folgt veranschaulicht werden: Aus Inhomogenitäten innerhalb der Isolierung (siehe Abbildung 3.10) kann eine beschleunigte Alterung von Isolationsstrecken resultieren, da sie als Grundlage für die Ausbildung von Electrical Trees fungieren. Voraussetzung für die Entstehung eines Electrical Trees ist die Bildung eines durch Erosion des Isolationsmaterials entstehenden trichterförmigen Freiraums. Herbeigeführt wird die Erosion durch Elektronen und Ionen, die bei der TE auf die Oberfläche des Isolationsmaterials treffen. Ein Trichter bildet sich meist von der Spitze einer Inhomogenität aus, da dort die Feldstärke am höchsten ist. Es dauert Stunden oder sogar Jahre, bis sich ein solcher Trichter ausgebildet hat. Ist die Feldstärke an der Spitze des Trichters dann schließlich größer als die Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmaterials entsteht über ein kurzes Stück der Isolierung hinweg ein Durchschlagskanal. Von der Spitze des Durchschlagskanals ausgehend, bildet sich dann wiederum erneut ein Durchschlagskanal über ein kurzes Stück der Isolierung hinweg. So entwickelt sich stufenweise ein immer größerer Electrical Tree. Dieser Prozess geht innerhalb einiger Sekunden oder Minuten vonstatten. Ab dem Zeitpunkt, zu dem der Electrical Tree beide Elektroden miteinander verbindet, kommt es zum vollständigen Durchschlag der Isolationsstrecke [12].



- A** Leitfähiges Material, schlecht mit Isolationsstoff verbunden
- B** Isolierendes Material, schlecht mit Isolationsstoff verbunden
- C** Leitfähiges und scharfkantiges Objekt
- D** Ausbuchtung an Elektrode
- E** Faser
- O** Einschluss geringer dielektrischer Stärke

Abbildung 3.10: Inhomogenitäten in festen Isolationsmaterialien [12]

### 3.1.6 Messbare Alterungseffekte innerer Teilentladungen

Da TE elektrische und thermische Arbeit am Isolationsmedium verrichten, kommt es mit der Zeit am Innenraum des Gaseinschlusses zu einer Veränderung der Materialeigenschaften. Der Innenraum der Gaseinschlüsse ist dann mit einer Schicht aus leitfähigem Material überzogen, dessen genaue Zusammensetzung vom verwendeten Isolierstoff abhängt. Dieser Prozess äußert sich in der Herabsetzung der TEE und bewirkt bei voranschreitender Alterung in immer kürzeren Abständen auftretende TE [7][10].

Ein Vergleich der Impulswiederholrate an produktgleichen Prüflingen liefert daher einen Anhaltspunkt über den Fortschritt von Alterungsprozessen. Sind die durchschnittliche Anzahl an TE-Events neuwertiger Bauteile und die letzte bekannte Anzahl an TE-Events isolationsdefekter Bauteile bekannt, kann ein Zusammenhang zur erwartbaren Restlebensdauer hergestellt werden.

### 3.1.7 Problemstellung

Die Messung von TE und die Interpretation der Messergebnisse ist ein noch nicht vollständig verstandener Prozess. Immer noch gilt es, folgende essenzielle Fragen zu beantworten:

- An welchem Ort befindet sich die TE-Ursache?

- Welche Fehlerart liegt vor?
- Wie stark wirkt sich eine Schädigung aus?
- Wie lässt sich eine Unterscheidung von sich überlagernder Fehlerursachen vornehmen?
- Welche Auswirkungen haben die gemessenen Kenngrößen auf die Restlebensdauer?  
[14]

## 3.2 Teilentladungsmessung (allgemein)

### 3.2.1 Einsatzgebiete

Teilentladungsmessungen kommen beispielsweise in den Bereichen Produktqualitätskontrolle, der Kontrolle in Bezug alterungs- oder eventbedingte Isolationsschäden und der Lokalisierung von TE-Ursachen zum Einsatz. In der Literatur werden Transformatoren, rotierende Maschinen und Hochspannungskabel als häufigste Prüflinge genannt. Die bei TE-Messungen aufgenommenen Kennwerte und Diagramme können korrekt eingesetzt einen entscheidenden Beitrag zur Wirtschaftlichkeit leisten [14]. Unvorhergesehene, vorzeitige Ausfälle können vermieden und effiziente Wartungszyklen etabliert werden.

### 3.2.2 Detektionsvarianten von Teilentladungen

Teilentladungen können über verschiedene Verfahren detektiert werden. Zu diesen gehören die chemische, fotosensitive, akustische und die elektrische Detektion. Für unterschiedliche Isolationsmedien eignen sich dabei unterschiedliche Detektionsverfahren.

Bei der chemischen Detektion können TE in flüssigen Isolationsmedien nachgewiesen werden, indem die Konzentration des Zerfallsprodukts des Isolationsmaterials gemessen wird. Die Messart eignet sich für flüssige Isolationsmaterialien, da es hier zu einer adäquaten Verteilung der Zerfallsprodukte durch die stetige Durchmischung des Isolationsmaterials kommt.

Die fotosensitive Detektion von TE eignet sich hingegen besonders insbesondere für gasförmige Isolationsmaterialien. Hier wird mit fotosensitiven Sensoren die beim Auftreten

von TE emittierte ultra violette (UV) Strahlung detektiert. Dadurch können beispielsweise in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) TE lokalisiert werden. In speziellen Testaufbauten kann die optisch ermittelte Position der TE-Quelle, der elektrisch gemessenen TE-Intensität zugeordnet werden. Hierfür wird zusätzlich zum elektrischen Messaufbau eine UV-Kamera eingesetzt. Demnach kann diese Messung auch als ergänzende Messung herangezogen werden, um die elektrisch gemessenen Ergebnisse zu verifizieren und TE-Quellen besser unterscheiden zu können.

Bei der akustischen Ultraschalldetektion werden meist mehrere Sensoren auf dem Betriebsmittelgehäuse verteilt oder um das freiliegenden Betriebsmittel herum aufgestellt. Sie detektieren die durch TE entstehenden Ultraschallwellen. Mithilfe der Messung können TE bis auf 1 m genau lokalisiert werden. Häufig kommt diese Technik bei größeren Transformatoren und freistehenden Schaltanlagen zum Einsatz.

Die elektrische Detektion von TE wird allgemein als das Standardmessverfahren bezeichnet. Es ist das einzige in den internationalen Normen anerkannte Messverfahren und Bestandteil einiger produktspezifischer Normen. Bei dieser Messmethodik wird die Ladung gemessen, die aufgebracht werden muss, um die Kapazität der Fehlstellen nachzuladen (siehe auch Abschnitt 3.3.7).

## 3.3 Teilentladungsmessung (elektrisch)

### 3.3.1 Varianten der elektrischen Teilentladungsmessung

Bei elektrischen TE-Messungen kann grundsätzlich zwischen Offline- und der Online-Messung differenziert werden. Während die Offline-Messung am abgekoppelten Betriebsmittel durchgeführt wird, kann mittels einer Online-Messung auch ein Betriebsmittel im laufenden Betrieb getestet werden. Nach derzeitigem Stand ist die offline Messung am etabliertesten. Dies begründet sich aus der ohnehin komplizierten Ergebnisanalyse, die bei einer Messung durch Störeffekte zusätzlicher Betriebsmittel im Messaufbau noch erschwert wird. Auch die Verwendung nicht sinusförmiger Betriebsspannungen würde die Interpretation erschweren, was in Abschnitt 3.3.2 und Abschnitt 3.3.3 erläutert wird.

Die aktive Messung bietet sich folglich für Bereiche an, in denen eine Abschaltung des Betriebsmittels für ausgedehnte Messungen nicht möglich ist oder diese mit sehr hohen wirtschaftlichen Verlusten verbunden wäre. Eine Unterkategorie der aktiven Messung bildet das Online-Monitoring. Hierbei wird ein Prüfling über längere Zeit oder sogar durchgängig, im laufenden Betrieb auf TE getestet. Dieses Verfahren befindet sich allerdings

noch in der Entwicklung und wird hauptsächlich für das Überwachen von Hochspannungskabeln des Energienetzes verwendet.

#### 3.3.2 Prüfspannungsformen

Generell können verschiedene Prüfspannungsformen für eine elektrische TE-Messung genutzt werden. Während Wechselspannung zu der am häufigsten eingesetzten Spannungsform gehört, werden auch Spannungsformen wie Gleich-, Rechteck- und Stoßimpulsspannungen herangezogen.

Da die verwendete Prüfspannung starken Einfluss auf die TE-Aktivität nimmt, hat sich unter dem Aspekt der Vergleichbarkeit die Verwendung einer einheitlichen Prüfspannungsform durchgesetzt. Bei der klassischen TE-Messung kommt ausschließlich eine sinusförmige Wechselspannung zum Einsatz. Diese hat gegenüber anderen Spannungsformen mehrere Vorteile, wenn es um die Deutung der Messergebnisse geht (siehe Unterkapitel 3.2). Es ist ferner zu erwähnen, dass bereits Literatur über die Umrechnung von mit Wechselspannung gemessenen Kenngrößen, in bei Gleichspannung gemessenen Kenngrößen existiert. Gleichwohl kommt es bei diesem Verfahren zu eher ungenauen Ergebnissen.

Zu den Vorteilen einer sinusförmigen Wechselspannung zählen beispielsweise die Simplizität der Generierung einer solchen Spannungsform. Darüber hinaus bietet eine bipolare Spannung den Vorteil, die Polarität der TE zu erfassen, was Aufschluss über die Art der TE gibt (siehe Abschnitt 3.2). Ferner weist eine sinusförmige Wechselspannung eine verhältnismäßig geringe Spannungssteilheit auf, sodass Ladungsträger ausreichend Zeit für ihre Verschiebung haben. Auf diese Weise produziert eine solche Spannungsform zuverlässigere und besser zu deutende Ergebnisse. Besonders nützlich ist diese Eigenschaft bei der Ermittlung der TEE und TEA. Diese Kennwerte können unter Anwendung einer Gleichspannung aufgrund der dort verhältnismäßig hohen Spannungssteilheit überhaupt nicht oder lediglich sehr unzuverlässig bestimmt werden. Da sich Prüflinge bei Gleichspannung auch in anderen Kennwerten der wechsellspannungsbasierten TE-Messung unterscheiden, sind in der Norm IEC 60270 auch gänzlich unterschiedliche Kenngrößen zur Interpretation der Isolationsqualität empfohlen.

Grundsätzlich bietet die Wechselspannungsprüfung nicht nur beim Messen, sondern auch bei der Interpretation zahlreiche Vorteile. Durch die etablierte Verwendung sinusförmiger Prüfspannungen ist daher mittlerweile ein großes Portfolio an Hilfestellungen und Mes-

sergebnissen vorhanden, die dem Erkenntnisgewinn über die Ursache und den Typ der TE zuträglich sind.

#### 3.3.3 Frequenzauswahl

Bei der klassischen TE-Messung finden mittlerweile zwei gängige Konzepte Verwendung. Sie haben sich als Antwort auf die unterschiedlichen Leistungsanforderungen an den Prüfspannungsgenerator ergeben. Prüflinge mit einer hohen Kapazität weisen hohe Blindleistungsverluste auf [14]. Unter Einsatz der Netzfrequenz oder höheren Frequenzen wird dann eine hohe Nennscheinleistung des Prüfgenerators notwendig. Dies erfordert den Einsatz schwererer, immobiler Generatoren. Die maßgeblich durch die Frequenz der Prüfspannung beeinflussten Blindleistungsverluste lassen den Einsatz sehr kleiner Frequenzen sinnvoll erscheinen. Im englischen Sprachgebrauch werden diese als Very Low Frequencies (VLFs) bezeichnet.

Alternativ zur Nutzung der VLF-Technik bietet sich die Verwendung der eigentlichen Betriebsfrequenz der Prüflinge an. Der Vorteil ist die gute Übertragbarkeit der Messwerte auf das Verhalten des Prüflings im Betrieb. Hier tritt jedoch wie erwähnt das Problem auf, dass durch die begrenzte Nennscheinleistung des Prüfspannungsgenerators nicht jeder Prüfling gemessen werden kann. Besonders bei Prüflingen des Stromnetzes, wie Hochspannungskabeln ist dies ein Problem. Die Kabel weisen gängigerweise Kapazitätsbeläge von  $0,1 \mu\text{F}/\text{km}$  bis  $0,3 \mu\text{F}/\text{km}$  auf. Somit werden häufig Kapazitäten einiger Mikrofarad erreicht. Dies ist für den Einsatz mobiler Prüfgeneratoren meist zu viel. Viele Hersteller liefern Messsysteme nur für kapazitive Lasten im Bereich einiger Nanofarad. Um eine gute Vergleichbarkeit mit möglichst vielen elektrischen Betriebsmitteln zu ermöglichen, wird unabhängig von den Vorteilen, der Nutzung der Betriebsfrequenz, der Einsatz der VLF-Technik empfohlen [1]. Diese eignet sich für Messungen von Prüflingen, mit einer kapazitiven Last im Mikrofaradbereich.

#### 3.3.4 Messgröße der Teilentladungsmessung

In Hinblick auf die Erfassung von TE hat sich als Messgröße die scheinbare Ladung  $q_s = \int i_s(t) dt$  einer einzelnen TE durchgesetzt [1]. Sie kann im Vergleich zur tatsächlichen Ladung  $q = \int i_{\text{TE}}(t) dt$  relativ leicht erfasst werden. Denn die scheinbare Ladungsmenge entspricht dem an den Elektroden des Prüflings gemessenen Nachladestroms einer TE.

In der Praxis entspricht dieser Strom jedoch der Summe aller Nachladungen, welche aus der Überlagerung gleichzeitig auftretender TE resultiert.

Damit die scheinbare Ladung möglichst genau der gemessenen Ladung  $q = \int i_{\text{mess}}(t) dt$  entspricht muss die, durch die TE anfallende Nachladungsmenge ausreichend schnell bereitgestellt werden. Dies ist der Fall, wenn das Verhältnis zwischen Prüflingskapazität  $C_a$  und Koppelkapazität  $C_k$  der Bedingung in Gleichung 3.4 folgt.

$$C_k \gg C_a \quad (3.4)$$

Dann gilt näherungsweise:

$$i_{\text{mess}} \approx i_s \quad (3.5)$$

Nach Integration des Nachladestroms über die Zeit ergibt sich die Integrale Größe, der gemessenen scheinbaren Ladung  $q_{\text{mess}}$ , welche als Teilentladungsintensität (TEI) bezeichnet wird. Aus der Erfassung dieser Größe werden weitere Kenngrößen abgeleitet, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

#### 3.3.5 Abgeleitete Kenngrößen

Aus der Messung der scheinbaren Ladung können wichtige Kenngrößen abgeleitet werden.

##### **Impulswiederholrate ( $n$ )**

Die Impulswiederholrate ist definiert, als die Summe aller aufgezeichneten TE-Events über einem fest definierten Zeitintervall [1].

##### **Impulswiederholfrequenz ( $N$ )**

Die Impulswiederholfrequenz ist definiert, als die Anzahl an TE pro Sekunde. Der Gebrauch dieser Kenngröße ist nur erlaubt, wenn die aufgenommenen Impulse äquidistant zueinander sind [1].

##### **TEE ( $U_i$ )**

Die TEE (TEE) ist definiert, als die Spannung, bei der es das erste Mal zum wiederholten Auftreten von TE kommt. Zur Aufnahme der Kenngröße wird eine Spannung weit unterhalb der TEE an den Prüfling angelegt und langsam auf eine Spannung knapp über der

TEE gesteigert [1][14]. Im englischen Sprachgebrauch wird die TEE als Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) bezeichnet.

#### **TEA ( $U_e$ )**

Die TEA (TEA) ist definiert, als die Spannung, bei der keine TE mehr auftreten. Zur Ermittlung der Kenngröße wird eine Spannung oberhalb der TEA auf eine Spannung unterhalb der TEA abgesenkt [1][14]. Im englischen Sprachgebrauch wird die TEE als Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV) bezeichnet.

#### **Größte wiederholt auftretende Teilentladungsstärke**

Die Größte wiederholt auftretende Teilentladungsstärke ist definiert, als die höchste gemessene Entladungsintensität. Sie muss einer vorgegebenen Impulsfolgeantwort entsprechen, wie näher in der IEC 60270 definiert [1].

#### **Phasenwinkel ( $\Phi_i$ )**

Bezeichnet den Phasenwinkel der Prüfspannung, zu dem eine TE auftritt. Dieser wird im sogenannten Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Diagramm visualisiert. Der Phasenwinkel berechnet sich aus der Zeit  $t_i$ , zu der die TE über die Phase aufgetreten ist und der Periodendauer  $T$  der TE-Prüfspannung. Die Zeit  $t_i$  wird immer ab dem Nulldurchgang der ins positive startenden Prüfspannung gezählt [1]. Der Phasenwinkel  $\Phi$  wird in Grad angegeben.

$$\Phi_i = 360 \cdot (t_i/T) \quad (3.6)$$

#### **Akkumulierte scheinbare Ladung ( $q_a$ )**

Die Summe aller, innerhalb eines definierten Zeitraums aufgezeichneter scheinbarer Ladungen, die einen festgelegten Grenzwert überschreiten [1].

#### **TE-Impulszahl ( $m$ )**

Die Anzahl aller, innerhalb eines definierten Zeitraums aufgezeichneter scheinbarer Ladungen, die einen festgelegten Grenzwert überschreiten [1].

### **3.3.6 Stand der Normen**

In der aktuellen Norm zur Messung von Teilentladungen IEC 60270 ist noch kein definierter Prüfablauf für die Messung eines Prüflings beschrieben. Lediglich eine Empfehlung ist zu finden, welche Kenngrößen bei Wechsel- oder Gleichspannungsbeanspruchung zur

Beurteilung der TE-Schädlichkeit heranzuziehen sind. Auch Grenzwerte lassen sich in der Norm IEC 60270 keine finden, hier wird auf die produktspezifischen Normen verwiesen. In der internationalen Produktnorm für Hochspannungskondensatoren IEC 61071 werden TE-Messungen noch nicht berücksichtigt. Insgesamt wird darin in zwei Textpassagen auf TE eingegangen. Darin wird auf deren Gefahr in Bezug auf eine Senkung der Lebenserwartung hingewiesen [2].

### 3.3.7 Messaufbau und Kalibrierung

Die TE-Messung wird in Anlehnung an die Norm IEC 60270 durchgeführt. Dafür wird die Messung nach dem in Abbildung 3.11 dargestellten Schema aufgebaut.

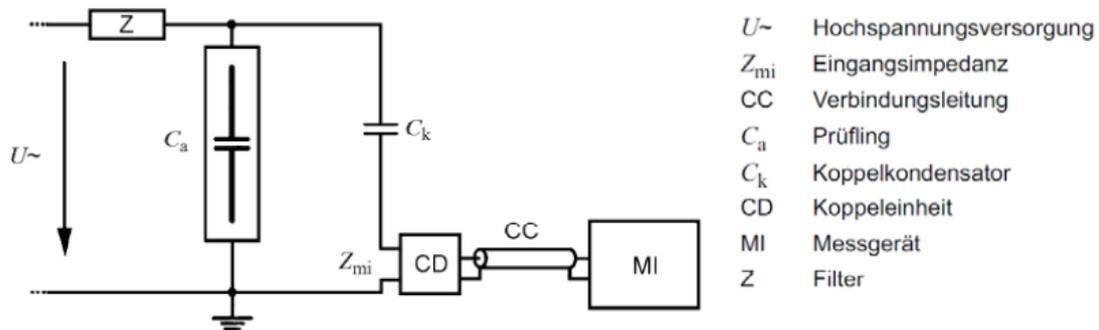


Abbildung 3.11: Norm Prüfaufbau der Teilentladungsmessung [1]

Der Messaufbau ist wie folgt gedacht. Die Prüfspannung  $U_{\sim}$  wird parallel zum Prüfling  $C_a$  und dem Zweig aus Koppelkondensator  $C_k$  und Koppereinheit, auch Coupling Device (CD) genannt angelegt. Das in Reihe zum Prüfgenerator geschaltete Filter, hier als Impedanz (Z) dargestellt, soll mögliche Störungen auf der Prüfspannung  $U_0$  dämpfen. Der Koppelkondensator soll die Prüfspannung bei TE-Aktivität stabilisieren und liefert die benötigte Ladungsmenge  $\Delta Q$ . Diese Ladungsmenge wird nötig, um die scheinbare Ladung der TE-Aktivität nachzuladen. Über die Eingangsimpedanz des Messgerätes  $Z_{mi}$  werden die Teilentladungsstromimpulse in Spannungspulse gewandelt und über das Coupling Device, auch Koppereinheit genannt ausgekoppelt. Die Koppereinheit, ein Hochpass, sperrt dabei die niederfrequente Prüfspannung. Somit werden nur die hochfrequenten TE-Impulse über die Messleitungen (CC) zum Messgerät geleitet. Diese werden dann vom Messgerät digital aufbereitet und ausgewertet.

Vor jeder Änderung am Messaufbau muss eine normgerechte Kalibrierung durchgeführt werden. Dadurch wird der Referenzpegel der TE-Intensität festgelegt. Ebenfalls wird mit Hilfe der Kalibrierung der Faktor zur Korrektur der Leitungsdämpfung berechnet. Nur durch den Korrekturfaktor, wird die scheinbare Ladung richtig angezeigt.

In Abbildung 3.12 ist das Anschlussschema für eine normgerechte Kalibrierung dargestellt.

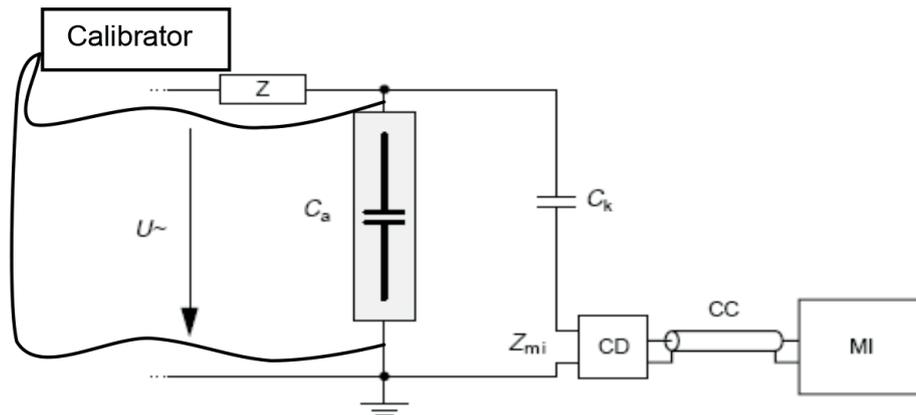


Abbildung 3.12: Norm Prüfaufbau einer Kalibrierung [15]

Der Triggerpegel des Messsystems, ab dem Signalamplituden erfasst werden sollen wird nach jeder Kalibrierung auf den in der Norm IEC 60270 empfohlenen Wert von 20 pC festgelegt [1]. Damit detektiert das Messsystem auch kleine TE-Impulsamplituden. Die Messwerte liegen bei einem Triggerpegel von 20 pC meist außerhalb des Grundstörpegels.

#### 3.3.8 Störeinflüsse

Nach Küchler gibt es eine Vielzahl an möglichen Störquellen, welche das Messergebnis der TE-Messung verfälschen können [14]. Der örtlich nahe Betrieb von Gleich- oder Umrichtern kann sich besonders störend auf die TE-Messung auswirken. Bei der Wahl des Messplatzes sollte darauf geachtet werden, dass sich solche elektrischen Betriebsmittel nicht in der Nähe des Prüffeldes befinden [1].

In der Norm IEC 60270 ist zudem das Vorgehen zur störfreien Messung wie folgt beschrieben:

„Falls nicht anders festgelegt:

- a) muss die Oberfläche der äußeren Isolierung des Prüflings sauber und trocken sein, da Feuchtigkeit und Verschmutzungen auf Isolierstoffoberflächen Teilentladungen verursachen können, und
- b) sollte der Prüfling während der Prüfung Umgebungstemperatur aufweisen.“ [1]

Zudem gilt, dass mechanische, thermische und elektrische Beanspruchungen vor der Prüfung das Messergebnis beeinflussen. Um eine gute Reproduzierbarkeit zu erreichen, sollten Pausen zwischen mehreren, am selben Prüfling nacheinander durchgeführten, TE-Messungen eingelegt werden [1].

#### 3.3.9 Versuchstypen

Für die elektrische TE-Messung haben sich drei Versuchstypen zur Teilentladungsanalyse bewährt. Zu diesen zählen der Hystereseversuch, der Spannungssteigerungsversuch und der Dauerspannungstest [14].

##### **Hystereseversuch**

Das als Hystereseversuch bezeichnete Prüfschema besteht aus einer kaskadierten Erhöhung und Absenkung der Prüfspannung  $U_0$ . Ziel des Versuchs ist die Ermittlung der TEE und TEA. Bei der Prüfung wird die Prüfspannung nur geringfügig über die TEE hinaus erhöht und anschließend wieder abgesenkt. Durch Aufnahme der TEE und TEA kann das Verhältnis der beiden Größen zueinander bestimmt werden, was wie in Abschnitt 3.3.10 beschrieben, unter anderem Rückschlüsse auf ein Vorhandensein von Korona oder Hohlraumentladungen zulässt. Das Ablaufschema eines Hystereseversuchs ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

##### **Spannungssteigerungsversuch**

Beim Spannungssteigerungsversuch wird der Scheitelwert der Prüfspannung kaskadiert erhöht. Dabei lassen sich Zusammenhänge zwischen der TE-Intensität und der anliegenden Spannung ausmachen. Darüber kann herausgefunden werden, wie groß mögliche

Hohlräume in der Isolation sind und ob es zu Oberflächenentladungen kommt. Zudem entstehen während des Spannungssteigerungsversuchs die PRPD-Diagramme.

