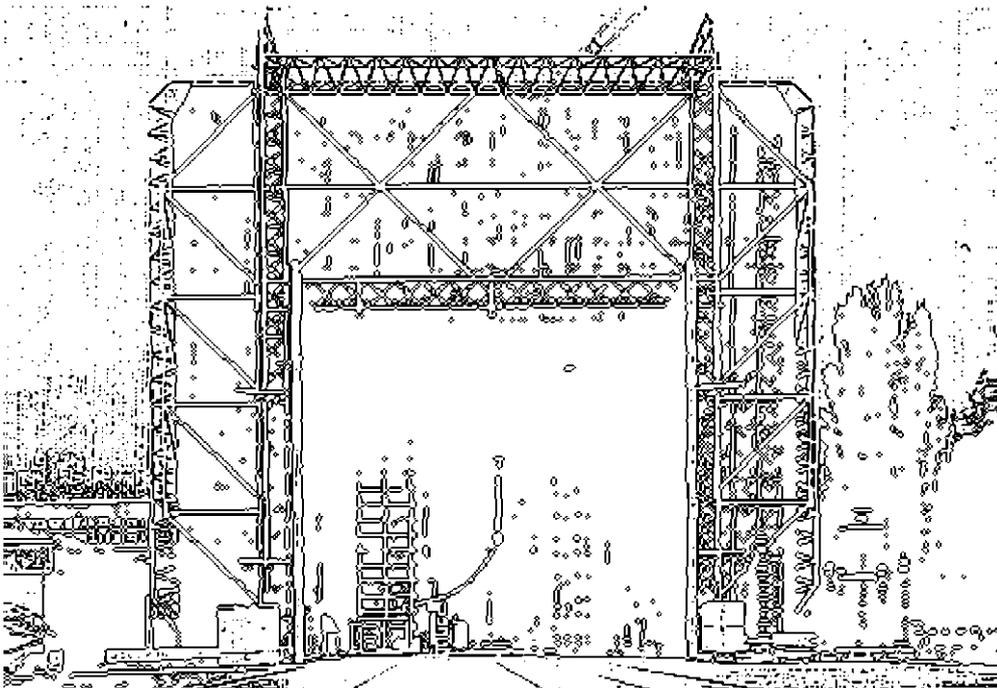


Technische Universität Graz

MASTERARBEIT

Robert Fasching

Februar 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND
SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

Vergleichende Untersuchung an verschiedenen Isoliersystemen nach IEEE Std. 1776 -2000

Masterarbeit



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sumereder
Dipl.-Ing. Werner Grubelnik

Vorgelegt von
Robert Fasching, BSc.

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7401
Telefax: (+43 316) 873 – 7408
<http://www.ihs.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / November 2012



Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei der Firma Isovolta, dem Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz und allen Helfern bedanken die mich bei der Durchführung dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Herrn Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sumeder am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz und Herrn Dipl.-Ing. Werner Grubelnik von der Firma Isovolta, für die viele Zeit welche sie mir zur Verfügung stellten.

Auch möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen Herrn Ing. Reinhard Dornhofer, Herrn Markus Neuhold, Herrn Ing. Philip Halb, Herrn Christian Stiefmaier und Herrn Dipl.-Ing. Bernd Künstl bedanken, für die vielen kleinen und großen Hilfestellungen, die mir die Durchführung dieser Arbeit wesentlich erleichtert haben.

Zuletzt gilt mein Dank auch meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mich über so viele Jahre dabei unterstützt haben.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,.....

.....

(signature)

Kurzfassung

Synthetische Harze bestimmen wesentlich die elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Isolierungen in rotierenden elektrischen Maschinen. In den letzten Jahren sind jedoch nicht nur die technischen Eigenschaften, sondern auch die Auswirkungen auf die Umwelt in den Vordergrund gerückt. Auch die Verarbeitung selbst hat entscheidenden Einfluss und benötigt große Erfahrung. Dementsprechend viel Aufwand wird auch in die Beurteilung dieser Systeme gesteckt. Die Basis für die Beurteilung bildet der Vergleich mit bekannten Isoliersystemen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich von fünf verschiedenen Hochspannungs-Isoliersystemen, mit Epoxy-Anhydrid-Harz, beschleunigtes Epoxid und einem umweltfreundlichen Polyester-Harz. Zu diesem Zweck wurde eine thermische Evaluierung nach IEEE Std. 1776 durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Dauerspannungsversuch bei zwei unterschiedlichen Spannungsniveaus gemacht. Zur genaueren Bestimmung des Ist-Zustandes der Isolationssysteme wurden die Teilentladungsmessung, die Verlustfaktormessung und der Polarisationsindex herangezogen.

Ein Vergleich zwischen dem verwendeten IEEE-Standard und dessen IEC-Entsprechung wurde anhand der Standards selbst und der Ergebnisse gezogen. Entscheidende Unterschiede wurden hervorgehoben.

Abschließend wurden die verwendeten Messmethoden hinsichtlich ihrer Fähigkeit, den Ist-Zustand der Isolierung wiederzugeben, beurteilt.

Schlagwörter:

Harz

thermische Evaluierung

Lebensdauer

Verlustfaktor

Polarisationsindex

Teilentladungsmessung

Abstract

Synthetic resins essentially determine the electrical and mechanical insulation properties in rotating electrical machines. In recent years, however, not only technical features but also the impacts on the environment thereof have become essential. The processing itself has a significant impact on the insulation properties and requires great experience. Accordingly, much effort is put into the evaluation of these insulation systems. The basis for an assessment is the comparison with already known insulation systems.

This thesis deals with the evaluation of five different types of high-voltage insulation systems containing epoxy-anhydride-resin, accelerated epoxy-resin and a green polyester-resin. Therefore a thermal evaluation has been performed according to the IEEE Standard 1776. In addition to that, a voltage-endurance test at two different voltage levels has been carried out. Partial discharge measurement, dissipation factor measurement and polarization index readings have been used to estimate the deterioration of the insulation systems.

A comparison of the utilized IEEE standards and of course their IEC equivalents was made based on discussing the standards as well as the interpretation of the results of the evaluation. The differences have been stressed out.

Finally, a review of the significance of the used methods was made in order to describe the current state of the insulation

Keywords:

green resin

evaluation

thermal ageing

Dissipation factor

polarization index

Partial Discharge

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
2	Prüfung und Diagnose.....	2
2.1	Thermische Evaluierung nach IEEE 1776-2008	2
2.1.1	Diagnosezyklus	3
2.1.2	Thermozyklus.....	4
2.1.3	Vergleich von IEC 6034-18-31:2012 zu IEEE 1776-2008	4
2.2	Isolationswiderstand und Polarisationsindex	5
2.2.1	Durchführung der Messung	7
2.2.2	Interpretation.....	7
2.3	Verlustfaktor $\tan \delta$	8
2.4	Teilentladungsmessung (TEM).....	10
2.4.1	Messkreis.....	10
2.4.2	Messprinzip	11
2.4.3	Interpretation	12
3	Ausführung der Untersuchung.....	13
3.1	Prüflingsaufbau	13
3.2	Imprägnierung	17
4	Ausführung der Untersuchung.....	22
4.1	Durchführung der thermischen Evaluierung	22
4.2	Elektrischer Lebensdauerversuch	22
4.3	Verlustfaktormessung.....	23
4.4	Teilentladungsmessung (TEM).....	23
4.5	Polarisationsindex PI	24
4.6	Vorversuch Endenglimmschutz	25
5	Diskussion der thermischen Evaluierung	26
5.1	Initiale Diagnose.....	26
5.1.1	Initiale Teilentladungsdiagnostik.....	26
5.1.2	Initiale Verlustfaktormessung	31
5.2	Initialer Polarisationsindex.....	35

5.3	Thermische Zyklierung	36
5.3.1	Optische Beurteilung nach dem ersten Zyklus.....	36
5.3.2	Verlustfaktormessung ($\tan \delta$)	37
5.3.3	Polarisationsindex	40
5.3.4	Teilentladungsmessung	46
5.3.5	Überblick der Ausfälle nach den Zyklen.....	48
6	Diskussion des elektrischen Lebensdauerversuches.....	51
6.1.1	Lebensdauerwerte	51
6.1.2	Verlustfaktor	53
7	Schlussfolgerungen.....	57
8	Zusammenfassung.....	59
9	Literaturverzeichnis	60
10	Anhang.....	63
10.1	Fertigungsprozess.....	63
10.2	Thermozyklus.....	65

1 Einleitung

Nach wie vor ist ein Versagen der Isolierung der häufigste Fehler in rotierenden elektrischen Maschinen [1]. Ein genaues Kenntnis der Isoliersysteme und deren Fähigkeit Belastungen zu widerstehen ist deshalb für Bau und Dimensionierung von rotierenden elektrischen Maschinen essentiell.

Seit der Erfindung der rotierenden elektrischen Maschinen im 19ten Jahrhundert wurden aus diesem Grunde viele verschiedene Methoden zur Diagnostik und auch zur Qualifizierung von Isolierungen entwickelt. Bis zum heutigen Tage unterliegen diese Verfahren einem ständigen Prozess der Evaluierung und Weiterentwicklung. Die dabei entstandenen Standards sind jedoch oft sehr weit gefasst und lassen eine Vielzahl von möglichen Varianten der Prüfung zu. Das liegt einerseits daran das viele Hersteller ein Interesse haben ihre bewährten, zuverlässigen und auf Erfahrungswerten beruhenden Prüfverfahren weiterhin verwenden zu können. Andererseits spielen auch regionale Gegebenheiten wie ein bereits vorliegendes Normenwerk eine Rolle. Sowohl die Kenntnis der verschiedenen Standards als auch die Auswirkungen ihrer Unterschiede sind somit von Bedeutung.

1.1 Aufgabenstellung

Diese Arbeit wurde zu dem Zweck ausgeschrieben um bereits vorliegende Erfahrungswerte mit dem IEC-Normenwerk um Erfahrungswerte mit dem IEEE-Normenwerk zu ergänzen und darüber hinaus auch die Kenntnisse zwei verschiedener Harzsysteme zu erweitern.

Als Referenzsystem in dieser Arbeit dient ein Glimmer-Epoxy-Anhydrid-System wie es bereits seit vielen Jahrzehnten mit sehr guten Betriebserfahrungen verwendet wird. Die zu untersuchenden Isoliersysteme sind ein emissionsarmes Glimmer-Polyesterimid-System sowie ein beschleunigtes Epoxid-Glimmer-System. Die beiden zu untersuchenden Isoliersysteme wurden sowohl mit Glas- als auch in der Kombination mit Folienträgerglimmerband untersucht. Das beinhaltet als Prüfverfahren eine thermische Evaluierung nach IEEE Std. 1776 und den elektrischen Lebensdauerversuch nach KEMA S-13 und IEEE Std.1553 – 2002. Als diagnostisches Verfahren wurden zusätzlich Verlustfaktormessungen, Isolationswiderstandsmessungen sowie Messungen des Teilentladungsverhaltens durchgeführt.

2 Prüfung und Diagnose

Im Zuge dieser Arbeit wurden während der Vorbereitung sowohl die IEC als auch die infrage kommenden IEEE Standards hinsichtlich ihrer Eignung zur Erreichung des Zieles dieser Arbeit durchleuchtet. Die Entscheidung fiel hauptsächlich zu Gunsten des IEEE Normenwerkes aus, da dieses bei der thermischen Evaluierung das härtere Kriterium darstellt. Die Normen und Standards wurden in der Form angewandt wie sie am 1. Jänner 2013 Gültigkeit hatten.

2.1 Thermische Evaluierung nach IEEE 1776-2008

Der Hauptteil dieser Arbeit, die thermische Evaluierung, wurde in Anlehnung an IEEE Std. 1776 – 2008 ausgeführt.

Diese Norm, stellt eine Richtlinie zum Vergleich zweier oder mehrerer Isoliersysteme, in Übereinstimmung mit deren Temperaturklasse und erwarteten Lebensdauer dar. Auch hier ist ein bereits bestens bekanntes Referenzsystem vorgesehen, mit dem die anderen in ihren Eigenschaften noch unbekanntes Systeme verglichen werden. Ziel ist es die zu untersuchenden Systeme unter beschleunigten Bedingungen den Belastungen einer langen Betriebsdauer auszusetzen. Hierzu wird eine Reihe von thermischen Belastungen bei verschiedenen Temperaturen und Zeitdauern empfohlen. Die Anwendung dieser Norm erfolgt für Isoliersysteme von unter normalen Bedingungen arbeitenden Maschinen, sowie Maschinen die unter erschwerten Umweltbedingungen eingesetzt werden. Darüber hinaus existierende Bauformen mit speziellen Erfordernissen, wie Maschinen die metallischen Staub, starken Chemikalien ausgesetzt sind oder in Flüssigkeiten eingetaucht sowie solchen die in einer Gasatmosphäre eingekapselt sind, werden von dieser Norm nicht abgedeckt. Der Ablauf einer Prüfreihe gliedert sich in zwei Teile, den Diagnose- und den eigentlichen Thermozyklus. Die Prüflinge sollten so aufgebaut sein dass alle essentiellen Bestandteile des Isolationsystems vorhanden sind, [2].

Die Anzahl der dabei verwendeten Prüflinge ist dabei mit mindesten 5 Stück je Temperatur laut IEEE Std. 98-2002 zu wählen.

Nach einem initialen Diagnosetest erfolgt der erste Thermozyklus. Diesem folgen abwechselnd weitere Thermo- und Diagnosezyklen. Die Evaluierung sollte für eine vollständige Qualifizierung, bei wenigsten drei verschiedenen, sich um 20°, unterscheidenden Temperaturen erfolgen. Die Dauer der thermischen Belastung sollte so gewählt werden, dass die mittlere Lebensdauer für jede Temperatur 10 Zyklen beträgt. Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, dass jeder Prüfling exakt denselben diagnostischen Belastungen ausgesetzt wird, [2].

2.1.1 Diagnosezyklus

Der Diagnosezyklus besteht aus mechanischer Belastung durch Vibrationen, Feuchteexposition sowie einem kurzen Stehspannungstest (eine Spannungsprüfung mit erhöhtem Pegel). Für unter normalen Bedingungen arbeitende Maschinen wird dieser hier folgend kurz umrissen.

Für die Durchführung der mechanischen Stressexposition wird empfohlen, diese derart zu wählen, dass sie der im später geplanten Einsatz üblichen schwersten Belastung entspricht. Die generelle Empfehlung ist es die Isoliersysteme mittels eines Rütteltisches einer Vibration von 50/60 Hz mit einer Stärke von 1,5 g ($1g=9,81 \text{ m/s}^2$Erdbeschleunigung) für die Zeitdauer von 60 Minuten (-0, +5) auszusetzen. Die auftretende Spitze-Spitze-Amplitude sollte etwa 0,2 mm betragen. Die Durchführung erfolgt bei Raumtemperatur und normalen Umgebungsbedingungen. Die daran anschließende Feuchtelagerung wird mit einer Dauer von wenigstens 48 Stunden bei einer relativen Luftfeuchte von 95-100% durchgeführt. Dabei sollte Wasser auf der Leiterstaboberfläche kondensieren. Auch hier wird normale Umgebungstemperatur erwartet, [2].

Ist die Empfehlung für alle unter normalen Bedingungen arbeitenden Maschinen bezüglich mechanischem Stress und Feuchtelagerung ident, erfolgt der Stehspannungstest angepasst an die Nennspannung der zu evaluierenden Systeme. Unabhängig von der Nennspannung wird allerdings eine Zeitdauer von 10 Minuten festgelegt. Ein Fehler liegt dann vor, wenn der Strom mindestens das fünffache des normalen Ladestromes überschritten hat. Überschlänge entlang der Leiteroberfläche sollten vermerkt werden, stellen jedoch an sich kein Abbruchkriterium dar. Der Stehspannungstest erfolgt mit 50/60 Hz AC und sollte noch in der Feuchteammer an den noch nassen Prüflingen vorgenommen werden. Nach dem Diagnosezyklus wird empfohlen, die Prüflinge über Nacht, bei Raumtemperatur, trocknen zu lassen bevor der nächste Thermozyklus beginnt. [2].

Nennspannung (verkettet) in V	Prüfspannung Wicklung- Wicklung und Wicklung- Erde in V
0-500	1000
551-1000	2000
1001-1500	3000
1501-2000	4000
2001-2500	5000
2501-3500	7000
3501-4500	9000
4501-5500	11 000
5501-6900	13 800
6901-9000	18 000
9001-11 000	22 000
11001-13 000	26 000
13001-15 000	30 000

Tabelle 2.1: Prüfspannung nach IEEE 1776 – 2008

2.1.2 Thermozyklus

Der Thermozyklus wird durch einbringen der Prüflinge in einen Ofen mit ausreichender Ventilation zur gleichmäßigen Verteilung der Wärme angewandt. Die Temperatur im Ofen sollte dabei für die Dauer des Thermozyklusses bis auf $\pm 2\%$ konstant bleiben. Abhängig von der Klassentemperatur der zu vergleichenden Systeme und der für den Thermozyklus gewählten Temperatur wird eine Zyklendauer empfohlen. Aufgrund der hier vorliegenden Klassentemperaturen von 155°C für die Systeme 1 und 3 sowie 180°C für die Systeme 2, 4 und 5 wurde eine Temperatur von 220°C gewählt. Für diese wird eine Zyklendauer von 7 Tagen empfohlen. Die Prüflinge sollten direkt von der Raumtemperatur aus in den vorgeheizten Ofen eingebracht werden. Am Ende des Thermozyklusses sollten sie auch direkt aus dem heißen Ofen heraus genommen werden und der Umgebungstemperatur ausgesetzt werden, [2].

2.1.3 Vergleich von IEC 6034-18-31:2012 zu IEEE 1776-2008

Auf Unterschiede und Gemeinsamkeit zwischen der thermischen Evaluierung laut IEC und IEEE wird hier nur so weit eingegangen wie selbige in dieser Arbeit von Relevanz sind.

Der Thermozyklus wird hier für ein Klasse H (180°C) System bei einer Alterungstemperatur von $215\text{-}225^{\circ}\text{C}$ mit einer Zeitdauer von 7-10 Tagen bestimmt. Die Anforderung an den Ofen besteht darin dass die gewollte Temperatur auf $\pm 2^{\circ}\text{C}$ eingehalten werden muss. Die Art und Weise der thermischen Belastung entspricht ansonsten IEEE Std. 1776-2008, [2], [3].

Der Hauptunterschied liegt im Diagnosezyklus. So wird laut IEC für bei 50 Hz eine Spitze-Spitze-Amplitude von 0,3mm empfohlen. Hinsichtlich Dauer und Stärke der mechanischen Belastung werden auch ein Zeitraum von 1 Stunde bei 1,5-facher Erdbeschleunigung festgelegt,[2], [3].

Für die Feuchtelagerung wird in IEC 60034-18-31 eine Umgebungstemperatur von $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ vorausgesetzt. Der Zeitraum der Feuchtelagerung wird mit mindesten 48 Stunden beziffert. Bezüglich der anzuwenden Luftfeuchte wird hier lediglich angeregt diese so zu wählen, dass sichtbare Kondensation auf der Leiterstaboberfläche entsteht, [3].

Der allersichtbarste und größte Unterschied in der Diagnose liegt im Überspannungstest. Für die hier untersuchten Systeme wird 2-fache Nennspannung für die Dauer von einer Minute angewandt. Das ist im konkreten Fall, für das nachgebildete 6,6 kV Isoliersystem eine Leiterstab-gegen-Erde-Spannung von 13200V laut IEC, IEEE 1776 legt für den Nennspannungsbereich von 5501-6900V eine generelle Prüfspannung von 13800 V für den Zeitraum von 10 Minuten fest. IEC 60034-18-31:1992 wie sie bis 2012 noch Gültigkeit hatte empfahl hier ebenfalls die 2-fache Nennspannung zur Prüfung, jedoch wie IEEE Std. 1776-2008 für eine Zeitdauer von 10 Minuten, [2], [3], [4].

Bezüglich der mindestanzahl von 5 Stück und der Forderung an die Prüflingsfertigung das reale System mit allen relevanten Eigenschaften und Bestandteilen nachzubilden, besteht zwischen den drei soeben genannten Normen Übereinstimmung, soweit selbige für diese Arbeit zum Tragen kommen, [2], [3], [4].

2.2 Isolationswiderstand und Polarisationsindex

Die Bestimmung des Isolationswiderstandes ist ein bewährtes Mittel zur Bewertung des Zustandes einer elektrischen Isolation. Alle Isolationswiderstandsmessungen im Zuge dieser Arbeit wurden in Anlehnung an IEEE Standard 43 - 2000 durchgeführt.

Die Kenntnis des Isolationswiderstandes an sich ist jedoch nicht alleine ausreichend, da dieser in keinem Zusammenhang zur Durchbruchspannung oder der Restlebensdauer der Isolierung steht. Auch wenn Mindestanforderungen an diesen normativ festgelegt sind, ergibt sich eine Zustandsaussage erst durch vergleichende Messungen über die Lebensdauer oder durch Messungen an anderen vergleichbaren Prüflingen, [5].

Da der Isolationswiderstand durch eine einfache Gleichstrom-Spannungsmessung ermittelt wird ist er von der Geometrie der Leiterstäbe und Isolierung d.h. der Isolationsdicke und der mit leitfähigem Material bedeckten Fläche abhängig. Mit zunehmender Isolationsdicke steigt deren Widerstand und mit zunehmender Fläche sinkt der Isolationswiderstand, [5].

Der während der Messung fließende Strom lässt sich in vier Teilkomponenten unterscheiden. Dem Leckstrom entlang der Oberfläche des Wickelkopfes I_L , den Ladenstrom der Kapazität I_C , Durchgangsstrom I_G aufgrund der (geringen) Leitfähigkeit und den Absorption-/ Polarisationsstrom I_A , [5].

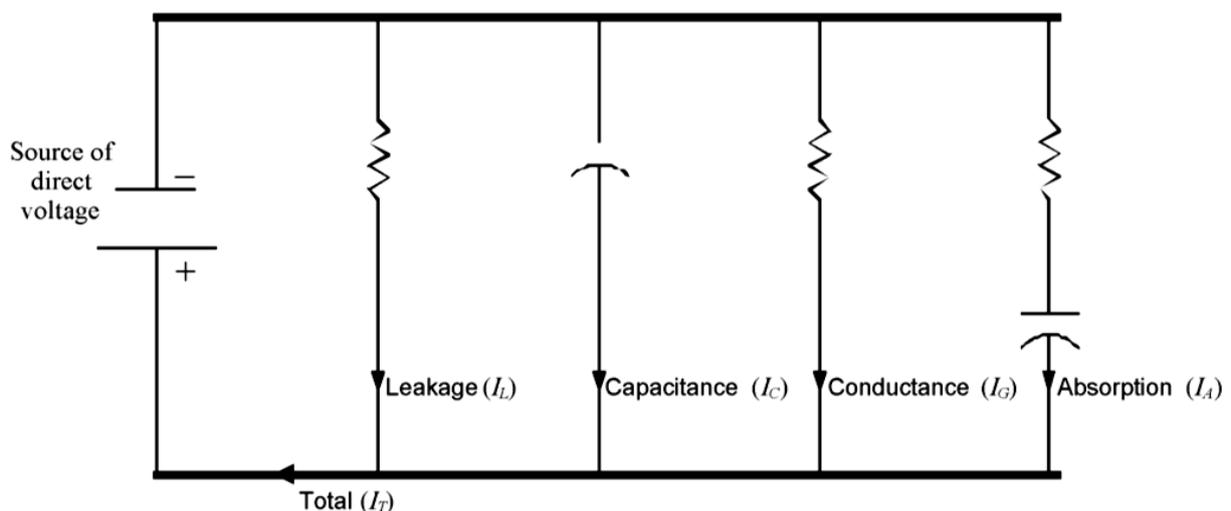


Abbildung 2.1: Ersatzschaltbild der Ströme während der Isolationswiderstandsmessung [5]

Der Absorptionsstrom selbst besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil entsteht durch die so genannte Orientierungspolarisation. Diese ist ein Prozess bei dem sich die organischen Moleküle der Isolation also das Polyester oder Epoxid nach dem angelegten äußeren elektrischen Feld ausrichten. Sind die zu Anfangs nur aufgrund der Kräfte zwischen den Molekülen chaotisch ausgerichteten Moleküle orientiert, ist hierfür keine Energie mehr nötig. Der zweite Teil hat seinen Ursprung in der Verschiebung von Ladungsträgern in der Isolation, diese bewegen sich dabei so lange bis sie von der Glimmerbarriere gestoppt werden. Sind diese beiden Prozesse abgeklungen, so klingt auch der Absorptionsstrom ab.