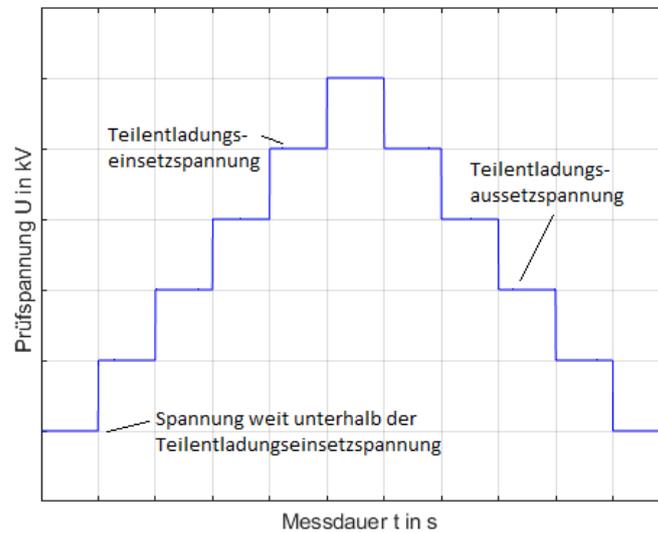


Abbildung 3.13: Ablauf eines Hystereseversuchs

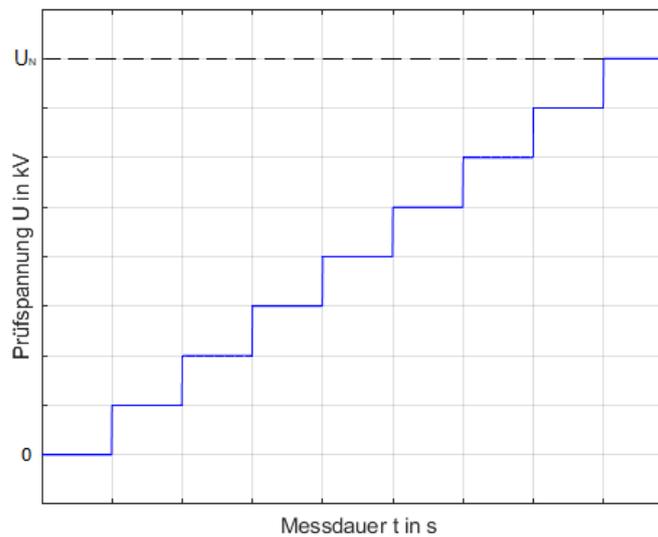


Abbildung 3.14: Ablauf eines Spannungssteigerungsversuch

#### Dauerspannungstest

Bei einem Dauerspannungstest entspricht die Prüfspannung meist der für den Prüfling vorgesehenen Betriebsspannung oder der Nennspannung. Das Teilentladungsverhalten verändert sich über den Verlauf des Versuchs meist deutlich und kann Rückschlüsse auf die Schädlichkeit von TE liefern [14].

Eine weitere Variante des Dauerspannungstests stellt die Erhöhung der Prüfspannung auf einen Wert oberhalb der Nennspannung da. Hier lässt sich ein möglicher Schädigungsverlauf in beschleunigter Form beobachten. Der Test gilt bei  $U_0 > U_N$  nicht mehr als „nicht schädigend“.

Der Prüfzeitraum erstreckt sich dabei meist über mehrere Tage. Der Scheitelwert der Prüfspannung wird über den Verlauf des Tests nicht verändert und bleibt konstant. Von besonderem Interesse ist der Verlauf der TE-Intensitäten und die Anzahl an TE-Events über dem Versuchszeitraum, siehe Abschnitt 4.3.

Sollte während des Dauerspannungstests keine Veränderung der Messwerte erkennbar sein, kann die TE-Aktivität als nicht bedeutsam eingestuft werden. Ist eine Veränderung der Größen TE-Intensität und der Impulswiederholrate erkennbar, so können Erkenntnisse zur Restlebensdauer gewonnen werden. Die über den Verlauf des Dauerspannungstests aufgetretenen Messwerte dienen später als Orientierungshilfe, um die Isolationsqualität anderer Prüflinge zu kategorisieren. Über den Vergleich lässt sich der Prüfling auf der Zeitachse seiner Gesamtlebensdauer einordnen, sodass seine Restlebensdauer abgeschätzt werden kann.

Der Dauerspannungstest sollte immer nach dem Hysterese- und Spannungssteigerungsversuch durchgeführt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich das TE-Verhalten des Prüflings durch die intensive Beanspruchung für längere Zeit verändert.

Dauerspannungstests wurden im Umfang dieser Arbeit aufgrund ihres hohen zeitlichen Aufwands nicht durchgeführt.

#### 3.3.10 Interpretation von Teilentladungsmessgrößen

Über die drei typischen Kennwerte, die im Zusammenhang mit TE-Messungen unter Verwendung von Wechselspannung aufgenommen werden, lassen sich unterschiedliche Rückschlüsse auf die Isolationsqualität und die TE-Ursachen ziehen. In Abbildung 3.15

sind die Zusammenhänge zwischen der TEI, TEE sowie TEA und der dazugehörigen TE-Ursache veranschaulicht.

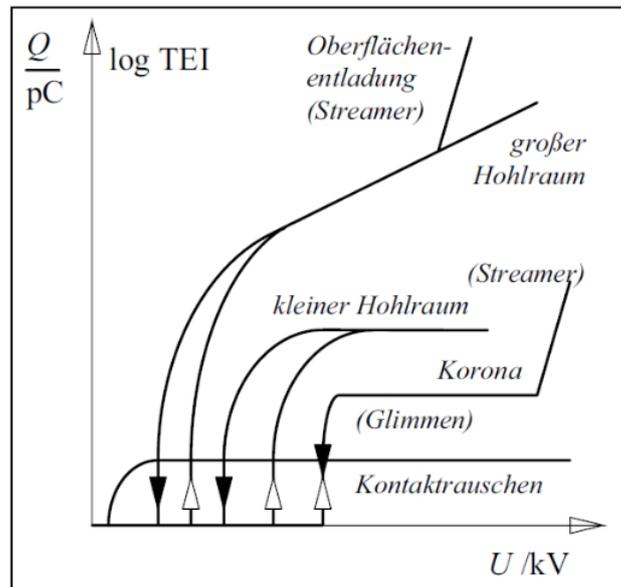


Abbildung 3.15: Charakteristische Kurvenverläufe der Teilentladungsintensität, Teilentladungseinsetz- (weißer Pfeil) und TEA (schwarzer Pfeil) in Abhängigkeit der angelegten Spannung [14]

Anhand der Distanz zwischen der TEE und der TEA lässt sich beispielsweise für innere TE eine Aussage über die Größe der Hohlräume treffen. Große Hohlräume lassen sich durch nahe aneinander liegende Spannungspegel erkennen, während kleine Hohlräume weiter auseinander liegende Ein- und Aussetzspannungen hervorbringen. Dass die TEA kleiner sein kann, als die TEE beruht darauf, dass TE auch noch auftreten können, wenn der Scheitelwert der Hohlraumspannung nicht mehr die Zündspannung  $U_z$  erreicht [14]. Dies resultiert aus der Spannungsverschiebung um  $\Delta U$ , die mindestens einmal pro Prüfspannungshalbwelle auftritt. Der Zusammenhang der Spannungsverschiebung um  $\Delta U$  wird näher in Abschnitt 3.1.4 erklärt. Durch die Verschiebung der Hohlraumspannung um  $\Delta U$  pro Spannungshalbwelle ist eine theoretische Differenz von 50 % zwischen der TEE und der TEA möglich. In der Praxis treten Differenzen von 10 bis 35 % auf [14]. Kontaktrauschen, dass auch durch mangelhafte Messaufbauten an Anschlüssen entstehen kann ist zudem über seine niedrige Startspannung und durch seine konstante TEI über der Spannung gekennzeichnet.

Koronaentladungen können ebenfalls über die drei Kenngrößen erkannt werden und sind durch eine sehr hohe TEE und eine damit identische TEA charakterisiert.

Da innerhalb einer Isolierung jedoch meist eine Vielzahl an Fehlstellen existiert, überlagern sich die Erkennungsmuster und lassen häufig nur einen Trend erkennen. Es ist daher auch möglich, dass sich keine Aussage über die TE-Ursache treffen lässt [14].

Aufschluss über weitere Informationen zur vorliegenden Teilentladungsart liefert ein PRPD-Diagramm, wie in Anhang A dargestellt. Die in den PRPD-Diagrammen dargestellte idealisierte Verteilung von TE-Events, über die Phase einer sinusförmigen Messspannung, hat sich zur Erkennung der vorliegenden Teilentladungsart etabliert.

Das liegt unter anderem daran, dass das Auftreten von TE-Events einer statischen Streuung unterliegt [14]. Über die Einfärbung, der im PRPD-Diagramm entstehenden Cluster-Wolken, deren Definition im Glossar zu finden ist, kann aber dennoch auf die Verlässlichkeit und Bedeutsamkeit der TE-Aktivität geschlossen werden. Weiterhin kann über die Phasenlage der Cluster-Wolken und den dazugehörigen Amplitudenverhältnissen (siehe Abschnitt 3.3.11), eine Aussage über die Position der Fehlerursache getroffen werden.

Voraussetzung für die Verwertbarkeit eines PRPD-Patterns ist, wie bereits erwähnt, die Verwendung einer oberwellenarmen sinusförmigen Spannung niedriger Frequenz. Diese Spannungsform bietet mehrere Vorteile zur Analyse von TE und hat sich dementsprechend als Messspannung etabliert. Zu den Vorteilen einer niederfrequenten sinusförmigen Spannung zählen unter anderem der regelmäßige Wechsel der Spannungspolarität, die Bipolarität der Spannung, die geringe Steilheit der Spannung sowie die begrenzte Geschwindigkeit des Polaritätswechsels der Spannung.

Durch die geringe Steilheit der Spannung können TEE und TEA mit einer sehr guten Auflösung aufgenommen werden.

Niedrige Frequenzen eignen sich darüber hinaus nicht nur um hohe Blindleistungsverluste des Prüflings zu vermeiden, sondern auch damit Polarisierungseffekte der Dielektrika dem Polaritätswechsel der Spannung folgen können.

Durch den Polaritätswechsel können durch die Prüfspannung geladene Bereiche in und am Prüfling entladen werden. Auf diese Weise kann im Gegensatz zur Messung mit Gleichspannung ein erneutes Auftreten von TE erreicht werden.

Die Vorteile der Bipolarität der Wechsellspannung werden nachfolgend erläutert.

### 3.3.11 Teilentladungsortung

Mithilfe der Spannungspolarität lässt sich erkennen, zu welcher Elektrode die TE-Ursache Kontakt hat. Dies soll am Beispiel einer Hohlraumladung kurz erklärt werden. In Abbildung 3.16 ist hierzu das für Hohlraumladungen typische Verteilungsmuster von TE über die Phase der Prüfspannung dargestellt.

Sollte der Hohlraum Kontakt zu der positiven Hochspannungselektrode haben, so äußert sich dies in TEI, die in der positiven Halbwelle, um das Dreifache größer sind als in der negativen Halbwelle.

Sollte die negative Elektrode Kontakt zur Fehlstelle haben so ergibt sich gerade ein gegenteiliges Bild und die Entladungshöhe ist in der negativen Halbwelle um mindestens, das Dreifache größer als in der positiven Halbwelle.

Sollte der Hohlraum zu keiner der beiden Elektroden Kontakt haben, unterscheiden sich die Amplituden, der positiven und negativen Halbwelle um einen Faktor, der kleiner ist als 3 [14].

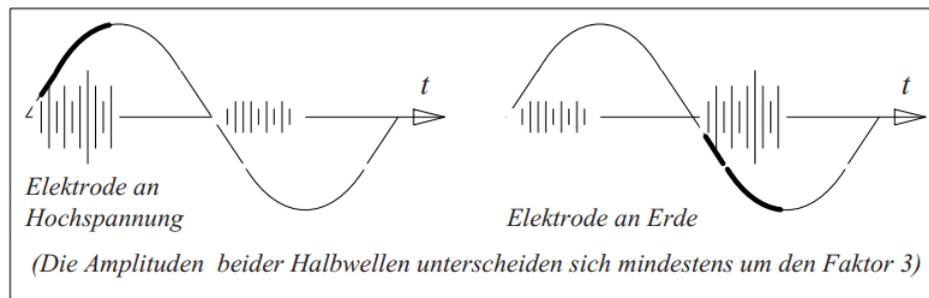


Abbildung 3.16: PRPD-Pattern einer Teilentladung in einem Hohlraum [14]

Durch die Einigung auf eine sinusförmige Messspannung lässt sich in der Fachliteratur und in Software-Datenbanken eine Vielzahl an Vergleichsergebnissen finden.

Weitere Erkennungsmuster wie in Abbildung 3.16 sind in Anhang A aufgelistet.

### 3.3.12 Lebensdauerabschätzung

Es existieren mehrere Modelle zur Ermittlung der Lebensdauer von Isolationsstrecken. In der Norm Elektrische Isolierstoffe und Isoliersysteme (IEC 62068) werden Methoden beschrieben, auf deren Basis die Lebensdauer einer elektrischen Isolation berechnet werden kann. Grundlage der Berechnung sind statistisch bestimmte Konstanten, die im

Zusammenhang mit der angelegten Spannung die zu erwartende Lebensdauer der Isolationsstrecke und damit auch des elektrischen Betriebsmittels ergeben [3]. Als Methoden für die Errechnung von Betriebsmittellebensdauern werden zwei mathematische Formelzusammenhänge genannt.

Die erste Methode beruht auf einer Potenzfunktion:

$$L = k \cdot U^{-n} \quad (3.7)$$

Erläuterung der Parameterbedeutung [3]:

$L$  Lebensdauer

$k$  Konstante

$U$  Anliegende Spannung

$n$  Konstante (Lebensdauerkoeffizient)

Der zweite Zusammenhang geht von einem exponentiellen Zusammenhang aus, dieser wird jedoch deutlich seltener genutzt [17][3]:

$$L = A \cdot e^{-h \cdot U} \quad (3.8)$$

Sowohl  $A$  als auch  $h$  entsprechen aufzufindenden Konstanten.

In Gleichung 3.7 wird die Spannung  $U$  als Bezugsgröße herangezogen. Dieser Zusammenhang kann bei Annahme einer homogenen Feldverteilung oder bei einer unbekanntem Feldstärkebelastung verwendet werden. Aussagekräftiger ist das in der Literatur als Inverse Power Law (IPL) bezeichnete Gesetz, das denselben mathematischen Zusammenhang zugrunde legt, anstelle der Spannung wird hingegen die elektrische Feldstärke als Bezugsgröße genutzt.

$$L = k \cdot E^{-n} \quad (3.9)$$

Dabei beschreibt  $E$  die anliegende elektrische Feldstärke, auch als Stressfaktor bezeichnet,  $k$  entspricht einer aufzufindenden Konstante,  $n$  dem Lebensdauerkoeffizienten und  $L$  der verbleibenden Restlebensdauer [12].

Um eine Linearisierung des IPL durchführen zu können, kann das Gesetz wie folgt umgeschrieben werden [10]:

$$\log L = \log k - n \cdot \log E \quad (3.10)$$

Dabei entsprechen die Ausdrücke der Gleichung 3.10 folgenden Parametern der Geradengleichung [17]:

- $y = \log L$
- $x = \log E$
- $m = -n$
- $b = \log k$

Die angenommene Abhängigkeit zwischen der Lebensdauer  $L$  in Abbildung 3.17 als Lebensdauer  $t$  betitelt und der elektrischen Feldstärke  $E$  ist bei doppeltlogarithmischer Axenskalierung linear abnehmend, wie in Abbildung 3.17 links dargestellt. Eine Relativierung dieses Gesetzes liefert Sumereder, der deutlich macht, dass das IPL nur bis zu einem Schwellwert der elektrischen Feldstärke  $E_0$  Bestand hat (siehe Abbildung 3.17 rechts). Dies begründet sich aus der Annahme, dass eine elektrisch herbeigeführte Alterung nur beim Auftreten von TE-Prozessen möglich ist. Diese können erst ab Überschreiten der TEE auftreten, ab der dann auch erst die Feldstärke  $E_0$  anliegt [7][18].

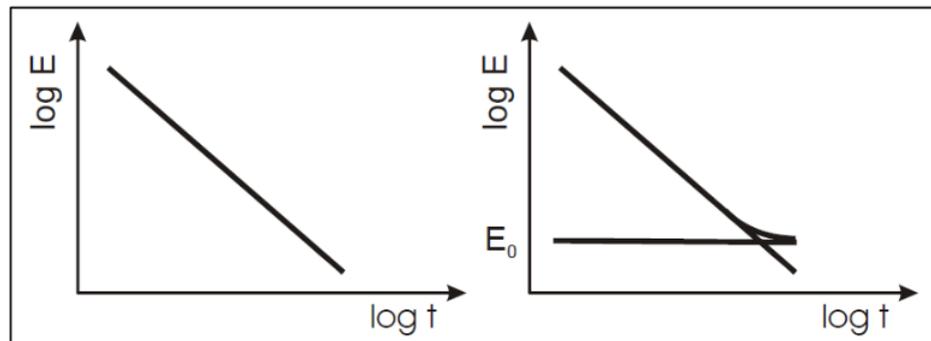


Abbildung 3.17: Inverse Power Law original (links) und abgewandelt nach Sumereeder (rechts) [7]

Es wird darauf verwiesen, dass es unter Anwendung des IPL zu einer Unsicherheit von 20 bis 30 % kommt [7]. Die tatsächliche Verteilung entspricht einer Punktwolke, die um die bestimmte Kurve herum liegt.

Die Weibullverteilung ist ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Lebensdauer. Der Einsatz der Weibullverteilung setzt indes den Ausfall von mindestens  $(\frac{n+1}{2})$  [gerade Anzahl an Prüflingen] oder  $(\frac{n}{2} + 1)$  [ungerade Anzahl an Prüflingen] der untersuchten Prüflinge voraus. Nur dann kann mittels der Verteilung eine verlässliche Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit eines elektrischen Betriebsmittels getroffen werden [3].

### 3.3.13 Problemlösungen

Die in Abschnitt 3.1.7 aufgezählten Fragestellungen gelten grundsätzlich für alle Arten von Prüflingen. Dabei unterscheiden sich die Antworten auf diese Fragen stark in Abhängigkeit von der Art des Prüflings.

Für die Lokalisierung der TE-Ursache existiert für Koaxialkabel bereits ein bewährtes Verfahren. Die Technik nennt sich Partial Discharge Site Location (PDSL), was frei übersetzt so viel wie Teilentladungs-Positions-Lokalisation bedeutet. Hierbei wird über die Laufzeit des TE-Impulses und seiner Reflektion am Ende der Leitung, die Position des Teilentladungsursprungs berechnet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle des TE-Impulses ist dabei überall im Kabel gleich groß, da das Kabel über die gesamte Strecke identisch aufgebaut ist. Für komplexere Anordnungen von Leitern und Dielektrika kann das PDSL-Verfahren nicht angewendet werden. Unterschiedliche

Ausbreitungsgeschwindigkeiten verhindern dabei eine korrekte Lokalisation. Für viele Prüflinge eignet sich zur Lokalisierung der TE-Ursache, das so genannte Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Diagramm (siehe auch Abschnitt 3.2). Über das Diagramm kann ermittelt werden, ob die TE-Ursache näher zur positiven oder zur negativen Elektrode orientiert ist. Gepaart mit einer Analyse möglicher lokaler Schwachstellen kann damit die Position der Fehlerursache eingegrenzt werden.

Wie schädigend sich TE auswirken, kann meist nur durch Praxiserfahrung oder einen Dauerspannungstest bestimmt werden. Dauerspannungstests werden in Abschnitt 3.3.9 beleuchtet. Mit einem Dauerspannungstest lässt sich ein möglicher Schädigungsverlauf in beschleunigter Form beobachten. Sollte während des Versuchs keine Veränderung der Messwerte erkennbar sein, kann die TE-Aktivität als nicht bedeutsam eingestuft werden. Ist eine Veränderung der Größen TE-Intensität und Impulswiederholrate erkennbar, können Erkenntnisse zur Restlebensdauer gewonnen werden. Die über den Verlauf des Dauerspannungstests aufgetretenen Messwerte werden dabei mit den Messwerten eines aktuellen Prüflings verglichen. Dieser wird dann auf der Zeitachse hinsichtlich seiner Gesamtlebensdauer eingeordnet und so seine Restlebensdauer abgeschätzt.

Eine Unterscheidung von Fehlerursachen kann ebenfalls über ein PRPD-Diagramm erzielt werden (siehe auch Unterkapitel 3.2). Dabei darf sich das Verhalten der unterschiedlichen TE-Ursachen nicht ähneln. Beste Voraussetzungen für eine Analyse der Fehlerursache sind gegeben, wenn PRPD-Vergleichsmuster baugleicher elektrischer Betriebsmittel vorliegen.

# 4 Vorstellung des Hochspannungskondensators

## 4.1 Der Hochspannungskondensator als Teil des Anpassnetzwerks

Der Hochspannungskondensator ist Bestandteil des in der Einleitung beschriebenen APNs. Nachfolgend sollen die Montageart, Verschaltung und Umgebungsbedingungen des Kondensators veranschaulicht werden. In Abbildung 4.1 ist der Schaltplan des APNs mit dem zu untersuchenden Kondensator (C1) dargestellt.

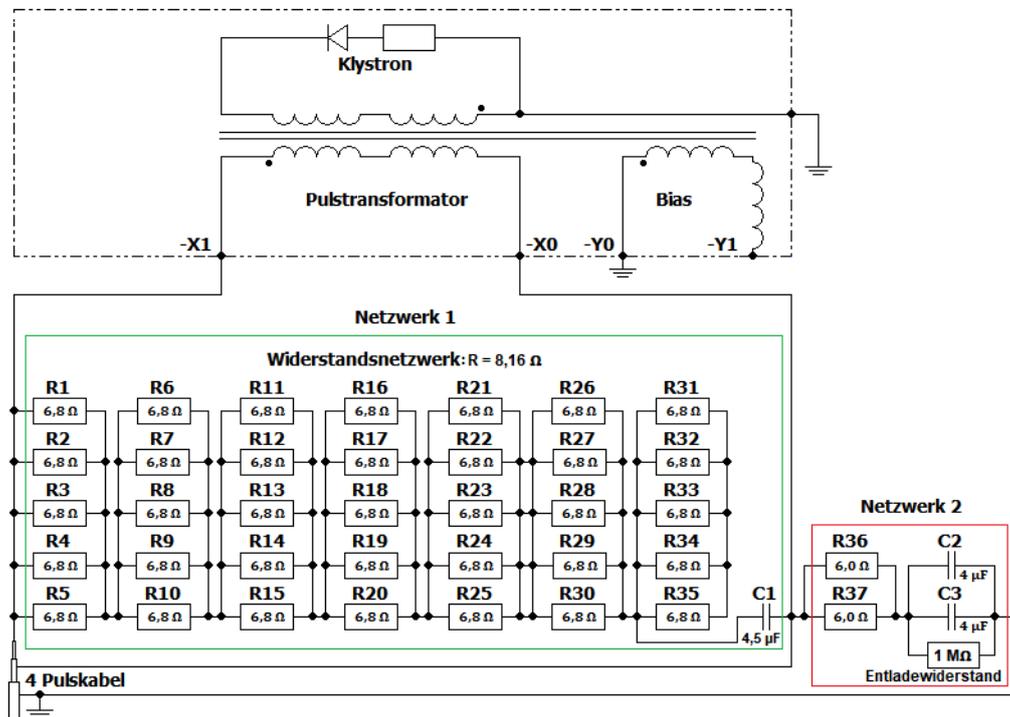


Abbildung 4.1: Schaltplan des Anpassnetzwerks in Anlehnung an [19]

#### 4 Vorstellung des Hochspannungskondensators

---

Der in einem Aluminiumgehäuse verpackte Kondensator (Abbildung 4.2 rechts) ist im Betrieb auf einer nicht leitfähigen Montageplatte zusammen mit dem Widerstandsnetzwerk (Abbildung 4.2 links) verbaut. An den Seiten des Kondensators sind aus Aluminium gefertigte Kühlplatten angebracht, die an die lokale Wasserkühlung angeschlossen sind. Das Kondensatorgehäuse ist über die auf der rechten Seite angebrachte Kühlplatte gerettet, auf der außerdem die zwei Leistungswiderstände des Netzwerks 2 angebracht sind. Auf der Rückseite der Montageplatte sind zudem noch die Kondensatoren des Netzwerks 2 zu finden.

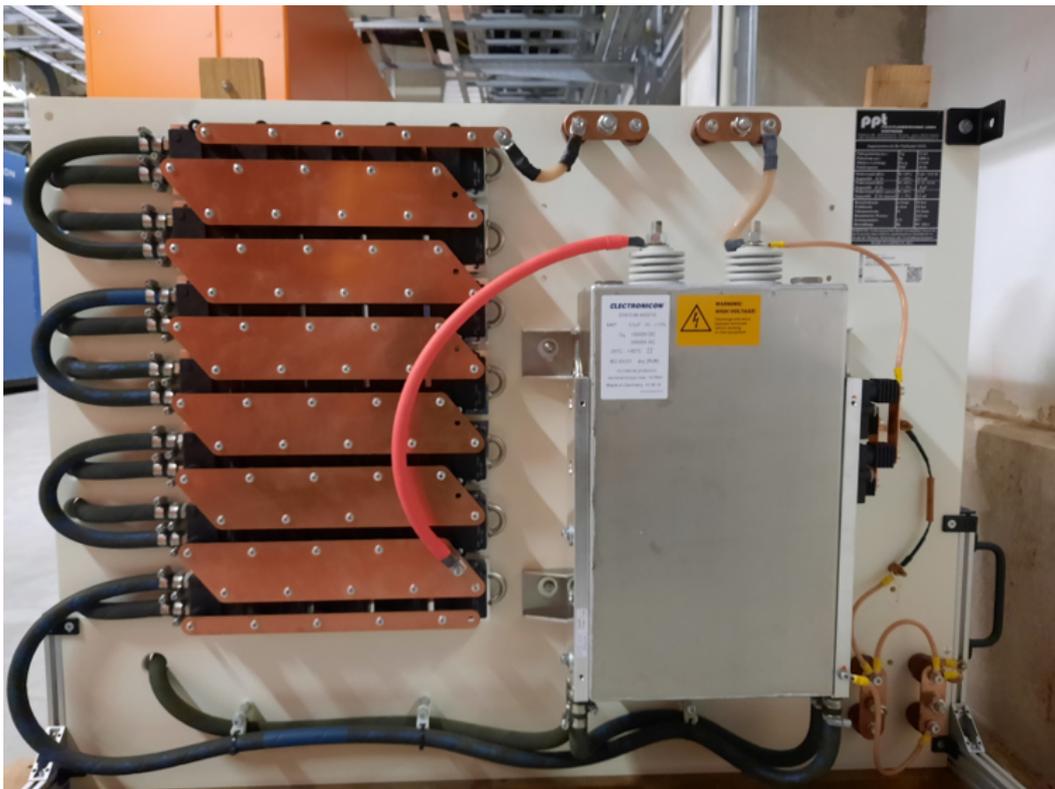


Abbildung 4.2: Frontansicht eines Anpassnetzwerks

Das APN ist im Gehäuse des Pulstransformators verbaut, in dem die Umgebungstemperatur bei durchschnittlich 30 °C liegt. Die Kühlwassertemperatur beträgt dabei ebenfalls ungefähr 30 °C.

## 4.2 Beschreibung des Kondensatoraufbaus

Das Kondensatorgehäuse hat ohne Montagebeine, Kühlplattenanschlusschrauben, Elektrodenanschlüsse und deren Isolatoren eine Breite von 248 mm, eine Höhe von 415 mm und eine Tiefe von 120 mm.

Der aus den Voruntersuchungen bekannte innere Aufbau des Kondensators ist in Abbildung 4.3 schematisch veranschaulicht.

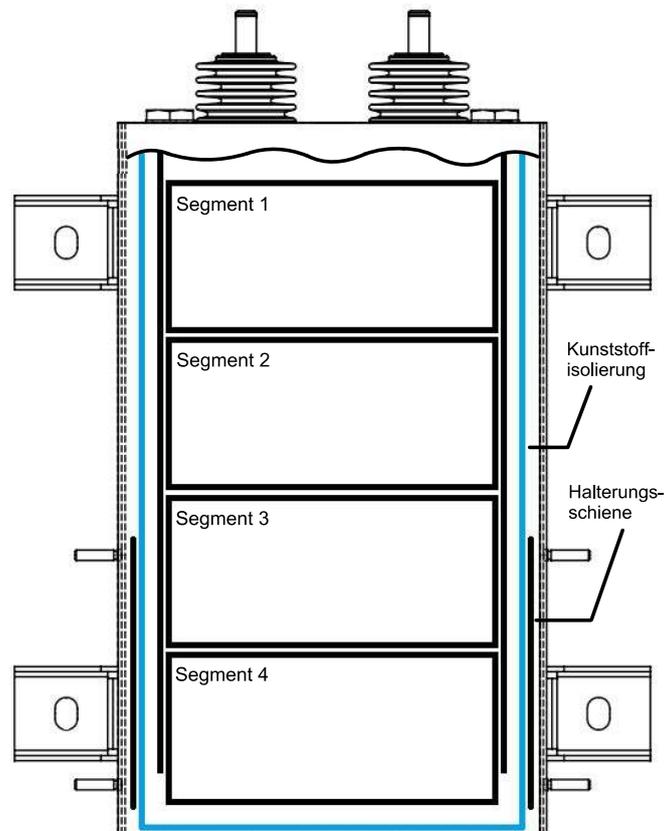


Abbildung 4.3: Innerer Aufbau des Hochspannungskondensators

Der Hochspannungskondensator besteht aus vier kleineren, zylindrisch aufgebauten, parallel geschalteten Folienkondensatoren, in Abbildung 4.3 als Segment 1 bis 4 bezeichnet. Zusammen ergeben diese eine Gesamtkapazität von  $4,5 \mu\text{F}$ . Alle Hohlräume im Inneren

des Aluminiumgehäuses sind vollständig mit Gießharz gefüllt. Die Hochspannungsschienen, links und rechts der Segmente angedeutet, sind zusätzlich durch eine Kunststoffeinhausung (blau dargestellt) von dem Aluminiumgehäuse und den leitfähigen Halterungsschienen, der Kühlplatten voneinander isoliert. Die Kühlplattenanschlussschrauben sind auf die Halterungsschienen aufgeschweißt. Die Anschlussschrauben der Schienen sind von innen durch Bohrungen im Aluminiumgehäuse nach außen gesteckt.

### 4.3 Vorstellung des Isolationsmaterials

Als Vergussharz zwischen den im Kondensatorgehäuse befindlichen Elektroden und dem elektrisch leitfähigen Aluminiumgehäuse wurde Polyurethan verwendet. Die Art des verwendeten Kunststoffes ist nicht bekannt.

Das Mischverhältnis des Vergussharzes ist unbekannt. Polyurethan hat die folgenden Eigenschaften:

- Durchschlagsfestigkeit: 17 kV/mm bis 25 kV/mm (je nach Mischverhältnis)
- Gute Temperaturleitfähigkeit
- Geringer Wärmeausdehnungskoeffizient

Um die Messergebnisse der TE-Messung besser deuten zu können, soll zunächst der Alterungsprozess von Polyurethan erörtert werden.

Intaktes Isolationsmaterial aus Polyurethan eignet sich gut, um Überschläge zu vermeiden. Verunreinigungen, Ablösungen von Kontaktflächen, Gaseinschlüsse (Blasen) und weitere Inhomogenitäten des Isolationsmaterial führen jedoch zu einer lokalen Feldüberhöhung innerhalb des Materials, die das Isolationsmaterial stark belastet. Infolgedessen kommt es zu einer beschleunigten elektrischen Alterung des Materials.

Jahoda & Kúdelčík haben ein Experiment, zur Untersuchung von TE in Hohlräumen einer Polyurethan Probe durchgeführt. Bei dem Experiment wurde eine Spitze-Spitze-Anordnung verwendet der Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Beim Experiment wurden zwei Testspannungen verwendet, 8 kV und 10 kV. Das Experiment hat ergeben, dass beim vorliegenden Versuchsaufbau unter Verwendung einer Testspannung von 8 kV keine messbare elektrische Alterung des Isolationsmaterials auftritt. Die Testdauer erstreckte sich über 150 h. Unter Verwendung von 10 kV ergab sich allerdings

ein in drei Stufen gliederbarer Alterungsprozess. Dieser endete mit einem vollständigen Durchschlagen der Isolationsstrecke nach rund 145 h [11].

Der Messaufbau des Experiments besteht aus dem Prüfspannungsgenerator HV, dem Koppelkondensator  $C_v$ , der Polyurethanprobe  $C_a$ , der Messimpedanz LDS-5 und dem Auswertungssystem LDS-6.

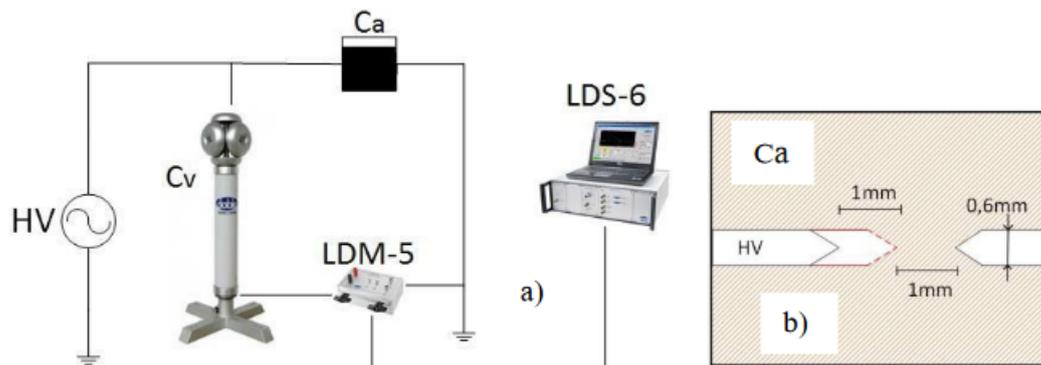


Abbildung 4.4: Messaufbau a) und Aufbau der Polyurethanprobe b) [11]

#### Ablauf des Alterungsprozesses:

1. Phase: Direkt nach Anlegen der Testspannung kam es zu TE-Events. Diese wiesen eine Amplitude von durchschnittlich 25 pC auf. Über die Messdauer von 30 s traten rund 700 TE auf. Die Phasenlage der TE begrenzte sich auf den Bereich von  $150^\circ$  zu  $270^\circ$  der angelegten Spannung.
2. Phase: Nach rund 5 h änderte sich das TE-Verhalten in Hinblick auf die Verteilung über die Phasenlage der angelegten Spannung und die TE-Intensität stieg von 30 pC auf 120 pC an. Dies deutete auf die Zunahme der Oberflächenleitfähigkeit des Hohlraums aufgrund elektrochemischen Reaktionen hin. Daraus resultierte gleichsam einer Erhöhung der Oberflächenrauigkeit, was wiederum die Grundlage für das Entstehen von Electrical Trees ist. Nach Erreichen einer TE-Intensität von 120 pC kam es zu einer scheinbaren Ladungssättigung des Materials, was zu einer kurzzeitigen Abnahme der TEI bedingte.
3. Phase: Nach rund 50 h stieg die TE-Intensität dann wieder kontinuierlich von 90 pC bis 180 pC an, bis es nach rund 145 h zum Durchschlagen der gesamten Isolationsstrecke kam.

Das Experiment hat gezeigt, dass Hohlräume in Polyurethan die Bildung von Electrical Trees bewirken kann. Grundvoraussetzung für die elektrische Alterung des Materials ist dabei allerdings das lokale Auftreten einer kleinsten notwendigen elektrischen Feldstärke. Diesen Zusammenhang hat Sumereder in seiner Adaption des IPL (siehe Abbildung 3.17) zusammengefasst. Nach der Adaption erhöht sich die Lebenserwartung eines Bauteils deutlich, wenn die auftretende elektrische Feldstärke nicht viel größer oder gar kleiner als die Feldstärke ist, ab der TE gerade einsetzen.

### 4.4 Analyse möglicher Teilentladungsursachen

Bei dem untersuchten Kondensator können an mehreren Stellen verschiedene Arten von TE auftreten.

Fremdkörper oder Gaseinschlüsse im Vergussharz können innere TE wie beispielsweise Hohlraumentladungen hervorrufen. Bei längerem Auftreten von TE ist auch die Bildung von Electrical Trees möglich. Daraus resultieren TE, die den Charakter von Oberflächenentladungen aufweisen.

In einem weiteren Szenario offenbaren sich Gleitentladungen an den Halterungsschienen der Kühlplatten. Dabei könnten Entladungen zwischen der Innenseite der Halterungsschienen (siehe Abbildung 4.3) und dem geschichteten Isolationsmaterial auftreten. Von den Hochspannungsschienen ausgehend sind ebenfalls Gleitentladungen über das geschichtete Isolationsmaterial möglich.

Es ist ebenfalls denkbar, dass es von den Halterungsschienen der Kühlplatten ausgehend zu TE mit dem Charakter von Entladungen auf freiem Potential kommt. Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang, dass die Schienen nicht gut leitfähig mit dem Aluminiumgehäuse verbunden sind. Diese sind, wie in Unterkapitel 4.2 beschrieben, nur durch Bohrlöcher im Gehäuse gesteckt und ansonsten mit einer dünnen Schicht Polyurethan von diesem isoliert.

## 4.5 Erkenntnisgewinn über Schäden am Hochspannungskondensator der HF-Station A11

Bei näherer Betrachtung der durch Gaseinschluss entstandenen Hohlräume fällt auf, dass diese an der Innenseite schwarz belegt sind. Diese Beobachtung deutet auf eine anhaltende TE-Aktivität hin [7]. Die Position des Durchschlagsorts trat an einer der kürzesten Strecken zwischen der Hochspannungselektrode und dem Gehäuse auf. Der Aufbau des Isolationsmaterials schien gerade dort besonders ungünstig. Durch die Halterungsschiene der Kühlplatte verringerte sich der Abstand zwischen der Hochspannungselektrode und dem auf Erdpotential liegenden, leitfähigen Gehäuse. Die Halterungsschiene ist rechts in Abbildung 4.5 zu sehen. Sie haftet durch das Vergusschharz von außen an der Kunststoffplatte. Vermutlich durch anhaltende elektrische Erosion bildete sich in dieser ein Loch. Ab dem Zeitpunkt, an dem die Kunststoffplatte lokal vollständig erodiert war, kam es vermutlich zum Durchschlagen der gesamten Isolationsstrecke. Die Halterungsschiene weist keine in der Hochspannungstechnik üblichen Merkmale auf, die eine bewusste Feldsteuerung erahnen lassen. In der Abbildung 4.5 sind die Durchschlagsstelle und die zugehörigen Potentiale des Kondensators ersichtlich.



Abbildung 4.5: Ansicht des beschädigten Kondensators der HF-Station A11

### Bemerkung:

Der Kondensator wurde nach den, in der Motivation (Kapitel 2) geschilderten Voruntersuchungen entsorgt und stand im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr zur Verfügung.

# 5 Vorbereitung der Teilentladungsmessungen

## 5.1 Teilentladungsmessequipment

Für die TE-Messung wird der Prüfspannungsgenerator PHG 80 portable genutzt. Dieser generiert eine oberwellenfreie VLF-Sinusspannung mit einer Frequenz von 0,1 Hz. In Kombination dazu wird das TE-Diagnosesystem PD-TaD 80 zusammen mit einem Notebook zur Steuerung der Messung verwendet. Auf dem Notebook ist die aktuelle Messsystem-Software (Version 4.10.2.22) installiert. Das gesamte Messsystem ist von der Firma BAUR. Es ist primär für die TE-Diagnose an Hochspannungskabeln ausgelegt. Das Messsystem erfüllt die nach IEC 60270 vorgeschriebenen Vorgaben.

### 5.1.1 Leistungsparameter

Tabelle 5.1: Leistungskennwerte des Prüfspannungsgenerators unter Verwendung einer VLF-Sinusspannung von 0,1 Hz [16]

<b>VLF-truesinus</b>	Formelzeichen	Nenngröße	Einheit
Max. Prüfspannung	$U_{\max}$	57	kV <sub>eff</sub>
Max. Scheinleistung	$S_{\max}$	3000	VA
Max. kapazitive Last bei 1 kV <sub>eff</sub>	$C_{\text{mess max 1}}$	20	μF
Max. kapazitive Last bei 30 kV <sub>eff</sub>	$C_{\text{mess max 30}}$	3	μF
Max. kapazitive Last bei 57 kV <sub>eff</sub>	$C_{\text{mess max 57}}$	1,2	μF

Anhand der Kennwerte aus Tabelle 5.1 soll gezeigt werden, dass der Prüfspannungsgenerator fähig ist, die für den Messaufbau benötigte Scheinleistung bereitzustellen.

Der Prüfspannungsgenerator liefert eine maximale Scheinleistung ( $S_{\max}$ ) von bis zu 3 kVA. Die kapazitive Last, die sich aus dem Prüfaufbau ergibt (siehe Abbildung 3.11 und Abbildung 5.4) ergibt beträgt:

$$\begin{aligned} C_{\text{mess}} &\approx C_a + C_k \\ &\approx 850 \text{ pC} + 8 \text{ nF} \\ &\approx 8,85 \text{ nF} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Dabei entspricht  $C_a$  der Prüflingskapazität und  $C_k$  der Kapazität des Messsystem eigenen Koppelkondensators. Die Kapazität des Prüflings wird mit 850 pC angenommen. Dies entspricht einem geringen Aufschlag, auf die durchschnittliche, an den Prüflingen gemessene Kapazität von 830 pC.

Die Gesamtkapazität des Messaufbaus  $C_{\text{mess}}$  ist kleiner als die zulässige kapazitive Last des Generators bei  $30 \text{ kV}_{\text{eff}}$  (siehe Gleichung 5.2). Da für die Messung der Prüflinge eine maximale Spannung von  $10 \text{ kV}_{\text{eff}}$  verwendet wird, ist der Prüfspannungsgenerator zur Durchführung der Messung geeignet.

$$C_{\text{mess}} < C_{a \text{ max } 30} \tag{5.2}$$

### 5.1.2 Darstellung der Messergebnisse

Das Messsystem stellt die TE wie bei der herkömmlichen TE-Messung üblich in einem PRPD-Diagramm dar. Die Diagramme sind wie folgt aufgebaut:

Auf der Abszisse ist der Phasenwinkel  $\Phi$  in Grad und auf der Ordinate die TEI  $q_s$  in pC veranschaulicht. Aufgrund der begrenzten Auflösung des Diagramms werden Teilentladungen gleicher Entladungsintensität, die zum selben Phasenwinkel auftreten farblich in ihrer Anzahl gekennzeichnet. Teilentladungen dessen Entladungsintensität zu einem bestimmten Phasenwinkel selten aufgetreten sind werden blau dargestellt. Teilentladungen, deren Entladungsintensität zu einem bestimmten Phasenwinkel häufig aufgetreten

ist, werden rot markiert. Über die Farblegende rechts in Abbildung 5.1 dargestellt, kann die Anzahl der sich überlagernden Datenpunkte abgelesen werden. Abbildung 5.1 ist die beispielhafte Darstellung eines solchen PRPD-Diagramms zu entnehmen.

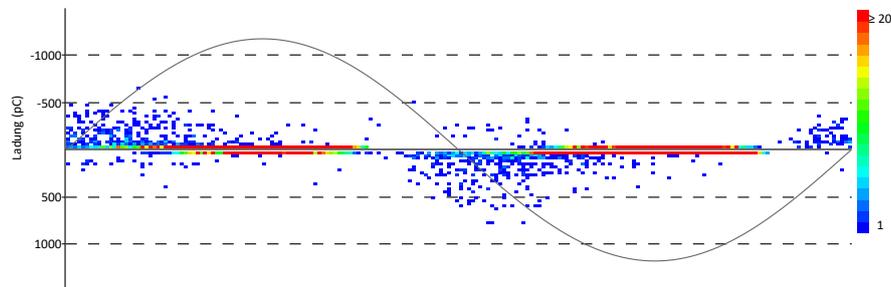


Abbildung 5.1: Darstellung eines vom Messsystem erstellten PRPD-Diagramms

**Hinweis:** Es ist zu beachten, dass die Ordinaten der Abgebildeten PRPD-Diagramme abhängig von der Höhe der aufgenommenen maximalen Entladungsintensität unterschiedlich skaliert sind. Eine Normierung der Achsenskalierung, zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse, war nicht über die Software des Messsystems möglich.

### 5.1.3 Lokalisationstechnik

Das Messsystem arbeitet zur Lokalisierung der Teilentladungsursache mit der PDSL-Technik. Diese kann bis auf rund 1 % der Kabellänge genau die Teilentladungsposition bestimmen. Die Auflösung, mit der die TEI dabei erfasst werden kann, liegt bei 1 pC/m. Dabei beträgt die Mindestkabellänge 1 m. Zur Gesamtlänge zählt die Leitungslänge vom Koppelkondensator aus gemessen bis zum Ende des Kabels.

Die PDSL-Technik eignet sich dabei wie in Abschnitt 3.3.13 erläutert nur für Prüflinge, bei denen die Anordnung des Leiters und des Dielektrikums identisch ist. Da keine Leitung, sondern ein Kondensator gemessen wird, ist das Vorgehen nicht übertragbar. Weder die Mindestlänge noch der gleichmäßige Aufbau sind beim Prüfen des Kondensators gegeben. Die PDSL-Technik kann daher nicht zur Lokalisierung der TE-Position genutzt werden. Informationen über die Position der TE-Ursache werden daher ausschließlich über das PRPD-Diagramm gewonnen (siehe auch Unterkapitel 3.2 und Abschnitt 3.3.13).

In Abbildung 5.2 ist veranschaulicht, wie TE-Ursachen über die Laufzeit der elektromagnetischen Welle und Leitungsreflektionen lokalisiert werden können.

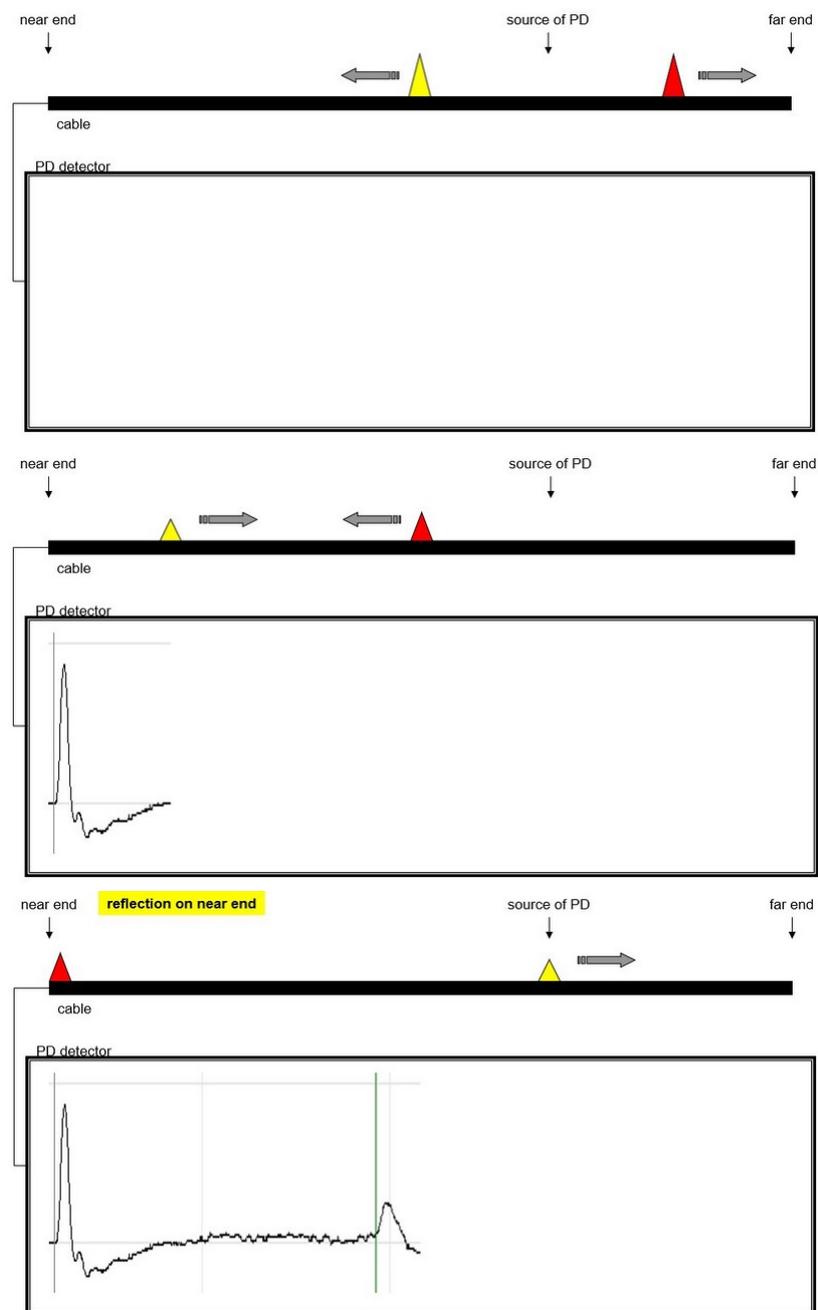


Abbildung 5.2: Partial Discharge Site Location Technik [15]

1. Der Teilentladungsimpuls gelb dargestellt, entspricht dem TE-Impuls der sich in Richtung des Messgerätes ausbreitet, der rot dargestellte Impuls breitet sich Richtung Leitungsende aus.

2. Die Impulse werden jeweils an den, als Stoßstellen bezeichneten Enden der Leitung reflektiert und der gelbe Impuls wird vom Messsystem registriert.
3. Der rote TE-Impuls wird vom Messsystem registriert.
4. Der gelbe Impuls wird nun am anderen Ende der Leitung reflektiert und breitet sich erneut in Richtung des Messsystems aus.
5. Der gelbe Impuls wird erneut vom Messsystem registriert.

Die Amplitude des TE-Impulses nimmt durch die Dämpfung der Leitung und bei jeder Reflektion ab. Insgesamt bleibt die Ladung des integrierten Impulses jedoch gleich. So kann mithilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Leitungslänge die TE-Ursache lokalisiert werden. Ebenfalls können so die Reflektionen eines TE-Impulses vom ursprünglichen Entladungsimpuls unterschieden werden.

Das Messsystem kann bei Unterschreiten der Mindestkabelänge keine Unterscheidung zwischen ursprünglichem TE-Impuls und reflektierten Impulsen vornehmen. Alle auftretenden TE-Impulse müssen daher per Hand in der Software bestätigt werden, um in die Auswertung aufgenommen zu werden.

### 5.2 Einstellungen am Messgerät

Vor Beginn der TE-Messung müssen einige Parameter in der Software des Messsystems voreingestellt werden.

- Leitungslänge
- Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle
- Trigger-Pegel
- Verstärkung der gemessenen Stromimpulse
- Filtereinstellungen
- Bandbreite, untere Grenzfrequenz, obere Grenzfrequenz

Die Leitungslänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle müssen vor der Messung eingestellt werden. Das Messsystem errechnet über diese nicht nur automatisch die TE-Position, sondern auch ob es sich bei den Impulsen um Reflexionen des ursprünglichen TE-Impulses handelt. Aufgrund der zuvor geschilderten Laufzeitproblematik entfallen beide Funktionen, sodass die Einstellung keine Verwendung findet.

Der Triggerpegel wird wie in der Norm IEC 60270 empfohlen, auf den Wert von 20 pC eingestellt. Dies entspricht auch dem kleinstmöglichen in der Software einstellbaren Wert. Dadurch können auch sehr kleine Teilentladungsintensitäten aufgenommen werden.

Bei der Einstellung der Verstärkung des Spannungspulses ist darauf zu achten, dass der Verstärker die Signale möglichst wenig verstärken sollte, um den Rauschpegel gering zu halten und im linearen Arbeitsbereich des Verstärkers zu bleiben. Das gewünschte Verhalten konnte mithilfe einer kurzen Messung an einem der Kondensatoren gefunden werden. Der optimale Arbeitspunkt stellte sich dabei bei einer Verstärkung von 45 dB ein. Hier lag das Rauschen unterhalb des Trigger-Pegels und TE wurden deutlich dargestellt.

Durch digitale Filter, schmalbandige Bandsperren, können einzelne Störquellen im Vorfeld herausgefiltert werden. In der Norm IEC 60270 werden dazu Empfehlungen und Hinweise auf die erlaubte Bandbreite der Ausblendungen erteilt.

Da keine Störfrequenzen bei den Testmessungen aufgetreten sind (siehe Unterkapitel 6.1) wurden keine zusätzlichen Filtereinstellungen vorgenommen. Die Filtereinstellungen wurden wie voreingestellt nach den in der IEC 60270 beschriebenen Einstellungen gewählt.

Da das verwendete Messsystem nach den Vorgaben der IEC 60270 als Breitband-TE-Messgerät definiert ist, gelten für die Bandbreite sowie die obere und untere Grenzfrequenz folgende Vorgaben:

$$\begin{aligned} 30 \text{ kHz} &\leq f_1 \leq 100 \text{ kHz} \\ f_2 &\leq 1 \text{ MHz} \\ 100 \text{ kHz} &\leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz} \end{aligned} \tag{5.3}$$

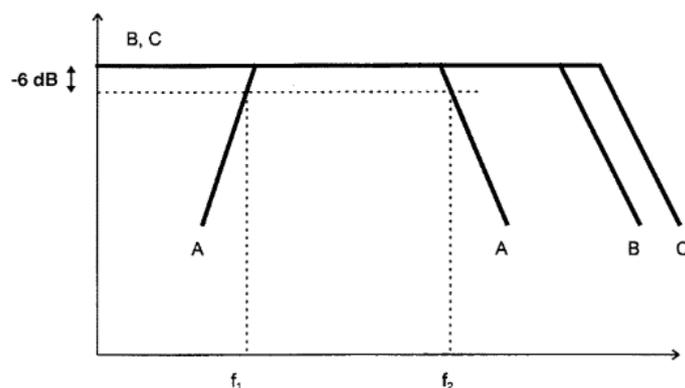


Abbildung 5.3: Definition der Messbandbreite gemäß IEC 60270 [1]

In der Software ist eine Filterung der Spannungspulse nach Bandpass A mit einer -6 dB Bandbreite von 900 kHz standardmäßig eingestellt. Ebenfalls standardmäßig eingestellt sind die untere Grenzfrequenz (100 kHz) und die obere Grenzfrequenz (1000 kHz).