Auch der Polarisationsvorgang ist nach einigen Minuten weitgehend abgeklungen, die genaue Dauer ist vom verwendeten Material und dessen Zustand (Feuchte, Verschmutzung, Rissbildung) abhängig. Da der Absorptionsstrom materialabhängig ist, ist auf Grund eines bestimmten Absorptionsstromes keine Aussage darüber möglich ob sich die Isolation in einem guten oder schlechten Zustand befindet, [5].

Der zeitlich konstante Leckstrom durch die Isolation ist bei einer intakten Glimmer-Polyester- oder Epoxy-Polyester-Isolation nahezu null. Mit zunehmender Verschlechterung des Zustandes steigt der Leckstrom durch die Isolation jedoch an. Als Ursache hierfür kommt einerseits die Karbonisierung der organischen Komponenten der Isolation, als auch die beginnende Ausbildung von Rissen in Kombination mit Feuchte in Frage. Bei Asphalt-Glimmer-Isolationen ist auch bei einer intakten neuen Isolation ein nicht zu vernachlässigender Leckstrom vorhanden. Dieser inzwischen veraltete Isolationstyp wurde in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht, [5].

Oberflächenströme sind jedoch auch bei einem unvorbelasteten modernen Isoliersystem vorhanden und von nicht vernachlässigbarer Größe. Diese nehmen durch Feuchte und Oberflächenverschmutzung zu. Moderne Isolationssysteme können einen stabilen Isolationswiderstand in ca. 4 oder auch weniger Minuten erreichen. Liegt Nässe oder starke Verschmutzung vor so wird sich ein niedriger, stabiler Isolationswiderstand bereits nach 1-2 Minuten einstellen, [5].

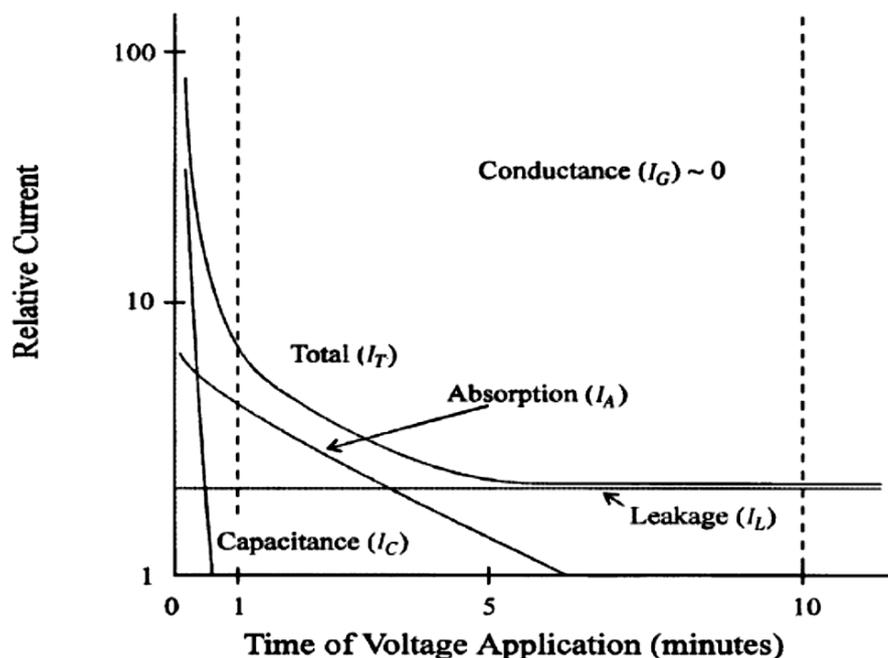


Abbildung 2.2: Isolationsströme einer Epoxy-Glimmer-Isolation mit geringem Oberflächenleckstrom und vernachlässigbarem Leckstrom durch die Isolation [5]

2.2.1 Durchführung der Messung

Abhängig von der Nennspannung (verkettet) werden nun folgenden Prüfspannungen definiert.

Nennspannung in V (AC)	Prüfspannung in V (DC)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Tabelle 2.2: Richtlinien für die Prüfspannung gem. IEEE Std. 43-2000

Für die Messung wird nun eine Gleichspannung wie in Tabelle 2.2 definiert an den Prüfling gelegt. Dabei wird der Strom durch den Prüfling für die Dauer von 10 Minuten gemessen. Da der Widerstand einer elektrischen Isolation stark temperaturabhängig ist, wird empfohlen diesen rechnerisch auf eine Temperatur von 40°C zu korrigieren. Als weitere Option lässt IEEE Std. 43-2000 die Möglichkeit offen alle Messungen bei gleicher Umgebungstemperatur durchzuführen. Die Messung sollte aber falls möglich auf jeden Fall über dem Taupunkt erfolgen, da andernfalls Feuchtigkeit auf der Leiterstaboberfläche kondensieren würde, und eine Messwertkorrektur nur schwer möglich wäre. Für Isolationswiderstände von über 5000M Ω bei 40°C wird von einer Messung des Isolationswiderstandes abgeraten, da die zu messenden Ströme im μ -Ampere-Bereich oder noch geringer liegen. Die Anforderungen an ein entsprechendes Messgerät wären sehr hoch. Bereits geringe Änderungen in der Umgebung führen zu Messfehlern. [5].

Für die Ermittlung des Polarisationsindex wird nun der Widerstand nach 600 Sekunden durch den nach 60 Sekunden dividiert. Der Polarisationsindex sollte laut IEEE Std. 43 Tabelle 2 über einem Wert von 2 liegen. Alternativ dazu kann auch ein Polarisationsindex aus dem 60 zu 30 Sekunden oder dem 30 zu 15 Sekunden Verhältnis gebildet werden, für diese existieren jedoch in IEEE Std. 43-2000 keine Minimumvorgaben. Der PI selbst ist nicht temperaturabhängig, es wird dabei jedoch vorausgesetzt, dass die Temperatur des Prüflings innerhalb des Messzeitraumes konstant bleibt. Schwankt die Temperatur während des Messzeitraumes so muss der PI korrigiert werden, [5].

2.2.2 Interpretation

Aus einem einzelnen PI-Wert kann nur schwer auf den Zustand der Isolation geschlossen werden. Besonders wenn im Wickelkopfbereich ein Endenglimmschutz auf die Isolation

aufgebracht wurde, oder auch bei sehr großer Oberfläche, sind historische Werte zum Vergleich besonders wertvoll. Auf den aktuellen Zustand der Isolation kann hierbei durch die Änderung der Messwerte geschlossen werden. Da die Ermittlung des Isolationswiderstandes mit Gleichspannung oder niedriger Wechselspannung erfolgt werden Hohlräume in der Isolation durch Verschleiß, Thermozyklen oder schlechte Imprägnierung nicht von der Messung erfasst. Es muss also ein direkter Kriechweg durch die Isolation bestehen. Sehr wohl erfasst werden jedoch Karbonisierung und auch mit karbonisiertem Material gefüllte Hohlräume, diese äußern sich durch verminderten Widerstand. [5].

Alternativ zum 10min / 1 min Polarisationsindex kann auch der 60s / 30s PI gebildet werden. Für diesen existieren jedoch keine allgemein gültigen Empfehlungen [5].

2.3 Verlustfaktor $\tan \delta$

Der dielektrische Tangens δ (Verlustfaktor) ist analog zum aus der Rheologie bekannten Tangens δ das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul. Die Kapazität ist hierbei der Speicher (entspricht also der Elastizität) und der Widerstand repräsentiert die Verluste (entspricht der Viskosität). Je kleiner der Widerstand desto größer der Winkel δ . Ein $\delta = 0$ entspricht einer idealen, rein kapazitiv wirkenden Isolierung. Der maximale $\delta = 90^\circ$ entspricht hingegen einem Kurzschluss. Die Hochspannungsisolierung wird meist durch eine Ersatzschaltung bestehend aus einem Widerstand und einer parallelen Kapazität abgebildet. Alternativ zum hier abgebildeten Parallelersatzschaltbild kann aber auch ein Serienerersatzschaltbild verwendet werden, [6], [7].

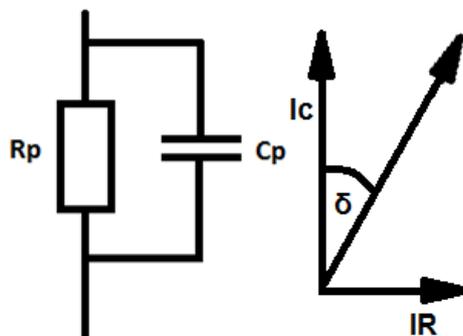


Abbildung 2.3: Parallel Ersatzschaltbilde einer Isolation

Der Verlustfaktor steigt mit zunehmender Temperatur, Frequenz, Feuchte, Ionenbeweglichkeit und zunehmender Teilentladungen. Er kann durch $\tan \delta = \frac{1}{R_p \cdot \omega \cdot C_p}$ bestimmt werden, wenn Kapazität und Wirkwiderstand bekannt sind. Dies geschieht meist mittels einer Schering-Brücke oder durch die direkte computergestützte Messung der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, [7].

Der zugrunde liegende Gedanke zur Verwendung des Verlustfaktors zur Beurteilung der Qualität einer Isolation ist simpel. Die in jeder realen Isolation vorkommenden

Gaseinschlüsse oder auch andere Arten von defekten wie Delamination wirken bei niedriger Spannung wie eine Kapazität. Wird die Spannung gesteigert, so wird die Feldstärke in diesen Hohlräumen mit zunehmender Spannung einen Wert erreichen bei dem es zur Entladung innerhalb des Hohlraumes kommt. Eine Entladung äußert sich durch UV-Licht, Wärme und Geräuschbildung, stellt also einen Wirkverlust da. Der entsprechende Hohlraum wirkt nicht mehr kapazitiv sondern resistiv, dies bewirkt eine Vergrößerung des Verhältnisses von Verlust- zu Speichermodul, der Verlustfaktor steigt. Auch Korona und Oberflächenentladungen bewirken einen Anstieg [7].

Üblicherweise wird im Rahmen einer Einzelstabuntersuchung der Anstieg des Verlustfaktors gemessen. Dabei wird die Spannung ausgehend von einem Wert von 0,2-facher Nennspannung bis zur 1,2-fachen Nennspannung gesteigert. Für jede Spannungsstufe wird der Verlustfaktor ermittelt. Zusätzlich kann diese Messung im Anschluss auch mit abnehmenden Spannungsstufen erfolgen, [7].

Hierbei werden folgende Werte besonders beachtet, [7]:

- Der Wert des Verlustfaktors bei 0,2 U_N . Dieser wird zur Bewertung des Aushärtetestatus einer Isolierung herangezogen. Ist das Harz noch nicht vollends ausgehärtet, so liegen eine höhere Ionenbeweglichkeit und somit auch ein im Vergleich zu einem gänzlich ausgehärteten System erhöhter Verlustfaktor vor.
- Die Änderung des Verlustfaktors ($\Delta \tan \delta$, Verlustfaktoranstieg) zwischen zwei Spannungsstufen . Siehe Tabelle 2.3

	0,6 bis 0,2 UN	0,2 UN bis Maximum
Luftgekühlte Generatoren ab 10 MVA	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Wasserstoff oder flüssigkeitsgekühlte Generatoren mit Spaltglimmer	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Wasserstoff oder flüssigkeitsgekühlte Generatoren mit Feinglimmer	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 2.3: Richtwerte für den Verlustfaktoranstieg, [8],[9]

Im Falle einer Hochspannungsisolierung für elektrische Maschinen kann ein im Vergleich zu anderen Stäben erhöhter Verlustfaktor die Folge von Delamination, unvollständiger Imprägnierung, einem erhöhtem Anteil von Gaseinschlüssen und leitfähigen Verunreinigungen auf oder im Isolationssystem sein, [7].

Eine Veränderung des Verlustfaktors kann eine Folge der zunehmenden Verschlechterung der Isolation sein, [7].

Um den Einfluss des Endenglimmschutzes zu verringern wird das Aufkleben von Schutzringen empfohlen. Diese sollten direkt mit dem Erdpotential verbunden werden, um Störströme abzuleiten. Diese Vorgehensweise wird auch für Systeme ohne EGS empfohlen. Eine Messung ohne Schutzringe resultiert in erhöhten Verlustfaktorwerten, [7].

2.4 Teilentladungsmessung (TEM)

Die Teilentladungsmessung ist ein Verfahren welches bereits seit mehreren Jahrzehnten zum Einsatz kommt. Seit einiger Zeit steht neben der Erfassung von Strom-, Spannungs- und Ladungswerten auch die grafische Auswertung in Form von so genannten Fingerprints zur Verfügung.

Eine Teilentladung (TE) ist ein unvollständiger Durchschlag welcher nur Teile des Isolationsmediums überbrückt. Wird das gesamte Isolationsmedium überbrückt spricht man hingegen von einem Durchschlag, [10].

Begriffsdefinitionen:

- TE-Impuls: „Strom- oder Spannungsimpuls, der von einer Teilentladung des Prüflings herrührt. Der Impuls wird mittels eines geeigneten Detektorkreises gemessen, der in den Prüfkreis zum Prüfzweck eingebracht wird.“ [10]
- Scheinbare Ladung q : „Die scheinbare Ladung eines Teilentladungsimpulses ist die Ladung, wenn sie innerhalb einer kurzen Zeit zwischen den Anschlüssen des Prüfobjektes in einen festgelegten Prüfkreis eingespeist wird, die selbe Anzeige geben würde wie der TE-Impuls selbst. Die scheinbare Ladung wird gewöhnlich in Picocoulomb (pC) ausgedrückt.“ [10]
- TE-Einsatzspannung: „abgelegte Spannung, bei der wiederholt auftretende Teilentladungen zum ersten Mal am Prüfobjekt beobachtet werden, wenn die an den Prüfling angelegte Spannung allmählich von einem geringeren Wert, bei dem noch keine Teilentladungen beobachtet werden, gesteigert wird.“ [10]

2.4.1 Messkreis

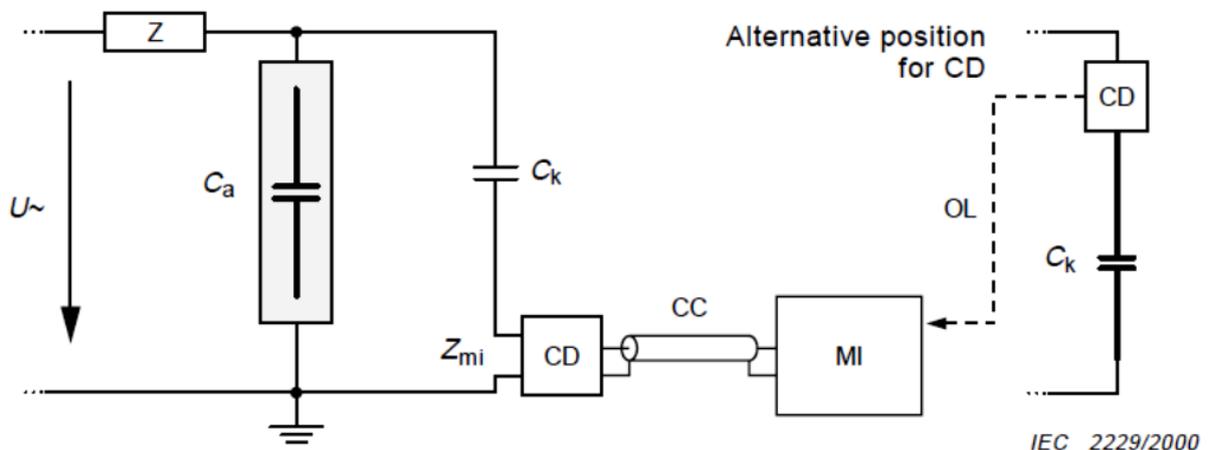


Tabelle 2.4: TE-Messkreis, [10]

Der hier abgebildete Messkreis wie er in IEC 60270: 2000 festgelegt ist besteht aus dem zu prüfenden Objekt C_a , der Spannungsversorgung und deren Impedanz sowie dem Koppelkondensator C_k und dem Auskoppelvierpol CD, [10].

2.4.2 Messprinzip

Vom Testobjekt gehen Teilentladungsimpulse aus. Auf Grund der vergleichsweise hohen Impedanz der Spannungsversorgung (hier ein regelbarer Transformator) kann nur ein geringer Teil des Signales über den Transformator fließen. Um dennoch einen Signalfluss zu ermöglichen ist der Koppelkondensator Teil des Messkreises. Dieser ist so beschaffen dass er für die vergleichsweise hochfrequenten TE-Impulse nur einen geringen Widerstand darstellt, gleichzeitig darf er die Versorgungsspannung nicht kurzschließen. Seriell zum Koppelkondensator ist der Auskoppelvierpol (AKV/ CD) geschaltet. Dieser ist im einfachsten Fall ein Widerstand. Er hat den Zweck das Signal aus dem Hochspannungsmesskreis auszukoppeln und zum TE-Messgerät zu führen. Eine andere Möglichkeit wäre es den Auskoppelvierpol mit dem Prüfobjekt in Serie zu schalten, [10].

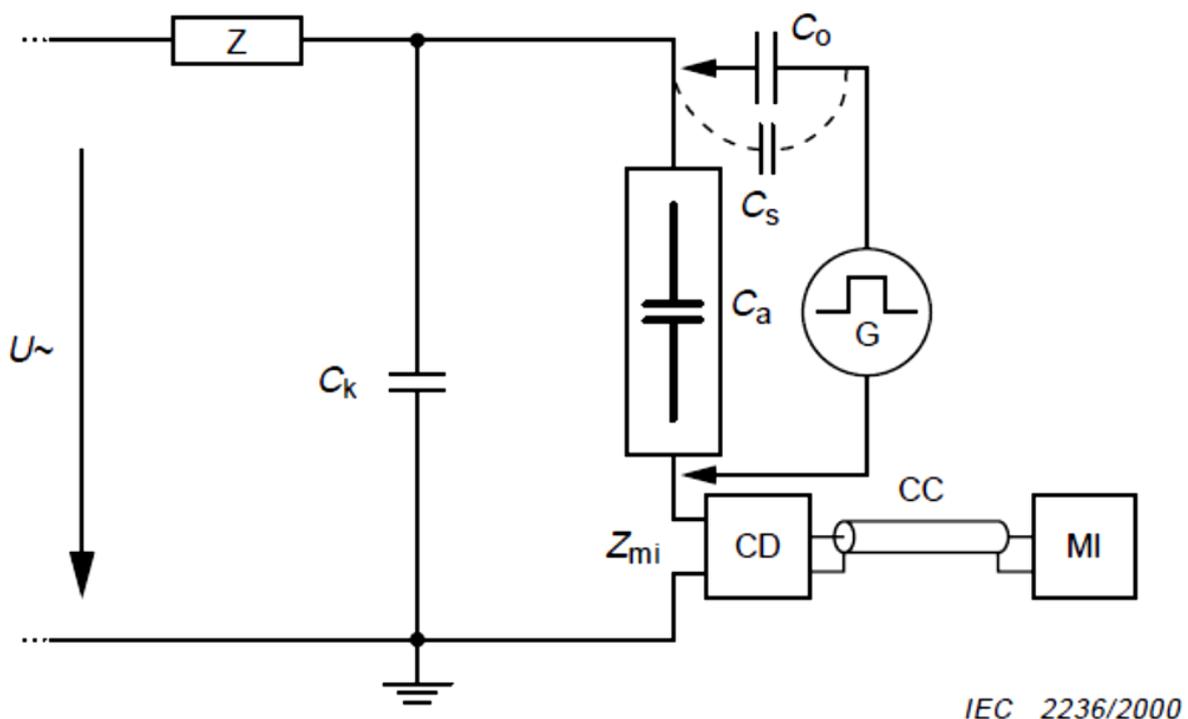


Abbildung 2.4: Alternativer Messkreis mit seriell geschaltetem Auskoppelvierpol,[10]

In Falle eines seriell geschalteten AKV könnte auch auf den Koppelkondensator verzichtet werden. Voraussetzung dafür ist jedoch dass die Streukapazitäten groß genug sind und die Signalausbreitung über die Streuwege stattfinden kann. Der Nachteil dieses Messkreises liegt darin, dass beim Durchschlag des Prüfobjektes die Versorgungsspannung direkt auf den AKV einwirkt, [10].

Die Streukapazitäten beeinflussen die Messung wesentlich. Da diese nicht bekannt sind muss der Messkreis vor Beginn der Messung kalibriert werden. Dabei wird ein Kalibrator parallel zum Prüfobjekt geschaltet werden. Dieser erzeugt Stromimpulse mit einer genau bekannten Ladung. Von der Messsoftware kann somit das Messgerät so kalibriert werden, dass trotz Streuung ein korrekter Wert gemessen werden kann. Eine Kalibration sollte vor jeder Messreihe aber auch bei einem wesentlichen Umbau des Messkreises vorgenommen werden. Eine falsche Kalibration verändert den Wert der gemessenen scheinbaren Ladung. Der Fingerprint wird dadurch jedoch in seinem Aussehen nicht verändert. Der Fingerprint ist eine Form der grafischen Auswertung bei der z.B.: die scheinbare Ladung über die Phasenlage der TE-Impulse aufgetragen wird, aber auch andere Auswertungen sind möglich. [10].

2.4.3 Interpretation

Teilentladungen können als Folge von thermischer Alterung, Delamination, Hohlräumen, Leiterstabbvibrationen und anderen Gründen auftreten. Eine Aussage über die Art des vorliegenden Fehlers kann durch die Interpretation der Fingerprints getroffen werden. Bestimmte Fehler produzieren charakteristische Fingerprints. Bei inneren Teilentladungen treten die meisten Entladungen um den Phasennulldurchgang auf. Bei äußeren Teilentladungen, treten diese im Spannungsmaximum auf. Beim Auftreten mehrerer Fehler wird die Interpretation des Fingerprints jedoch zunehmend schwerer. [11].

Neben dem Fingerprint können auch Kriterien wie die scheinbare Ladung, die Einsetzspannung, die Pulshäufigkeit, der Q_{UIEC} -Wert und deren Verläufe zur Anwendung kommen, [10][11].

Die TEM wird oft auch nur als vergleichende Messung angewandt. So können aus einer Charge von fertigen Leiterstäben jene aussortiert werden, welche in auffälliger Art und Weise von den anderen abweichen. Generell lässt sich sagen, dass für eine korrekte Interpretation von TEM-Ergebnissen einen erfahrener Diagnostikingenieur, viele Erfahrungswerte aus der Vergangenheit, sowie eine möglichst genaue Kenntnis der Vorgeschichte des Prüfobjektes notwendig ist.

3 Ausführung der Untersuchung

3.1 Prüflingsaufbau

Die Zusammensetzung der Prüflinge wurde so gewählt, dass ein Hochspannungsisoliersystem mit einer Nennspannung (U_N) von 6,6 kV nachgebildet wird. Für die benötigten Teilleiterstäbe wurde eine Kupferdimension der Teilleiter von 8,80 x 3,30 mm verwendet. Die Teilleiter wurden mit 1 Lage PETP Folie und 3 Lagen Conductofol mit Schmelzkleber bewickelt. Für dieses System wurden 10 Teilleiter einreihig mit dem angegebenen Aufbau vorverfestigt.

Als möglicher Außenglimmschutz (AGS) standen Contafel 0865, Contafel 2716 und Contafel 2912 zur Verfügung. Da der erst aus der Kombination von Kunstharz und Außenglimmschutzband entstehende Oberflächenwiderstand des Außenglimmschutzes nicht bekannt war, wurde ein Vorversuch durchgeführt. Im Vorversuch wurden jeweils ein Eisenleiterstab mit beschleunigtem Epoxidharz und Polyesterharz, pro Contafel mit einer Hauptisolationsdicke von 2 mm ($HIS\ 7 \times \frac{1}{2} = 14$ Lagen) sowie dem Endglimmschutz (EGS) EGSB 2709 und dem Wickelkopfschutz Isoleal MF 0611, angefertigt. Der Oberflächenwiderstand wurde nach der Imprägnierung mit einer Zungenelektrode gemessen.