#### Zusätzliche Vorbereitungen:

Die Betriebssoftware des TE-Messsystems ermöglicht keinen vollautomatischen Ablauf. Nachdem eine Messung gestartet wurde, muss zunächst die Aufnahme der TE-Events initiiert werden. Dieser Vorgang muss zudem nach jeder durchlaufenen Spannungsstufe wiederholt werden. Auch ohne Initiierung einer Aufnahme liegt permanent Prüfspannung am Prüfling an. Dadurch kann das Messergebnis zwischen den Prüflingen beeinflusst werden, sollte der Bediener die Aufnahme in unregelmäßigen Abständen starten. Um einen zeitlich fest definierten Prüfablauf zu erhalten, wurden Zusatzprogramme eingesetzt, indem sogenannte Autoklicker verwendet wurden. Diese ermöglichen die Aufnahme beliebiger Mausbewegungen und Click-Muster, sodass alle Bestätigungen und Aufnahmestarts automatisiert durchgeführt werden konnten. Dadurch konnte die Vergleichbarkeit der Messergebnisse erhöht und der Arbeitsaufwand reduziert werden.

### 5.3 Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung

Um vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse zu erzeugen, soll während der Durchführung der Messreihen, die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Luft gemessen werden. Beide Parameter werden sowohl in der Literatur als auch im Datenblatt, als Einflussfaktoren für TE-Prozesse genannt.

Es wird davon ausgegangen, dass die Genauigkeit eines handelsüblichen digitalen Raumthermometers mit integriertem Hygrometer ausreicht, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Messwerte sind den PRPD-Diagrammen in Anhang C als Beschreibung beigefügt.

### 5.4 Prüffeld und Messaufbau

Das Prüffeld ist in einer Werkhalle (Halle 2) im nur für Elektrofachkräfte der Abteilung zugänglichen Bereich aufgebaut. Die Halle ist nicht klimatisiert und schlecht isoliert. Die Umgebungstemperatur ist dadurch tagesabhängig. Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Messergebnisse wird in Abschnitt 6.1.4 erläutert. In nächster Umgebung befinden sich unter anderem elektrische Anlagen, deren Störeinfluss Auswirkungen auf die Messung haben könnte. Bekannte elektrische Anlagen sind ein Modulator und ein Klystron. Störeinflüsse wurden in Abschnitt 6.1.1 näher untersucht. Der Messaufbau (siehe Abbildung 5.4) wurde auf Grundlage des Norm Messaufbaus (siehe Abbildung 3.11) erstellt. Die Komponenten des Messaufbaus sind in Tabelle 5.2 erklärt.

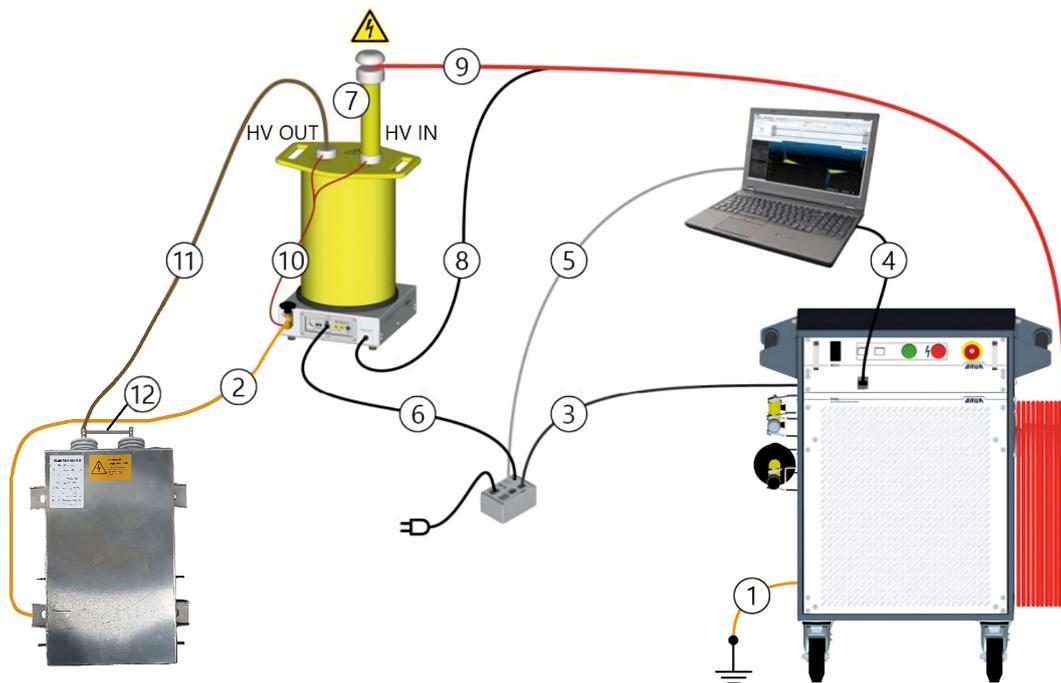


Abbildung 5.4: Anschlussplan des Teilentladungsmesssystems

Tabelle 5.2: Erklärung der Anschlussplankomponenten des Messaufbaus

Nummer	Erklärung	Nummer	Erklärung
1	Erdungsleitung des Prüfspannungsgenerators	7	HF-Filter
2	Erdungsleitung des Prüflings	8	Erdungsanschluss des Messsystems
3	Stromversorgung des Prüfspannungsgenerators	9	HV-Leitung
4	Leitung zur Steuerung des Prüfspannungsgenerators	10	Kurzschlussleitungen des Koppelkondensators
5	Datenleitung (Messergebnisse des Messsystems)	11	HV-Anschlussleitung des Prüflings
6	Datenleitung (Messergebnisse des Messsystems)	12	Kurzschlussleitung zwischen den Elektroden des Prüflings

Die Kurzschlussleitungen des Koppelkondensators (siehe Abbildung 5.2 Nummer 10) wird vor dem Messbetrieb entfernt. Außerhalb des Messbetriebs verhindern die Kurzschlussleitungen eine selbstständige Aufladung des Kondensators auf personengefährdende Spannungshöhen. Die Kurzschlussleitungen dienen damit dem Personenschutz.

Die Hochspannungselektroden des Kondensators werden mit einer einfachen Drahtbrücke kurzgeschlossen (siehe Abbildung 5.2 Nummer 12). So wird unabhängig von der tatsächlichen Kapazität von  $4,5 \mu\text{F}$  zwischen den Elektroden des Kondensators nur das Verhalten der Kapazität zwischen den Elektroden und dem Kondensatorgehäuse  $830 \text{ pF}$  untersucht.

Der Anschlussplan für eine Kalibrierung ist zusammen mit einer detaillierten Vorgehensbeschreibung in Anhang B.1 zu finden.

# 6 Verifikation der Messung und deren Messwerte

## 6.1 Vorfeldmessungen

### 6.1.1 Bestimmung von Störeinflüssen

Um mögliche externe Störungen zu identifizieren, wird zuerst eine Kalibrierung des Messaufbaus durchgeführt. Anschließend können im Kalibrationsmenü die gemessenen Entladungshöhen angezeigt werden, die ohne Anlegen einer Prüfspannung detektiert werden. Über diese kann eine Aussage über die Störfreiheit des Messaufbaus und des Prüffeldes getroffen werden. Die Höhe der Störsignale sollte deutlich niedriger als das Kalibrationssignal sein, das auf eine Höhe von 100 pC eingestellt wurde.

Erste Messungen zeigten, dass der Kalibrationspegel durch Prüffeld nahe, in Betrieb befindliche Anlagen merklich gestört wird. Als Störer wurden der Modulator und das Klystron identifiziert. Pegel von bis zu 300 pC wurden gemessen. Die Beeinflussung des Messpegels konnte durch Abschalten der Anlagen behoben werden. Auch über mehrere Minuten hinweg konnten keine Messwertschwankungen größer  $\pm 3$  pC gemessen werden. Im weiteren Verlauf wird mithin angenommen, dass der Messaufbau ausreichend störfrei ist.

In Abschnitt 5.1.3 wurde die Problematik beschrieben, dass das Messsystem nicht zwischen dem ursprünglichen TE-Impuls und seiner Reflektion an den Leitungsenden unterscheiden kann. Bei einer ersten Testmessung, wie sie in Abschnitt 6.1.2 veranschaulicht ist, muss daher untersucht werden, wie Reflektionen vom Messsystem aufgezeichnet werden. Reflektionen und TE-Impulse könnten als paarweise auftretende Datenpunkte im PRPD-Diagramm dargestellt werden. Aufgrund der Nähe zum Ende der Leitung bewegt sich der am Leitungsende reflektierte Impuls mit nur geringem Abstand zum Ursprungsimpuls über die Leitung. TE daher zum annähernd identischen Phasenzeitpunkt auf.

Durch die begrenzte Auflösung des Phasenwinkels würden die Reflektionen im PRPD-Diagramm an derselben Stelle angezeigt werden, wie der Ursprungsimpuls. Die Überlagerung der TE würde dann als ein hellblauer Punkt im Diagramm dargestellt werden. Ebenfalls denkbar ist, dass das Messsystem sowohl den Ursprungsimpuls als auch seine Reflektion zusammen erfasst und über beide Impulse integriert. Dann würde das Messgerät die summierte TEI als ein einzelnes Teilentladungsevent erfassen.

### 6.1.2 Auslegung des Hysterese- und Spannungssteigerungsversuchs

Der Hystereseversuch und der Spannungssteigerungsversuch sollen gemeinsam durchgeführt werden. Auf diese Weise soll eine Beeinflussung der Ergebnisse des Spannungssteigerungsversuchs verhindert werden, wenn die zwei Messungen mit geringem zeitlichen Abstand zueinander erfolgen.

Bei einer Durchführung des kombinierten Versuchs soll ermittelt werden, ab welcher Spannung TE einsetzen. Auf Basis dessen wird im Anschluss der Start- und Endwert des Versuchs gewählt. Bei dem Versuch werden nacheinander zwei Kondensatoren aus dem Lagerbestand getestet. Zudem wird analysiert, wie das Messsystem die Reflektion eines TE-Impulses verarbeitet. Damit soll der Aussagegehalt der Messwerte geklärt werden.

In Abbildung 6.1 ist der kombinierte Versuchsablauf veranschaulicht.

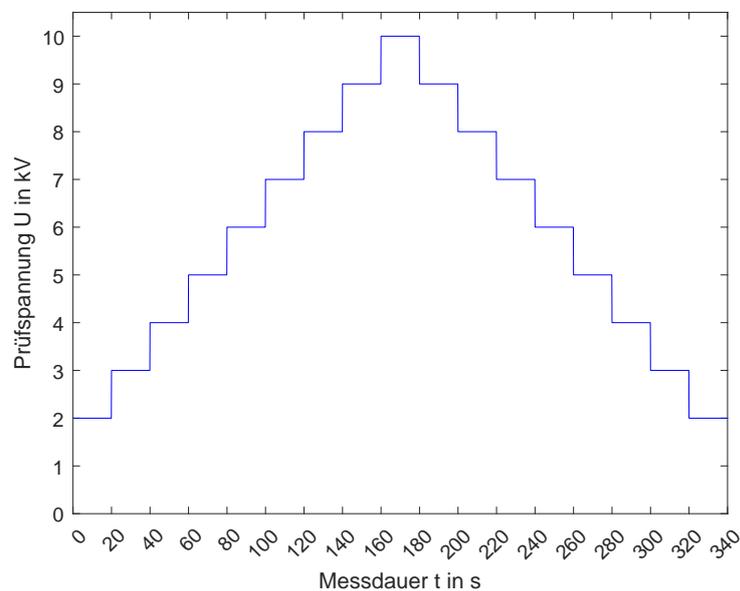


Abbildung 6.1: Verlauf des Hysterese- und Spannungssteigerungsversuchs

Der kombinierte Versuch besteht aus kaskadierten Spannungstests, bei denen nacheinander der Scheitelwert der Prüfspannung in vorgegebenen Sprüngen erhöht und anschließend wieder abgesenkt wird.

An den Prüfling wird für jeweils zwei Perioden, also 20 s lang, eine 0,1 Hz Sinusspannung angelegt. Die Höhe der Prüfspannung beträgt dabei anfänglich 20 % der Nennspannung des Kondensators, also 2 kV. Nach Ablauf der 20 s wird die Spannung um 10 %, bis zum Erreichen der Nennspannung von 10 kV erhöht. Anschließend wird die Spannung gegenläufig wieder auf 20 % der Nennspannung abgesenkt.

Die Mindestspannungshöhe, bei der das Messsystem arbeitet, beläuft sich auf 1 kV. Die Höhe der Prüfspannungsstufen soll bei 2 kV beginnen. Dies entspricht auch dem typischerweise gewählten Startwert von 20 % der Nennspannung. Bei einem derart niedrigen Spannungswert wird üblicherweise davon ausgegangen, dass es noch nicht zum Einsetzen von TE kommt.

Die Höhe des Spannungs-Deltas von einer Spannungsstufe zur nächsten, ist so gewählt, dass die Höhe ausreichend ist, um einem deutlichen Anstieg zur vorherigen Stufe zu entsprechen, jedoch nicht zu groß ist, sodass genügend Messwerte entstehen.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Teilentladungseinsetzspannungen und Teilentladungsaussetzspannungen im Umfang der ersten Testmessung

Serien-Nr.	SN29	SN30
$U_i$ in kV	4	3
$U_e$ in kV	2	2

Temperatur: 18 °C Relative Luftfeuchtigkeit: 30 %

Die TEE und TEA liegen innerhalb der Prüfspannungsgrenzen. Die Prüfspannung wird daher nicht verändert und für alle weiteren TE-Messungen beibehalten.

Die Analyse des dabei entstandenen PRPD-Diagramms hat ferner ergeben, dass das Messsystem den TE-Impuls und seine Reflektion am Ende der Leitung vermutlich als ein TE-Event verarbeitet. Diese Schlussfolgerung ergab sich aufgrund des Ausbleibens zweier TE-Events zum selben Phasenzeitpunkt, mit gleicher Entladungsintensität. Diese zwei möglichen Theorien wurden näher in Abschnitt 6.1.1 geschildert. Die Ladung eines TE-Impulses entspricht daher der Summe aus ursprünglichem TE-Impuls und seiner Reflektion.

Die vom Messsystem angezeigte Entladungshöhen sind somit vermutlich doppelt so groß wie die tatsächliche Entladungsintensität. Die Messwerte der TEI sind daher nur mit

den Ergebnissen weiterer Messungen vergleichbar, nicht aber mit Ergebnissen aus der Literatur. Für die Auswertung der aufgenommenen Messwerte hat dies jedoch keine Relevanz, da in erster Linie Vergleiche zwischen den Messergebnissen angestellt wurden. Ob sich die angezeigte TEI tatsächlich aus der Überlagerung der beiden Impulse ergibt ist unklar. Daher wurden im weiteren Verlauf der Arbeit die vom Messsystem angezeigten Werte verwendet. Wie das Messgerät die Reflektion eines TE-Impulses verarbeitet muss in einer weiterführenden Analyse untersucht werden.

### 6.1.3 Statistische Streuung der Messergebnisse

Das Auftreten von TE in einem Prüfling ist nicht deterministisch, sondern unterliegt gewissen Schwankungen. Bei 6-maliger Messung eines Kondensators erhält man daher auch sechs unterschiedliche Impulswiederholraten, wie in Tabelle 6.2 zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass die Wiederholgenauigkeit nicht besonders hoch ist. Dies gilt es bei der Bewertung der Messergebnisse zu berücksichtigen.

Zur Untersuchung der Streuung wurden an Kondensator SN32 exemplarisch sechs Messungen durchgeführt. Die Messungen entsprachen dabei der zuvor beschriebenen Kombination aus Hysterese- und Spannungssteigerungsversuch.

Bei der Streuung der Ergebnisse wird von einer Gaußverteilung ausgegangen. Zur Beurteilung des Streuungsmaßes wird daher die Standardabweichung  $\sigma$  herangezogen. Zusätzlich zur Impulswiederholrate wird auch die Spitzendurchschnittsentladung ( $Q_{\max 5}$ ), dem Durchschnittswert der fünf größten Entladungen in ihrer Streuung untersucht. Dieser Parameter soll im Umfang dieser Arbeit in Anlehnung an den Begriff der größten wiederholt auftretenden Teilentladungsstärke verwendet werden.

Die Gleichungen 6.1 und 6.2 zeigen wie die jeweiligen Standardabweichungen berechnet wurden.

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (n_i - \bar{n})^2} \quad (6.1)$$

$n_i$  = Anzahl an TE     $\bar{n}$  = Mittelwert an TE     $M$  = Anzahl an Messungen

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (Q_{\max 5,i} - \bar{Q}_{\max 5})^2} \quad (6.2)$$

$Q_{\max 5,i}$  = Höhe der  $Q_{\max 5}$      $\bar{Q}_{\max 5}$  = Mittelwert     $M$  = Anzahl an Messungen

Für weitere Messungen ist der Mittelwert nicht bekannt, da jeder Prüfling nur einmal aufgrund des hohen Zeitaufwands geprüft werden kann. Da erwartet wird, dass die Standardabweichung von der Gesamtzahl, der pro Messung auftretenden TE abhängig ist, wird die Standardabweichung in einen relativen, prozentualen Wert umgerechnet.

Zur Berechnung der relativen prozentualen Standardabweichung wurden die Gleichung 6.4 und die Gleichung 6.3 verwendet.

$$\sigma_{\text{rel n}} = \frac{\sigma_n}{\bar{n}} \cdot 100 \% \quad (6.3)$$

$$\sigma_{\text{rel Q}} = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}_{\max 5}} \cdot 100 \% \quad (6.4)$$

Die Ergebnisse der Impulswiederholraten und der Spitzendurchschnittsentladung sind in Tabelle 6.2 zusammen mit den dazugehörigen Standardabweichungen aufgeführt. Die Standardabweichungen und die prozentualen Standardabweichungen wurden auf die erste Stelle vor dem Komma gerundet.

Tabelle 6.2: Standardabweichung der Impulswiederholrate und der Spitzendurchschnittsentladung in Abhängigkeit der Messungen an Kondensator SN32

Messung	1	2	3	4	5	6	Mittelwert	SD	SD in %
n	9692	9878	9293	9538	9129	9070	9433	322	3.42
$Q_{\max 5}$ in pC	742	941	742	834	854	759	812	79	9.77

Messungen durchgeführt an Kondensator SN32    Temperatur: 18 °C    Relative Luftfeuchtigkeit: 30 %

Um 99 % aller erwartbaren Messergebnisse abzudecken, wird die 3-fache Standardabweichung  $3\sigma$  verwendet. Für die Impulswiederholrate ergibt sich damit  $3\sigma_{\text{rel n}} \approx 10\%$  und für die Spitzendurchschnittsentladung  $3\sigma_{\text{rel Q}} \approx 30\%$ .

### 6.1.4 Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis

In dieser Untersuchung wurde der Einfluss der Temperatur auf das Teilentladungsverhalten analysiert. Dies schien nach einer plötzlichen Umgebungstemperaturänderung, aufgrund des Wintereinbruchs unabdingbar. Um den Temperatureinfluss zu analysieren wurden die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1.3, die bei  $18^\circ\text{C}$  aufgenommen wurden mit neuen Messwerten verglichen, die bei  $13^\circ\text{C}$  aufgenommen wurden.

Auch bei  $13^\circ\text{C}$  wurden sechs Messungen an Kondensator SN32 durchgeführt. In Tabelle 6.3 sind die Mittelwerte der Impulswiederholrate und der Spitzendurchschnittsentladung aufgeführt.

Tabelle 6.3: Mittelwerte der Impulswiederholrate und Spitzendurchschnittsentladung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur aus sechs Messungen

Temperatur in $^\circ\text{C}$	18	13	$\Delta$ Mittelwert in %	$\Delta\text{SD}$ in %
$\bar{n}$	9506	9240	-2,8	4,33
$\overline{Q}_{\text{max 5}}$	823	888	7,9	-0,68

Messungen durchgeführt an Kondensator SN32 Relative Luftfeuchtigkeit: 30 % bei  $18^\circ\text{C}$  und 40 % bei  $13^\circ\text{C}$

Es ist zu erkennen, dass die durchschnittliche Impulswiederholrate mit abnehmender Temperatur sinkt. Dies entspricht auch dem Erwartungswert, denn mit sinkender Temperatur sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Startelektron für die Teilentladung zur Verfügung steht.

Ebenfalls ist zu beobachten, dass mit sinkender Impulswiederholrate die TEI steigt. Auch dies entspricht dem Erwartungswert, denn bei verzögert einsetzender Entladung kann die Feldstärke weiter ansteigen, bis ein Startelektron zur Verfügung steht und es zur Teilentladung kommt. Bei verzögerter Zündung der Teilentladung gilt dann, dass die anliegende Spannung deutlich größer ist als die Zündspannung. Damit ergeben sich deutlich höhere Entladungsintensitäten.

Die temperaturbedingten Abweichungen der 3-fachen Standardabweichung sind nur sehr gering. Die relative Standardabweichung der Impulswiederholrate weicht um  $+4,33\%$

von der bei 18 °C ab. Sie beträgt also  $3 \sigma_{n,rel16} = 10,7 \%$ . Für die Spitzendurchschnittsentladung ergibt sich eine Abweichung von  $-0,68 \%$  gegenüber der Standardabweichung bei 18 °C. Damit gilt  $3 \sigma_{Q,rel16} = 29,11 \%$ .

Für die 3-fache Standardabweichung der Impulswiederholrate und der Spitzendurchschnittsentladung können daher in guter Näherung auch weiterhin die in Abschnitt 6.1.3 bestimmten Werte angenommen werden.

## 6.2 Teilentladungsmessung eines verschiedenartigen Kondensatorentyps

Bei diesem Versuch soll herausgefunden werden, welche Messwerte als ungefährlich einzustufen sind. Dazu sollen, als qualitativ hochwertig angenommene Kondensatoren mit einem, der in der Hauptuntersuchung zu messenden Kondensatoren verglichen werden. Dessen ungeachtet sollen Unterschiede in den PRPD-Diagrammen, in den Spitzenwerten der TEI und in der Anzahl an TE-Events untersucht werden. Diese sollen als Referenzwerte für die Hauptmessung dienen.

### 6.2.1 Vorstellung des Vergleichskondensators

Der Vergleichskondensatortyp wird in der Kondensatorbank der Modulatoren, des Linearbeschleunigers Freie-Elektronen-Laser (FLASH), verwendet. Der Verwendungszweck des Kondensators unterscheidet sich damit vom in Kapitel 4 beschriebenen Kondensator. Der Kondensatortyp ist eine Spezialanfertigung der Firma KYOCERA AVX aus der FILFIM-Serie.

Der Kondensator wird im Betrieb mit einer 11 kV Gleichspannung geladen und dann entladen. Dabei wird ein Rechteckpuls generiert, dessen Spannung deutlich kleiner ist als die Ladespannung des Kondensators.

Der Kondensatorentyp eignet sich gut für die Vergleichsmessung, da keiner der im Betrieb befindlichen Kondensatoren jemals Auffälligkeiten in seiner Funktion gezeigt hat oder ausgefallen ist. Dabei sind die Kondensatoren bereits seit dem Jahr 2003 im Einsatz.

Der Kondensatorentyp ist, ebenso wie auch der zu untersuchende Kondensator ein metallisierter Polypropylen-Folienkondensator. Bezüglich des Kondensatoraufbaus unterscheiden sich die Kondensatoren vor allem in Bezug auf das verwendete Isolationsmaterial,

die intern verlaufenden Elektroden und das Kondensatorgehäuse. Beim Vergleichskondensator werden mehrere Lagen Polyesterfolie als Isolationsmaterial verwendet, während der zu untersuchende Kondensator Polyurethan ein Vergussharz als Isolator verwendet wird.

Der Kondensator ist gemeinsam mit dem Versuchsaufbau der Messung in Abbildung 6.2 dargestellt.



Abbildung 6.2: Vergleichskondensator im Versuchsaufbau

### 6.2.2 Versuchsbeschreibung

Im Umfang dieses Versuchs sollen Messungen an drei Kondensatoren vorgenommen werden. Dabei entsprechend zwei der Kondensatoren dem zuvor beschriebenen Kondensatortyp. Diese werden im Folgenden als Vergleichskondensatoren 1 und 2 betitelt. Der dritte Kondensator entspricht dem in Kapitel 4 vorgestellten Kondensatortyp und trägt die Seriennummer 32 (SN32).

An allen Kondensatoren soll dabei die Kombination aus Hysterese- und Spannungssteigerungsversuch durchgeführt werden (siehe auch Abschnitt 6.1.2).

### 6.2.3 Auswertung der Messergebnisse

Die PRPD-Diagramme der Vergleichskondensatoren werden zuerst einzeln untersucht und anschließend miteinander verglichen. Anschließend werden die Erkenntnisse aus den PRPD-Diagrammen mit denjenigen des Kondensators SN32 verglichen. Bei Deutung der PRPD-Diagramme wurden die in Anhang A veranschaulichten Vergleichsmuster verwendet.

Phasenaufgelöste Diagramme sind nur mit den in Anhang A dargestellten Mustern vergleichbar, wenn sie bei einer Prüfspannungshöhe aufgenommen wurden, die nicht wesentlich größer ist als die TEE. Das Aussehen der ansonsten entstehenden Diagramme kann gegebenenfalls deutliche Unterschiede zu den bekannten Mustern aufweisen, sodass keine verlässlichen Schlüsse aus diesen gezogen werden können [14].

Da indes vorerst unbekannt ist, in welchem Bereich die TEE liegen sollen zwei PRPD-Diagrammvarianten ausgewertet werden.

Im ersten Diagrammtyp wurden dazu die TE-Events, welche von 2 kV bis 4 kV aufgenommen wurden berücksichtigt. In diesem Fall gilt voraussichtlich für alle Prüflinge  $U_0 > TEE$ .

Im zweiten Diagrammtyp werden alle TE-Events berücksichtigt, die über die gesamte Messung hinweg, also von 2 kV bis 10 kV aufgenommen wurden.

Die Analyse des zweiten Diagrammtyps soll Aufschluss darüber geben, wie sich die TE-Muster entwickeln, wenn die Prüfspannung deutlich größer ist, als die TEE. Damit soll es möglich sein alle Prüflinge unabhängig von ihrer genauen TEE anhand der ersten Diagrammvariante auszuwerten.

Für die Erstellung der zwei PRPD-Diagrammvarianten wurde eine Funktion der Software verwendet, welche die Auswahl der zu berücksichtigenden Teilentladungsevents, in Abhängigkeit der Prüfspannungshöhe erlaubt.

Die Anzahl an aufgenommenen TE, bei einer Prüfspannung von 2 kV bis 4 kV (siehe Abbildung 6.3) ist sehr gering. TE treten in den Bereichen zwischen den Spannungsnulldurchgängen und den Scheitelwerten der Prüfspannung auf. Die Phasenverteilung deutet auf Hohlraum- oder Oberflächenentladungen hin.