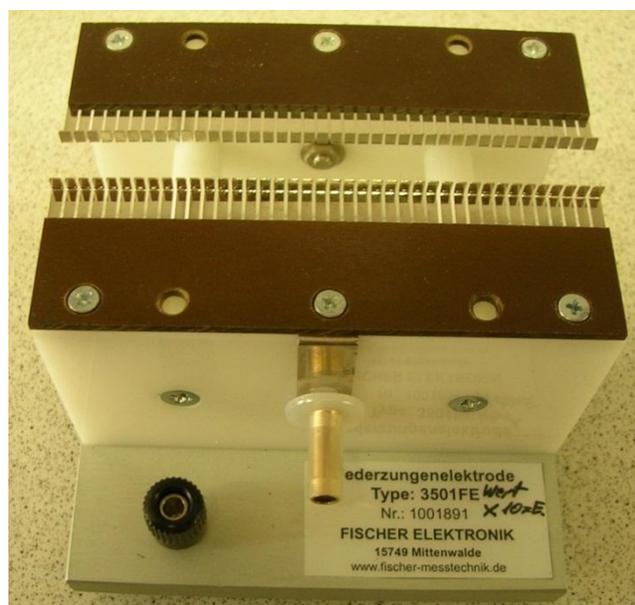


Abbildung 3.1: Zungenelektrode

Für die Messung des Oberflächenwiderstandes wird die Zungenelektrode an ein Ohmmeter angeschlossen und mit einem Normgewicht auf die Leiterstaboberfläche gedrückt. Die dabei mit den Federzungen gemessene Bereich ist 10cm lang und 1cm breit. Der am Ohmmeter abgelesene Wert in Ω/cm^2 muss mit der Fläche der Elektrode von 10 cm^2 multipliziert werden um das Ergebnis in Ω zu erhalten.

Ausführung der Untersuchung

Stab Nr.:	R _{GEMESSEN} in Ω/cm^2	RoF in K Ω	AGS
13-126	>1500	> 15	2912
13-127	941,00	9,41	2716
13-128	950,00	9,50	2716
13-129	> 1500	> 15	2912
13-130	85,00	0,85	0865
13-131	47,00	0,47	0865

Tabelle 3.1 Oberflächenwiderstände möglichen Außenglimmschutzbänder

Die Nutimitation der Prüflinge ist aus 4 einzelnen um die Hauptisolation herum zusammenschweißten Blechen zusammen gesetzt. Anders als bei einer realen Maschine besteht somit nicht die Gefahr die Statorbleche in der Nut durch einen zu niederresistiven Außenglimmschutz kurzuschließen. Es fiel daher die Entscheidung Contafel 0865 für den Außenglimmschutz zu verwenden.

Der Aufbau der fünf untersuchten Isolationssysteme ist daher wie folgt:

	Harz	Hauptisolation	AGS	EGS	Wickelkopfschutz
System 1	Epoxidharz	Poroband 0410	Contafel 0865	EGSB 2709	Isoseal MF 0611
System 2	Polyesterharz	Poroband 0410	Contafel 0865	EGSB 2709	Isoseal MF 0611
System 3	Epoxidharz	Porofol 2076	Contafel 0865	EGSB 2709	Isoseal MF 0611
System 4	Polyesterharz	Porofol 2076	Contafel 0865	EGSB 2709	Isoseal MF 0611
System 5	Epoxy-Anhydrid	Poroband ME 4020	Contafel 0865	EGSB 2709	Isoseal MF 0611

Tabelle 3.2: Übersicht der angefertigten Prüflinge

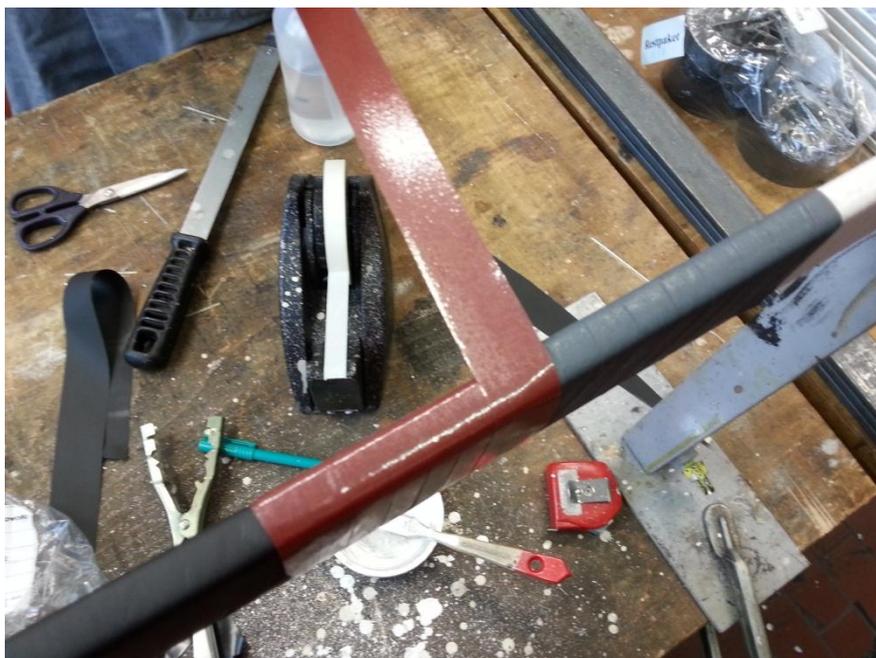


Abbildung 3.2: Stabfertigung aufbringen des AGS

Ausführung der Untersuchung

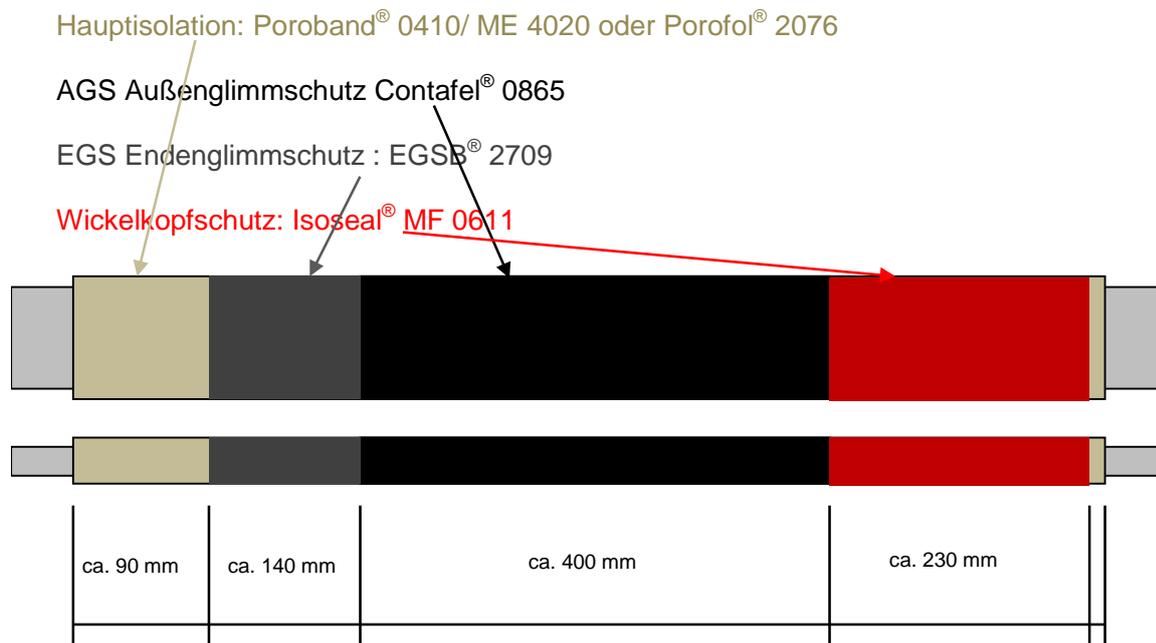


Abbildung 3.3: Komponenten eines Isoliersystems (Isovolta AG 2014)

System 5 ist in dieser Untersuchung das Referenzsystem. Sowohl die hier gewählte Materialkombination als auch das verwendete Epoxy-Anhydrid-Harz ist aus vorangegangenen Untersuchungen bestens bekannt.

Poroband 0410 besteht aus hoch porösem Glimmerpapier auf Basis von unkalziniertem Muskovit, auf einer Seite verstärkt mit Glasgewebe, und eine geringe Menge Bisphenol-A-Epoxidharz. Poroband 0410 enthält keine Beschleuniger oder Härter und wird zur Imprägnierung mit beschleunigten Harzen verwendet.

Porofol 2076 besteht aus hoch absorbierendem Glimmerpapier auf Basis unkalziniertem Muskovit und einer PET-Folie als Träger. Das Bindemittel ist ein von Härter freies Epoxidharz, [12].

Poroband ME 4020 besteht aus hoch porösem Glimmerpapier auf Basis von unkalziniertem Muskovit, auf einer Seite verstärkt mit Glasgewebe, und eine geringe Menge Bisphenol-A-Epoxidharz. Poroband ME 4020 enthält einen für Epoxid/Säureanhydridsysteme geeigneten Beschleuniger auf Basis eines metallischen Salzes (Zinknaphtenat), [13].

Contafel 0865 ist ein Band bestehend aus Polyesterfließ, das mit rußgefülltem Lack imprägniert wurde. Es wird als Glimmschutz bei VPI- und Resin-Rich-Imprägnierten Isoliersystemen verwendet,[14].

Ausführung der Untersuchung

„ISOSEAL MF 0611 besteht aus einem imprägnierten Polyester-Glasseiden-Mischgewebe mit einseitiger PET-Folien-Abdeckung. Beim Aushärtvorgang schrumpft ISOSEAL MF 0611 unter Temperatureinwirkung und verdichtet die darunter befindliche Isolation, wobei ein Ausrinnen des Harzes aus dem Inneren weitgehend verhindert wird. ISOSEAL MF 0611 wird als Deckband bei der Herstellung von Wicklungen elektrischer Maschinen verwendet, welche nach dem Vakuum-Druck-Imprägnierverfahren isoliert werden.“ [15]

Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der endgültigen Isolierung werden hauptsächlich vom verwendeten Harz bestimmt, [16], [13], [12].



Abbildung 3.4: Prüflingsaufbau vom Teilleiterstab bis zum fertigen Testobjekt

In Summe wurden 75 Prüflinge angefertigt, 15 je System. Davon wurden je fünf für die thermische Evaluierung, je fünf für den elektrischen Lebensdauerversuch bei $2,54 \times U_N \approx 16,9$ kV und je fünf für den Lebensdauerversuch bei $3 \times U_N \approx 19,8$ kV verwendet. Die Hauptisolationsdicke beträgt 1,4 mm für Poroband ($HIS\ 5 \times \frac{1}{2} = 10$ Lagen) und 1,3 mm für Porofol ($HIS\ 5 \times \frac{1}{2} = 10$ Lagen). Der Wickelkopfschutz sowie AGS und EGS wurden $\frac{1}{2}$ überlappt manuell aufgebracht. Die Stäbe sind 90 cm lang, wobei der aktive Teil 40 cm lang ist.

3.2 Imprägnierung

Die bei der Imprägnierung vorliegenden Viskositäten wurden mittels Kugelfallviskosimeter ermittelt.

	dyn. Viskosität in mpA*s			
Temperatur in °C	35	40	45	60
Epoxidharz	665,96	<u>408,18</u>	266,26	
Polyesterharz	201,48	<u>158,18</u>	125,97	
Epoxy-Anhydrid				<u>29,67</u>

Tabelle 3.3: Viskositäten vor der Imprägnierung

Die Imprägnierung wurde in einer industriell üblichen VPI-Anlage durchgeführt. Der hierbei verwendete Imprägnierprozess besteht aus mehreren Phasen. In der ersten, der so genannten Trockenvakuumphase, werden die Stäbe bereits im Vakuum erwärmt. Dadurch dass sich noch kein Harz im Kessel befindet, wird die aus den Stäben entweichende Luft nur durch den, auf Grund der Porosität geringen, Luftwiderstand der Bänder gebremst. Durch das Erwärmen wird der Dampfdruck der in den Bändern enthaltenen Feuchtigkeit erhöht, so dass Aufgrund des höheren Dampfdruckes und des geringeren Umgebungsdruckes, die Verdampfung schnell und nahezu vollständig stattfinden kann. Diese erste Phase ist beendet wenn die Stäbe die Imprägniertemperatur erreicht haben, [17].

In der unmittelbar darauf folgenden Nassvakuumphase wird Harz unter Beibehaltung des Vakuums in den Kessel geflutet. Dazu wird ein Ventil geöffnet und das Harz durch den Umgebungsdruck in den evakuierten Kessel gedrückt. Eventuell noch vorhandene Restluft in der Isolation, wird vom Harz verdrängt und durch die Vakuumpumpe aus dem Kessel entfernt. Hier spielt die Viskosität des Tränkharzes eine Rolle, je niedriger diese ist, desto besser kann der poröse Glimmer durchdrungen werden. Das Harz schäumt während des Flutens auf. Wenn das Harz wieder zur Ruhe gekommen ist, kann die nächste Phase eingeleitet werden. Die Nassvakuumphase dauert im hier verwendeten Prozess nur einige Minuten, [17].

In der dritten Phase, der so genannten Überdruckphase wird Umgebungsluft in den Kessel gepumpt bis ein Druck von ca. 6 Bar erreicht ist [17].

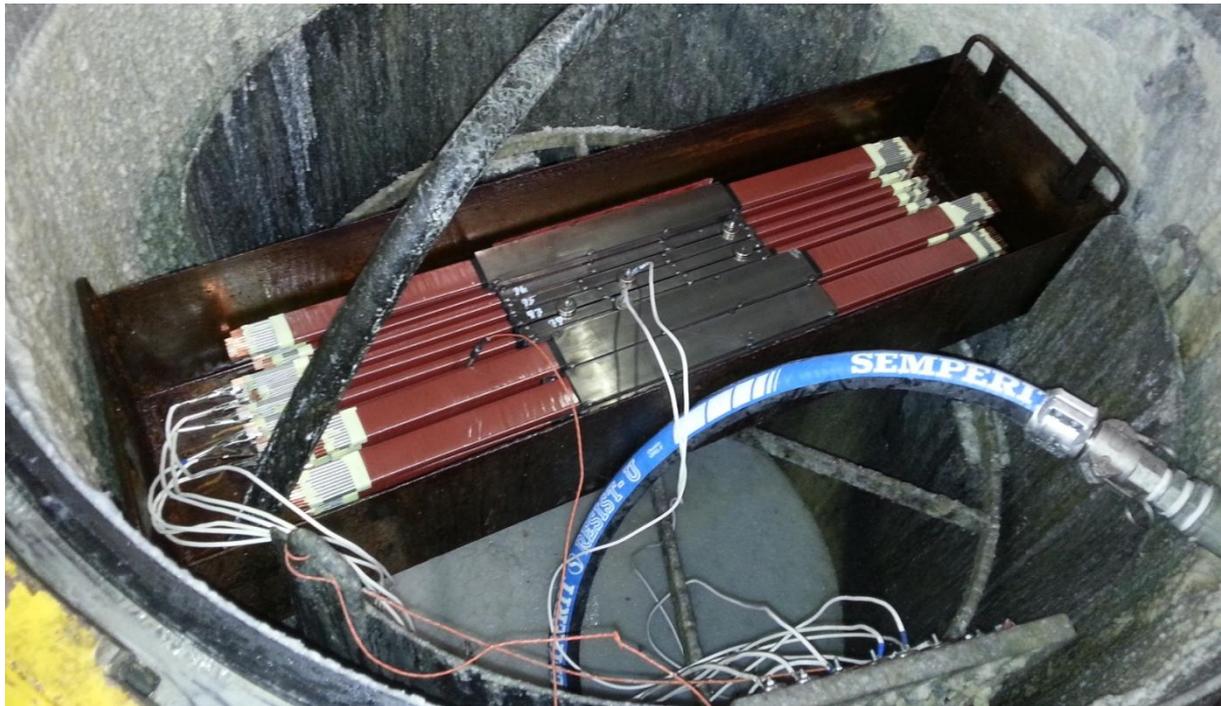


Abbildung 3.5: Imprägnierkessel mit Stäben und Messanschlüssen

Zur Sicherstellung der benötigten Qualität wurden Druck und Temperatur des Imprägnierkessels, sowie die Kapazität der Prüflinge überwacht. In Abbildung 3.5 sind die bereits im Imprägnierkessel befindlichen Stäbe abgebildet. Die Wanne hat dabei den Zweck die zum Fluten nötige Harzmenge zu reduzieren. Die grauen Silikonkabel sind mit Magneten und Klemmen versehen und stellen eine Verbindung zum Isocap (Kapazitäts-, Temperatur- und Druckmessgerät) her, die braunen Kabel sind mit Pt-100 Thermowiderständen versehen. Beim Fluten wird das Harz durch den schwarzen Schlauch zugeführt und durch diesen nach dem Abschluss der Imprägnierung auch wieder abgeführt. Durch den blauen Schlauch können diverse Imprägnierharze bei Bedarf aus externen Behältern (z.B.: Fässer, Hobbock) entnommen. Bei der Kapazitätsmessung dienen der Leiterstab und die Nutimitation als Elektroden. Vor und während der Vakuumphase ist die Kapazität der Prüflinge konstant, die Kapazität ist hauptsächlich durch die Geometrie des Stabes und die Permittivitäten des Glimmers und des Trägermaterial (hier Glas oder Polyester) bestimmt. Während des Flutens mit Tränkharz wird durch das Ersetzen der Luft mit Harz die Dielektrizitätskonstante des Prüflings verändert, sie wird größer. Nach vollständigem Fluten des Imprägnierkessels erfolgt ein Druckanstieg bis zu 6 bar Überdruck. In dieser Phase erfolgt der größte Kapazitätsanstieg einer Imprägnierung. Bei Erreichen eines stabilen Kapazitätswertes ist die Imprägnierung prinzipiell abgeschlossen. Als Sicherheit, dauert die Überdruckphase auch danach noch einige Stunden an (Druckhaltephase), da der Kapazitätsverlauf nur von einigen repräsentativ gewählten aber nicht von allen Prüflingen messtechnisch erfasst werden kann, [18].

Material	Permittivität
Luft	1
Glas	10
Glimmer	8
Epoxidharz	3,7
Polyesterfilm	3,3

Tabelle 3.4: Überblick Permittivitäten, [19], [20]
 (enthält Richtwerte, Abweichungen sind möglich)

Der Imprägnierablauf selbst ist in bestimmten Fertigungsphasen immer den verwendeten Imprägnierharzen anzupassen. Dadurch ergeben sich bei verschiedenen verwendeten Harzen auch verschiedene Prozesse. Der lange Zeitraum bis zum Erreichen der Imprägniertemperatur rührt daher, dass verursacht durch das Vakuum nur Wärmestrahlung und keinerlei Konvektion für die Erwärmung verantwortlich ist. Die dabei gemessene Temperatur ist die Temperatur der Prüflinge selbst. Der Sensor wurde dabei so platziert, dass für jeden Prüfling das Erreichen der Imprägniertemperatur sichergestellt werden konnte.

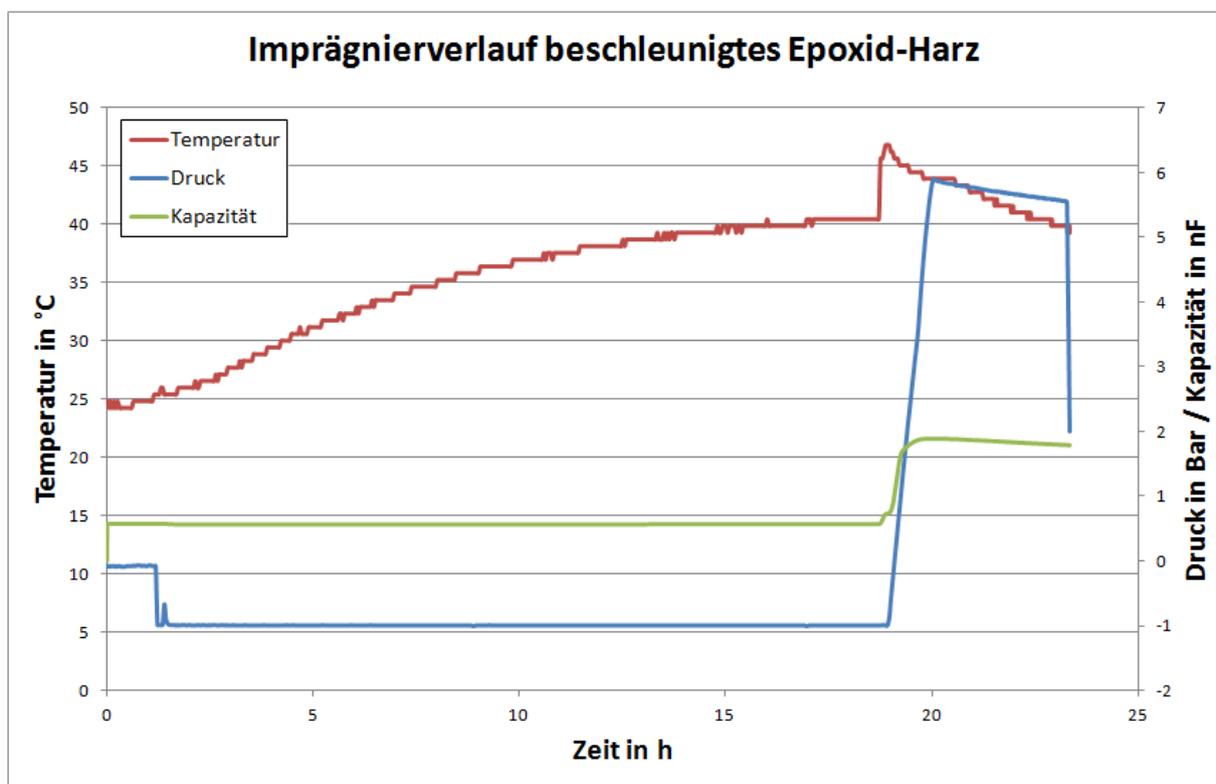


Abbildung 3.6: Imprägnierverlauf System 1 und System 3



Abbildung 3.7: Stäbe vor dem Aushärteprozess

Nach Abschluss des VPI-Prozesses wurden die Stäbe zum Aushärten in einen Ofen eingebracht. Das Aushärten der Epoxid-Systeme (System 1, 3, 5) erfolgte bei 160 °C für eine Dauer von 16 Stunden. System 2 und 4 (Polyesterharz) wurden in einem zweistufigen Verfahren ausgehärtet. Die erste Aushärtestufe dauerte 4 Stunden bei 125°C unmittelbar darauf anschließende zweite Aushärtestufe dauerte 12 Stunden bei einer Temperatur von 170°C. Auch der Aushärteprozess muss gegebenenfalls an das Tränkharz angepasst. So neigen z.B.: niederviskose Harze dazu während des Entladens des Imprägnierkessels und dem Beladen des Aushärteofens wieder aus der Isolierung auszurinnen. Andere Harze erreichen eine höhere Verarbeitungsqualität wenn der Aushärteprozess in Stufen, mit Anfangs verringerter Temperatur durchgeführt wird.