Da die Entladungsintensitäten zwischen der positiven und negativen Spannungshalbwelle ähnlich hoch sind, kann nicht von einem direkten Kontakt der Fehlstelle zu einer Elektrode ausgegangen werden.

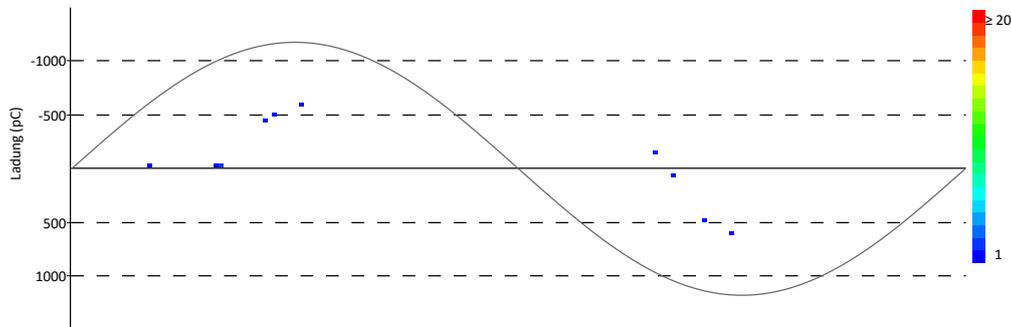


Abbildung 6.3: PRPD-Diagramm des ersten Vergleichskondensators von 2 kV bis 4 kV

Die Verteilung der TE in Abbildung 6.4 deutet auf eine Abhängigkeit zur Spannungshöhe hin. Dies ergibt sich aus der zum Scheitelwert hin ansteigenden und anschließend wieder abfallenden Anzahl an TE und der gleichzeitig ansteigenden TEI. Die Verteilung ähnelt nun nicht mehr den in Anhang A aufgeführten charakteristischen TE-Mustern. Die Verteilung der TE liegt nun auch außerhalb des für Hohlraum- und Oberflächenentladungen typischen Phasenbereichs.

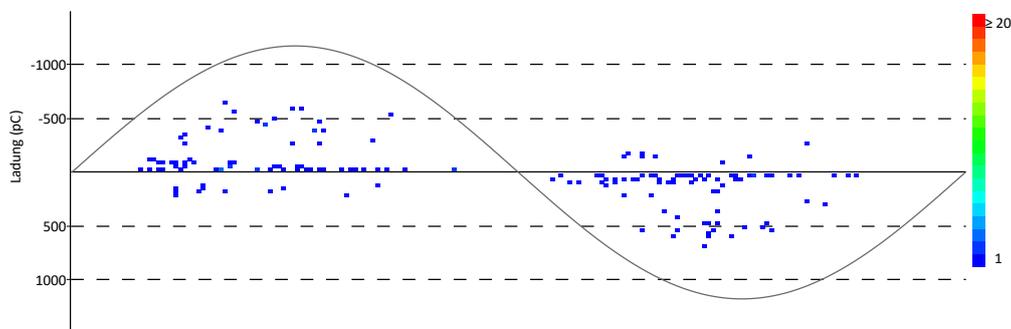


Abbildung 6.4: PRPD-Diagramm des ersten Vergleichskondensators von 2 kV bis 10 kV

Die Verteilung der TE in Abbildung 6.5 hat ebenfalls Ähnlichkeit mit Hohlraum- oder Oberflächenentladungen. Dabei unterscheidet sich die Verteilung jedoch in ihrer Ausdehnung über die Scheitelwerte der Prüfspannung hinaus, mit den in Anhang A dargestellten TE-Mustern. Die Verteilung setzt dabei in der positiven Halbwelle erst ab  $135^\circ$  aus und in der negativen Halbwelle erst ab  $315^\circ$ .

Aus Abbildung 6.4 konnte bereits geschlossen werden, dass sich die Verteilungen bei deutlicher Überschreitung der TEE über den charakteristischen Phasenbereich hinaus ausweitet. Übertragen auf das in Abbildung 6.5 vorliegende Verteilungsmuster, hängt die Ausweitung daher vermutlich mit einem deutlichen überschreiten der TEE zusammen. Ein Vergleich der beiden TEEen liefert, dass die TEE von Vergleichskondensator eins mit 3 kV deutlich über der TEE von Vergleichskondensator 2 liegt, die kleiner ist als 2 kV.

Anhand dieses Zusammenhangs kann mit erhöhter Sicherheit davon ausgegangen werden, dass auch bei Vergleichskondensator 2 Hohlraum- oder Oberflächenentladungen die TE-Ursache sind.

Auch hier können in beiden Sinushalbwellen ähnlich hohe TEI beobachtet werden. Damit kann auch bei Vergleichskondensator 2 nicht davon ausgegangen werden, dass die Fehlstelle Kontakt zu einer der Elektroden besitzt.

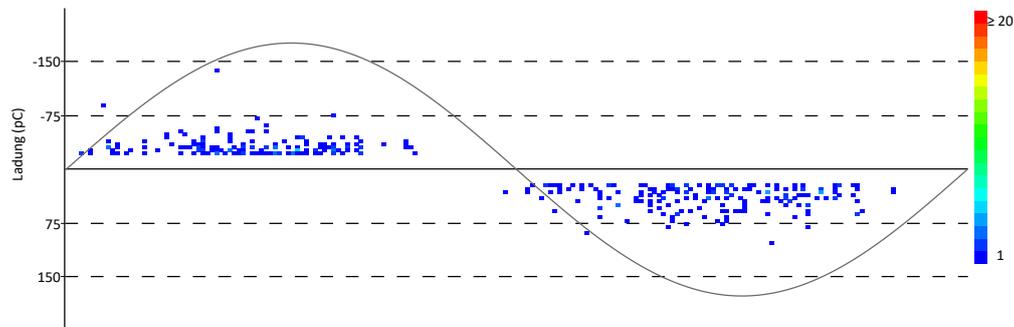


Abbildung 6.5: PRPD-Diagramm des zweiten Vergleichskondensators von 2 kV bis 4 kV

Das in Abbildung 6.6 dargestellte PRPD-Diagramm zeigt eine noch ausgedehntere Verteilung, auf die Bereiche vor den Spannungsnulldurchgängen. Damit lässt sich auch hier ein Zusammenhang zwischen deutlicher Überschreitung der TEE und einer Ausdehnung der Verteilungsmuster konstatieren.

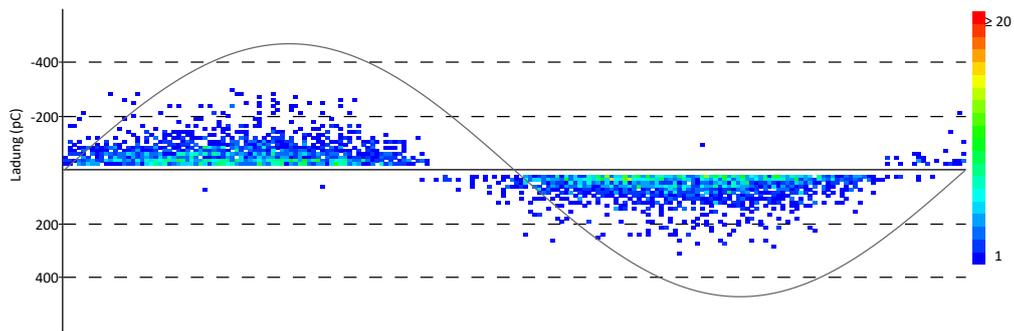


Abbildung 6.6: PRPD-Diagramm des zweiten Vergleichskondensators von 2 kV bis 10 kV

An den Vergleichskondensatoren 1 und 2 konnten hohlraum- oder oberflächenentladungstypische Verteilungsmuster beobachtet werden. Die Beobachtung, dass an baugleichen Kondensatoren identische TE-Ursachen auftreten, erscheint plausibel.

Die Verteilung der TE in Abbildung 6.7 hat unter Betrachtung der positiven Halbwelle den Charakter von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen. Das verspätete Einsetzen der TE ab  $20^\circ$  und ab  $250^\circ$  entspricht dabei nicht dem charakteristischen Verteilungsmuster.

Auch an Kondensator SN32 kann bei näherer Analyse der TEE festgestellt werden, dass die Prüfspannung zu hoch gewählt war. Daran lässt sich die geringfügige Überschreitung des Verteilungsmusters, über den Scheitelwert der Prüfspannung hinaus zurückführen. Weshalb die TE in der negativen Spannungshalbwelle erst bei  $250^\circ$  einsetzen ist unklar.

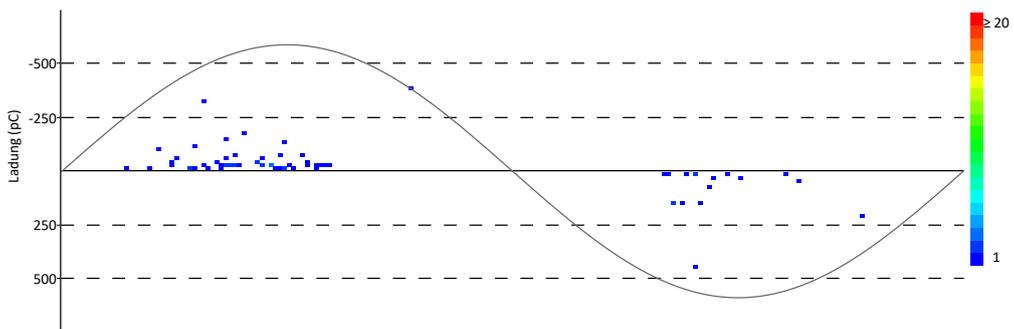


Abbildung 6.7: PRPD-Diagramm des Kondensators SN32 von 2 kV bis 4 kV

Bei Analyse des zweiten PRPD-Diagramms (siehe Abbildung 6.8) fällt auf, dass TE bereits vor den Spannungsnulldurchgängen einsetzen und sich insgesamt über die Bereiche  $340^\circ$  bis  $140^\circ$  sowie  $165^\circ$  bis  $315^\circ$  erstrecken.

Auch bei diesem PRPD-Diagramm kann anhand der Beobachtungen darauf geschlossen werden, dass eine deutliche Erhöhung der Prüfspannung über die TEE hinaus zu einer Ausweitung der Verteilung führt.

Bereits aus der theoretischen Betrachtung von Hohlraum- und Oberflächenentladungen ist bekannt, dass TE auch im Bereich der Spannungsnulldurchgänge auftreten können (siehe Abschnitt 3.1.4). Ebenfalls bekannt ist, dass Verteilungsmuster nur bis zu einer Prüfspannungshöhe knapp über der TEE zu den charakteristischen Verteilungsmustern führen. Demnach scheint die Ausweitung der Cluster-Wolken über den Phasenbereich zwischen Spannungsnulldurchgang und Scheitelwert hinaus, auf eine Prüfspannung hinzuweisen, die deutlich über der TEE liegt.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann die TE-Ursache auf Hohlraum- oder Oberflächenentladungen zurückgeführt werden. Da Hohlraum- und Oberflächenentladungen eine sehr ähnliche Verteilungscharakteristik aufweisen, kann jedoch nicht bestimmt werden, um welche der beiden TE-Ursachen es sich exakt handelt.

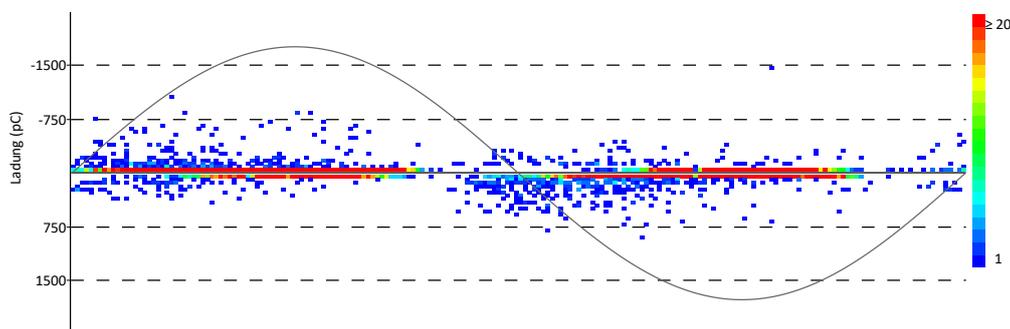


Abbildung 6.8: PRPD-Diagramm des Kondensators SN32 von 2 kV bis 10 kV

Beim Vergleich der PRPD-Diagramme der Vergleichskondensatoren und dem Kondensator SN32 fällt auf, dass sich bei beiden Kondensatortypen PRPD-Muster ergeben, die auf Hohlraum- oder Oberflächenentladungen hindeuten.

Sowohl bei den Vergleichskondensatoren 1 und 2 als auch bei Kondensator SN32 führte eine deutliche Erhöhung der Prüfspannung, über die TEE hinaus, zu einer Ausweitung der Verteilung. Die Verteilung breitete sich dabei zuerst auf die Bereiche von  $90^\circ$  bis  $160^\circ$

und 270° bis 340° aus. Anschließend ließ sich auch eine Ausweitung auf die Bereiche vor den Spannungsnulldurchgängen beobachten.

Die Höhe der Spitzendurchschnittsentladungen und die Impulswiederholraten unterscheiden sich bei allen drei Kondensatoren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Die Höchstwerte der an den Kondensatoren ermittelten Messwerte sind fettgedruckt hervorgehoben.

Tabelle 6.4: Spitzendurchschnittsentladungen und Impulswiederholraten aus der Vorfeldmessung

Bezeichnung	Kondensator 1	Kondensator 2	Kondensator SN32
$Q_{\max 5}$ in pC	604	291	<b>1014</b>
$n$	157	3622	<b>9525</b>

Standardabweichung:  $3 \sigma_{n \text{ rel}} = 10 \% \mid 3 \sigma_{Q \text{ rel}} = 30 \%$  Temperatur: 16 °C Relative Luftfeuchtigkeit: 48 %

Sowohl die Impulswiederholrate als auch die Spitzendurchschnittsentladung waren an Kondensator SN32 am größten. Die Spitzendurchschnittsentladung lag bei Kondensator SN32, um 40 % höher als an Vergleichskondensators 1. Dieser wies die insgesamt zweithöchste Spitzendurchschnittsentladung auf. Die Impulswiederholrate ist zudem 60 % größer als die des Vergleichskondensators 2. Dieser wies die insgesamt zweithöchste Impulswiederholrate auf.

Die Messwerte deuten damit tatsächlich auf eine mindere Qualität des in Kapitel 4 beschriebenen Kondensatortyps hin. Wieviel schädigender die TE an Kondensator SN32 sind ist vorerst unklar.

Da bei den Vergleichskondensatoren über 20 Jahre hinweg keine Ausfälle aufgetreten sind, können die Messwerte von Vergleichskondensator 1 und 2 als unbedenklich eingestuft werden.

# 7 Hauptmessung der Kondensatoren

## 7.1 Versuchsbeschreibung

Im Umfang der Hauptmessung werden an insgesamt vierzehn Kondensatoren TE-Messungen vorgenommen. Alle Kondensatoren entsprechen dem in Kapitel 4 beschriebenen Typ. Die vierzehn Prüflinge teilen sich dabei in drei Gruppen von Kondensatoren auf. Es sollen neu gelieferte Kondensatoren (neue Charge), fünf Jahre lang eingelagerte Kondensatoren (alte Charge) und bisher im Betrieb befindliche Kondensatoren (betriebene Charge) geprüft werden. Die Anzahl der Prüflinge ergibt sich im Falle der alten und neuen Charge aus der Gesamtmenge an zur Verfügung stehenden Kondensatoren. Die im Beschleuniger verbauten Kondensatoren sind nur im Zeitraum vom 29. November 2022 bis zum 23. Dezember 2022, im Rahmen des Winter-Shutdowns zugänglich gewesen. In diesem Zeitraum mussten die Kondensatoren ausgebaut, gemessen und wieder eingebaut werden. Daraus ergab sich die begrenzte Anzahl, an bereits betriebenen Kondensatoren.

Eine Kurzbeschreibung des Vorgehens beim Aus- und Einbau der Kondensatoren befindet sich im Anhang D. Ebenfalls ist im Anhang ein Ablaufschema zu finden, welches das Vorgehen vor, während und nach der Messung eines Kondensators beschreibt, siehe Anhang B.2.

An allen Kondensatoren wird die kombinierte Messung aus Hysterese- und Spannungssteigerungsversuch durchgeführt, wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

## 7.2 Ziele der Messung

Die drei Hauptziele der Messung sollen sein:

- Bestimmung der TE-Ursache

- Erkenntnisgewinn über die Schädlichkeit der Defekte
- Abschätzung der Kondensatorlebensdauer

Um die Ziele zu erreichen, müssen die folgenden Schritte ergriffen werden:

- Aufnahme des PRPD-Diagramms
- Dokumentation der Spitzendurchschnittsentladung  $Q_{\max 5}$
- Dokumentation der Impulswiederholrate  $n$
- Dokumentation der TEE und TEA
- Berechnung des Verhältnisses aus Teilentladungsaussetzspannung und Teilentladungseinsetzspannung  $U_e/U_i$

Die Antworten werden im Anschluss wie folgt aus den Messwerten gewonnen:

- **Teilentladungsursache:**
  1. Auswertung des PRPD-Diagramms anhand von Vergleichsmustern zur Bestimmung der Teilentladungsart.
  2. Bestimmung der Differenz zwischen TEE und TEA, dessen Wert Aufschluss über die Art von Teilentladung und die Größe von Hohlräumen in der Isolierung gibt.
- **Schädlichkeit:**
  1. Klassifizierung der Höhe der TEE und TEA in größer als Nennspannung und kleiner als Nennspannung zur Bewertung der Schädlichkeit der TE-Ursache.
- **Alterungsgeschwindigkeit:**
  1. Ermittlung der Spitzendurchschnittsentladung  $Q_{\max 5}$  und der Impulswiederholrate  $n$  in Abhängigkeit der Betriebsdauer  $t$  unter Beachtung der dazugehörigen Betriebsspannung  $U_B$ .
  2. Ermittlung des Trends der Spitzendurchschnittsentladung  $Q_{\max 5}$  und dem Trend der Impulswiederholrate  $n$ , über dem Verlauf der Betriebsdauer.

## 7.3 Auswertung der Messergebnisse

### 7.3.1 Teilentladungsursache und Lokalisation

#### PRPD-Diagramm

Die Ergebnisse der PRPD-Diagramme wurden zuerst innerhalb einer jeden Kondensatorcharge und anschließend zwischen den Chargen verglichen. Bei der Deutung der PRPD-Diagramme wurden die in Anhang A dargestellten Vergleichsmuster und die Erkenntnisse aus der Vergleichsmessung, siehe Abschnitt 6.2 verwendet.

Für die Auswertung wurden PRPD-Diagramme erstellt, welche an die prüflingspezifische TEE angepasst sind. Es werden nur die TE dargestellt, die bei einer Prüfspannung aufgetreten sind, welche geringfügig größer als die TEE ist. Damit soll eine detailliertere Analyse als bei der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Vergleichsmessung möglich sein.

#### Analyse der alten Charge

Das in Abbildung 7.1 dargestellte PRPD-Diagramm von Kondensator SN29 ähnelt am ehesten dem von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen. Die Anzahl an dargestellten TE ist sehr gering. Für mehr Datenpunkte hätten mehr als zwei Prüfspannungsperioden pro Spannungsstufe durchlaufen werden müssen.

Bei der zusätzlichen Betrachtung der Prüfspannungsstufe von 5 kV verbreiterte sich die Verteilung. Es traten dann auch TE im nicht für Hohlraum- oder Oberflächenentladungen charakteristischen Phasenbereich auf. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Vergleichsmessung, siehe Abschnitt 6.2.

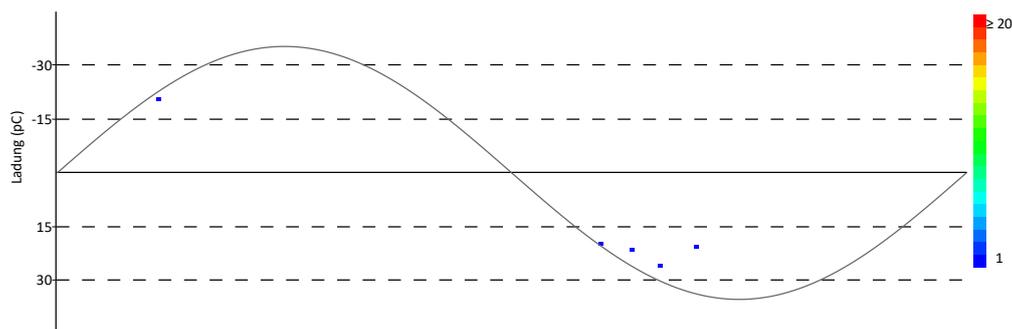


Abbildung 7.1: PRPD-Diagramm des Kondensators SN29 von 2 kV bis 4 kV

Auch die Kondensatoren SN30 und SN32 wiesen die an SN29 beobachteten Ähnlichkeiten zu Hohlraum- oder Oberflächenentladungen auf. Lediglich Kondensator SN31 unterschied sich deutlich in seinem PRPD-Diagramm von denen der anderen drei Kondensatoren der Charge. Abbildung 7.2 zeigt das an Kondensator SN31 aufgezeichnete TE-Muster.

An Kondensator SN31 lag die Mehrzahl an TE in der rechten Hälfte der Sinushalbwellen. Die Verteilung gleicht keinem der charakteristischen PRPD-Diagramme aus Anhang A. Inwiefern sich die TE-Ursache damit von denen der Kondensatoren SN29, SN30 und SN32 unterscheidet ist unklar.

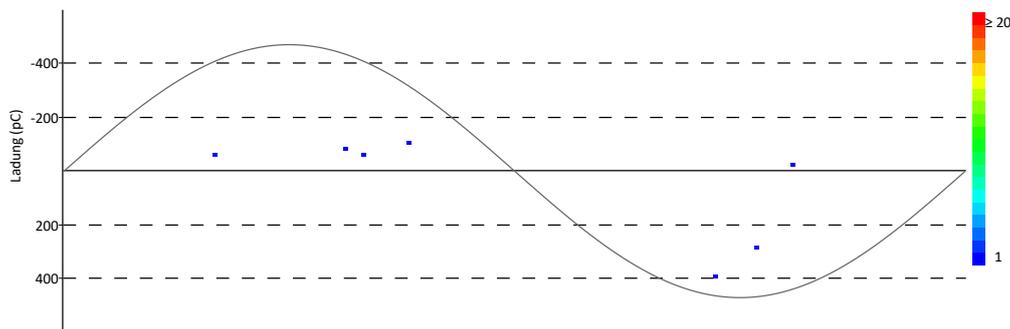


Abbildung 7.2: PRPD-Diagramm des Kondensators SN31 von 2 kV bis 4 kV

Bei allen Kondensatoren der Charge, außer bei SN31 konnte die TE-Ursache sicher auf Hohlraum- oder Oberflächenentladungen zurückgeführt werden.

### Analyse der neuen Charge

In den Abbildungen 7.3 bis 7.6 sind die PRPD-Diagramme der neuen Charge dargestellt.

Bei den Kondensatoren SN34, SN35 und SN36 fällt auf, dass in jeweils einer Spannungshalbwellen eine Verteilung höherer Entladungsintensität auftritt. In der jeweils anderen Spannungshalbwellen bilden sich Verteilungen niedriger Entladungsintensität aus. Die TE-Muster der Kondensatoren SN34, SN35 und SN36 ähneln denen von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen. Da TE auch über den charakteristischen Phasenbereich von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen hinaus auftreten, bedarf es einer weiteren Untersuchung der TE-Muster.

An Kondensator SN38 treten lediglich in einer Spannungshalbwellen TE auf. Die im PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 dargestellten TEI weisen aber im Gegensatz

zu den PRPD-Diagrammen der anderen Kondensatoren deutlich niedrigere Entladungsintensitäten von nur rund 20 pC auf. Die Verteilung der TE im PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 deuten auf Koronaentladungen in Gas hin.

Die PRPD-Diagramme der Kondensatoren SN34, SN35, SN36 und SN38 werden zur Klärung der TE-Ursache erneut ausgewertet. Diesmal bei einer erhöhten Prüfspannung, die deutlich über der TEE liegt.

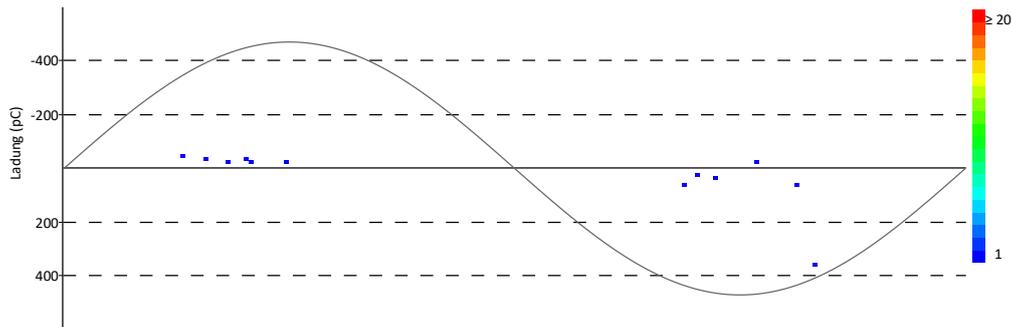


Abbildung 7.3: PRPD-Diagramm des Kondensators SN34 von 2 kV bis 5 kV

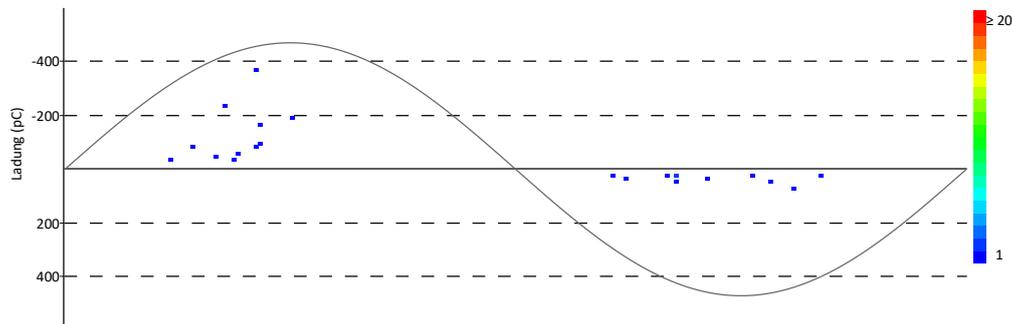


Abbildung 7.4: PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 von 2 kV bis 4 kV

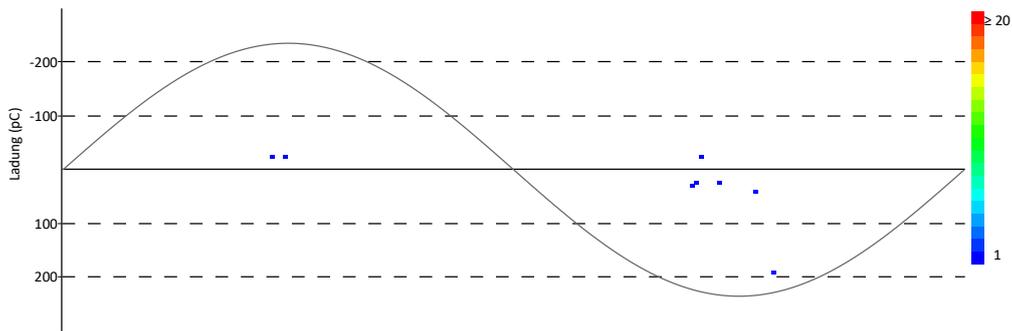


Abbildung 7.5: PRPD-Diagramm des Kondensators SN36 von 2 kV bis 4 kV

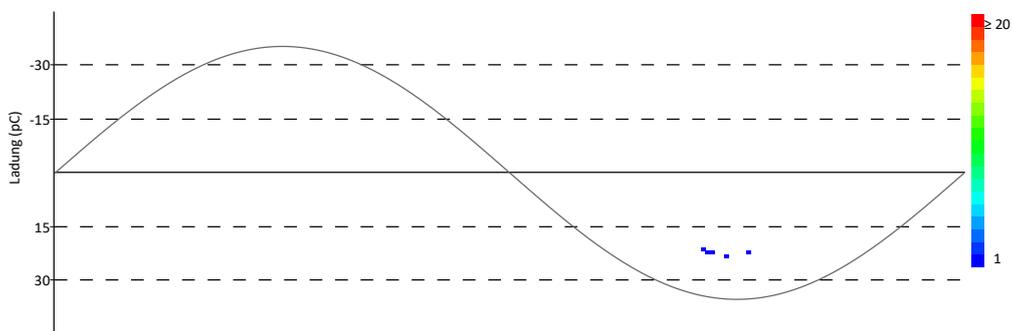


Abbildung 7.6: PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 3 kV

Beispielhaft ist in Abbildung 7.7 das entstehende PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 dargestellt. Es zeigt repräsentativ für die Kondensatoren SN34, SN35 und SN36 die Entwicklung der TE-Muster bei steigender Prüfspannung.

In Abbildung 7.7 ähnelt die Verteilungscharakteristik dabei tatsächlich der von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen.

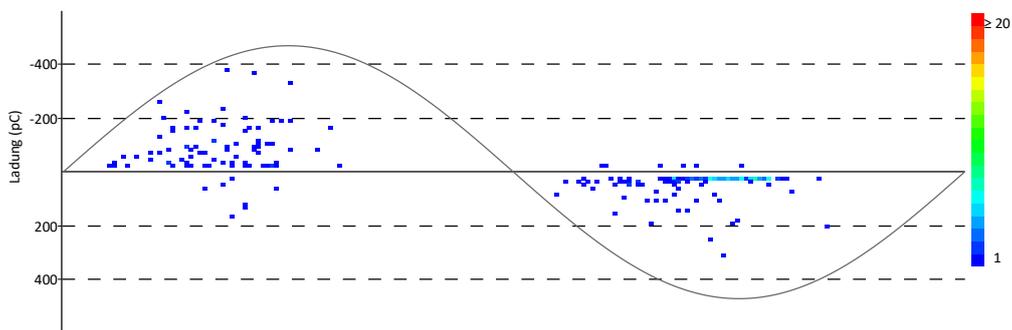


Abbildung 7.7: PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 von 2 kV bis 7 kV

Die Abbildung 7.8 zeigt die Entwicklung des TE-Musters von Kondensator SN38. Die Prüfspannung wurde darin auf bis 4 kV erhöht. Darin liegen drei TE höherer Entladungsintensität in der positiven Spannungshalbwellen und zwei in der negativen Spannungshalbwellen. Die Verteilung von TE kleinerer Entladungsintensität, in der negativen Spannungshalbwellen, ist nun deutlich ausgeprägter.

Die Verteilung in Abbildung 7.8 deutet tatsächlich auf eine Koronaentladung in Gas hin. Koronaentladungen in Gas zeichnen sich vor allem durch eine gleichmäßige Entladungsintensität in einer der Spannungshalbwellen aus.

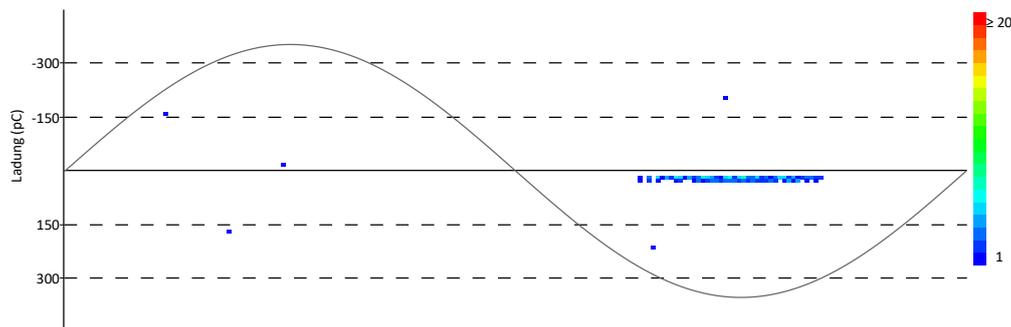


Abbildung 7.8: PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 4 kV

Bei einer weiteren Erhöhung der Prüfspannung auf nun 5 kV entsteht das in Abbildung 7.9 dargestellte PRPD-Diagramm.

Die in Abbildung 7.8 beobachteten TE höherer Entladungsintensität offenbaren sich in Abbildung 7.9 als für Hohlraum- und Oberflächenentladungen typische Verteilungsmuster. Dabei fällt auf, dass die Entladungen in der negativen Halbwelle anders als bei Hohlraum- und Oberflächenentladungen typisch nur eine geringe Entladungsintensität aufweisen.

Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die TE in der positiven Spannungshalbwellen und der negativen Spannungshalbwellen von derselben TE-Ursache herrühren. Dabei scheint die Fehlstelle einseitig spitzenförmig zu sein, sodass eine große Inhomogenität des Feldes entsteht. Diese Inhomogenität ist die Grundlage für Koronaentladungen. Von der anderen Richtung ausgehend bildet sich eine eher homogene Feldverteilung aus. Diese liegt beispielsweise bei Hohlraum- oder Oberflächenentladungen vor.

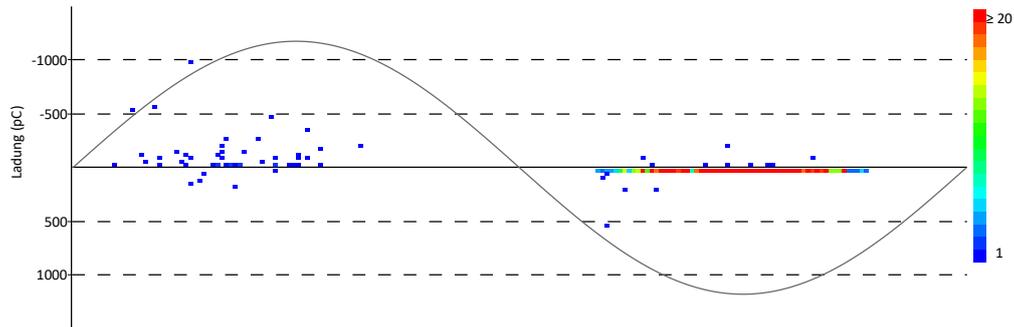


Abbildung 7.9: PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 5 kV

### Analyse der betriebenen Charge

Die in Abbildung 7.10 und Abbildung 7.11 dargestellten Verteilungsmuster erstreckt sich über beide Sinushalbwellen. Anders als aus der Voruntersuchung zu erwarten war ist kein charakteristisches Verteilungsmuster von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen zu erkennen. TE treten auch außerhalb des Phasenbereichs von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  und von  $180^\circ$  bis  $270^\circ$  auf. Eine genaue Identifikation der TE-Ursache ist daher an Kondensator SN02 nicht möglich.

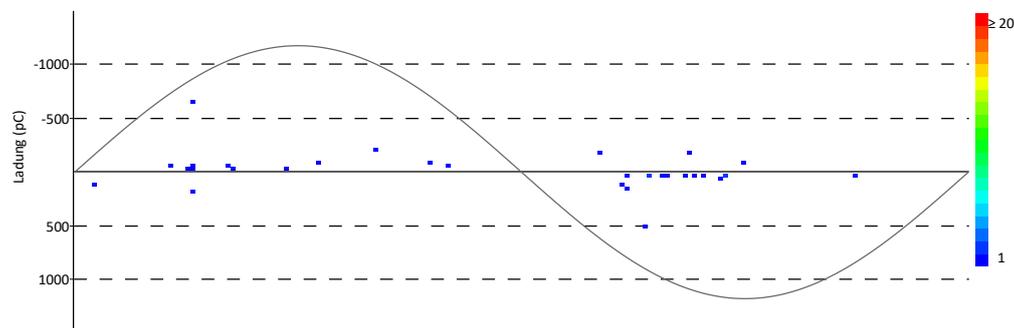


Abbildung 7.10: PRPD-Diagramm des Kondensators SN02 von 2 kV bis 4 kV

## 7 Hauptmessung der Kondensatoren

---

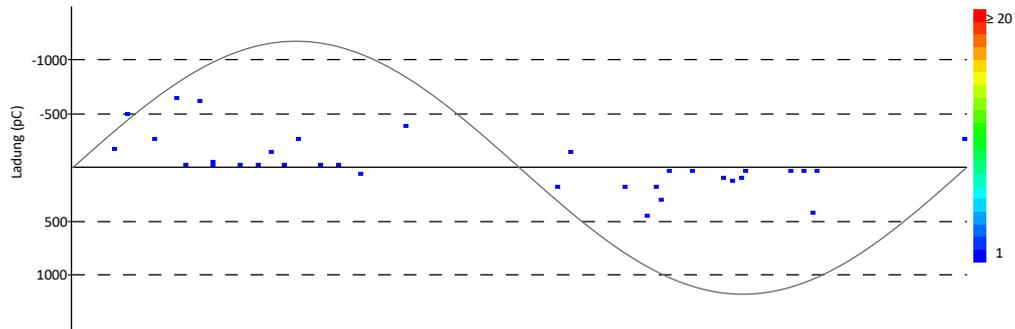


Abbildung 7.11: PRPD-Diagramm des Kondensators SN18 von 2 kV bis 4 kV

Die in Abbildung 7.12, Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 dargestellten Verteilungsmuster ähneln einander von ihrer Phasenverteilung. Die Verteilungsmuster entsprechen dabei dem erwarteten TE-Muster von Hohlraum- oder Oberflächenentladungen.

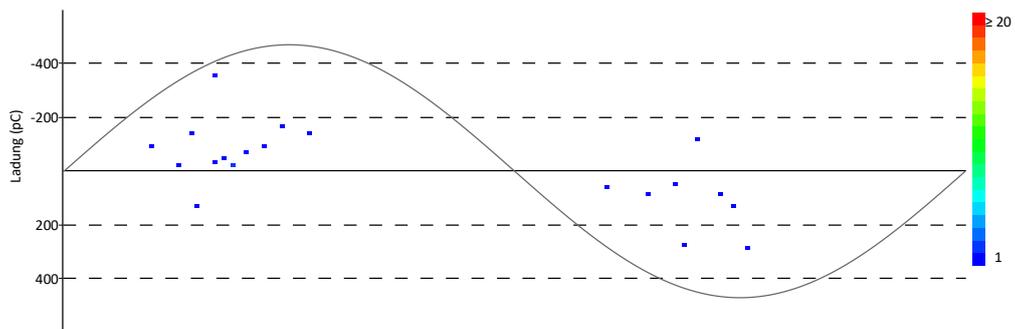


Abbildung 7.12: PRPD-Diagramm des Kondensators SN11 von 2 kV bis 4 kV

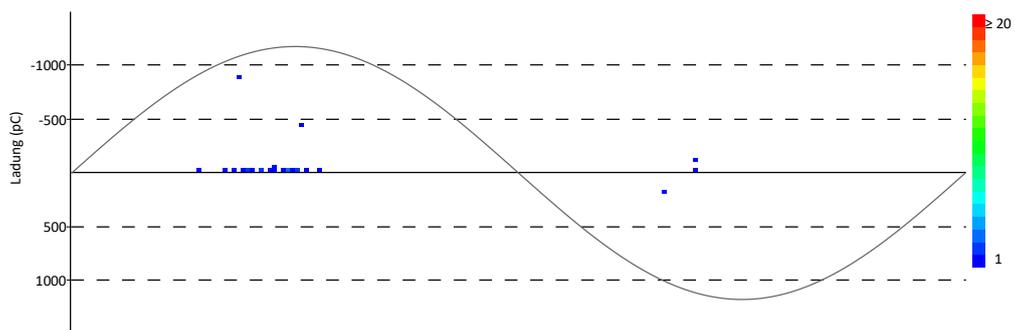


Abbildung 7.13: PRPD-Diagramm des Kondensators SN16 von 2 kV bis 4 kV

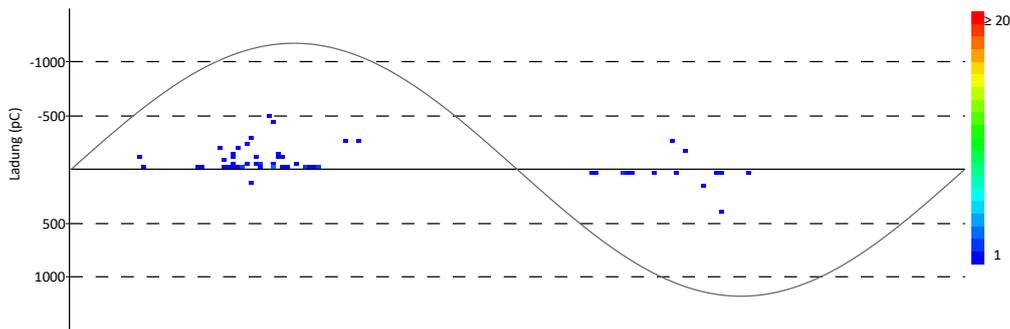


Abbildung 7.14: PRPD-Diagramm des Kondensators SN17 von 2 kV bis 4 kV

Das PRPD-Diagramm von Kondensator SN19 (siehe Abbildung 7.15) entspricht keinem der charakteristischen TE-Muster. TE setzten dabei kurzzeitig bei einer Prüfspannungshöhe von 2 kV ein, während der Spannungsstufe von 3 kV setzten sie dann wieder vollständig aus. Bei einer Spannungshöhe von 4 kV setzten sie dann erneut wieder ein. Das sich bei 4 kV ergebende TE-Muster entsprach dann einem ähnlichen Verteilungsmuster, wie es bereits an Kondensator SN11 aufgezeichnet wurde.

Das anfänglich auftretende Verteilungsmuster kann nicht erklärt werden. Anders als bei den Kondensatoren zuvor treten an Kondensator SN19 in der positiven Spannungshälfte mehr positive als negative Entladungen auf. Zudem offenbaren sich lediglich TE im Bereich des Spannungsnulldurchgangs um  $0^\circ$ .

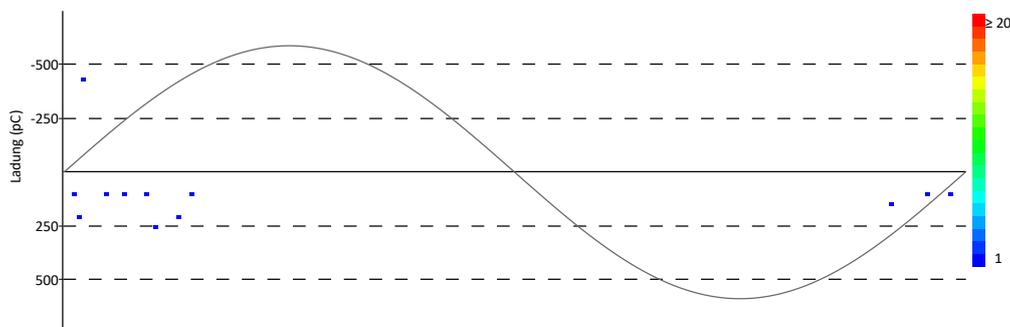


Abbildung 7.15: PRPD-Diagramm des Kondensators SN19 von 2 kV

### Vergleich zwischen den Chargen

Bei den Kondensatoren der alten Charge SN29, SN30 und SN32 wurden für Hohlraum-

und Oberflächenentladung typische TE-Muster erkannt. Bei den Kondensatoren der neuen Charge SN34, SN35, SN36 und SN38 war dies ebenfalls der Fall. Auch bei den Kondensatoren der bereits betriebenen Charge wurden hohlraum- und oberflächenentladungstypische Verteilungscharakteristiken beobachtet.

Die TE-Ursache wird folglich an allen Kondensatoren auf Lufteinschlüsse im Dielektrikum oder auf Oberflächenentladungen in geschichtetem Dielektrikum zurückgeführt.

Eine Nähe der Fehlstellen zu einer der Elektroden konnte nicht eindeutig erkannt werden. In keinem der PRPD-Diagramme wies eine der Spannungshalbwellen Entladungsintensitäten auf, die mindestens um den Faktor 3 größere waren als diejenigen der anderen Spannungshalbwelle.

### Verhältnis aus Teilentladungsaussetz- und Teilentladungseinsetzspannung

Das Verhältnis von TEA zur TEE kann ebenfalls Aufschluss über die Art der TE-Quelle geben. Da sich die Werte der TEE und TEA durch elektrische Alterungsprozesse ändern können, werden hier nur die Verhältnisse aus TEA und TEE der alten und neuen Charge untersucht. Die Verhältnisse sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Verhältnis aus Teilentladungsaussetzspannung und Teilentladungseinsetzspannung in Abhängigkeit des untersuchten Kondensators

	Alte Charge				Neue Charge			
Serien.-Nr.	29	30	31	32	34	35	36	38
$U_e/U_i$	0,7	0,5	<0,7	<0,7	1,3	1	1	0,7

Da bei zwei der Kondensatoren die TEA kleiner war als die kleinste verwendete Spannungsstufe von 2kV, kann dort kein genauer Wert für das Verhältnis von TEA zu TEE bestimmt werden. Auf Basis der Auswertungsergebnisse der PRPD-Diagramme ist bekannt, dass es sich bei der TE-Ursache wahrscheinlich um Hohlraum- oder Oberflächenentladungen handelt.

Hohlraum- oder Oberflächenentladungen würden, wie in Abbildung 3.15 dargestellt, zu einem Verhältnis von  $U_e/U_i < 1$  führen. Da die TEA bei dieser Art von TE-Ursache meist zwischen 10 - 35 % kleiner ist als die TEE, ist ein Verhältnis von  $U_e/U_i \approx 0,7$  bis  $U_e/U_i \approx 0,9$  zu erwarten. Dies ist bei den Kondensatoren SN29 und SN38 auch der Fall.

Es wird jedoch erwartet, dass es sich um eine Vielzahl an TE-Quellen handelt, die Einfluss auf die in Tabelle 7.1 gelisteten Ergebnisse nehmen. Durch die Überlagerung der einzelnen Verhältnisse schwindet der Aussagegehalt des Gesamtergebnisses. Das Verhältnis  $U_e/U_i$  wird durch die jeweils kleinste Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannung, der sich überlagernden TE-Ursachen dominiert. Daher fallen neben den erwarteten Verhältnissen, die Verhältnisse  $U_e/U_i = 1$  und  $U_e/U_i = 1,3$  auf.

Ein Verhältnis von  $U_e/U_i = 1$  deutet dabei nach Abbildung 3.15 auf Koronaentladungen hin. Hinweise auf Koronaentladungen ließen sich tatsächlich anhand des PRPD-Diagramms von Kondensator SN35 identifizieren. In Abbildung 7.4 ist die für Koronaentladungen typische Verteilung in der negativen Spannungshalbwelle zu erkennen. Dort kam es um den Scheitelwert der Prüfspannung herum zu mehreren TE kleiner Entladungsintensität. Die im Diagramm überlagerten TE sind im TE-Muster grün eingefärbt. Im PRPD-Diagramm des Kondensators SN36 waren Koronaentladungen lediglich zu erahnen. Es ist dennoch nicht auszuschließen, dass aufgrund der Überlagerung mehrerer TE-Ursachen, koronaentladungstypische Verteilungen schlechter in den PRPD-Diagrammen identifiziert werden konnten. Bei Kondensator SN38 an dem Koronaentladungen am eindeutigsten nachgewiesen werden konnten, traten auch Hohlraum- oder Oberflächenentladungen auf, welche das Ergebnis aus  $U_e/U_i$  dominieren. Daher konnte dort kein Verhältnis von  $U_e/U_i = 1$  festgestellt werden.

Das für Kondensator SN34 bestimmte Verhältnis von  $U_e/U_i = 1,3$  lässt sich anhand von Abbildung 3.15 nicht erklären. Ein Verhältnis von  $U_e/U_i > 1$  lässt sich keinem der charakteristischen Hystereseverläufe zuordnen. Vermutlich resultierte ein Verhältnis aus der Überlagerung unterschiedlicher charakteristischer TEE und TEA.

Die in 7.1 dargestellten Ergebnisse scheinen damit plausibel und erklärbar. Eine genauere Analyse des Verhältnisses  $U_e/U_i$  soll jedoch nicht vorgenommen werden, da es bewiesenermaßen zur Überlagerung unterschiedlicher charakteristischer TEE und TEA kommt.

Über die genauere Beschaffenheit der TE-Quellen, beispielsweise die Größe von Hohlräumen, kann dementsprechend keine Aussage getroffen werden.

### 7.3.2 Schädlichkeit der Defekte

#### Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannung

Die Schädlichkeit einer TE-Quelle hängt unter anderem davon ab, ob die TEE größer ist als die Betriebsspannung. In diesem Fall ist der Prüfling keiner dauerhaften elektrischen Alterung ausgesetzt.

Ein weiteres Kriterium ist, dass die TEA größer ist als die Betriebsspannung. Nur in diesem Fall können durch kurzzeitig auftretende Überspannung, gezündete TE sicher verlöschen [14]. Weshalb TE auch auftreten können, obwohl der Scheitelwert der Betriebsspannung nicht der Zündspannung der TE entspricht, ist in Abschnitt 3.1.4 erläutert.

Die in Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 gelisteten Ergebnisse der TEE und TEA zeigen, dass keines der beiden Kriterien erfüllt ist. Die Betriebsspannung liegt mit 6,3 kV bis 9,2 kV deutlich über den aufgenommenen Messwerten der TEE und TEA.

Unter Belastung der Prüflinge mit einer Wechselspannung würde es daher zu einer durchgängigen Belastung des Isolationsmaterial kommen. Die Übertragbarkeit auf die im Betrieb verwendete gepulste Rechteckspannung muss in einer weiterführenden Recherche geklärt werden.

Die Ergebnisse in Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 sind vom schlechtesten Wert (SN18) zum vergleichsweise besten Wert (SN34) hin sortiert.

Tabelle 7.2: Vergleich der Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen

Kondensator	SN18	SN32	SN31	SN02	SN17	SN16	SN38
$U_i$ in kV	2	3	3	3	4	4	3
$U_e$ in kV	2	<2	<2	<2	<2	<2	2

Alte Charge: SN31, SN32 | Neue Charge: SN38 | Betriebene Charge: SN02, SN16, SN17, SN18

Tabelle 7.3: Vergleich der Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannungen

Kondensator	SN29	SN11	SN30	SN36	SN35	SN34
$U_i$ in kV	3	3	4	3	3	3
$U_e$ in kV	2	2	2	3	3	4

Alte Charge: SN29, SN30 | Neue Charge: SN34, SN35, SN36 | Betriebene Charge: SN11

Der Kondensator SN19 wurde nicht in den Tabellen 7.2 oder 7.3 aufgeführt, da der Prüfling keine durchgängige Erhöhung seiner TE-Anzahl mit zunehmender Prüfspannung aufwies. In der Norm IEC 60270 wird angemerkt, dass solch ein Verhalten bei verschiedenen Typen von Isolierungen vorkommen kann. Da keiner der anderen Prüflinge ein solches Verhalten aufwies kann davon ausgegangen werden, dass sich der Prüfling in der Beschaffenheit seiner Isolation von denjenigen der anderen unterscheidet. Inwiefern sich die Isolation von denen der anderen Kondensatoren unterscheidet, ist indes unklar.

### **Art der Teilentladungsursache**

Wie aus der Analyse der PRPD-Diagramme hervorgeht, handelt es sich bei den Fehlstellen entweder um Hohlräume oder Gleitentladungen im geschichteten Dielektrikum. Zusätzlich kam es an einigen Prüflingen zu Koronaentladungen.

Koronaentladungen in Gas gelten als eher ungefährlich. Ihr Auftreten ist primär von wirtschaftlichem Interesse und kann daher vernachlässigt werden.

Von Oberflächenentladungen geht eine höhere Gefahr aus. Ist die Spannung groß genug, bilden sich Streamer-Entladungen entlang der Grenzflächen aus. Diese bedingen ebenfalls die Bildung von Electrical Trees.

Hohlraumentladungen repräsentieren die höchste Gefahr. Bereits geringe TEI können über Jahre hinweg zur Bildung von Electrical Trees führen. Die erosive Wirkung von TE wird dabei durch die Entladungsintensität und die Anzahl an TE in ihrer Geschwindigkeit beeinflusst.

Daher sollen die Impulswiederholrate und die Spitzendurchschnittsentladung der alten und der neuen Charge näher untersucht werden. Die Ergebnisse der alten und neuen Kondensatorcharge sind in Tabelle 7.4 veranschaulicht.

Besonders auffällige Ergebnisse der Impulswiederholrate und der Spitzendurchschnittsentladung sind in Fettdruck hervorgehoben.

Tabelle 7.4: Anzahl an Teilentladungs-Events und maximale Teilentladungsintensität

Alte Charge			Neue Charge		
Serien-Nr.	$n$	$Q_{\max 5}$ in pC	Serien-Nr.	$n$	$Q_{\max 5}$ in pC
29	8273	705	34	6413	<b>377</b>
30	8146	760	35	7699	615
31	9265	668	36	6607	415
32	9692	742	38	<b>11338</b>	878
Mittelwert	8844	719	Mittelwert <sup>1</sup>	6906	571

<sup>1</sup> Mittelwertbildung erfolgte unter Außerachtlassung der Impulswiederholrate des Kondensators SN38

Die Ergebnisse der Impulswiederholraten variieren sowohl zwischen der alten und der neuen Charge als auch innerhalb der Chargen. Unter Außerachtlassung von Kondensator SN38 sind die TEI und die Impulswiederholraten der alten Charge generell höher als bei der neuen Charge. Der Mittelwert der Impulswiederholrate der alten Charge ist um 22 % höher als bei der neuen Charge und die Spitzendurchschnittsentladung ist um 21 % höher als bei der neuen Charge.