Ausführung der Untersuchung

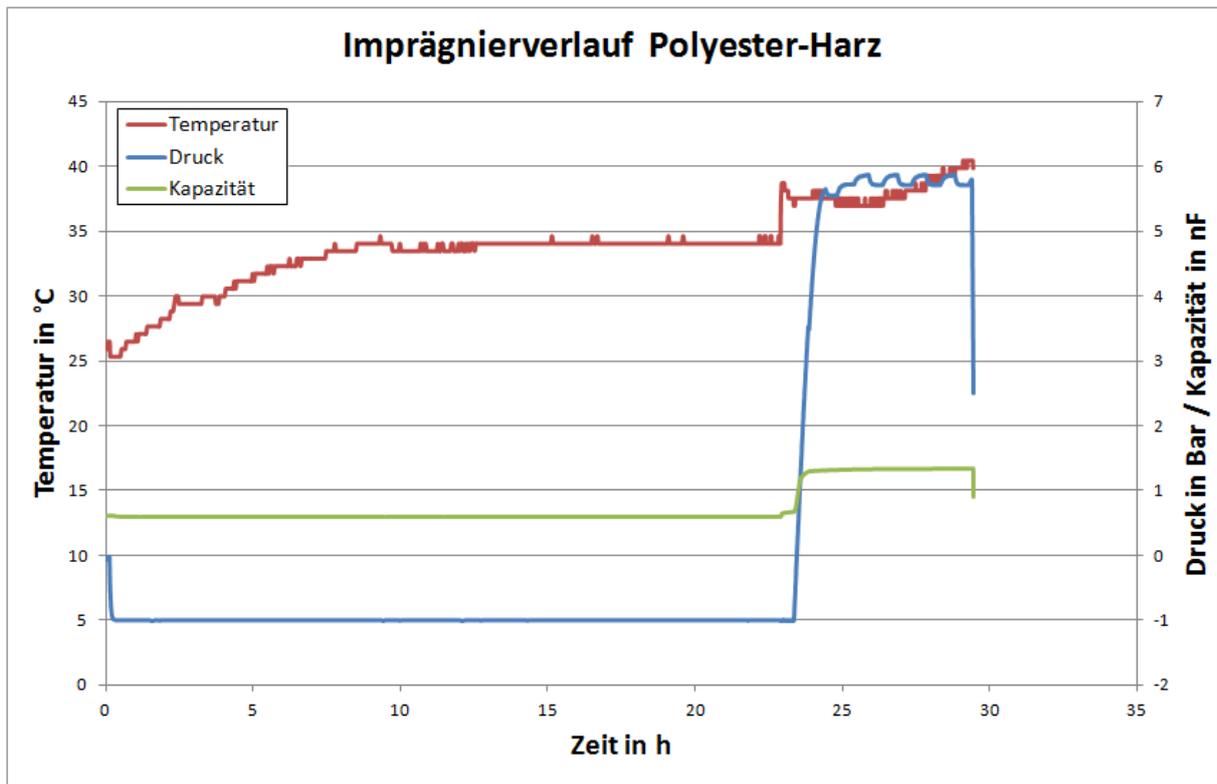


Abbildung 3.8: Imprägnierverlauf System 2 und System 4

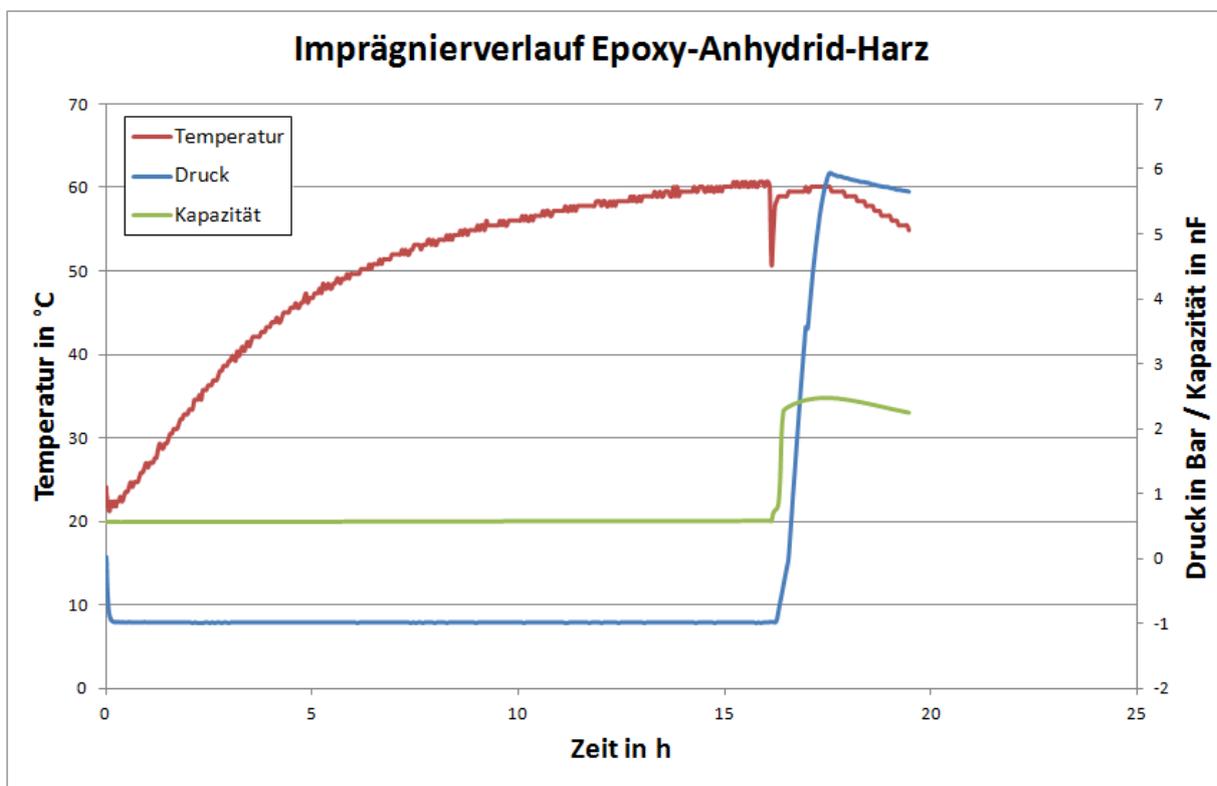


Abbildung 3.9: Imprägnierverlauf System 5

4 Ausführung der Untersuchung

4.1 Durchführung der thermischen Evaluierung

Die thermische Evaluierung wurde weitgehend gemäß IEEE Std. 1776 – 2008 durchgeführt. Kleinere Abweichungen vom Standard wurden jedoch in Kauf genommen. Die Stehspannungsprüfung konnte nicht wie in der bestimmten Norm noch in der Feuchtekammer vorgenommen werden. Jedoch benötigte der Transport von der Feuchtekammer in die Versuchszelle weniger als 5 Minuten. Ein substanzielles Abtrocknen vor dem Versuch kann daher ausgeschlossen werden. Die anderen Prüflinge verblieben derweil in der eingeschalteten Feuchtkammer.

Der thermische Belastungszyklus wurde mit 10 Tagen bei 220°C gewählt. IEEE Std.1776-2008 schlägt für diese Temperatur und Klassen eine Dauer von 7 Tagen vor. Das ist jedoch nur eine unverbindliche Empfehlung, die nicht Teil der Norm ist. Die Ofentemperatur von 220°C ± 2% konnte durch Messung mittels K-Typ Thermoelement bestätigt werden.

Um die zusätzlich zum Diagnosezyklus nach Norm durchgeführten Diagnoseprüfungen ohne Feuchteinfluss durchführen zu können wurde abweichend vom Standard das Trocknen der Prüflinge nicht über Nacht sondern bei 50°C für 12 Stunden im Ofen durchgeführt.

Im Anschluss an jeden Diagnosezyklus folgten Teilentladungsmessung, Verlustfaktormessung und Isolationswiderstandsmessung, in dieser Reihenfolge. Die Teilleiter der Teststäbe wurden durch das Auftragen von Leitsilber auf die blanken, von Harz und Teilleiterisolation befreiten Enden miteinander elektrisch verbunden. Zusätzlich wurden die Enden vor jeder Teilentladungsmessung mit neuem Kupferklebeband umwickelt. Fehler zwischen den einzelnen Teilleitern sind durch diese Maßnahmen während der gesamten Diagnose ohne Auswirkung. Auch die sehr gute elektrische Kontaktierbarkeit der Nutimitation konnte durch vollständiges Abtragen der darauf befindlichen Harzschicht mittels Winkelschleifer sichergestellt werden. Vor dem ersten Thermozyklus wurde zusätzlich eine Verlustfaktormessung bei 155°C durchgeführt.

4.2 Elektrischer Lebensdauerversuch

Der elektrische Lebensdauerversuch gehört zu den grundlegenden Versuchen zur Beurteilung der Qualität einer elektrischen Isolation. Dieser wird üblicherweise bei Raumtemperatur durchgeführt, kann aber auch bei anderen Temperaturen erfolgen. Für die hier untersuchten 6,6 kV Hochspannungsisoliersysteme wurden zwei Lebensdauerversuche mit jeweils 25 Stäben (5 Stäbe je System) durchgeführt. Dabei wurden eine Prüfspannung von 16,7 kV = 2,54 U_N [21] und 19,8 kV = 3 U_N [8] gewählt. Dabei sollte ein Lebensdauer von 250 Stunden für 2,54 U_N [21] und 10 Stunden für 3 U_N [8] erreicht werden. Wenn alle Stäbe die vorgeschriebene Zeit erreichen gilt die Norm als erfüllt. Es sollten dabei mindesten 4 Stäbe oder zwei Spulen verwendet werden. Im Rahmen dieser Untersuchung standen jeweils 5 Stäbe pro Spannung und System zur Verfügung.

4.3 Verlustfaktormessung

In Abweichung von IEEE Std. 286 – 2000 wurde die Verlustfaktormessung ohne Schutzringe durchgeführt. Eine Kontaktierung des EGS wäre nur durch Beschädigung des Wickelkopfschutzes möglich gewesen. Auf Grunde der je nach Stab unterschiedlichen Harzschicht auf dem Wickelkopfschutz zeigte sich dass, bei einem entsprechenden Vorversuch mit aufgeklebtem Schutzring, die Vergleichbarkeit auch der Messwerte auch innerhalb der Stäbe eines einzelnen Systems verloren gegangen wäre. Es wurde deshalb entschieden zu Gunsten der Aufrechterhaltung der Vergleichbarkeit die Norm in diesem Punkt nicht zu berücksichtigen.

4.4 Teilentladungsmessung (TEM)

Die Teilentladungsmessung wurde mit einem LDS-6 System von Doble-Lemke durchgeführt. Die verwendete Bandbreite betrug 900 kHz und eine Mittenfrequenz von 550 kHz. Es wurde die Spannung, analog zur Verlustfaktormessung, in 20%-Stufen beginnend mit einer Spannung von $0,2 U_N$ (1,32 kV) bis $1,2 U_N$ (7,92 kV) gesteigert. Dabei wurde die Einsatzspannung sowie der Q_{IEC} -Wert bei Nennspannung notiert. Anhand der Fingerprints wurde versucht, bereits zu Anfangs vorliegende Fehler zu diagnostizieren und eine Schlussfolgerung bezüglich des Zustandes der Isolation zu treffen. Als Referenz dienten hierbei die Fingerprints anderer Arbeiten, bei denen teils unter Laborbedingungen charakteristische Fingerprints für bestimmte Fehlerarten ermittelt wurden.

Vor jeder Messung wurden die Stäbe für eine Dauer von 5 Minuten bei Nennspannung vorkonditioniert. Während der Konditionierung wurde bereits eine TEM vorgenommen und der dabei gemessene Q_{IEC} -Wert festgehalten. Dieser wurde bei der daran anschließenden Kalibrierung als Richtwert genutzt um den Ladungswert am Kalibrator bestmöglich auszuwählen. Es wurde für jedes System einzeln kalibriert. Wenn die Q_{IEC} -Werte zwischen zwei Stäben eines Systems stark voneinander abwichen wurde ebenfalls neu kalibriert.

4.5 Polarisationsindex PI

Wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt stellt die Isolationsstrommessung bei Widerständen über $5000 \text{ M}\Omega$ [5] eine erhebliche Anforderung hinsichtlich der Genauigkeit des Messgerätes und Konstanzheit der Umgebungsbedingungen dar.

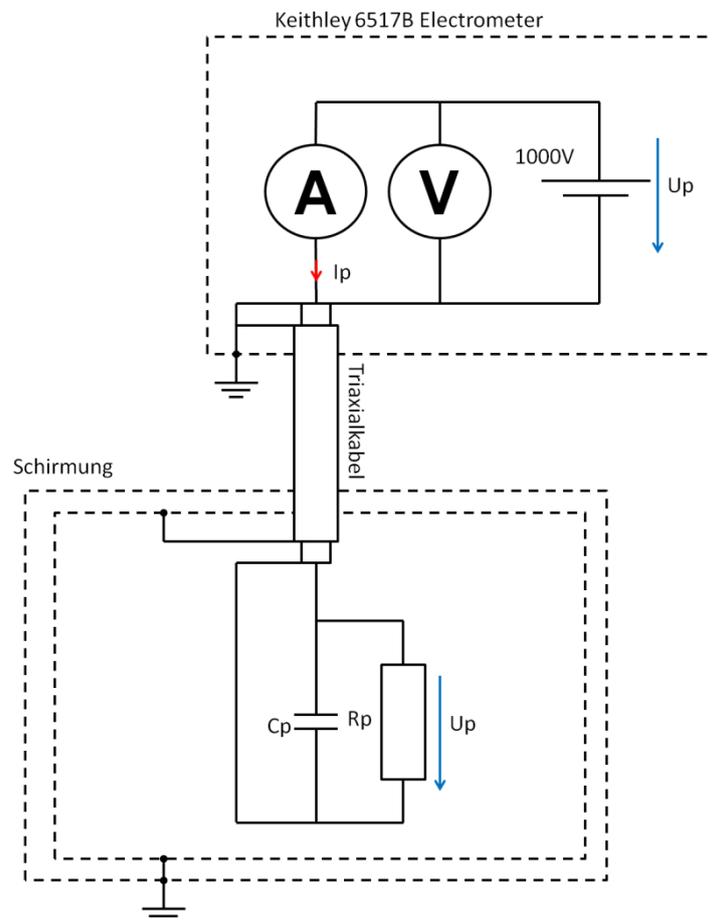


Abbildung 4.1: Schema des Messaufbaus für die Isolationswiderstandsmessung

Da der Isolationswiderstand durch eine einfache Strom-Spannungsmessung ermittelt wird, steigt der Widerstand mit sinkender Probengröße. Es hat sich dabei gezeigt dass die in IEEE Std. 1776-2008 beschriebenen Probleme auch in wenig gestörter Umgebung auftreten, auch wenn ein Messgerät mit ausreichender Genauigkeit im sub- μ -Ampere-Bereich zur Verfügung steht. IEEE Std. 1776-2008 richtet sich jedoch an industrielle Benutzer, bedingt durch die geringe Prüflingsgröße, konnten jedoch geeignete Schirmungsmaßnahmen (Triaxialkabel, Schirmbox für Prüfling) ergriffen werden um eine ausreichende Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erreichen. Die Messung konnte jedoch, entgegen der IEEE Empfehlung, bedingt durch das verwendete Messgerät, bei nur 1000V DC vorgenommen werden.

4.6 Vorversuch Endenglimmschutz

Anhand der Stäbe welche für den Vorversuch zur Bestimmung des geeigneten AGS angefertigt wurden, wurde ein Versuch zur Abschätzung des Einflusses des EGS auf den Verlustfaktor durch geführt. Dabei wurde Verlustfaktor bei 155°C den Vorversuchsstäben gemessen. Im Anschluss wurden Schutzringe durch Einfeilen angebracht und die Messung wiederholt.

Stab Nr.:	tan δ in ‰ mit EGSB	tan δ in ‰ ohne EGSB	Δ tan δ	Harz
13-126	379,5	335,5	44,0	beschleunigtes Epoxid
13-127	199,5	147,5	52,0	Polyester
13-128	318,5	292,5	26,0	beschleunigtes Epoxid
13-129	214,5	139,0	75,5	Polyester
13-131	220,5	173,5	47,0	Polyester

Durchschnittliche Veränderung für Polyester	58,2
Durchschnittliche Veränderung für Epoxid	35,0

Tabelle 4.1: Vorversuch EGS-Einfluss

Die hier ermittelten Werte dienen nur für Vergleichszwecke beim Verlustfaktor bei 155°C. Der ermittelte Wert für das beschleunigte Epoxidharz kann auch beim Epoxy-Anhydrid-System berücksichtigt werden. Dieser wird durch den Vergleich mit im Wesentlichen ähnlich aufgebauten Systemen, die jedoch mit Schutzring versehen waren, gestützt. Eine systematische Untersuchung dazu wurde jedoch nicht durchgeführt. Auch wurden die in dieser Arbeit eingefügten Verlustfaktorwerte nicht um diese ermittelten Schätzwerte korrigiert. Die weitere Beurteilung erfolgte nur aus dem Vergleich der einzelnen Systeme untereinander. Würde man den für Epoxid ermittelten Schätzwert von den Messwerten jedoch abziehen, so wären diese im üblichen Bereich der Werte mit Schutzring.

5 Diskussion der thermischen Evaluierung

5.1 Initiale Diagnose

Die hier getroffenen Feststellungen treffen auf alle während eigentlicher Evaluierung eingesetzten Prüfstäbe zu. In den Vorversuchen verwendete Prüflinge werden nicht besprochen.

5.1.1 Initiale Teilentladungsdiagnostik

Die Teilentladungsmessungen an den noch thermisch unvorbelasteten Prüflingen wiesen bei allen Systemen, innerhalb der fünf Prüflinge je System, auf dieselbe Fehlerart hin. Hier wird deshalb nur ein repräsentativ gewählter Fingerprint je System diskutiert. Die Fingerprints wurden so gewählt dass deren Q_{IEC} -Wert bei Nennspannung im Median für das entsprechende System liegt.

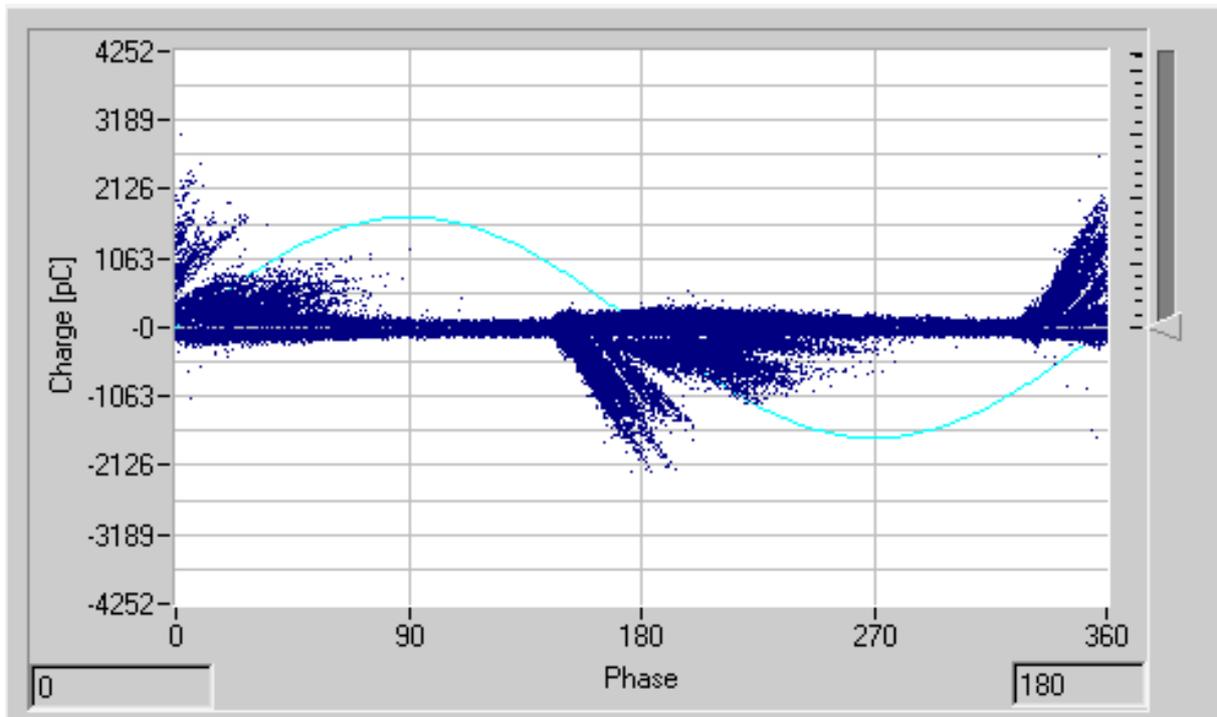


Abbildung 5.1: Fingerprint von System 1, Prüfling 13-82, unvorbelastet

Bei System 1 (Abbildung 5.1) weist der Fingerprint auf bereits vorliegende Hohlräume innerhalb der Hauptisolation hin. Der Medianwert der Q_{IEC} -Werte beträgt 1800 pC bei Nennspannung (Stab 13-82 mit 1800 pC bei U_N). Im Wesentlichen entspricht der Fingerprint jenen welche auch in Veröffentlichungen [22],[23] enthalten sind.

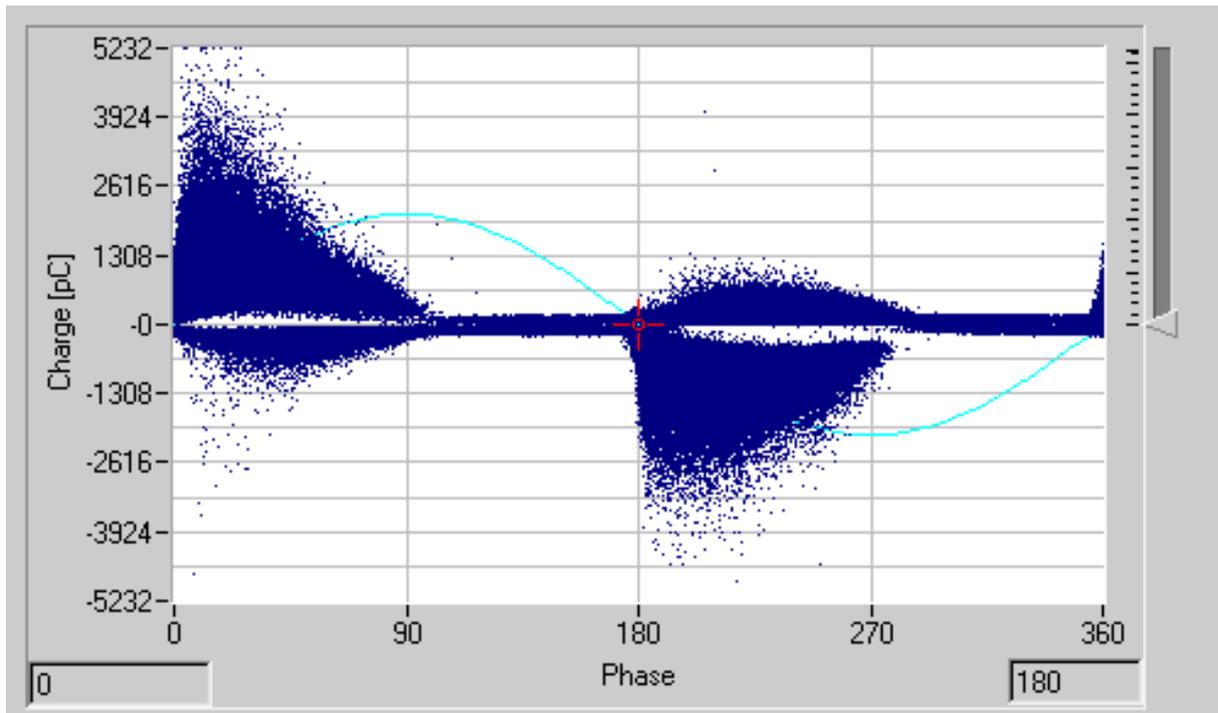


Abbildung 5.2: Fingerprint von System 2, Prüfling 13-93, unvorbelastet

Die Betrachtung von System 2 (Abbildung 5.2) weist auf einen Fehler zwischen Außenglimmschutz und Hauptisolation oder in dieser hin. Ein Fehler zwischen Außenglimmschutz und Nutimitation kann mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, da die Nutimitation die Blechung einer Maschine nicht nachbildet. Eine Kontaktierung von Außenglimmschutz und Nutimitation an nur einem Punkt sollte also eine wesentliche Potentialdifferenz in diesem Bereich verhindern. Der für diese Fehlerart charakteristische dreieckige Fingerprint ist gut erkennbar. Wenn auch nur eine geringe Asymmetrie, zwischen Teilentladungen in positiver und negativer Halbwelle sichtbar ist. Der Fingerprint entspricht somit jenen in Quelle [24], „Laboratory Study of Slot Discharge Characteristic PRPD Patterns“. Der QIEC-Wert ist mit einem Medianwert von 1400 pC bei Nennspannung (13-93 mit 1400 pC bei UN) vergleichbar mit den anderen Systemen.

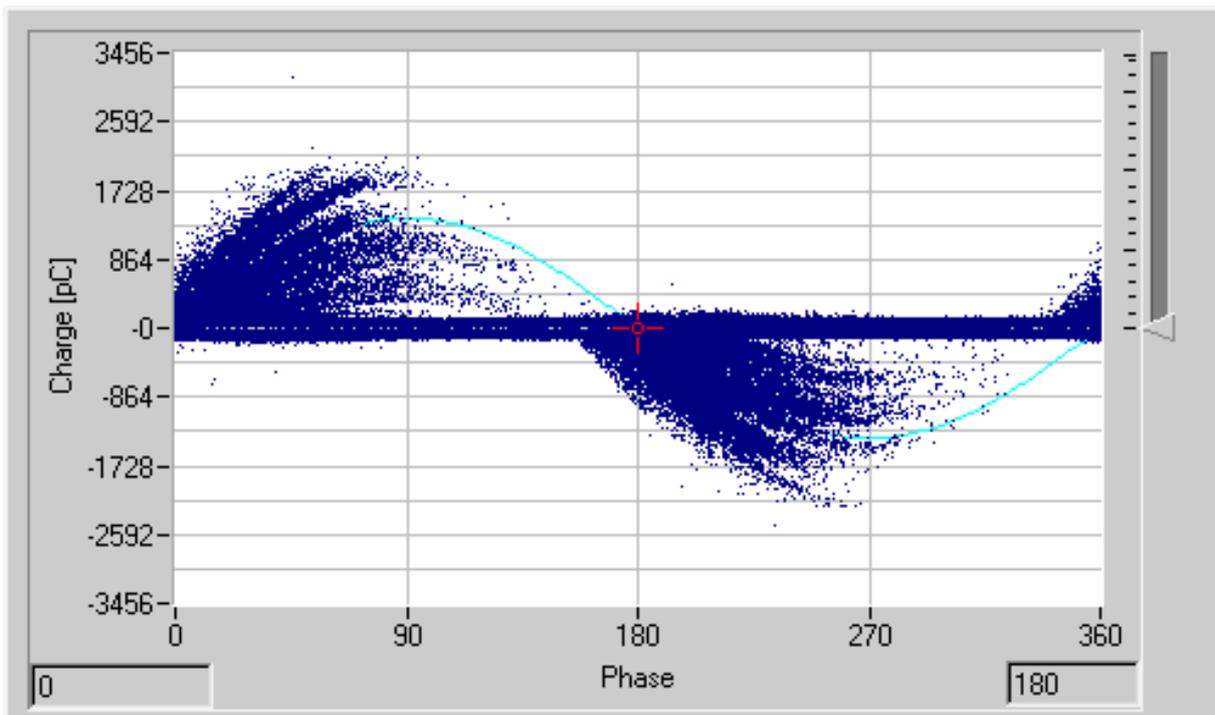


Abbildung 5.3: Fingerprint von System 3, Prüfling 13-102, unvorbelastet

Die Fingerprints von System 3 (Abbildung 5.3) zeigen, dass hier vorwiegend innere Teilentladung stattfinden. Als Ursache kommen auch hier Hohlräume unterschiedlicher Größe in der Hauptisolation in Frage, [25][22]. Auffallend ist jedoch, dass trotz der Verwendung desselben beschleunigten Epoxidharzes, wie bei System 1, der Durchschnitt des Q_{IEC} -Wertes bei Nennspannung mit 3540 pC mehr als doppelt so hoch ist. Ein möglicher Grund für größere Zahl an defekten, ist die Kombination des sehr hoch viskosen Harzes mit dem Folienträgerband der Hauptisolation. Dieser Folienträger ist schlechter imprägnierbar als der der für System 1 gewählte Glasbandträger.