Worauf sich die Unterschiede zwischen den Chargen zurückführen lassen, bleibt zunächst offen. Eine Theorie lautet, dass das Dielektrikum der Kondensatoren über die Lagerungszeit hinweg gealtert ist. Dabei unterlagen die Kondensatoren über die Zeit der Lagerung keinen großen Temperaturschwankungen. Die Umgebungstemperatur bei der Lagerung belief sich durchschnittlich auf 20 °C.

Die Ursache für die auffällig hohe Anzahl an TE bei SN38 konnte auf Koronaentladungen in Gas zurückgeführt werden, die nur geringe Entladungsintensitäten aufwiesen. Diese können meist als ungefährlich angesehen werden. Das Ergebnis wurde folglich nicht in die Mittelwertbildung der Charge einbezogen.

Die Ursache für die besonders niedrige Spitzendurchschnittsentladung an Kondensator SN34 kann nicht erklärt werden. Da an Kondensator SN34 auch die niedrigste Impulswiederholrate gemessen wurde, kann davon ausgegangen werden, dass der Kondensator im Vergleich zu allen anderen Kondensatoren eine besonders gute Qualität besitzt.

Aus den Messwerten der einzelnen Kondensatoren kann geschlossen werden, dass die Prüflinge unterschiedlich stark vorgeschädigt sind. Grundsätzlich sticht unter Berücksichtigung der Fehlerwerte, keiner der Kondensatoren besonders negativ hervor. Alle Kondensatoren bis auf Kondensator SN34 scheinen ungefähr gleich stark vorgeschädigt

zu sein. Dies scheint plausibel, da bisher nur einer der insgesamt 26 im Beschleuniger verbauten Pulscondensatoren ausgefallen ist.

In Anhang C sind ergänzend PRPD-Diagramme eines jeden Prüflings dargestellt, die das TE-Verhalten über den gesamten Hysterese- und Spannungssteigerungsversuch veranschaulichen. Diese könnten in Zukunft als zusätzliches Vergleichsmaterial zur Identifikation identischer Fehlstellenbeschaffenheit dienen.

### 7.3.3 Alterungsgeschwindigkeit

Den Ergebnissen der alten und neuen Charge wurden die Ergebnisse der bereits im Beschleuniger eingesetzten Kondensatoren gegenübergestellt. Die Messwerte sind Tabelle 7.5 zu entnehmen. In der Tabelle sind die Betriebsspannung  $U_B$ , die Betriebsstunden  $t$ , die Impulswiederholrate  $n$ , sowie die Spitzendurchschnittsentladungen  $Q_{\max 5}$  der aufgezzeichneten TEI aufgeführt. Die Kondensatoren sind aufsteigend nach der Betriebsspannung (Spalte 3) sortiert.

Tabelle 7.5: Anzahl an Teilentladungs-Events und maximale Teilentladungsintensität der bereits betriebenen Kondensatoren

Station	Serien-Nr.	$U_B$ in kV	$n$	$Q_{\max 5}$ in pC	$t$ in h
A1.I1	02	6,2	10161	898	47705
A6.L3	16	7,2	11200	1188	41422
A19.L3	19	8,3	<b>9674</b>	<b>2601</b>	34500
A11.L3	17	8,4	11063	1603	13134
A22.L3	18	8,4	<b>11812</b>	<b>2095</b>	37514
A4.L3	11	9,2	11020	1121	41050

Standardabweichung:  $3 \sigma_{n \text{ rel}} = 10 \%$  und  $3 \sigma_{Q \text{ rel}} = 30 \%$  | Temperatur:  $16^\circ\text{C}$  Relative Luftfeuchtigkeit: 44 %

An der bereits betriebenen Charge wurden unter Außerachtlassung des Kondensators SN38 bisher die größten Impulswiederholraten gemessen. Dabei scheint weder die Betriebsdauer noch die Betriebsspannung der Kondensatoren einen dominanten Einfluss auf die Anzahl an TE zu haben.

Auch für die Spitzendurchschnittsentladung gilt, dass kein direkter Zusammenhang zur Betriebsspannung oder Betriebszeit festzustellen ist. Mit dem Wissen, dass die Prüflinge sich in ihrem TE-Verhalten schon von Werk ab unterscheiden (siehe Tabelle 7.4)

kann davon ausgegangen werden, dass die Kondensatoren SN18 und SN19 bereits stärker vorgeschädigt waren als die anderen Kondensatoren der Charge.

Der Prüfling SN19 weist im Vergleich zu den Maximalwerten der alten und neuen Charge eine, um das Dreifache erhöhte Spitzendurchschnittsentladung auf. Bei dem Kondensator SN18 ist die Spitzendurchschnittsentladung über zweimal so groß wie die Maximalwerte der alten und neuen Charge.

Auffällig ist, dass der Kondensator SN18 den Maximalwert der Impulswiederholrate der Charge besitzt, während der Kondensator SN19 den Minimalwert der gemessenen Impulswiederholrate aufweist. Damit sind beide Kondensatoren sowohl in ihrer Spitzendurchschnittsentladung als auch in ihrer Impulswiederholrate auffällig.

Die Verringerung der Impulswiederholrate an Kondensator SN19 scheint dabei eine neue Alterungsstufe darzustellen, die auf eine noch weiter fortgeschrittene elektrische Alterung hindeutet. Eine Abnahme der Impulswiederholrate deutet, wie in Abschnitt 3.1.6 und Unterkapitel 4.3 beschrieben, auf einen bevorstehenden Ausfall des Prüflings hin. Es wird unterstellt, dass sich bereits ein Electrical Tree im Isolationsmaterial gebildet hat. Dies würde auch das Verhalten des Kondensators erklären, dass bei Anlegen einer Prüfspannung zuerst TE einsetzen und anschließend direkt wieder aussetzen. Dieses Verhalten kann damit begründet werden, dass die Oberfläche der entstandenen Bäumchenstruktur anfänglich einmal aufgeladen werden muss. Das Ein- und Aussetzen von TE und das anschließende Wiedereinsetzen wurden in Abschnitt 7.3.2 beschrieben. Bei jener Untersuchung wurde das Verhalten der Prüflinge in Bezug auf ihre TEE und TEA analysiert.

### 7.3.4 Restlebensdauerabschätzung

Im Umfang dieser Arbeit sollte geklärt werden, ob sich anhand der Ergebnisse eine Vorhersage hinreichender Sicherheit über den Ausfall eines Kondensators treffen lässt. Eine hinreichende Sicherheit wird hier gleichbedeutend mit einer Genauigkeit von einem Jahr verstanden. Diese Interpretation basiert auf der Umsetzbarkeit von maximal 13 Messungen innerhalb eines Shutdowns. Dies entspricht der Messungen der Hälfte aller Kondensatoren. Shutdowns finden zweimal pro Jahr statt, sodass eine Messung aller Kondensatoren innerhalb eines Jahres möglich ist.

Die Lebensdauer kann nicht wie in Abschnitt Lebensdauerabschätzung, siehe Abschnitt 3.3.12 anhand der Gleichung 3.9 beziehungsweise der Gleichung 3.10 abgeschätzt werden. Für die Bestimmung der Restlebensdauer hätten vor dem Winter-Shutdown noch mehrere Kondensatoren ausfallen müssen. Es konnte keine Funktion zur erwartbaren Lebensdauer ermittelt werden. Eine Einordnung von Prüflingen auf der Lebensdauerkennlinie anhand ihrer TE-Messwerte ist demnach nicht möglich.

Vorerst müssen alle Messwerte der betriebenen Kondensatorcharge als unbedenklich angesehen werden. Erst wenn einer der im Umfang dieser Abhandlung geprüften Kondensatoren ausfällt, kann eine Abschätzung des Schädigungszustandes vorgenommen werden. In Tabelle 7.6 sind die **noch** als sicher geltenden Höchstwerte der Impulswiederholfrequenz und der Spitzendurchschnittsentladung dargestellt.

Tabelle 7.6: Referenz- und Grenzwerte der Spitzendurchschnittsentladung und der Impulswiederholfrequenz

Ungealtert und unbedenklich <sup>1</sup>		Gealtert und Ohne Ausfall <sup>2</sup>	
$Q_{\max 5}$ in pC	$n$	$Q_{\max 5}$ in pC	$n$
< 900	< 10000	< 2600	< 12000

<sup>1</sup> Ergebnisse der Kondensatoren SN32 und SN38 | <sup>2</sup> Ergebnisse der Kondensatoren SN18 und SN19

### 7.3.5 Eignung des Messgerätes

Das eingesetzte Messgerät eignet sich wie in Unterkapitel 5.1 beschrieben, nur bedingt für eine detaillierte Analyse von TE-Ursachen an einem Kondensator. Das Messsystem kann an Prüflingen, die kleinere Leiterlängen  $l$  als 1 m aufweisen, keine automatisierte Unterscheidung zwischen reflektierten Impulsen und ursprünglichen Impulsen vornehmen. Dadurch kommt es zu einer Verzerrung der Messergebnisse. Außerdem ist auch die Lokalisierung der TE-Ursache unter der Bedingung  $l < 1$  m nicht möglich.

Ausschließlich die Kenngrößen der klassischen TE-Diagnose werden durch das Messsystem zur Analyse der Fehlstellen herangezogen. Moderne Analysemethoden wie eine zusätzliche Frequenzanalyse der TE-Impulse, zur Separierung sich im PRPD-Diagramm überlagernder Verteilungsmuster, werden nicht unterstützt. Stochastische Größen, die eine tiefgehende Analyse der Datensätze ermöglichen würden, werden ebenfalls nicht bereitgestellt.

Ein Export der aufgenommenen Messdaten ist lediglich in Form eines SQL-Datenbanksatzes möglich, gängige Dateiformate wie CSV oder XLSX werden nicht unterstützt. Eine weiterführende Analyse der Messdaten war daher nur unter erschwerten Bedingungen möglich. Die benötigten Datensätze mussten zur Verarbeitung einzeln aus den exportierten SQL-Datenbanken in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen werden.

Das Messsystem ist für die Ein- oder Mehrphasenanalyse von Kabelstrecken optimiert. Für eine tiefere wissenschaftliche Analyse von Prüflingen, die keine Kabel sind, ist das Messgerät nicht geeignet.

**Hinweis:** Alle Rohdaten zur Auswertung der Messwerte verwendete Skripte und PRPD-Diagramme, sowie alle Datenblätter und eine digitale Kopie dieser Arbeit befinden sich auf CD und können beim Erstgutachter eingesehen werden.

## 8 Fazit und Zusammenfassung

Teilentladungen sind Entladungen, die nur einen Teil der Isolationsstrecke betreffen und nicht sofort zum Durchschlag führen. Teilentladungen können in drei Arten unterteilt werden. Dazu gehören Hohlraumentladungen, Koronaentladungen und Oberflächenentladungen.

An den in dieser Arbeit untersuchten Kondensatoren konnten Hohlraum- oder Gleitentladungen identifiziert werden. Diese stellen die größte Gefahr der drei Teilentladungsarten dar, denn sie können zur Ausbildung von Electrical Trees führen. Bei einer fortschreitenden Vergrößerung des Electrical Trees kommt es zum immer weiteren Durchschlagen der Isolationsstrecke. Sobald die Isolationsstrecke fast gänzlich überbrückt ist, erfolgt der vollständige Durchschlag.

Die Untersuchung neuer und gealterter Kondensatoren hat gezeigt, dass die teilentladungsverursachenden Fehlstellen bereits bei der Manufaktur entstehen. Die genaue Beschaffenheit der Fehlstellen unterschied sich dabei im Detail zwischen allen Kondensatoren. Messungen an vergleichbaren Kondensatoren haben ergeben, dass die im Umfang dieser Studie untersuchten Kondensatoren doppelt bis dreifach so hohe Messwerte aufwiesen. Dies deutet auf eine mindere Qualität der Kondensatoren hin.

An gealterten Kondensatoren konnte keine Abhängigkeit zur Betriebsdauer oder zur Betriebsspannung festgestellt werden. Zwei der gealterten Kondensatoren fielen dabei jedoch aufgrund ihrer hohen Teilentladungsintensitäten auf. Dabei wies einer der Kondensatoren zusätzlich die maximale Impulswiederholrate an Teilentladungen auf. Der andere Kondensator wies die kleinste gemessene Impulswiederholrate auf. Das Verhalten der beiden Kondensatoren deutete auf einen fortgeschrittenen Alterungsprozess hin. Bei diesem nimmt die Impulswiederholrate erst ab und anschließend wieder zu, bis es zum vollständigen Durchschlag kommt.

Die maximalen an gealterten Kondensatoren gemessenen Teilentladungsintensitäten und Impulswiederholraten gelten zunächst als unbedenklich anzunehmende Grenzwerte.

Die gemessenen Teilentladungsintensitäten und Impulswiederholraten liefern vorerst keinen Anhaltspunkt zur erwartbaren Restlebensdauer. Teilentladungsbedingte Schädigungsverläufe sind komplexe Vorgänge, die meist nur durch Praxiserfahrung eingeschätzt werden können. Um eine Aussage über die Restlebensdauer treffen zu können, müssen vorerst weitere Pulscondensatoren ausfallen, deren Messdaten bekannt sind. Eine Restlebensdauerabschätzung ist folglich nicht möglich.

Die Lokalisierungstechnik des verwendeten Messsystems konnte nicht für die Ortung von Teilentladungsursachen verwendet werden. Für Prüflinge mit einem komplexeren Aufbau des Dielektrikums und einer Länge unter einem Meter gilt, dass eine Anwendung der Lokalisierungstechnik ausgeschlossen ist. Ein Datenexport der Messdaten ist lediglich in Form einer SQL-Datenbank möglich, gängige Dateiformate wie CSV oder XLSX werden nicht unterstützt. Eine weiterführende Auswertung von Messdaten war mithin nur unter erschwerten Bedingungen möglich.

# Literatur

- [1] DIN EN 60270:2016-11 VDE 0434:2016-11, Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000 + Cor.:2001 + A1:2015); Deutsche Fassung EN 60270:2001 + A1:2016.
- [2] DIN EN 61071:2008-01 VDE 0560-120:2008-01, Kondensatoren der Leistungselektronik (IEC 61071:2007); Deutsche Fassung EN 61071:2007.
- [3] DIN EN 62068:2014-03 VDE 0302-91:2014-03, Elektrische Isolierstoffe und Isoliersysteme - Allgemeines Verfahren zur Bewertung der elektrischen Lebensdauer bei Beanspruchung mit sich wiederholenden Spannungsimpulsen (IEC 62068:2013); Deutsche Fassung EN 62068:2013.
- [4] Katja Bammel u. a. *Naturwissenschaft und Technik*. „Hochfrequenz“ in: Brockhaus, Bd. 4, F.A. Brockhaus AG, 2003, S.915. 2003. ISBN: 3-7653-1062-X.
- [5] Susanne Behrend. „Optische und elektrische Untersuchungen zu Teilentladungen in transparenten Silikonelastomeren“. Diss. Technische Universität Berlin, 2015. DOI: [10.14279/depositonce-4489](https://doi.org/10.14279/depositonce-4489).
- [6] Michael Bousonville. *XFEL High Power RF-System*. DESY KITE-Forum | Konstrukteure, Ingenieure, Techniker, Entwickler [Vortrag], Hamburg. 2021. (Intranet). URL: [https://kite.desy.de/archiv/veranstaltungen/veranstaltungen\\_2021/](https://kite.desy.de/archiv/veranstaltungen/veranstaltungen_2021/) (besucht am 13.02.2023).
- [7] Mario Dolcic. „Restspannungsfestigkeit von betriebsgealterten Generatorstäben“. Magisterarb. Technische Universität Graz, 2013. URL: <https://diglib.tugraz.at/restspannungsfestigkeit-von-betriebsgealterten-generatorstaeben-2013> (besucht am 13.02.2023).
- [8] Robert Feidenhans'l. *Licht der Zukunft*. 2018. URL: [https://www.xfel.eu/news\\_and\\_events/flyers\\_and\\_brochures/index\\_eng.html](https://www.xfel.eu/news_and_events/flyers_and_brochures/index_eng.html) (besucht am 13.02.2023).

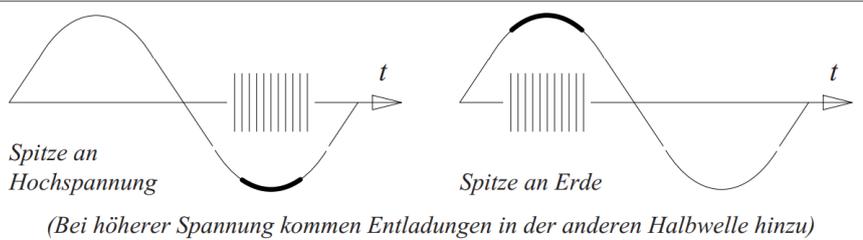
- [9] *Grundlagen der elektrischen Feldsteuerung*. 2012. URL: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/elektrischefeldsteuerung> (besucht am 13.02.2023).
- [10] Lucas Georg Adam Höfer. „Innere Teilentladungen bei Gleichspannungsbelastung“. Magisterarb. Technische Universität München, 2021. URL: <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1548918> (besucht am 13.02.2023).
- [11] Emil Jahoda und Jozef Kúdelčík. „Internal partial discharge in cavity of polyurethane“. In: *Procedia Engineering* 192 (2017). 12th international scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport, S. 365–369. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.063>.
- [12] Frederik Hendrik Kreuger. *Industrial High Voltage Volume I - Electric Fields, Dielectrics, Constructions*. Delft University Press, 1991. ISBN: 978-90-6275-561-5.
- [13] Victor Cajus Kröger. *Dokumentation zur Simulation und Analyse des Anpassnetzwerks des Hochspannungspulstransformators des XFEL*. 2022.
- [14] Andreas Küchler. *Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. 4. Aufl. Berlin: Springer Viewig, 2017. ISBN: 978-3-662-54700-7.
- [15] Tobias Neier. *Kabeldiagnose in erdverlegten Mittelspannungskabelnetzen. Theoretischer Hintergrund und praktische Anwendung*. Diagnosehandbuch. 2020.
- [16] *PHG 70 portable / PHG 80 portable - BAUR VLF-Prüfsystem*. 816-118-11. BAUR. Juli 2021.
- [17] Michael Schüller. „Auswirkungen erhöhter 1-Minuten Stehspannungsprüfungspegel auf die elektrische Lebensdauer des Isolationssystems rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen“. Magisterarb. Technische Universität Graz, 2018. URL: <https://diglib.tugraz.at/auswirkungen-erhoehter-1-minuten-stehspannungspruefungspegel-auf-die-elektrische-lebensdauer-des-isolationssystems-rotierender-elektrischer-hochspannungsmaschinen-2009> (besucht am 13.02.2023).
- [18] Christof Sumereder. „Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik“. Habilitationsschrift. Technische Universität Graz, 2010. ISBN: ISBN 978-3-85133-058-8.
- [19] *Technische Beschreibung - Zusatzdokumentation (DE-XFEL-MATCH1 ANPASSNETZWERK)*. 138050. Ampegon. 2014.

- [20] *Teilentladungsmessung*. Techn. Ber. Baumüller Services, 2022. URL: <https://www.baumueller-services.com/de/downloads/download/14-common/251-broschuere-teilentladungsmessung> (besucht am 13.02.2023).
- [21] *Was sind Teilentladungen?* Techn. Ber. OMICRON electronics GmbH, 2020. URL: <https://www.omicronenergy.com/de/applikation/offline-pruefung/offline-messung-und-analyse-von-teilentladungen/> (besucht am 13.02.2023).
- [22] Hualong Zheng, George Chen und Simon M. Rowland. „The influence of AC and DC voltages on electrical treeing in low density polyethylene“. In: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 114 (2020), S. 105386. ISSN: 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105386>.

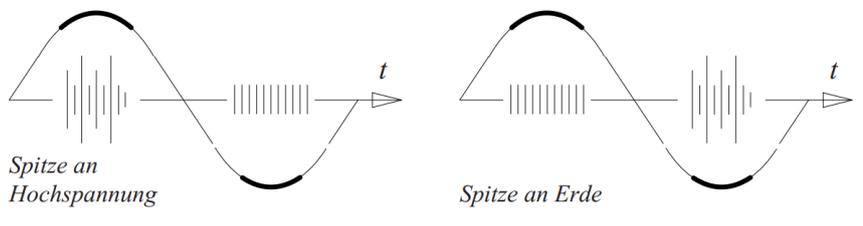


# A Phasenaufgelöste TE-Muster zur Interpretationshilfe

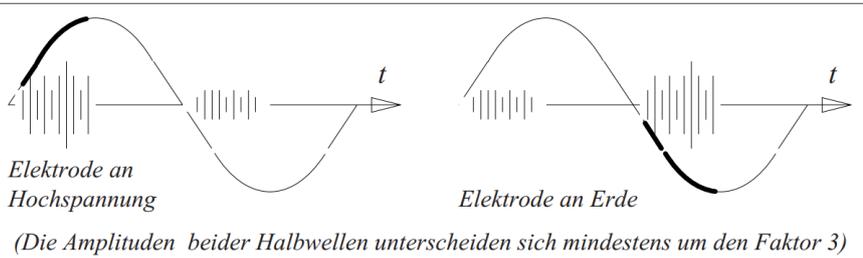
**a) Koronaentladung in Gas an einer Spitze gegen eine Platte.**  
 Regelmäßige Impulse konstanter Größe, Häufigkeit mit der Spannung zunehmend.



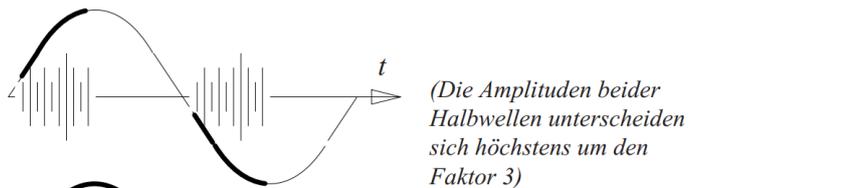
**b) Koronaentladung in Öl an einer Spitze gegen eine Platte.**  
 Kleinere, regelmäßige Impulse konstanter Größe, Häufigkeit mit der Spannung zunehmend.



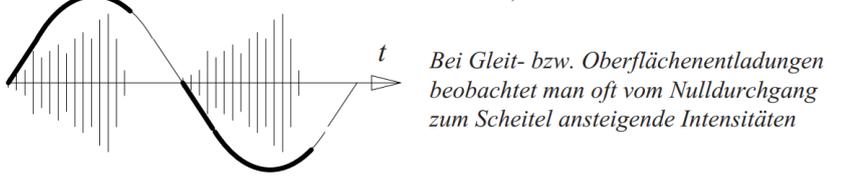
**c) Hohlraum- oder Oberflächenentladung mit einseitigem Kontakt zu einer Elektrode**  
 (Oberflächenentladungen sind bei erhöhter Spannung durch unregelmäßige und intensive Streamer-Entladungen erkennbar).



**d) Hohlraum- oder Oberflächenentladung ohne Elektrodenkontakt, Entladungen zwischen isolierten Leitern.**



**e) Gleit- oder Oberflächenentladung.**



- f) Kontaktrauschen**  
(links) und  
**g) Entladung von Elektroden auf freiem Potential**  
(rechts).

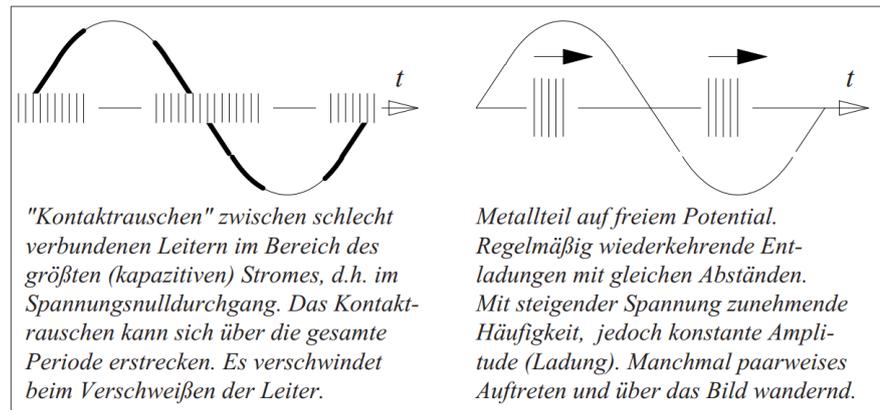


Abbildung A.1: Charakteristische TE-Muster zur Interpretationshilfe [14]

# B Anleitungen

## B.1 Kalibrierung des Messsystems

**Die Durchführung einer Kalibrierung erfolgt nach folgendem Schema:**

**Hinweis:** Es ist darauf zu achten, dass während der Kalibrierung keine Hochspannung eingeschaltet werden darf, da diese den Kalibrator beschädigen würde. Zudem ist explizit darauf zu achten, dass der Prüfling und der Koppelkondensator vor jeder Änderung am Prüfaufbau mit einer Erdungsstange geerdet werden.

1. Falls noch nicht erfolgt: Aufbau der Messschaltung
2. Höhe der Kalibrierungsladung einstellen
3. Den Kalibrator parallel zum Prüfling anschließen
4. In der Software zum Menüpunkt > Messen > Kalibrieren (cal) navigieren
5. Die eingestellte Kalibrierungsladung eingeben
6. Auf Messung starten klicken (Messung geht sehr schnell)
7. Kalibrator entfernen

Die Kalibrierung wurde durchgeführt wie in Abbildung B.1 dargestellt.