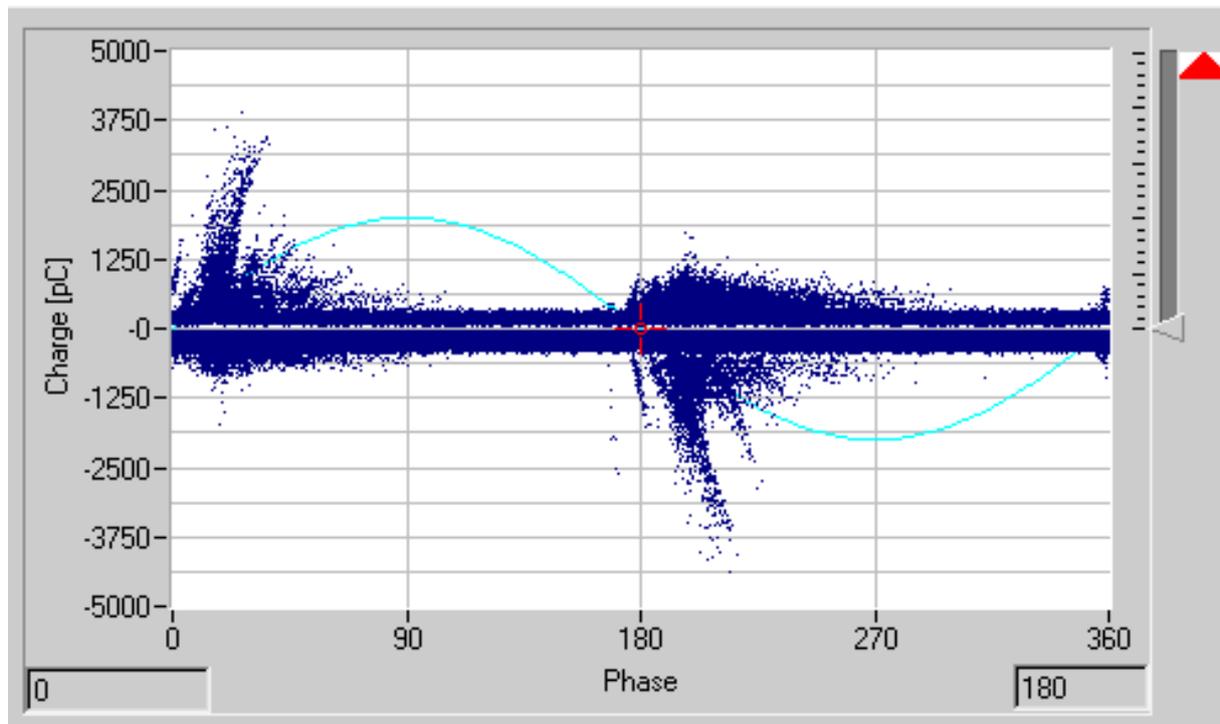


Abbildung 5.4: Fingerprint von System 4, Prüfling 13-115, unvorbelastet

Auch hier bei System 4 (Abbildung 5.4) kristallisiert sich deutlich der Unterschied zwischen Glasträger und Folienträger heraus. Der hier vorwiegende Fehler sind innere Teilentladungen, [22][23]. Deutlich erkennbar durch die Spitzen um den Spannungsnulldurchgang. Der Q_{IEC} -Wert beträgt mit einem Systemdurchschnitt von 1220 pC (Stab 13-115 mit 1300 pC bei U_N). nur ca. ein Drittel gegenüber System 3 (3540 pC). Auch hier dürfte die deutlich geringere Viskosität des Polyesterharzes einen großen Einfluss haben. Als Folge dessen sollten auch weniger und kleinere Hohlräume in der Isolation vorhanden sein.

Das als Referenzsystem gewählte System 5 (Abbildung 5.5) unterscheidet sich bereits zu Beginn deutlich von den anderen vier Systemen. Hier überwiegen Oberflächenentladungen, andere vorhandene Fehler sind nicht erkennbar, das kann jedoch auch der Stärke der Oberflächenentladungen liegen. Der Q_{IEC} -Wert ist hier im Durchschnitt mit 4640 pC bei Nennspannung (13-124 mit 4700 pC bei U_N) am höchsten. Ein direkter Vergleich nur aufgrund der scheinbaren Ladung ist nicht zielführend da der hauptsächlich im Vordergrund stehende Fehler ein gänzlich anderer zu sein scheint als bei den übrigen Systemen. Bei diesem System war zu Anfangs die Oberfläche des Wickelkopfes klebrig. Es liegt die Vermutung nahe dass die Oberflächenentladungen damit in Zusammenhang stehen. Bestärkt wird dieser Eindruck dadurch dass, nach zwei Thermozyklen sowohl die Klebrigkeit des Wickelkopfschutzes als auch die Oberflächenentladungen stark zurückgingen. Der nach zwei Zyklen erstellte Fingerprint (Abbildung 5.6) entspricht jenem eines Leiterstabes mit inneren Teilentladungen [22].

Diskussion der thermischen Evaluierung

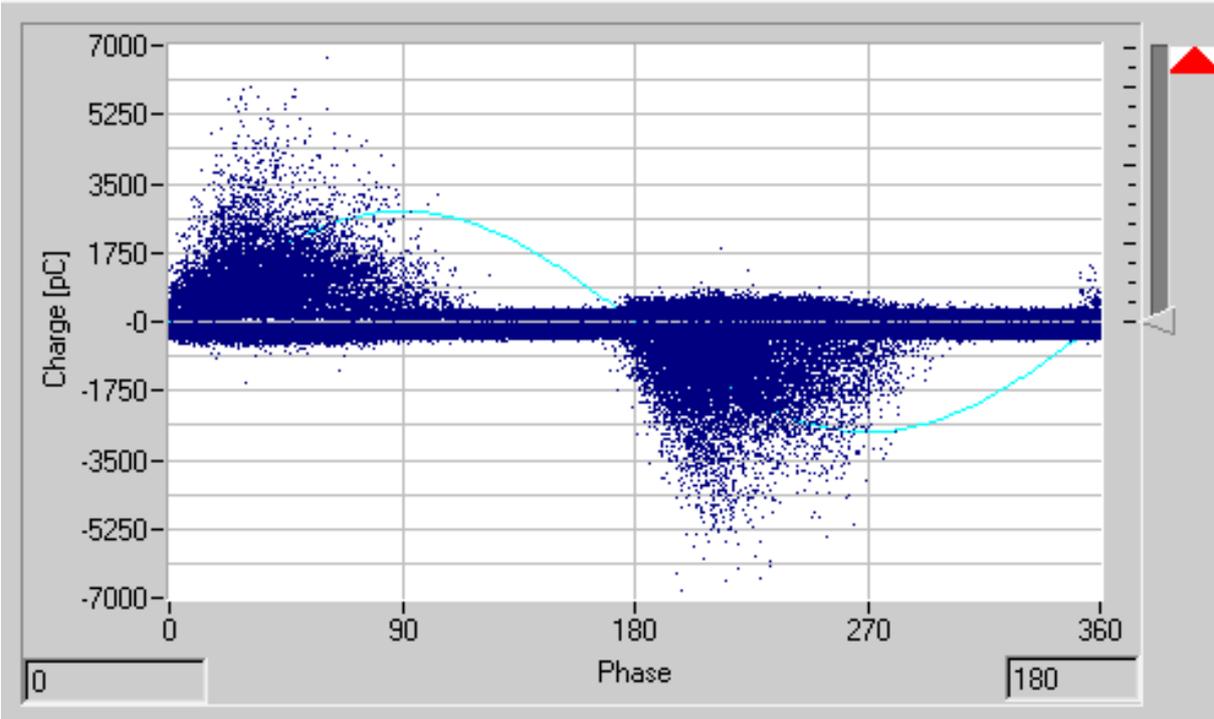


Abbildung 5.5: Fingerprint von System 5, Prüfling 13-124, unvorbelastet

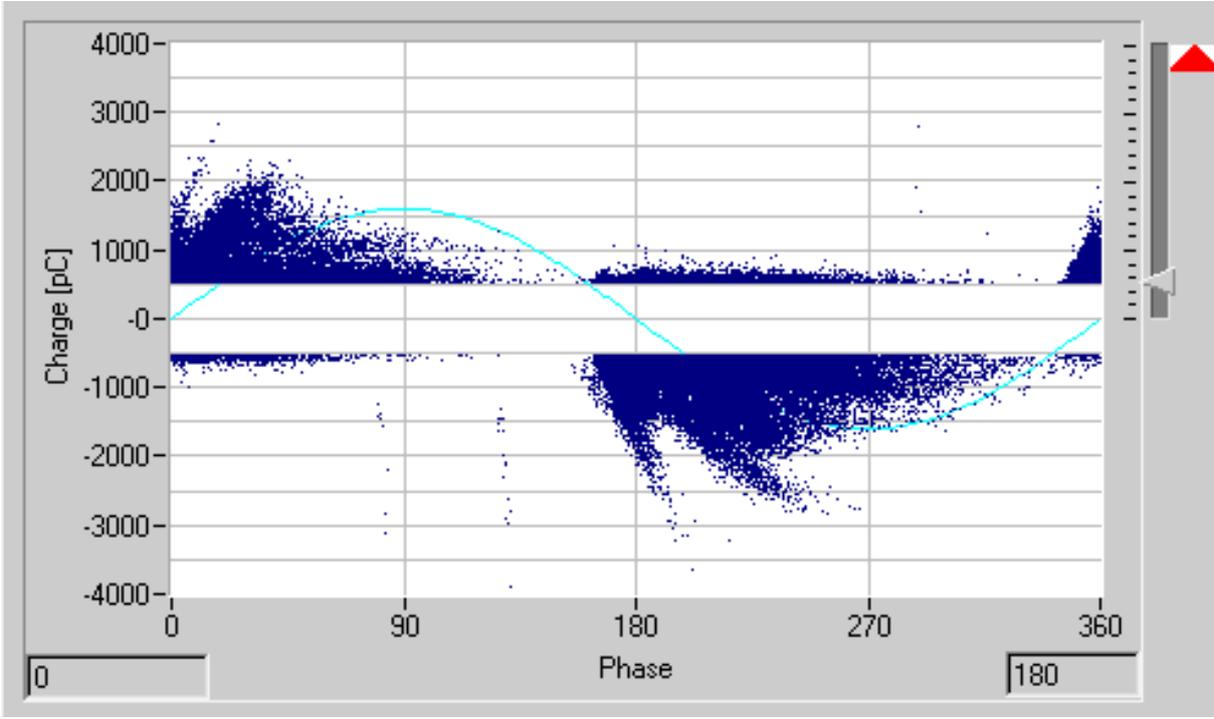


Abbildung 5.6: Fingerprint von System 5, Prüfling 13-124, nach 2 Thermozyklen

5.1.2 Initiale Verlustfaktormessung

Auf Grund der großen Anzahl an Messwerten wird hier nur ein Auszug aus der initialen Verlustfaktormessung abgebildet, gewählt wurden für diesen Auszug die für die thermische Evaluierung bestimmten Stäbe.

Auf Grund der Messung ohne Schutzring mit vollem Einfluss der Ableitströme aus den Endbereichen der Stäbe ergibt sich bereits hier ein erhöhter Verlustfaktor. Dieser ist jedoch kein Hinweis auf mindere Qualität, sondern ergibt sich nur aus der hier gewählten Art der Durchführung der Messung und betrifft alle Systeme. Eine Aussage lässt sich nur durch den Vergleich mit dem bereits seit langer Zeit im Einsatz stehenden und bestens in seinen Eigenschaften bekannten Referenzsystem (System 5) treffen. Auffällig ist jedoch dass, das Polyesterharz bereits von Anfang einen höheren Verlustfaktor über alle Spannungsstufen aufweist. Die Messung wurde in 20%-Schritten von $0,2 U_N$ bis $1,2 U_N$ bei Umgebungstemperatur durchgeführt.

Die in der Tabelle vorhandenen Messausreißer konnten auch durch Wiederholung der Messung nicht behoben werden. Diese Art von Ausreißer trat mehrmals über die Dauer der Untersuchung auf. Eine Systematik in Bezug auf die betroffenen Prüfstäbe ist nicht erkennbar.

Diskussion der thermischen Evaluierung

	Stab Nr.:	U in kV						max
	1	1,32	2,64	3,96	5,28	6,6	7,92	‰
EPOXIDHARZ mit Poroband 0410	13-081	14,1	19,9	28,0	37,1	44,3	48,9	9,1
	13-082	13,7	20,4	29,1	35,6	41,6	46,4	8,7
	13-083	13,4	20,4	27,7	36,1	41,5	46,1	8,4
	13-084	14,7	23,0	30,7	37,3	43,5	47,8	8,3
	13-085	14,5	21,6	26,5	33,0	38,8	43,2	7,1
Polyesterharz mit Poroband 0410	13-091	27,1	34,1	55,7	66,5	75,0	82,3	21,6
	13-092	23,7	30,3	51,9	61,6	70,1	75,7	21,6
	13-093	26,1	33,4	50,6	62,5	73,3	81,2	17,2
	13-094	26,3	33,5	54,1	67,1	78,8	85,4	20,6
	13-095	27,0	34,6	74,6*	65,3	74,9	82,0	40,0*
EPOXIDHARZ mit Porofol 2076	13-101	12,4	18,3	26,2	41,3	44,3	50,2	15,1
	13-102	11,9	17,2	23,9	30,8	36,7	41,8	6,9
	13-103	12,0	17,7	26,0	33,8	40,4	46,0	8,3
	13-104	12,3	17,9	25,3	33,8	40,8	46,4	8,5
	13-105	12,0	17,8	27,4	34,1	39,9	45,4	9,6
Polyesterharz mit Porofol 2076	13-111	19,2	26,2	39,1	55,2	65,2	72,0	16,1
	13-112	20,4	27,8	40,4	52,6	64,9	73,6	12,6
	13-113	20,8	28,0	41,4	56,2	67,8	74,5	14,8
	13-114	20,0	26,5	68,0*	56,4	67,4	75,3	41,5*
	13-115	20,2	26,1	35,6	49,6	60,5	68,6	14,0
Epoxy- Anhydrid mit Poroband 4020	13-121	11,5	15,6	20,5	26,1	31,6	35,9	5,6
	13-122	10,2	14,6	19,2	25,2	30,1	35,1	6,0
	13-123	9,5	13,6	18,1	23,6	28,8	33,1	5,5
	13-124	10,3	14,5	18,6	23,8	29,6	34,3	5,8
	13-125	10,5	14,9	19,5	23,6	29,5	34,3	5,9

Tabelle 5.1: Auszug aus der Initialen Verlustfaktormessung

* Ausreißer, durch wiederholtes Messen nicht behebbar

Bei der Verlustfaktormessung unter Temperatur (155°C bei 650V = 0,1 U_N) ist wiederum gut erkennbar dass, die Messwertstreuung innerhalb eines Systems nur gering ist im Bezug auf den jeweiligen Systemdurchschnitt. Selbige Feststellung lässt sich auch für die Verlustfaktormesswerte bei Raumtemperatur treffen. Eine gleichmäßige Verarbeitungsqualität dürfte also erreicht worden sein. Des Weiteren bemerkenswert ist die große Differenz zwischen Folien und Glasträger bei gleichem Harzsystem. Eine mögliche Erklärung hierfür ist dass, die PET-Folie im Porofol einen direkten Kriechweg durch das Band wohl besser verhindert als das Glasgewebe. Sowohl die Messspannung als auch Temperatur stellen keine Herausforderung für den Folienträger dar, so dass auch dieser einen substantziellen Beitrag zum Isoliervermögen leistet. Diese Feststellung trifft jedoch nur auf die unvorbelasteten Stäbe, bei nur kurzzeitiger Messbelastung zu.

Der große Unterschied zwischen den Harzsystemen kann in Zusammenhang mit deren Temperaturindex stehen, das höchsten indizierte Standartsystem (204°C thermischer

Diskussion der thermischen Evaluierung

Gewichtsverlust) schneidet hierbei am besten ab, das am geringsten indizierte beschleunigte Epoxidharz (179°C thermischer Gewichtsverlust) am schlechtesten. Ein Zusammenhang zwischen der Chemie eines Polyestersystemes und eines Epoxysystemes und deren stark unterschiedlichen Verlustfaktorwerten unter Temperatur kann jedoch ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

	Stab Nr.:	tan δ in		Stab Nr.:	tan δ in		Stab Nr.:	tan δ in
	1	‰		1	‰		1	‰
beschleunigtes Epoxid mit Poroband 0410	13-076	354,0	beschleunigtes Epoxid mit Porofol 2076	13-096	220,0	Epoxy-Anhydrid mit Poroband ME 4020	13-116	88,5
	13-077	366,0		13-097	221,0		13-117	87,6
	13-078	354,0		13-098	222,0		13-118	88,4
	13-079	357,0		13-099	227,0		13-119	85,8
	13-080	342,0		13-100	223,0		13-120	85,0
	13-081	345,0		13-101	228,0		13-121	82,8
	13-082	351,0		13-102	209,0		13-122	86,3
	13-083	361,0		13-103	230,0		13-123	84,4
	13-084	360,0		13-104	226,0		13-124	83,7
	13-085	349,0		13-105	232,0		13-125	83,5
Polyesterharz mit Poroband 0410	13-086	172,0	Polyesterharz mit Porofol 2076	13-106	100,0			
	13-087	162,0		13-107	100,0			
	13-088	167,0		13-108	108,0			
	13-089	168,0		13-109	103,0			
	13-090	171,0		13-110	101,0			
	13-091	174,0		13-111	100,0			
	13-092	170,0		13-112	104,0			
	13-093	167,0		13-113	102,0			
	13-094	170,0		13-114	108,0			
	13-095	164,0		13-115	113,0			

Tabelle 5.2: Verlustfaktor bei 155°C



Abbildung 5.7: Verlustfaktormessung unter Temperatur

Die Verlustfaktormessung unter Temperatur erfolgte in einem industriell üblichen Ofen. Die Hochspannung und das Messsignal wurden mittels zweier separater Durchführungen mit der außerhalb des Ofens befindlichen Messanlage (Schering-Brücke mit einstellbarem Transformator) verbunden. Die Nutimitationen der nicht an der Messung beteiligten Stäbe wurden mit dem Erdpotential verbunden.

System	ø-Verlustfaktor	ø-Abweichung	
		relativ	absolut
Nr.:	‰	%	‰
1	353,9	1,64	5,80
2	168,5	1,77	2,98
3	223,8	2,07	4,63
4	103,9	2,07	2,15
5	85,6	2,06	1,76

Tabelle 5.3: Systemvergleich bei Verlustfaktor mit 155°C

5.2 Initialer Polarisationsindex

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt wurde, stellt der PI eine Eigenschaft des Isoliersystems die von der Temperatur, dem Zustand, der Feuchtigkeit und der Verschmutzung abhängig ist, dar. Aus einem hohen PI alleine kann keine Aussage darüber getroffen werden welches System die höchste Beständigkeit aufweist. Vergleicht man jedoch die Prüfstäbe der Systeme jeweils untereinander ist hier jedoch ersichtlich das eine gleichmäßige Qualität der Verarbeitung je System erreicht wurde. Die Anforderung eines Polarisationsindex von über 2 (IEE Std. 43 Tabelle 2) wurde von jedem einzelnen Prüfling erreicht, [5].

System	ϕ -DAR	ϕ -PI	ϕ -Pi-Abweichung
1	1,95	21,92	1,22
2	1,83	7,96	0,52
3	1,85	20,68	2,61
4	1,64	8,26	1,46
5	1,64	11,78	2,75

Tabelle 5.4: Polarisationsindex der thermisch unvorbelasteten Isoliersysteme

5.3 Thermische Zyklierung

5.3.1 Optische Beurteilung nach dem ersten Zyklus

Bereits nach dem ersten thermischen Belastungszyklus waren teils erhebliche optische Veränderungen an den Prüfstäben erkennbar. Da jedoch im daran anschließenden Diagnosezyklus kein einziger Ausfall eines Prüfstabes stattfand, wurde mit Ausnahme der optischen Begutachtung und des Tap-Tests auf weitere Diagnosen verzichtet. Beim sogenannten Tap-Test wird der Stab, durch einen erfahrenen Diagnostikingenieur mittels abklopfen beurteilt. Er dient dem (manuellen) mechanischen feststellen von Delaminationen. Eine genaue Aussage über die Schwere der Beschädigung ist anhand des Tap-Tests nicht möglich, es kann nur der Ort der Delamination genau festgestellt werden. Der Tap-Test beruht rein auf der Erfahrung und dem Eindruck des Diagnostikingenieurs. Die festgestellten Beschädigungen sind in Tabelle 5.5 für die System 1 bis 5 festgehalten. [26]

System	Beschreibung
1	Im Wickelkopf auf ganzer Länge delaminiert einhergehend mit starker Volumsvergrößerung. Ablösung der Nutimitation beim Abklopfen wahrnehmbar, deutlich andere Entladungsgeräusche als andere Systeme.
2	Im Wickelkopf auf ganzer Länge delaminiert, einhergehend mit starker Volumsvergrößerung.
3	Starke Delamination im Endenglimmschutz-Bereich, nur leichte Delamination an den Enden, nur mäßige Volumsvergrößerung. Beginnende Rissbildung am sichtbaren Außenglimmschutz, deutlich geringere Lautstärke der Entladungen im Vergleich den anderen Systemen.
4	Leichte Delamination im Endenglimmschutz-Bereich mit geringer Volumsvergrößerung. Keine Delamination an den Enden. Leichte Rissbildung am sichtbaren AGS.
5	Keine Schäden erkennbar, nur geringe farbliche Veränderung des Wickelkopfschutzbandes.

Tabelle 5.5: Schlussfolgerungen aus dem Tap-Test

5.3.2 Verlustfaktormessung ($\tan \delta$)

Die Verlustfaktormessung wurde Initial und nach jedem Diagnosezyklus durchgeführt. Die Auswertung des $\Delta \tan \delta$ erwies sich dabei für keines der fünf Systeme als aussagekräftig. Betrachtet man jedoch den Verlustfaktor bei $1,2 U_N$ so erhält man für die drei Epoxid-Systeme einen recht eindeutigen Verlauf. Es ist ersichtlich, dass bei diesen Systemen im letzten bzw. vorletzten Zyklus vor dem Ausfall ein signifikanter Anstieg des Verlustfaktors erfolgte. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre die beginnende Delamination des Glas-Glimmer-Harz-Verbundes im vorangegangenen Zyklus. Diese scheint sich erst nach mehreren Zyklen so auszuwirken, dass innerhalb eines einzigen Zyklusses der Stab aufgeht d.h. größere Delaminationserscheinungen oder Hohlräume auftreten.