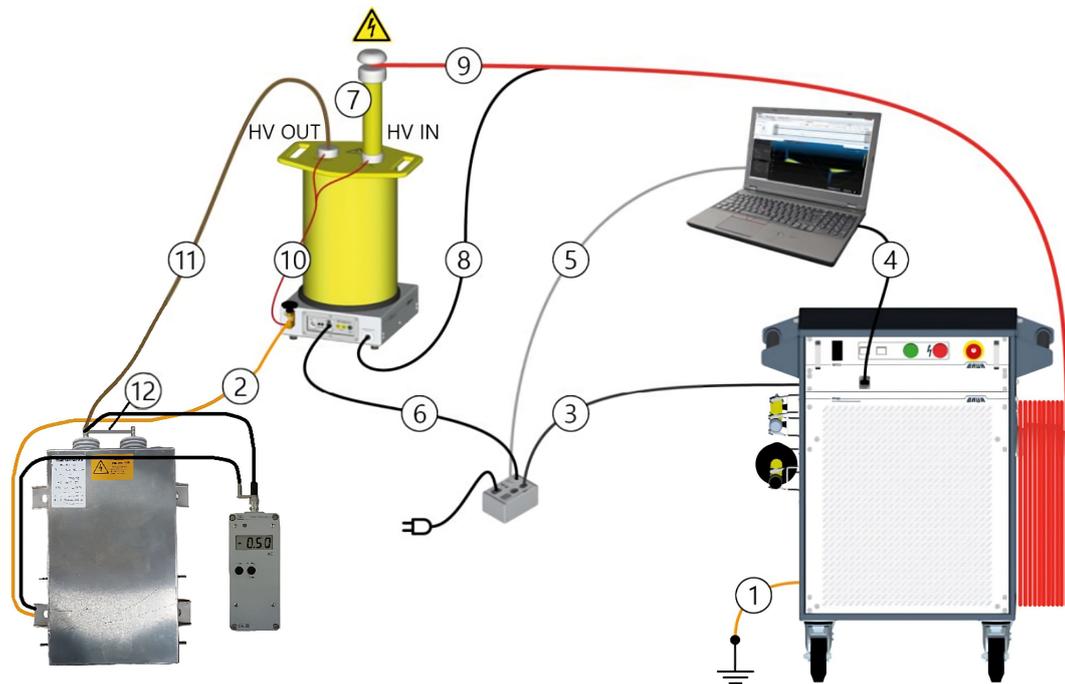


Abbildung B.1: Anschlussplan für die Kalibrierung des Teilentladungsmesssystems

Tabelle B.1: Erklärung der Anschlussplankomponenten des Messaufbaus bei einer Kalibrierung

Nummer	Erklärung	Nummer	Erklärung
1	Erdungsleitung des Prüfspannungsgenerators	7	HF-Filter
2	Erdungsleitung des Prüflings	8	Erdungsanschluss des Messsystems
3	Stromversorgung des Prüfspannungsgenerators	9	HV-Leitung
4	Leitung zur Steuerung des Prüfspannungsgenerators	10 <sup>1</sup>	Kurzschlussleitung des Koppelkondensators
5	Datenleitung (Messergebnisse des Messsystems)	11	HV-Anschlussleitung des Prüflings
6	Datenleitung (Messergebnisse des Messsystems)	12	Kurzschlussleitung zwischen den Elektroden des Prüflings

<sup>1</sup> Die Kurzschlussleitung (Nummer 10) wird vor dem Kalibriervorgang entfernt.

## B.2 Vorgehen bei der Messung eines Kondensators

### Beispielhafter Untersuchungsablauf

Das Vorgehen bei der Messung eines der Kondensatoren kann in den Einbau des Prüflings in den Messaufbau, die Durchführung der Messung und den Ausbau des Prüflings aus dem Messaufbau unterteilt werden.

#### Einbau des Prüflings in den Messaufbau:

1. Falls noch nicht geschehen: Notaus-Schalter am Prüfspannungsgenerator betätigen und mithilfe des beiliegenden Schlüssels gegen Wiedereinschalten sichern
2. Ein Kondensator wird von der Palette der aufgestapelten Kondensatoren genommen und zum Prüffeld getragen.
3. Die Erdungsklemme  $HV_-$  des Teilentladungsmessgeräts wird an das untere für die Montage des Kondensators vorgesehene Befestigungsbein angeschraubt. Es wird dabei auf festen Sitz der Klemme geachtet, um eine bestmögliche Kontaktierung zu gewährleisten.
4. Der Kurzschlussdraht wird von den Elektroden des Kondensators entfernt und der Hochspannungsanschluss  $HV_+$  des Teilentladungsmessgeräts wird wie im Realbetrieb an die linke Elektrode (Blickwinkel: Frontansicht) angeschlossen.
5. Die Drahtbrücke, die  $HV_-$  und die  $HV_+$ -Elektrode miteinander verbindet, wird angelegt.

#### Durchführung der Messung:

1. Entfernen der Erdungskabel des Koppelkondensators
2. Kalibrierung des Messaufbaus (siehe Abschnitt 3.3.7)
3. Räumen und absperren des Prüffeldes (Vorsicht Hochspannung)
4. Notaus-Schalter entsperren
5. Einschalten der Hochspannung
6. Starten des Hysterese- und Spannungssteigerungsversuchs
7. Ausschalten der Hochspannung

8. Notaus-Schalter am Prüfspannungsgenerator betätigen und mithilfe des beiliegenden Schlüssels gegen Wiedereinschalten sichern
9. Den Messaufbau mit dem Erdungsstab erden und anschließend den Koppelkondensator mithilfe der beiliegenden Erdungskabel kurzschließen
10. Das Prüffeld kann jetzt wieder frei betreten werden.

**Ausbau des Prüflings aus dem Messaufbau:**

1. Abnehmen der Drahtbrücke von den Elektroden des Prüflings
2. Abbau des HV-Anschlusses von der Elektrode des Prüflings
3. Anlegen des Kurzschlussdrahts an die Elektroden des Kondensators
4. Abbau der Erdungsklemme vom Prüfling
5. Deponierung des Kondensators auf der Palette der ungetesteten Kondensatoren

Der zeitliche Aufwand bei der Durchführung der Messung eines Kondensators entspricht folgender Auflistung:

1. Einbau des Prüflings in den Messaufbau: rund 5 min
2. Durchführung der Messung:
  - Kalibrierung: rund 3 min
  - Hysterese- und Spannungssteigerungsversuch: (17 Spannungsstufen) rund 7 min
3. Ausbau des Prüflings aus dem Messaufbau: rund 5 min

# C PRPD-Diagramme der Hauptmessung

## C.1 Alte Charge

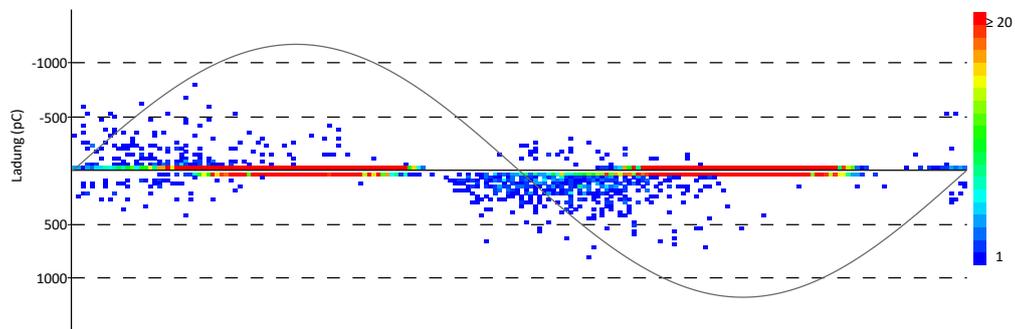


Abbildung C.1: PRPD-Diagramm des Kondensators SN29 von 2 kV bis 10 kV

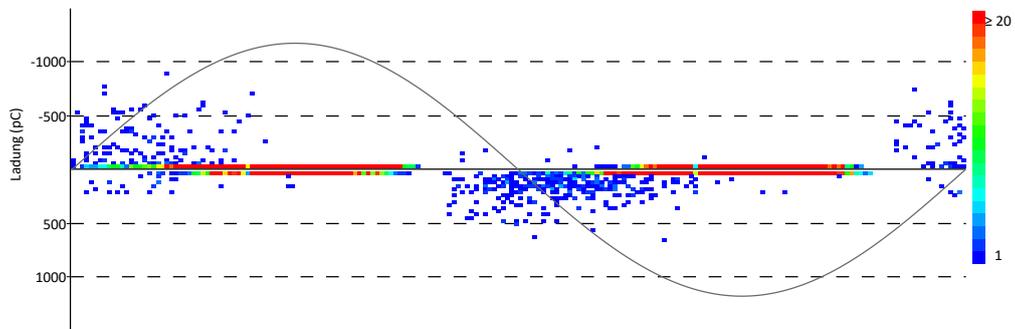


Abbildung C.2: PRPD-Diagramm des Kondensators SN30 von 2 kV bis 10 kV

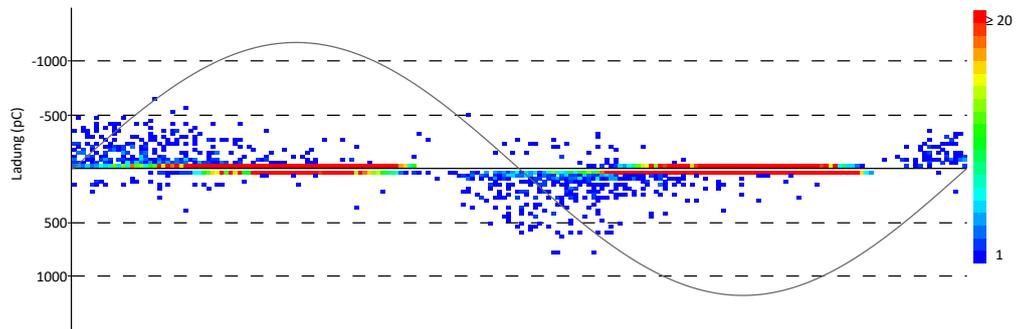


Abbildung C.3: PRPD-Diagramm des Kondensators SN31 von 2 kV bis 10 kV

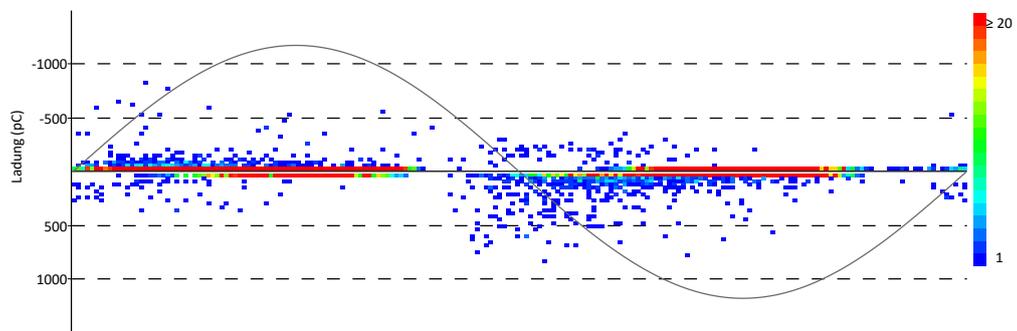


Abbildung C.4: PRPD-Diagramm des Kondensators SN32 von 2 kV bis 10 kV

## C.2 Neue Charge

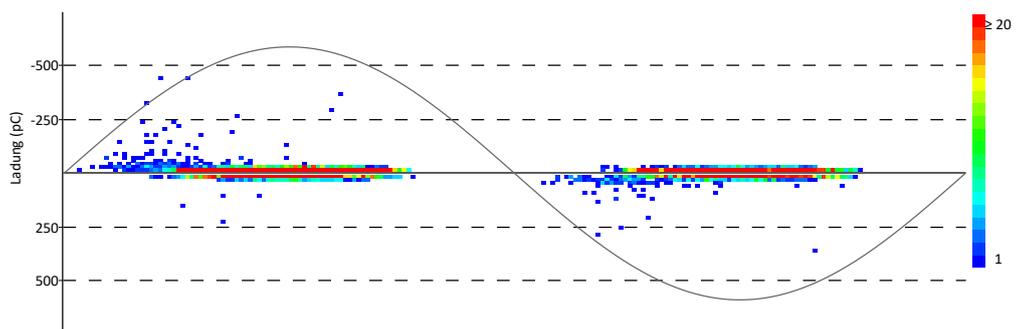


Abbildung C.5: PRPD-Diagramm des Kondensators SN34 von 2 kV bis 10 kV

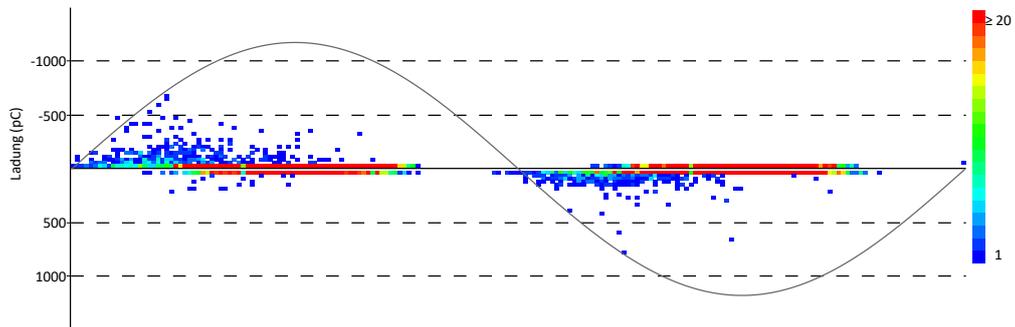


Abbildung C.6: PRPD-Diagramm des Kondensators SN35 von 2 kV bis 10 kV

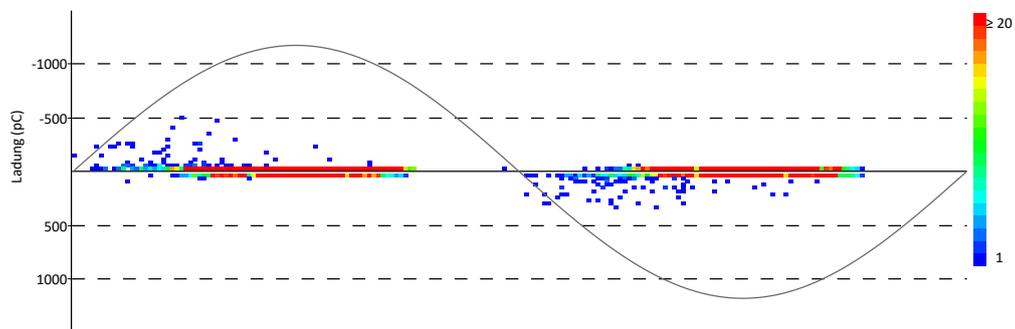


Abbildung C.7: PRPD-Diagramm des Kondensators SN36 von 2 kV bis 10 kV

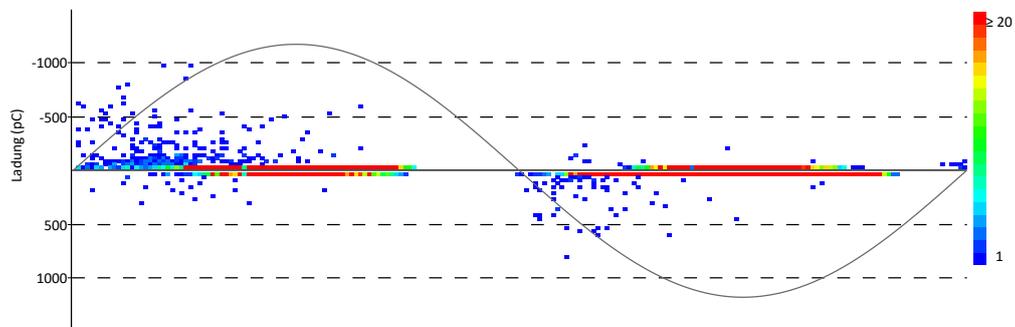


Abbildung C.8: PRPD-Diagramm des Kondensators SN38 von 2 kV bis 10 kV

### C.3 Betriebene Charge

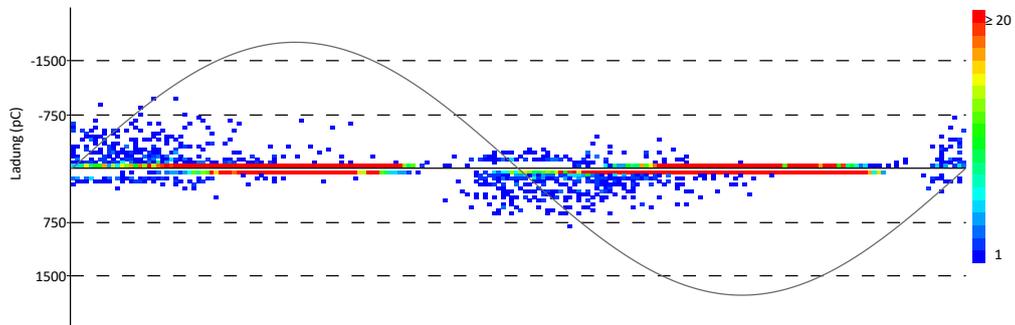


Abbildung C.9: PRPD-Diagramm des Kondensators SN02 von 2 kV bis 10 kV

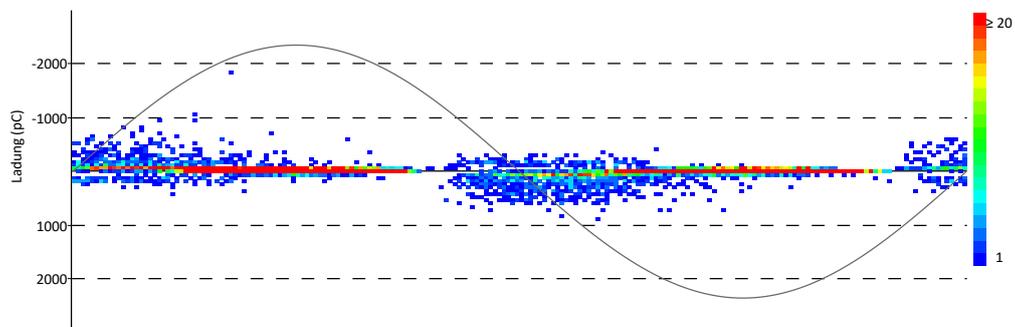


Abbildung C.10: PRPD-Diagramm des Kondensators SN11 von 2 kV bis 10 kV

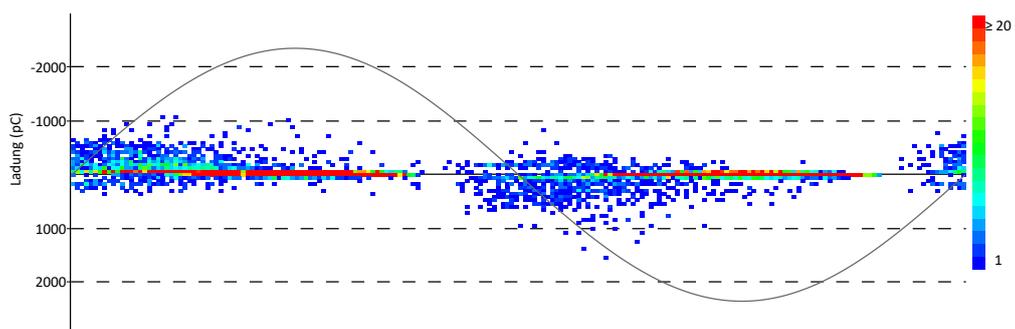


Abbildung C.11: PRPD-Diagramm des Kondensators SN16 von 2 kV bis 10 kV

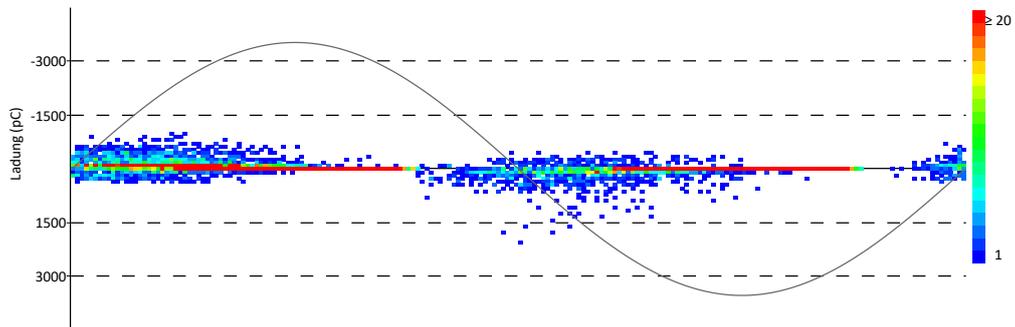


Abbildung C.12: PRPD-Diagramm des Kondensators SN17 von 2 kV bis 10 kV

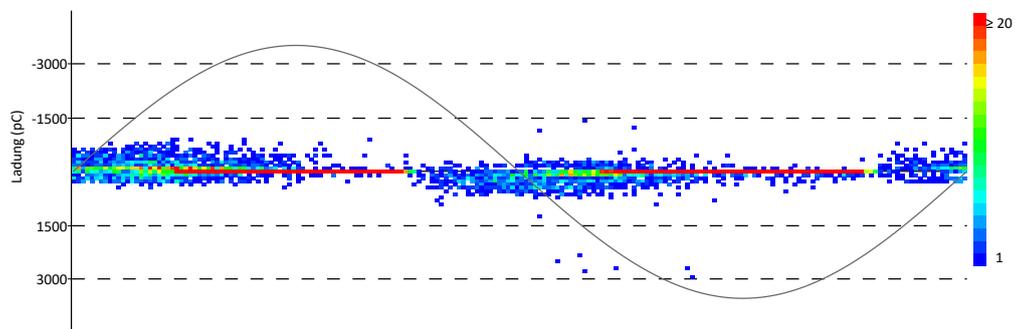


Abbildung C.13: PRPD-Diagramm des Kondensators SN18 von 2 kV bis 10 kV

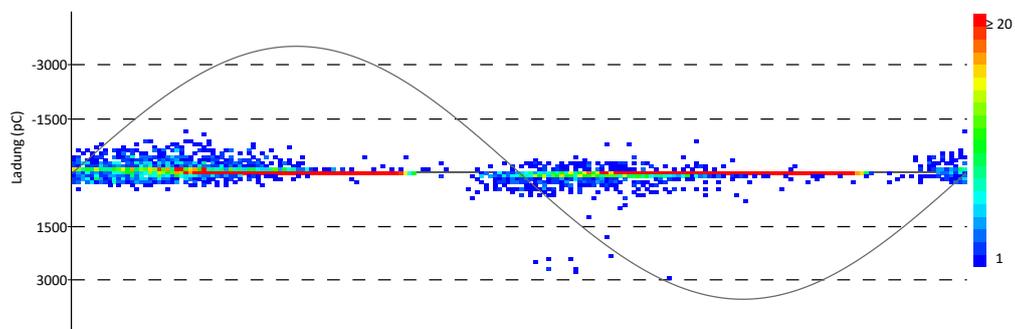


Abbildung C.14: PRPD-Diagramm des Kondensators SN19 von 2 kV bis 10 kV

# D Dokumentation des Aus- und Einbaus eines im Beschleuniger verbauten Kondensators

## **Ausbau der Kondensatoren**

Vor dem Beginn der Demontearbeiten wurden die Modulatoren geerdet und gegen Wiedereinschalten gesichert. Anschließend wurde eine Arbeitserde von der Gruppe Maschine Power Converter (MPC) an der Einspeisung der Pulstransformatoren installiert.

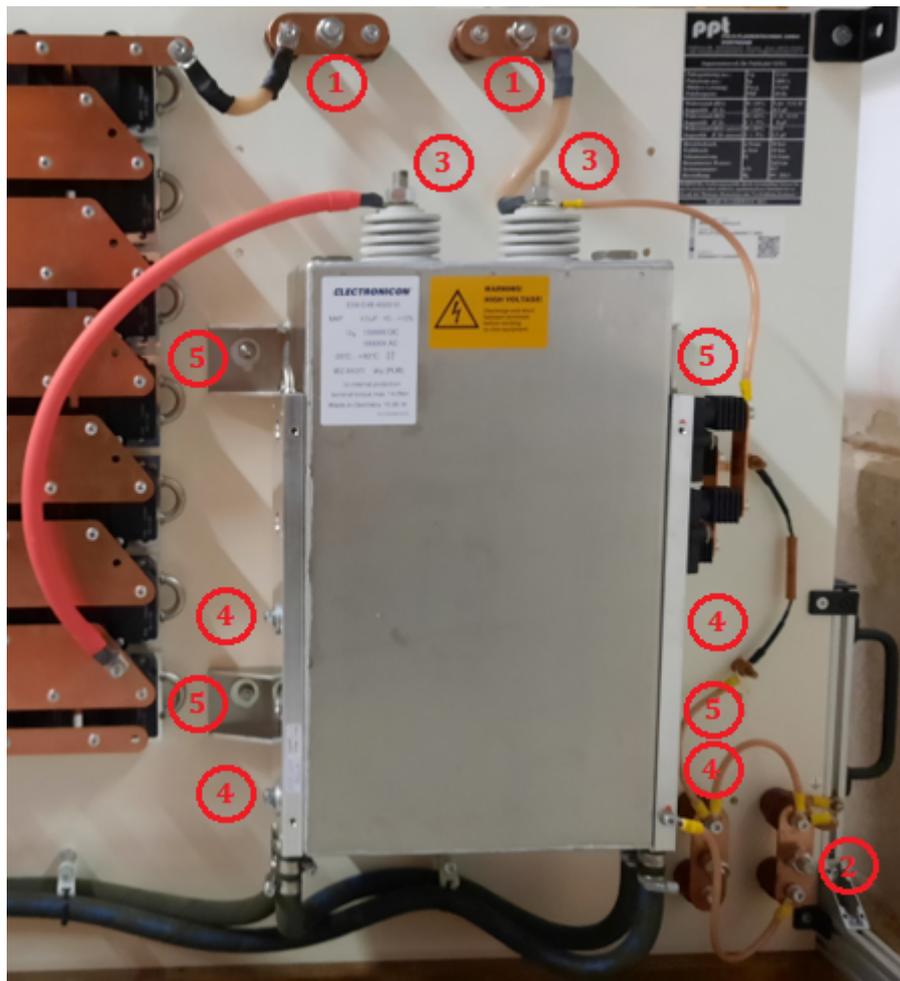
### **1. Öffnen des Zugangs**

Der erste Schritt des Ausbaus bildet das Öffnen des Zugangs. Dazu müssen die Bolzen (M22) und die Erdungsleitung ebenfalls (M22) mit einem Schlagschrauber demontiert werden.

### **2. Demontage aller Komponenten vom Hochspannungskondensator**

Um den Hochspannungskondensator demontieren zu können, müssen zuerst die Hochspannungseinspeisung (1) und die Erdung (2) [die Anschlussleitungen sind nicht in der Abbildung dargestellt] abgeschraubt werden. Dann kann das Anpassnetzwerk ein Stück aus dem Pulstransformator herausgezogen werden, um einen besseren Zugang für weitere Arbeitsschritte zu erhalten.

Im nächsten Schritt werden die HV-Anschlüsse (3) vom Kondensator mit einem M19 Schlüssel abmontiert. Daraufhin können die Kühlplatten (4) mit einem Schraubenschlüssel M10 abgeschraubt werden. Im letzten Schritt kann der Kondensator dann von der Montageplatte mit einem 8er Innensechskantschlüssel und einem Schraubenschlüssel M10 gekontert, abgeschraubt werden (5).



### 3. Schließen des Zugangs

Der Zugang zum Anpassnetzwerk muss während der Messungen an den Kondensatoren aufgrund der Gefahr eines Öllecks beziehungsweise bei Leckschlagen der inneren Ölwanne des Pulstransformators wieder geschlossen werden. Dazu müssen die Bolzen (M22) wieder mit einem Schlagschrauber montiert werden.

#### Einbau der Kondensatoren

Für den Einbau der Kondensatoren werden die beim Ausbau ergriffenen Schritte in umgekehrter Reihenfolge vorgenommen.

Die Arbeitserde wurde von der Gruppe MPC deinstalliert und die Sicherung gegen das Wiedereinschalten der Modulatoren entfernt.

## **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

---

Ort

Datum

Unterschrift im Original