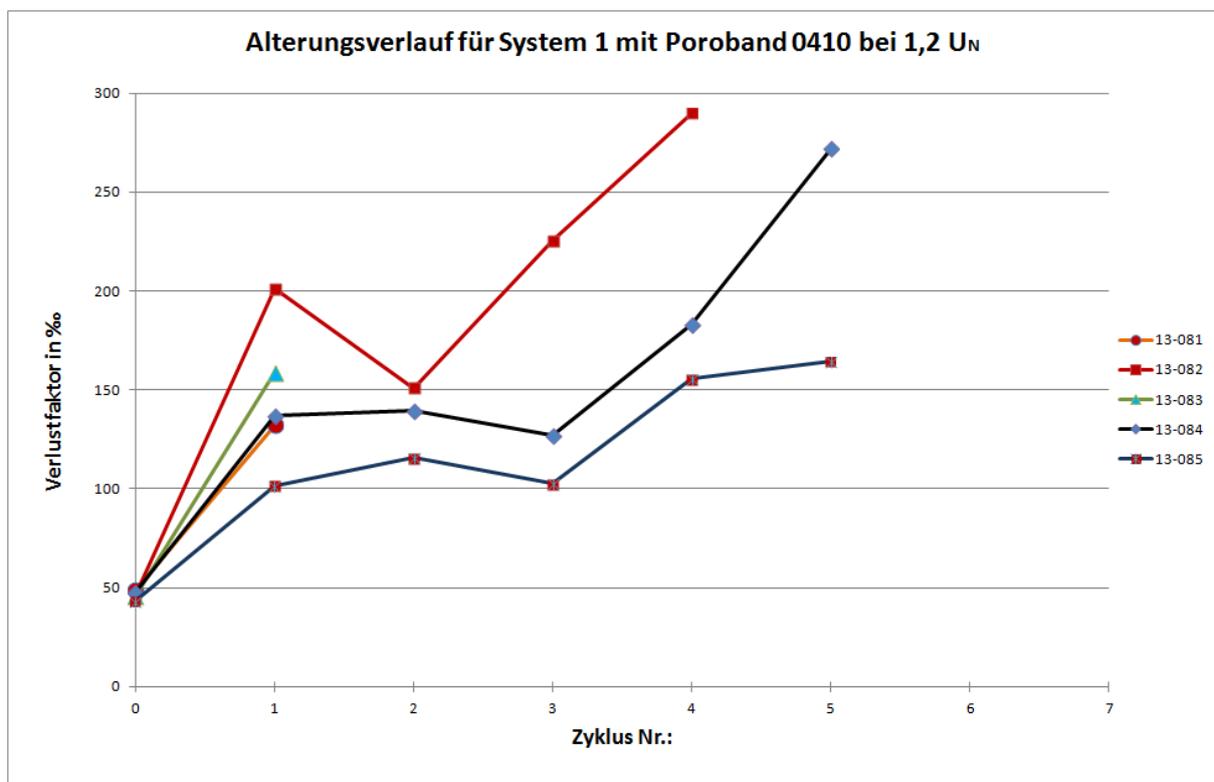


Abbildung 5.8: $\tan \delta$ über Alterungszyklen bei $1,2 U_N$ für System 1 mit Poroband 0410

Vergleicht man den Verlauf von System 1 (Abbildung 5.13) mit jenem von System 3 (Abbildung 5.14), so zeigt sich, dass der Folienträger bereits ab dem ersten Zyklus zu delaminieren scheint. Der Glasträger hingegen zeigt dieses Verhalten erst nach dem ersten bis dritten Zyklus. System 3 zeigt also ein Verhalten welches System 5 (Epoxy-Anhydrid mit Glasträger) sehr ähnlich ist.

Diskussion der thermischen Evaluierung

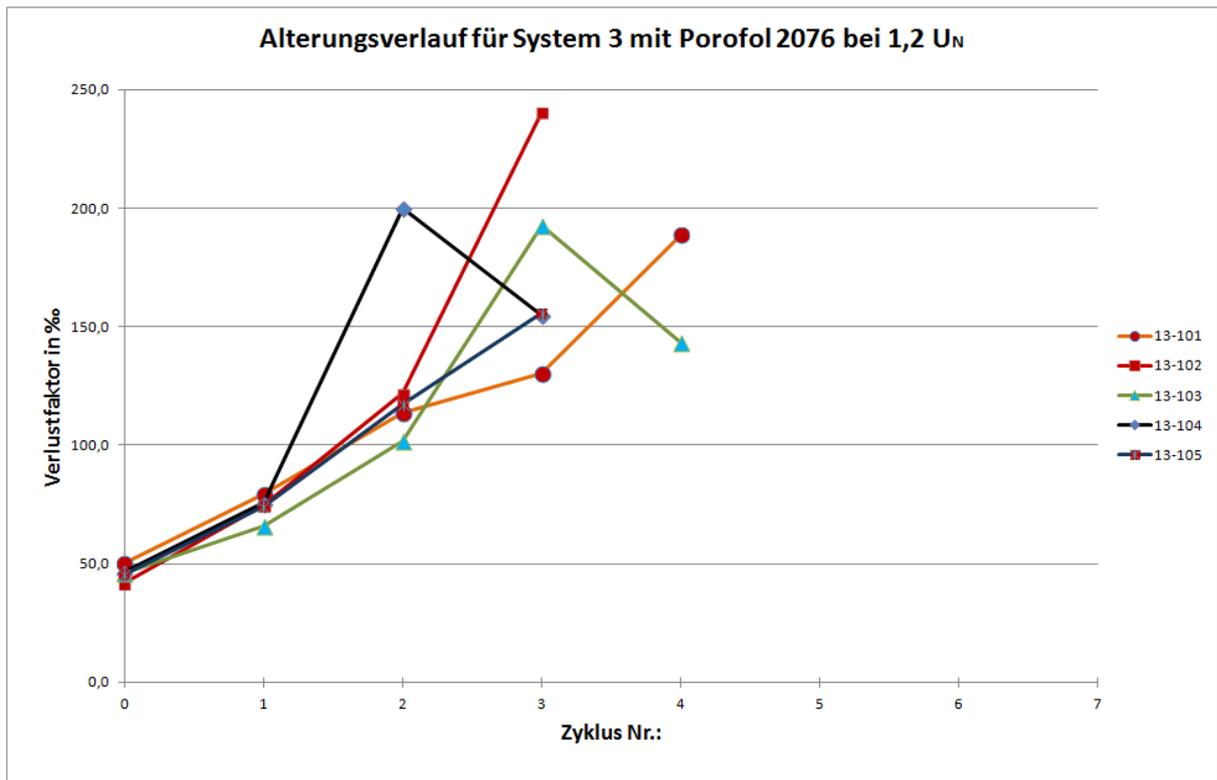


Abbildung 5.9: $\tan \delta$ über Alterungszyklen bei 1,2 U_N für System 3 mit Porofol 2076

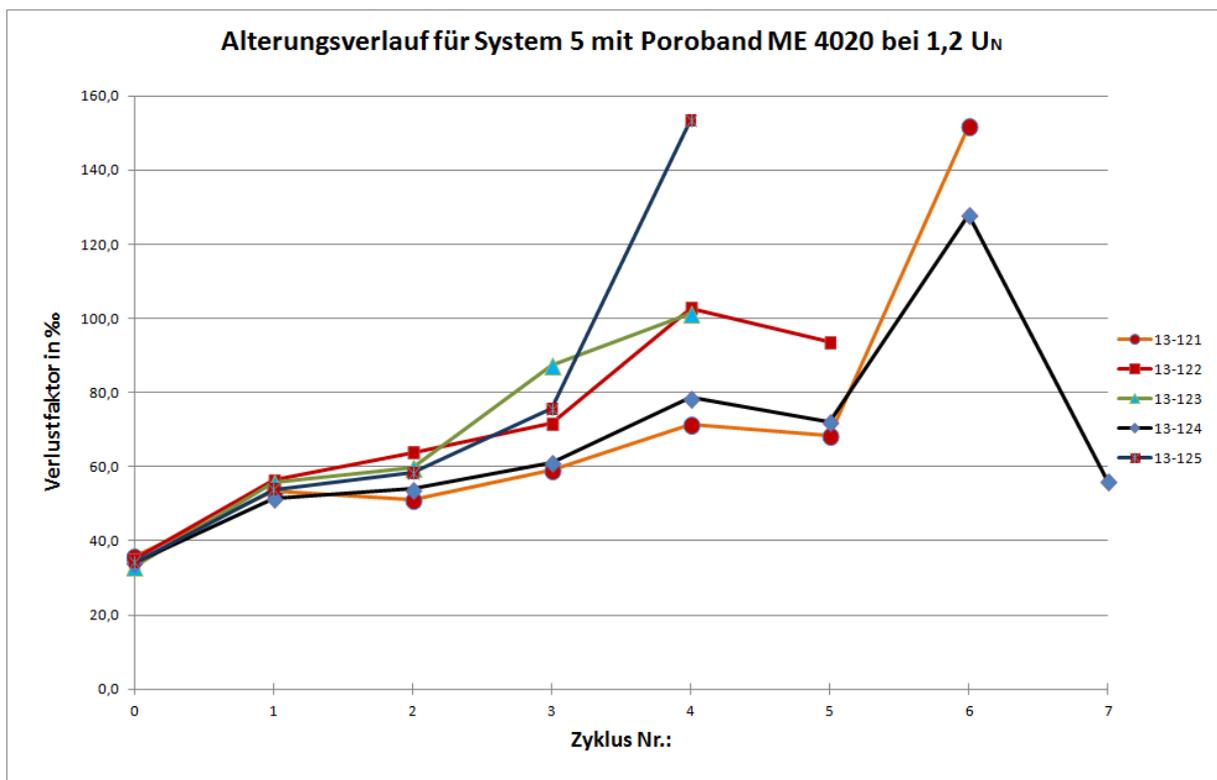


Abbildung 5.10: $\tan \delta$ über Alterungszyklen bei 1,2 U_N für System 5 mit Poroband ME 4020

Bei den Polyestersystemen ist weder aus dem $\Delta \tan \delta$ Verlauf, noch aus dem Verlauf des $\tan \delta$ bei irgendeiner anderen Spannungsstufe ein Trend erkennbar. Wie bereits Eingangs

Diskussion der thermischen Evaluierung

des Kapitels erwähnt, kann auch für die Epoxy-Systeme kein Trend aus dem $\Delta \tan \delta$ Verlauf erkannt werden. Eine entsprechende grafische Darstellung ist Teil des Anhanges.

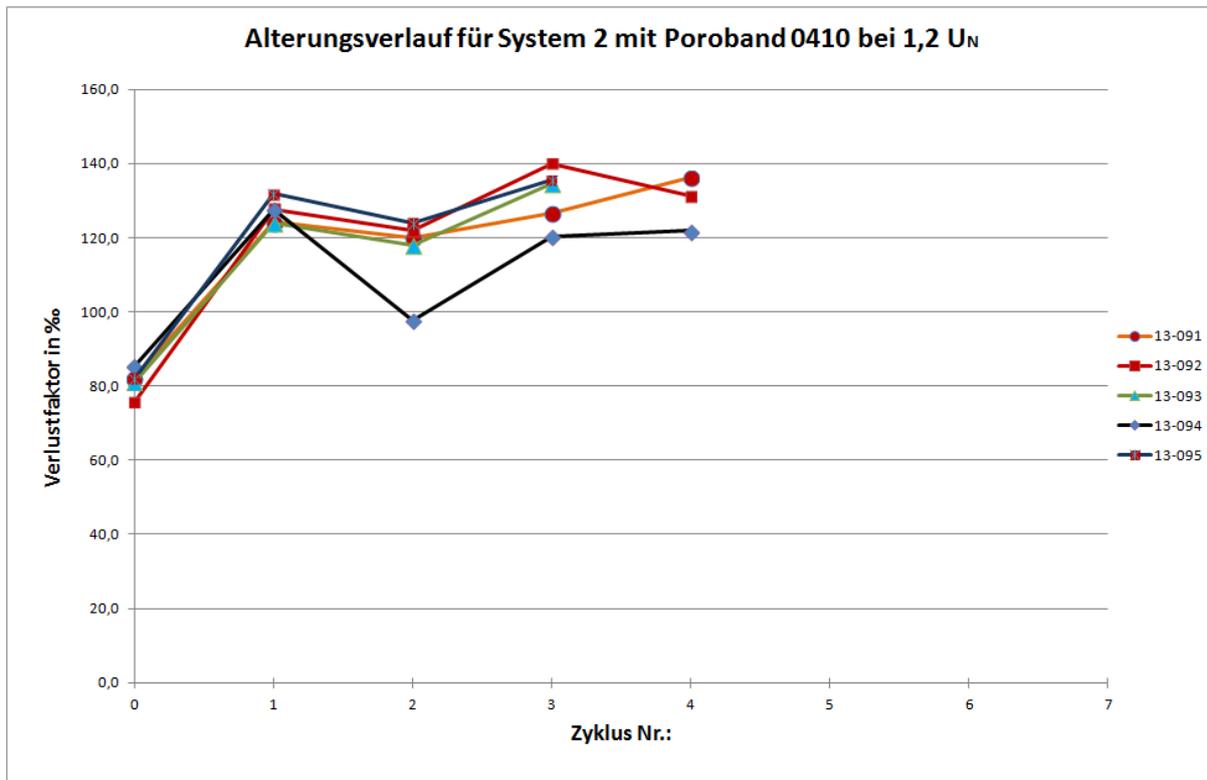


Abbildung 5.11: $\tan \delta$ über Alterungszyklen bei 1,2 U_N für System 2 mit Poroband 0410

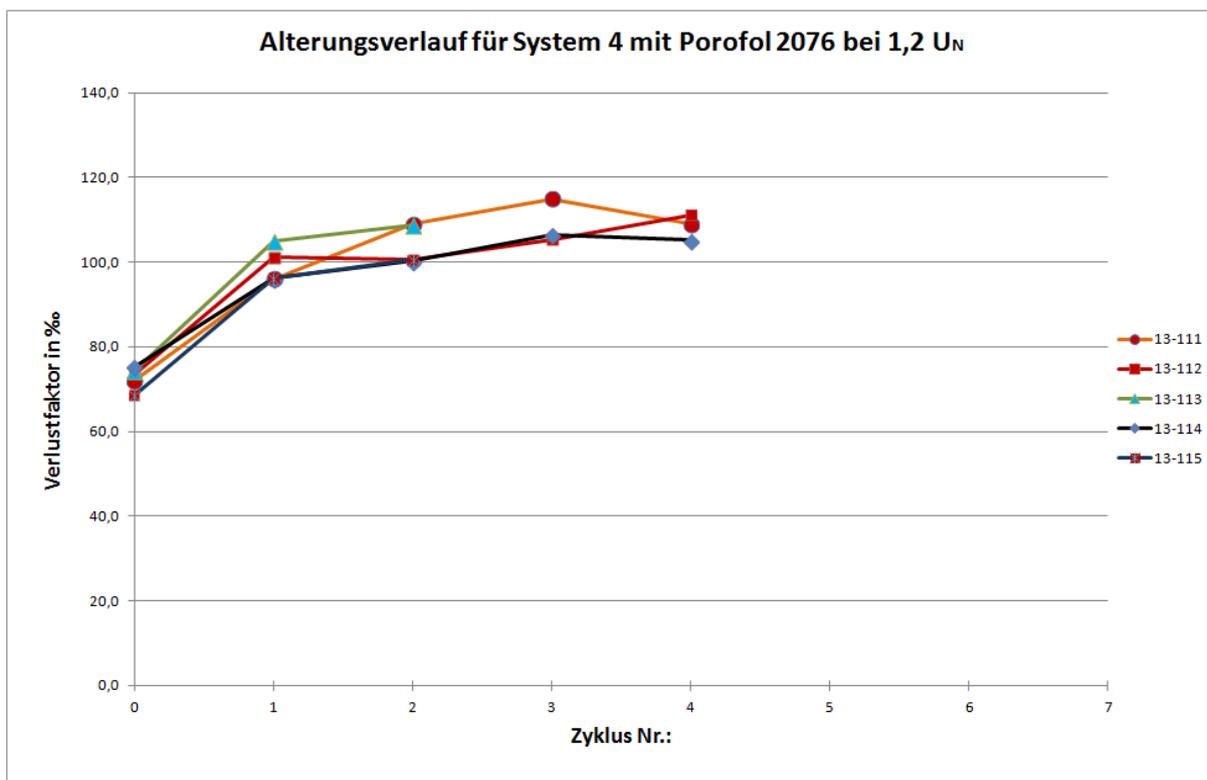


Abbildung 5.12: $\tan \delta$ über Alterungszyklen bei 1,2 U_N für System 4 mit Porofol 2076

5.3.3 Polarisationsindex

Wie bereits im Normen-Kapitel erwähnt, wird für moderne Epoxid- oder Polyestersysteme ein Polarisationsindex von mindestens 2 [5] empfohlen. Zumindest für die hier untersuchten Epoxidsysteme (System 1, 3, 5) konnte dieser Wert in Bezug auf die thermische Evaluierung nachvollzogen werden. Die genannten System versagten unmittelbar nach dem unterschreiten eines PI von 2 nach dem nächsten Zyklus oder standen zumindest kurz davor. Beim Epoxy-Anhydrid-System ist sogar eine weitgehend kontinuierliche Abnahme des PI erkennbar.

Bei den beschleunigten Epoxid-Systemen (System 1, 3) ist dieser kontinuierliche Verlauf nicht feststellbar. Es stellt sich sogar die Frage ob nicht bereits nach dem ersten Zyklus ein Wert von nur etwas über 3 messbar gewesen wäre. Durch die unerwartet hohen Startwerte von System 1 und 3 erscheint der Abfall des PI zwar sehr groß, es sollte jedoch bedacht werden, dass im Allgemeinen ein PI von über 4 bereits als ausgezeichnet gilt, [27]. Die hier Anfangs gemessenen Werte sind weit über den erwarteten Werten. Erwartet wurde für alle Epoxid-Systeme ein Wert zwischen 4 und 10.

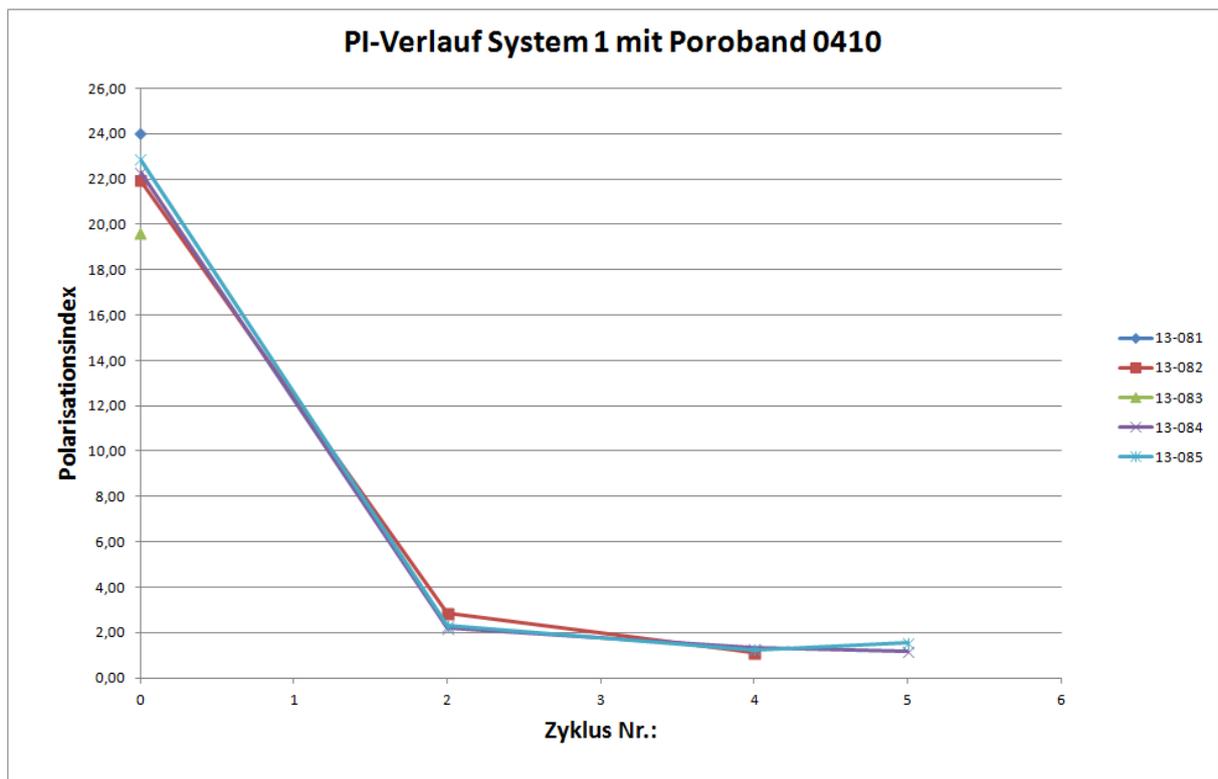


Abbildung 5.13: PI-Verlauf System 1 mit Poroband 0410

Für System 1 liegt der mittlere PI der nach dem zweiten Diagnosezyklus nicht ausgefallenen Stäbe bei 2,46. Bereits beim 4ten Zyklus wird der Wert von 2 unterschritten. Hier zeigt sich dass der PI zwar ein guter Indikator für Schäden ist, ein Ausfall jedoch auch nicht garantiert ist, zwei Stäbe konnten jeweils noch einen Zyklus überdauern. Auf den frühen Ausfall der Stäbe 13-81 und 13-83 wies der anfängliche PI von 24 für 13-81 bzw. 19,6 für 13-83, nicht hin (siehe auch Anhang: Tabelle 10.2).

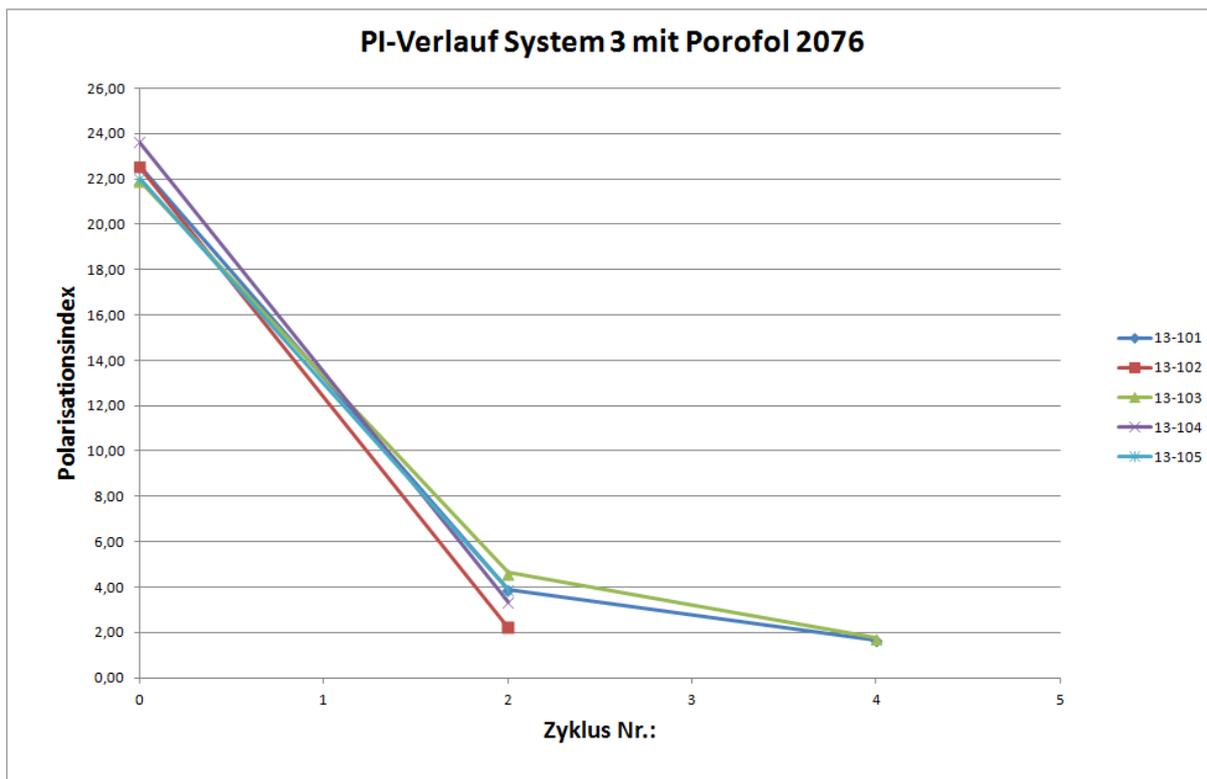


Abbildung 5.14: PI-Verlauf System 3 mit Porofol 2076

Beim hier abgebildeten System 3 (Abbildung 5.14) erfolgte der Ausfall unmittelbar beim Erreichen bzw. Unterschreiten eines PI-Wertes von $$21,6$. Auch konnten bei der initialen Messung ungewöhnlich hohe PI-Werte von $$21,6$ bis $$23,9$ gemessen werden.$$$

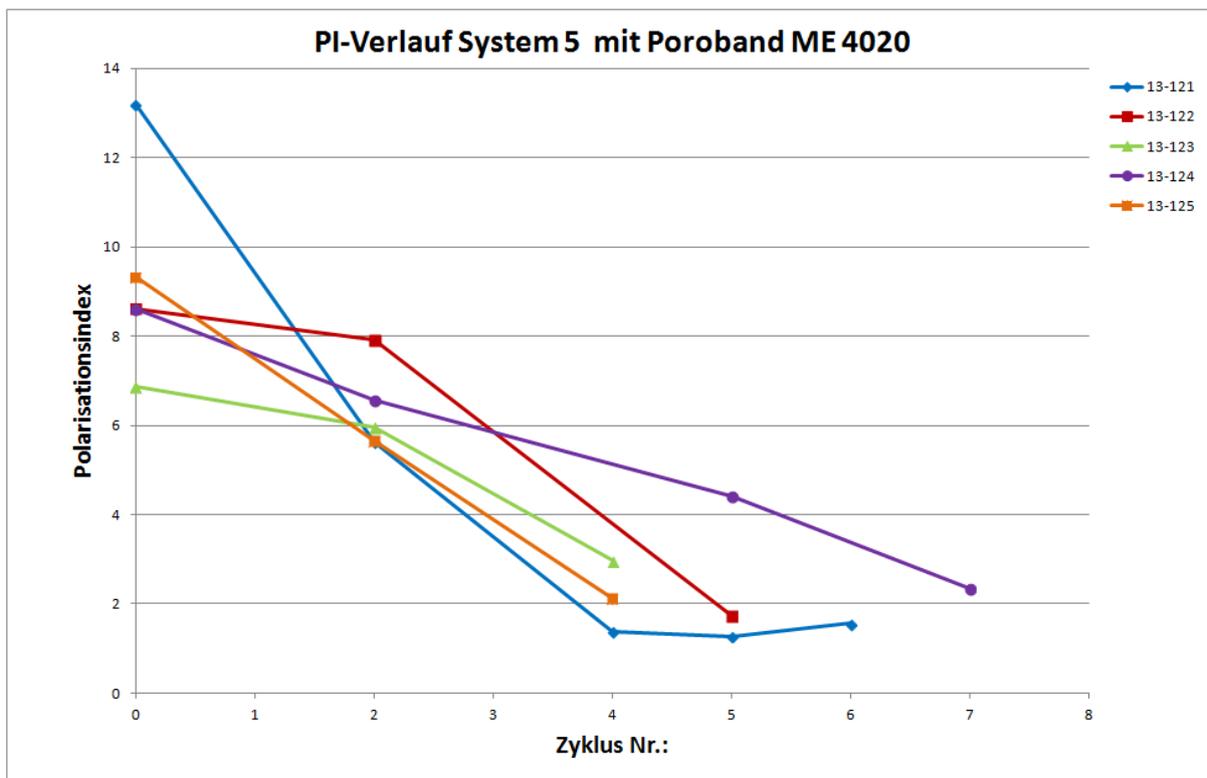


Abbildung 5.15: PI-Verlauf System 5

Diskussion der thermischen Evaluierung

Auch bei System 5 (Abbildung 5.15) wird der Zustand der Isolierung sehr gut durch den PI wiedergegeben. Die anfänglichen PI-Werte für alle Stäbe wiesen bei System 5 jedoch die größte Streuung auf (siehe auch Anhang: Tabelle 10.2). Hier liegt ein Zusammenhang mit dem anfänglich klebrigen Wickelkopfschutz nahe. Eine nur sehr schwer entfernbare Oberflächenverschmutzung ist eine mögliche Ursache. Eine weitere Erklärung wäre eine erhöhte Ionenleitfähigkeit des Wickelkopfschutzes selbst. Trotzdem ist auch hier eine stetige Abnahme des PI erkennbar. Bei Erreichen eines PI-Wertes von ca. 2 erfolgte meist im unmittelbar folgenden Zyklus ein Ausfall.

Mit der erhöhten Klebrigkeit des Wickelkopfschutzes einhergehend sind auch Fehlmessungen durch Oberflächenverschmutzung wahrscheinlicher. Einige Messungen konnten als fehlerhaft identifiziert werden und wurden deshalb in Abbildung 5.15 nicht berücksichtigt.

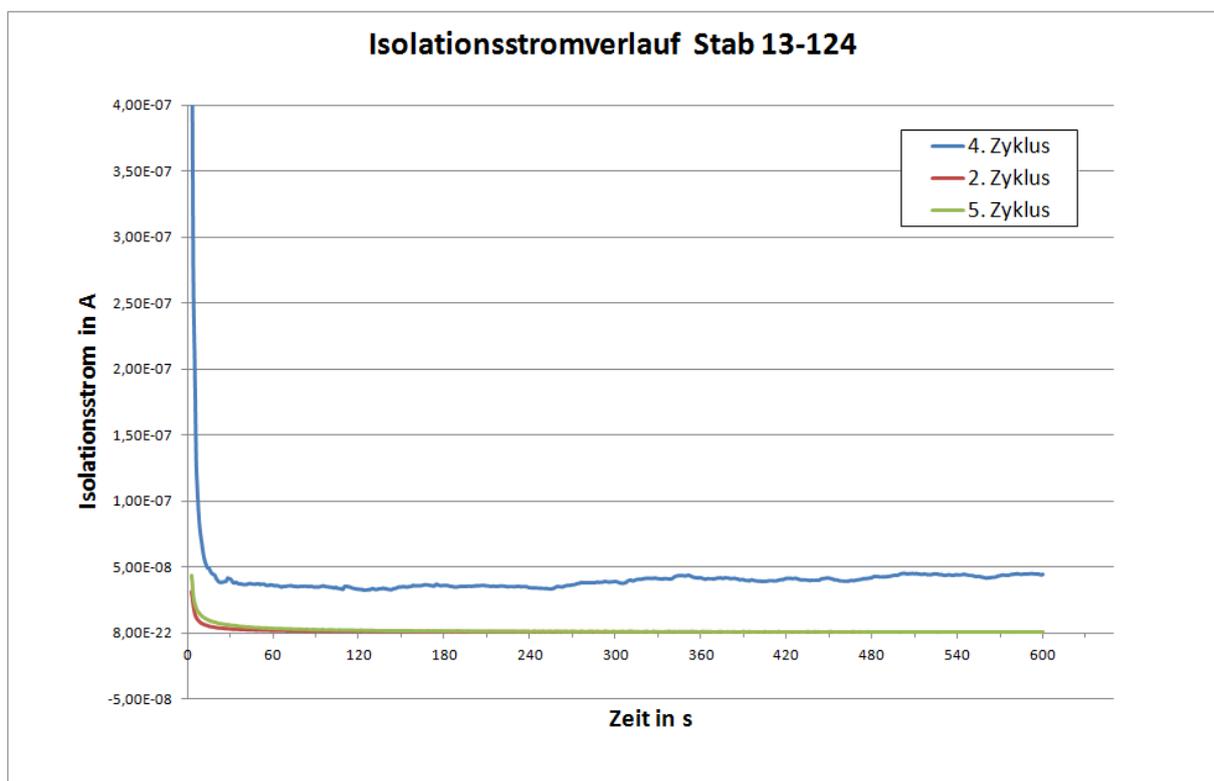


Abbildung 5.16: Isolationsstromverlauf für nasse oder verschmutzte Isolation

In Abbildung 5.16 sind für einen Stab (13 -124) die Verläufe des Isolationsstromes für den 2ten, den 4ten und den 5ten Zyklus abgebildet. Bereits auf den ersten Blick ist bemerkbar, dass der sich dauerhaft einstellende Strom im 4ten Zyklus ein vielfaches (ca. Faktor 60) der Ströme während des 2ten und des 5ten Zyklusses beträgt und ab ca. 4 Minuten sogar leicht zu steigen beginnt.

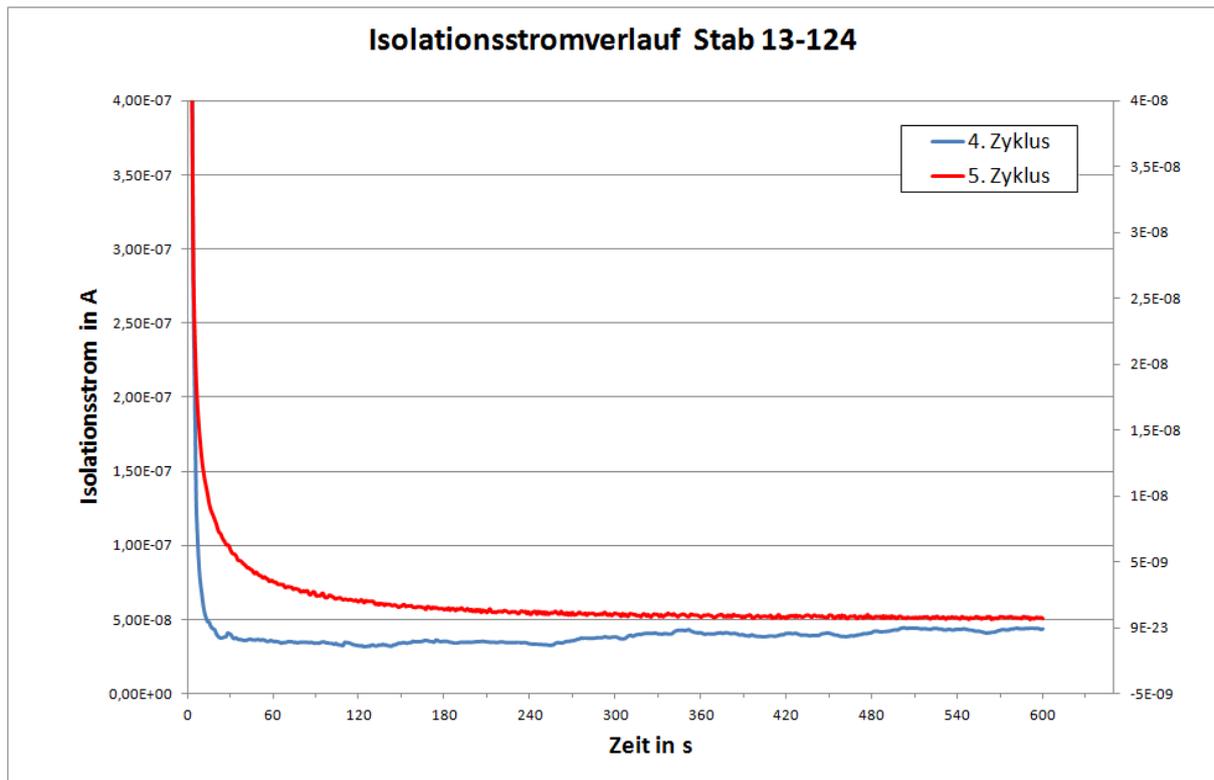


Abbildung 5.17: Isolationsstromverläufe im Vergleich

Vergleicht man die Form des Verlaufes liefert auch diese einen Hinweis auf eine Fehlmessung. In Abbildung 5.17 wurde dazu der Isolationsstrom während der Messung nach dem 4ten Zyklus auf die linke vertikale Achse aufgetragen. Der Isolationsstromverlauf vom 5ten Zyklus hingegen auf die rechte vertikale Achse.

Der Verlauf des Isolationsstromes (rot) nach dem 5ten Zyklus entspricht von seiner Form her jenem, wie er als normal angesehen wird. Ein stabiler Wert wird nach ca. 240 Sekunden erreicht. Der Isolationsstrom nach dem 4ten Zyklus (blau) hingegen hat bereits nach 30 Sekunden einen stabilen Wert erreicht.[5].

Ausgehend von der aus IEEE Std.43-2000 entnommenen Abbildung 2.2 und den dort beschriebenen Effekten der Feuchtigkeit und Verschmutzung, liegt also der Schluss nahe, dass trotz der Trocknung im Ofen, in den nach den Zyklen vorhandenen Rissen noch Feuchtigkeit vorhanden war und/oder auch Oberflächenverschmutzung vorlag.

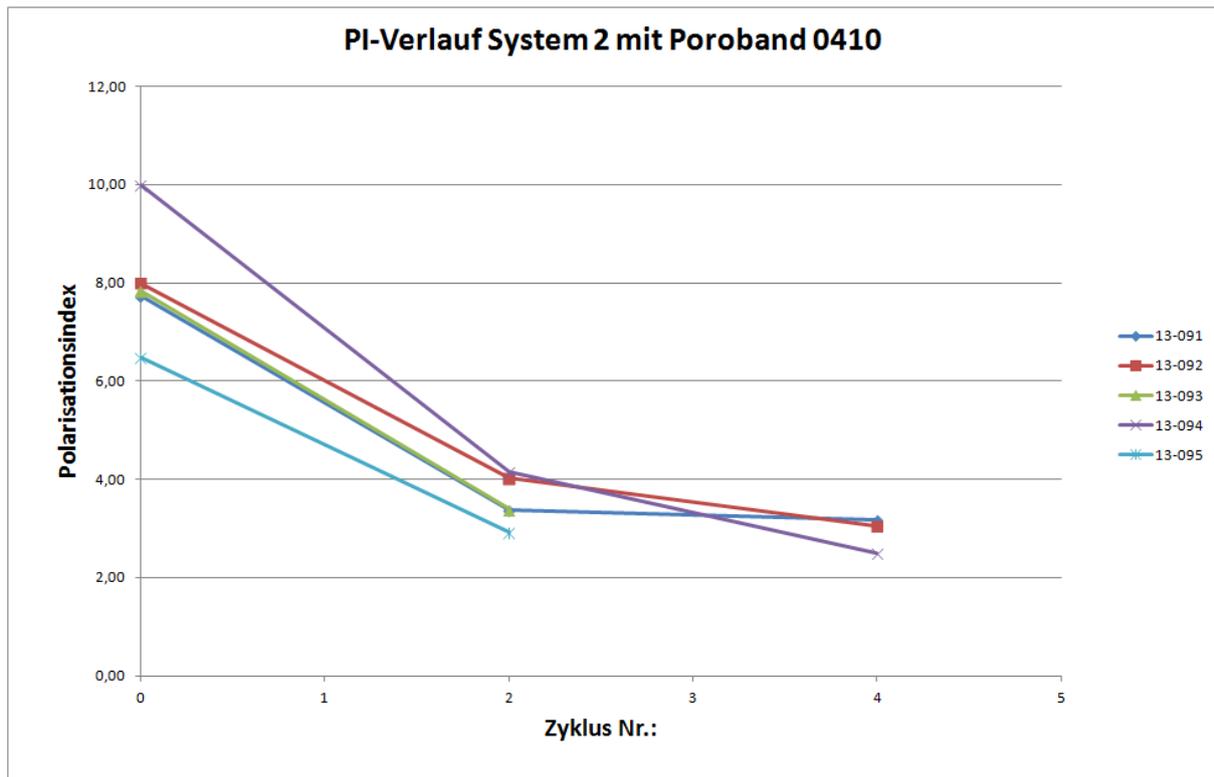


Abbildung 5.18: PI-Verlauf System 2 mit Poroband 0410

Bei den beiden Polyestersystemen geht kein so eindeutiges Bild aus der Betrachtung der PI-Verläufe hervor wie es bei den Epoxy-Systemen der Fall war. Es ist auffällig, dass hier im Gegensatz zu den Epoxy-Systemen der letzte PI-Wert vor dem Ausfall mit 2,5 bis 3,5 für System 2 (Abbildung 5.18) noch vergleichsweise hoch war. Bei den Epoxy-Systemen (Abbildung 5.13, Abbildung 5.14, Abbildung 5.15) wurde der Wert von 2 meist vor dem Ausfall erreicht bzw. unterschritten.

Noch deutlicher ist dieses abweichende Verhalten anhand von System 4 (Abbildung 5.19) zu bemerken. Hier lagen die letzten PI-Werte vor dem Ausfall zwischen 3,5 und 7,5. Auch ist kein klarer Trend über die Zyklen erkennbar. Diese nicht eindeutigen PI-Ergebnisse decken sich mit bereits älteren Untersuchungen zur Aussagekraft verschiedener Untersuchungsmethoden. Auch hier konnte nicht bestätigt werden, dass der PI für Polyestersysteme ein geeignetes Kriterium darstellt, [28].

Diskussion der thermischen Evaluierung

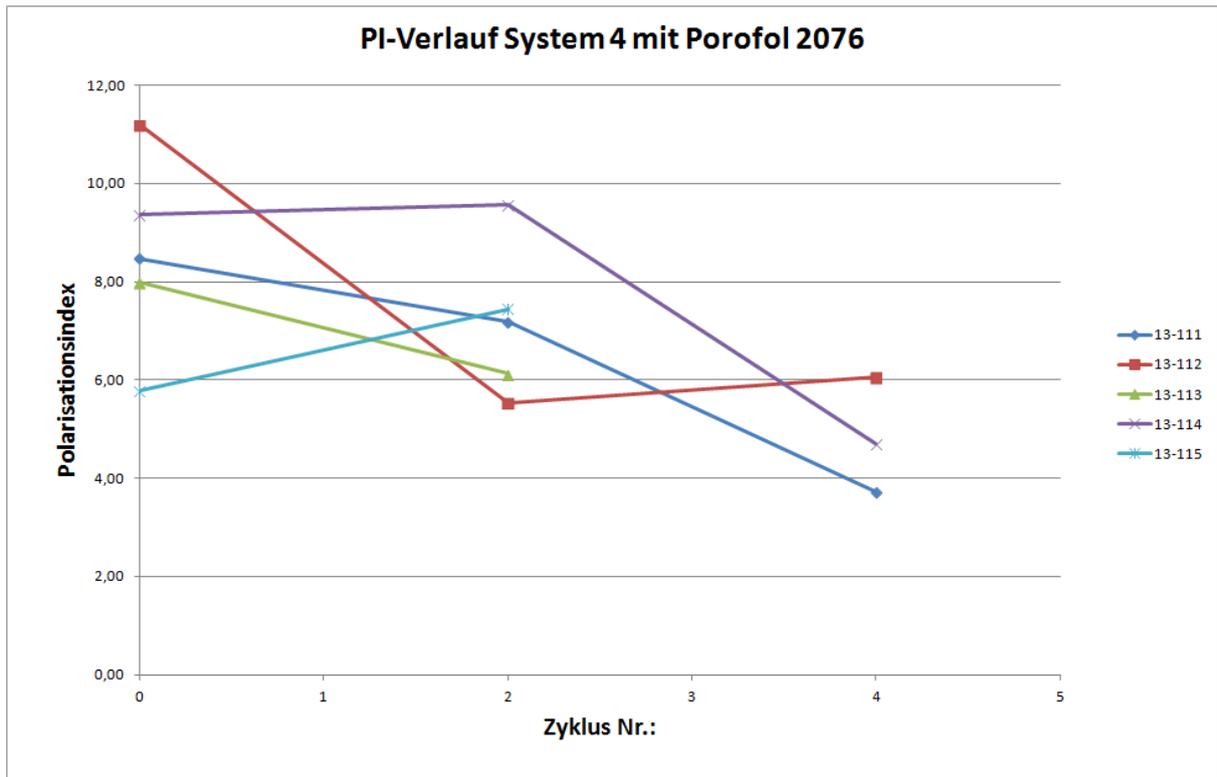


Abbildung 5.19: PI-Verlauf System 4 mit Porofol 2076

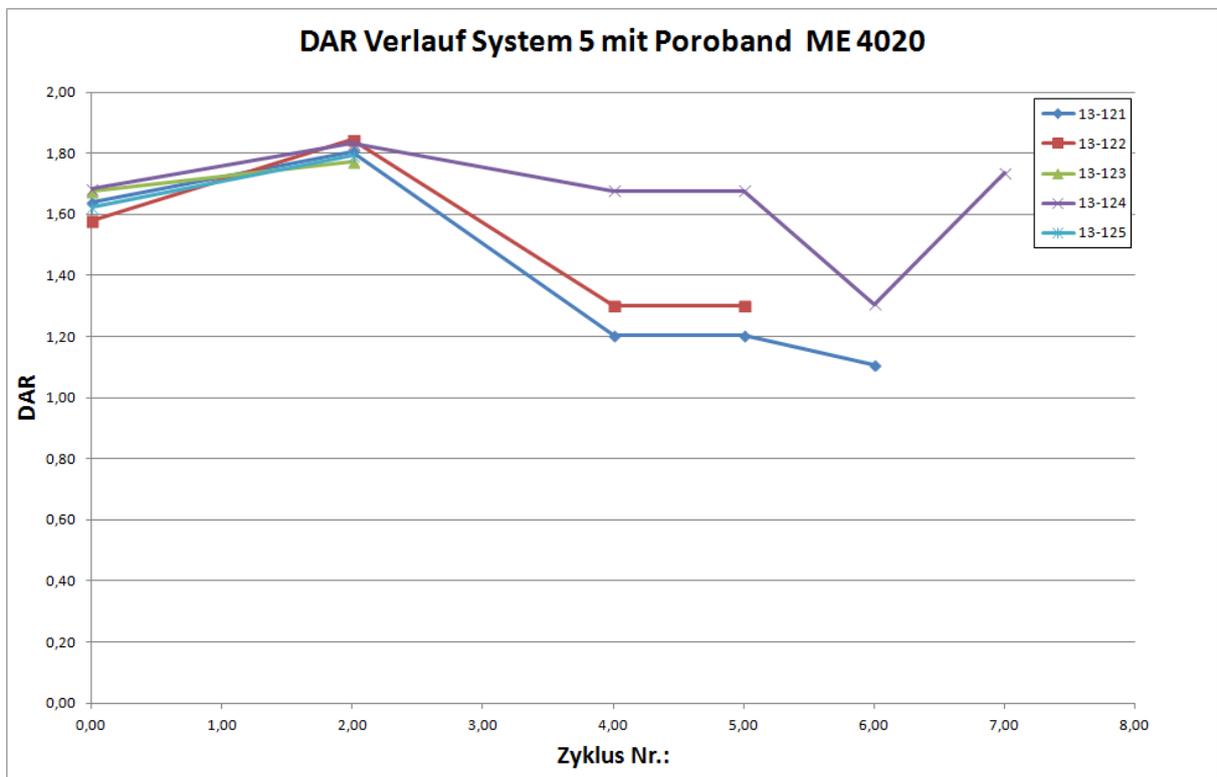


Abbildung 5.20: DAR Verlauf für System 5

Es hat sich gezeigt dass aus dem 60 zu 30 Sekunden PI, bei keinem der fünf Systeme auf den Zustand der Isolation geschlossen werden kann. Der 60 zu 30 Sekunden PI wird auch Absorptionskoeffizient (DAR dielectric absorption ratio) genannt.

5.3.4 Teilentladungsmessung

Die Teilentladungsmessung konnte keinen Trend für den sich verschlechternden Zustand der Isolierung zeigen. Hier ist deshalb nur ein kurzer Auszug der Q_{IEC} und TE-Einsatzspannungswerte abgebildet. Dieser dient nur Überblickszwecken. Ein vollständiger Überblick (Tabelle 10.1) ist Teil des Anhanges. Es ist jedoch auch hier erkennbar, dass keine Korrelation zwischen dem Q_{IEC} -Wert und den verbleibenden Zyklen besteht. Das deckt sich gut mit vorangegangenen Untersuchungen zur Aussagekraft der Teilentladungsdiagnostik, [29].

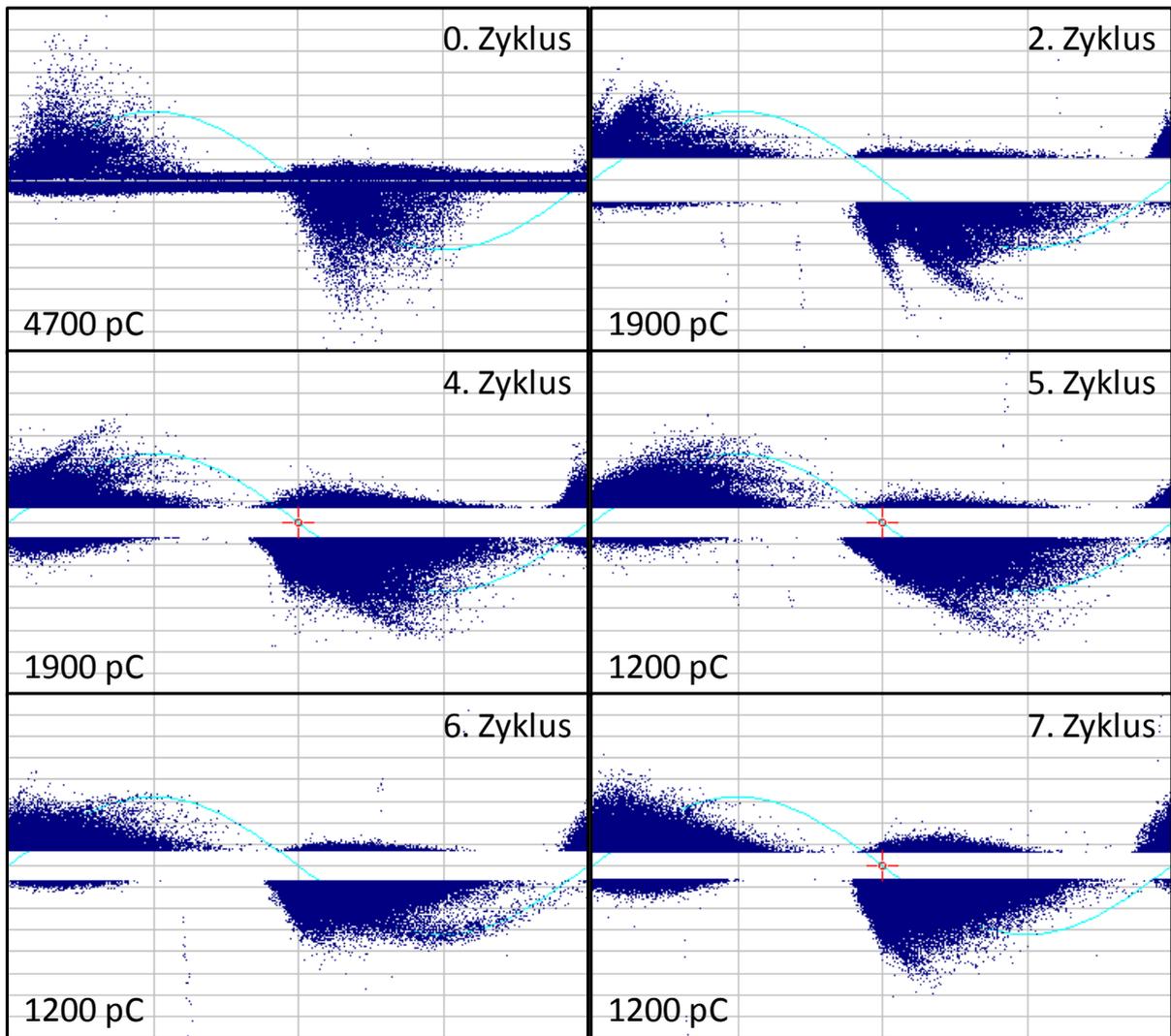
		0. Zyklus		2. Zyklus		4. Zyklus		5. Zyklus		6. Zyklus	
	Stab Nr.:	Q_{IEC} in pC	U_E in 1								
System 1	13-082	1800	0,4	7500	0,4	1600	0,4				
	13-084	2200	0,4	8600	0,4	1900	0,4	1500	0,4		
System 2	13-091	3200	0,6	4800	0,6	5500	0,6				
	13-092	1700	0,6	5000	0,6	6400	0,6				
System 3	13-101	2700	0,4	4800	0,6	2800	0,6				
	13-103	2200	0,4	5600	0,6	5000	0,4				
System 4	13-111	1600	0,4	11000	0,6	5200	0,6				
	13-112	900	0,6	5800	0,6	7200	0,6				
System 5	13-121	5800	0,8	3000	0,6	1700	0,6	1400	0,6	1700	0,6
	13-124	4700	0,8	1900	0,6	1900	0,6	1200	0,6	1200*	0,6*

Abbildung 5.21: Q_{IEC} und TE-Einsatzspannung über Zyklen

* Idente Werte nach 7ten Zyklus

Die zugehörigen Fingerprints entsprechen jenen wie sie bei thermisch gealterter Isolation zu erwarten sind. Bei allen Systemen zeigte sich eine Entwicklung hin zu den für thermisch gealterten Stäben typischen dreieckigen Fingerprints ohne Asymmetrie, [24], [23].

Diskussion der thermischen Evaluierung



5.22: Fingerprint Stab 13-124 (System 5 mit Poroband ME 4020) über verschiedene Zyklen mit Q_{IEC} -Wert



Abbildung 5.23: Messaufbau zur Teilentladungsmessung

5.3.5 Überblick der Ausfälle nach den Zyklen

Bei der Betrachtung der Ausfallszeiten nach der elektrischen Diagnose fällt sofort auf, dass 10 der 25 Stäbe, die zur thermischen Evaluierung herangezogen wurden, nach mehr als einer Minute ausgefallen waren. Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten beim Polyesterharz. Zwar waren nur 10 der 25 Prüfstäbe mit Polyesterharz imprägniert, davon fielen jedoch 5 nach mehr als einer Minute während der Prüfspannungsbeanspruchung aus. In Tabelle 5.6 sind die Ausfallszeiten während des Diagnosezyklusses beim Stehspannungstest (13,6 kV für 10 min) dargestellt, Ausfallszeiten von über 60 Sekunden wurden dabei hervorgehoben. Ebenfalls eingetragen ist die Anzahl der Thermozyklen denen ein Stab zuvor ausgesetzt war.

	Stab Nr.:	Zyklen	Zeit		Stab Nr.:	Zyklen	Zeit
	1	1	s		1	1	s
EPOXIDHARZ mit Porofol 2076	13-101	5	38s	EPOXIDHARZ mit Poroband 0410	13-081	2	5 s
	13-102	4	0 s		13-082	5	0s
	13-103	5	0s		13-083	2	2 min 17 s
	13-104	4	4 min 42 s		13-084	6	1 min 23
	13-105	4	0s		13-085	6	19s
Polyesterharz mit Porofol 2076	13-111	5	0s		Polyesterharz mit Poroband 0410	13-091	5
	13-112	5	4min 17s	13-092		3	38s
	13-113	3	6 min 30s	13-093		4	10 s
	13-114	5	3min 24s	13-094		5	0s
	13-115	3	3min 17s	13-095		4	12 s
Epoxy-Anhydrid mit Poroband ME 4020	13-121	7	25,0				
	13-122	6	0s				
	13-123	5	6min 59s				
	13-124	8	0s				
	13-125	5	1min 18s				

Tabelle 5.6: Ausfallszeiten während der elektrischen Diagnose

In Tabelle 5.7 sind die mittleren Lebensdauerwerte für alle Systeme abgebildet. Für die mittlere Lebensdauer wurde jeweils die Anzahl der Zyklen für jedes System mit der Zyklendauer von 240 Stunden multipliziert. Der letzte Zyklus wurde dabei nur mit 120 Stunden berücksichtigt, es wurde also in Übereinstimmung mit IEC 6034-18-1: 1992 von einem, einen Ausfall verursachenden Zustand, bereits nach der Hälfte des letzten Zyklusses ausgegangen, [30].

Bei der Betrachtung der elektrischen Diagnosezeiten frei nach IEC 60034-18-32: 2012 wurde davon ausgegangen dass ein Stab welcher nach mehr als einer Minute elektrischer Diagnose ausgefallen war zumindest noch in den nächsten Zyklus gekommen wäre. Vereinfacht gesagt heißt dass: es wurde ein Zyklus mehr gezählt. Unbekannt ist jedoch die Auswirkung der längeren elektrischen Diagnose nach IEEE-Norm. Der dadurch vermutlich größere entstanden Schaden an den Stäben kann nicht ermittelt werden. Die Auswirkung auf die mittlere Lebensdauer ist gering, dennoch wird deutlich das je nach Betrachtungsweise

Diskussion der thermischen Evaluierung

einmal die beschleunigten Epoxidsysteme und bei der anderen die Polyestersysteme bessere Resultate zeigen. An der deutlich besseren Performance des Epoxy-Anhydrid-Systemes (System 1) ändern beide Betrachtungsweisen nichts.

	Mittlere Lebensdauer in Stunden nach IEEE	Mittlere Lebensdauer in Stunden nach IEC	Varianz (IEEE)	Varianz (IEC)
System 1	888,0	984	491,9	497,7
System 2	888,0	936	200,8	273,6
System 3	936,0	984	131,5	131,5
System 4	888	1080	262,9	240,0
System 5	1368	1464	312,9	214,7
alle Polyester	888,0	1008,0	220,5	254,2
alle besch. Epoxid	912,0	984,0	340,4	343,2

Tabelle 5.7: Mittlere Lebensdauer

Bei den grafischen Vergleichen wie in Abbildung 5.24 und Abbildung 5.25 dargestellt ist erkennbar, dass die Wahl der Betrachtungsweise vor allem eine Auswirkung auf die Streuung der Ausfälle über die Zyklen hat. In den hier dargestellten Ausfallszeiten ist die Ausfallsdauer während der elektrischen Diagnose berücksichtigt.

Ein Ausfall nach dem vierten Zyklus und 0 Sekunden Dauerspannung ist auf der Linie des dritten Zyklusses abgebildet. Ein Ausfall nach dem 4ten Zyklus und 10 Minuten hingegen wäre bereits auf der Linie des vierten Zyklusses abgebildet.

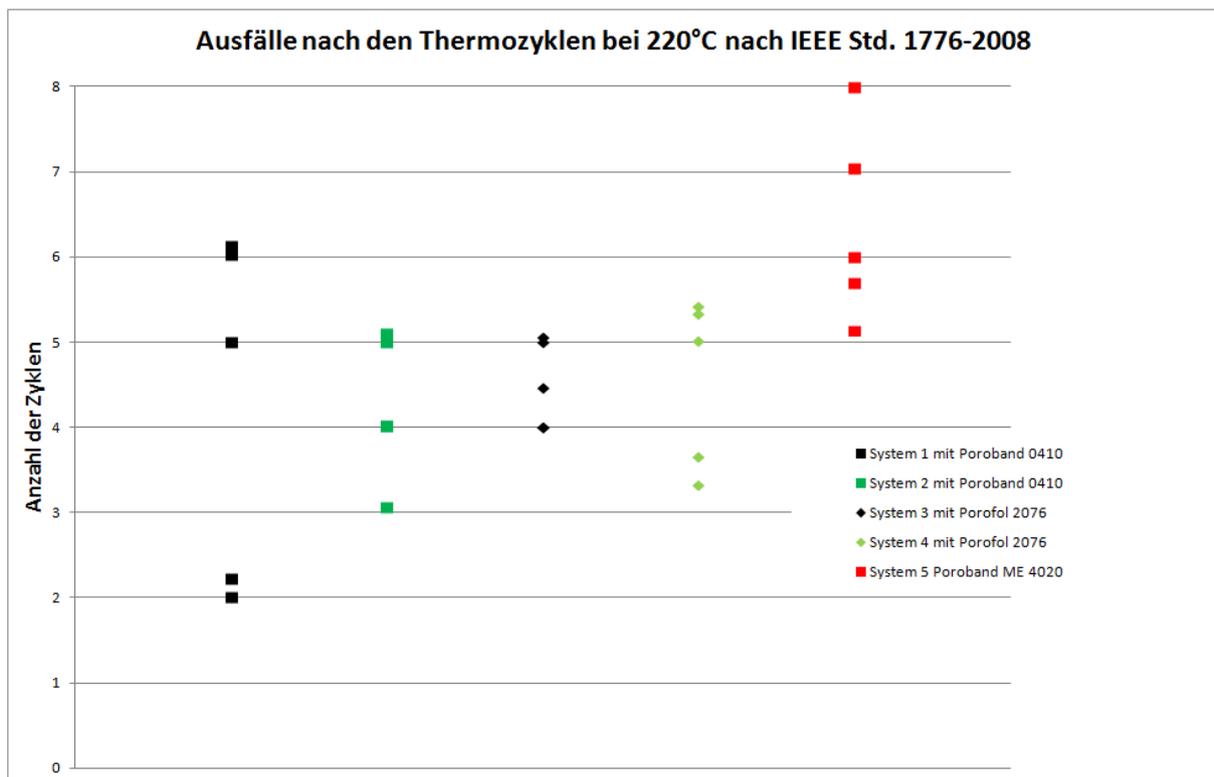


Abbildung 5.24: Thermischen Evaluierung nach IEEE Std. 1776-2008

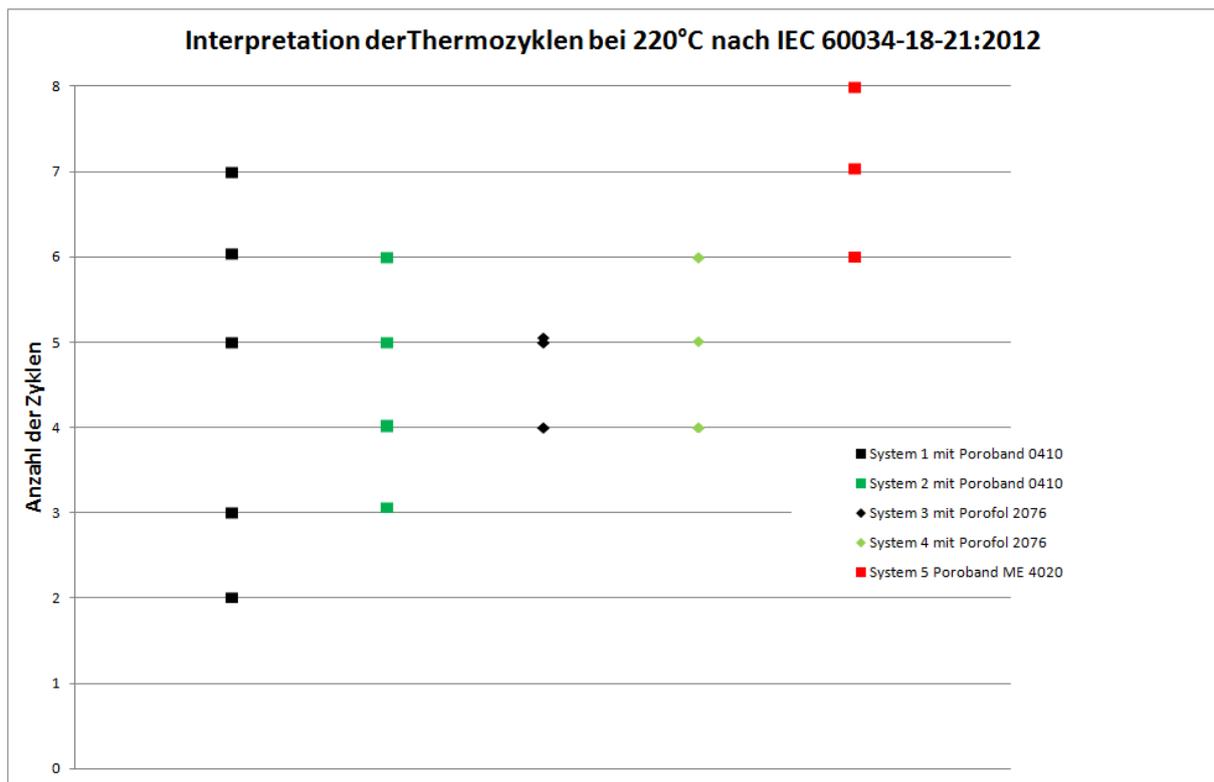


Abbildung 5.25: Interpretation der Thermozyklen nach IEC 60034-18-31: 2012

In Abbildung 5.25 ist ein Ausfall, der nach mehr als einer Minute stattfindet bereits auf der Linie des nächsten Zyklusses abgebildet. Vergleicht man beide Abbildungen, so wird man feststellen, dass in IEEE-Interpretation System 4 schlechter abschneidet als System 3. In der Abbildung nach IEC-Interpretation hingegen ist System 4 das bessere.

6 Diskussion des elektrischen Lebensdauerversuches

6.1.1 Lebensdauerwerte

Für den elektrischen Lebensdauerversuch standen in Summe 50 Stäbe zur Verfügung. Diese sind im Aufbau vollkommen ident mit jenen welche zur thermischen Evaluierung verwendet wurden. Anfangs wurde von einer Lebensdauer von bis zu maximal 2000 für einzelne Stäben unter 2,54-facher Nennspannung und bis zu maximal 200 Stunden bei 3-facher Nennspannung ausgegangen. Als sich bereits abzeichnete, dass bei Abschluss dieser Arbeit der Lebensdauerversuch bei 2,54 U_N noch nicht beendet sein würde, wurde die Anfertigung weiterer 25 Stäbe für einen Lebensdauerversuch bei 3 U_N entschieden. Zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Arbeit hatten die Stäbe welche 2,54 U_N belastet wurden bereits eine Lebensdauer von 4000 Stunden überschritten. Die mit 3-facher Nennspannung belasteten waren bereits zu 60% ausgefallen (Tabelle 6.1) und konnten daher noch zu einer schnellen Abschätzung im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt werden.

System	Stab Nr.:	Haupt-isolationsdicke	Lebensdauer in h	System	Stab Nr.:	Haupt-isolationsdicke	Lebensdauer in h
besch. Epoxy mit 0410	13-342	1,4 mm	894,5	besch. Epoxy mit 2076	13-352	1,3 mm	1400 > *
	13-343		1400 > *		13-353		1400 > *
	13-344		1400 > *		13-354		0,0
	13-345		1400 > *		13-355		1400 > *
	13-346		1400 > *		13-356		1400 > *
Polyester mit 0410	13-347	1,4 mm	970,4	Polyester mit 2076	13-357	1,3 mm	913,9
	13-348		936,1		13-358		1344,4
	13-349		1375,1		13-359		1257,7
	13-350		1400 > *		13-360		1322,6
	13-351		1400 > *		13-361		1382,5
Epoxy-Anhydrid mit 4020	13-362	1,4 mm	252,6				
	13-363		339,2				
	13-364		382,1				
	13-365		333,5				
	13-366		1030,8				

Tabelle 6.1: Elektrische Lebensdauer bei 3 x U_N

* Lebensdauerversuch bis dato noch nicht beendet

Das bei der thermischen Evaluierung am besten abschneidende Epoxy-Anhydrid-System (System 5) war jenes das bei der elektrischen Lebensdaueruntersuchung die geringste Lebensdauer erreichte. Es sollte jedoch bedacht werden, dass die bei 3-facher Nennspannung nach Kema S-13 bei dieser Belastung und Raumtemperatur eine Lebensdauer von mindesten 10 Stunden vorgesehen ist. Diese wurde vom Epoxy-Anhydrid-System um das 25- bis 103-fache überschritten. Das Epoxy-Anhydrid-System ist deshalb trotz der hier im Vergleich geringeren Performance als ausgezeichnet anzusehen.

System	Stab Nr.:	Haupt-isolationsdicke	Lebensdauer in h	System	Stab Nr.:	Haupt-isolationsdicke	Lebensdauer in h
besch. Epoxy mit 0410	13-076	1,4 mm	4200 > *	besch. Epoxy mit 2076	13-096	1,3 mm	4200 > *
	13-077		4200 > *		13-097		4200 > *
	13-078		4200 > *		13-098		4200 > *
	13-079		4200 > *		13-099		4200 > *
	13-080		4200 > *		13-100		4200 > *
Polyester mit 0410	13-086	1,4 mm	4200 > *	Polyester mit 2076	13-106	1,3 mm	3600 > *
	13-087		4200 > *		13-107		3600 > *
	13-088		4200 > *		13-108		3600 > *
	13-089		4200 > *		13-109		3600 > *
	13-090		4200 > *		13-110		1400
Epoxy-Anhydrid mit 4020	13-116	1,4 mm	4200 > *				
	13-117		4200 > *				
	13-118		4200 > *				
	13-119		4200 > *				
	13-120		4200 > *				

Tabelle 6.2: Elektrische Lebensdauer bei 2,54 x U_N

*** Lebensdauerversuch bis Dato noch nicht beendet**

In Tabelle 6.2 sind die bisherigen Lebensdauerwerte für alle Systeme bei 3 U_N abgebildet. Der Versuch ist bis dato noch nicht abgeschlossen. Alle Stäbe konnten die empfohlene Mindestlebensdauer für Erfüllung von IEEE Std. 1553 -2002 von 250 h deutlich überschreiten.

6.1.2 Verlustfaktor

An den mit $2,54 U_N$ belasteten Stäben wurden Verlustfaktormessungen vorgenommen. Diese wurden bis zu einer Lebensdauer von 600h alle 200h vorgenommen. Später wurde dieses Intervall auf 400h erhöht. Ab einer Lebensdauer von 1800h erfolgte eine weitere Erhöhung auf 600h. Generell lässt sich sagen dass sich die ermittelten $\Delta \tan \delta$ -Werte mit andauernder elektrischer Alterung aneinander angenähert haben. Das üblicherweise verwendete 5%-Kriterium wurde hierbei von keinem System erfüllt. Dies liegt daran, dass in Abweichung von IEEE Std. 286-2000 ohne Schutzringe gemessen wurde, der gesamte Einfluss des EGSB und des Wickelkopfes erhöht also diese Werte über das normale Maß. Bei einem Vergleich der zu Anfangs des Lebensdauertestes ermittelten Werte lässt sich feststellen dass, die beiden Polyestersystem erst nach 400 Stunden im selben Wertebereich wie die drei Epoxid-Systeme lagen. Es fand also scheinbar von einem schlechten Wert ausgehend eine Verbesserung statt, [7].

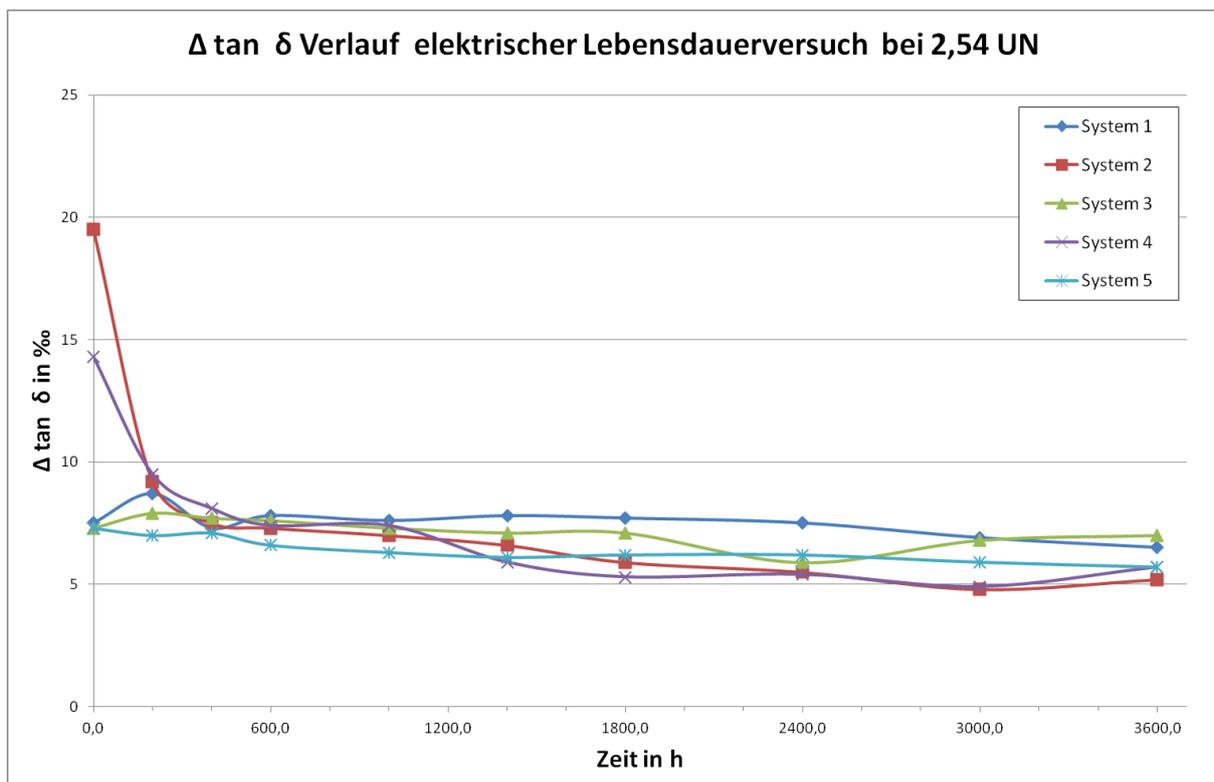


Abbildung 6.1: $\Delta \tan \delta$ – Verlauf des elektrischen Lebensdauerversuches bei $2,54 \times U_N$

Bei genauerer Analyse der entsprechenden Verlustfaktoranstiegsmessreihen wird jedoch erkennbar dass diese scheinbare Verbesserung nur auf Grund des Anstieges der Verlustfaktorwerte bei niedriger Spannung erfolgt ist. Die entsprechenden Verlustfaktorwerte für $1,2 U_N$ und auch U_N blieben während des gesamten Lebensdauerversuches weitgehend konstant. Die Epoxid-System (System 1, 3, 5) zeigen keinen derart raschen Anstieg über die Zeit. Hier sind sowohl die Verlustfaktorwerte bei hoher wie auch niedriger Spannung zu Anfang stabil. Erst ab 2400 Stunden zeichnete sich ein Anstieg Verlustfaktorwerte bei den

Diskussion des elektrischen Lebensdauerversuches

Epoxid-Systemen ab, bei den Polyestersystemen (System 2, 4) blieben sie nachwievor stabil.

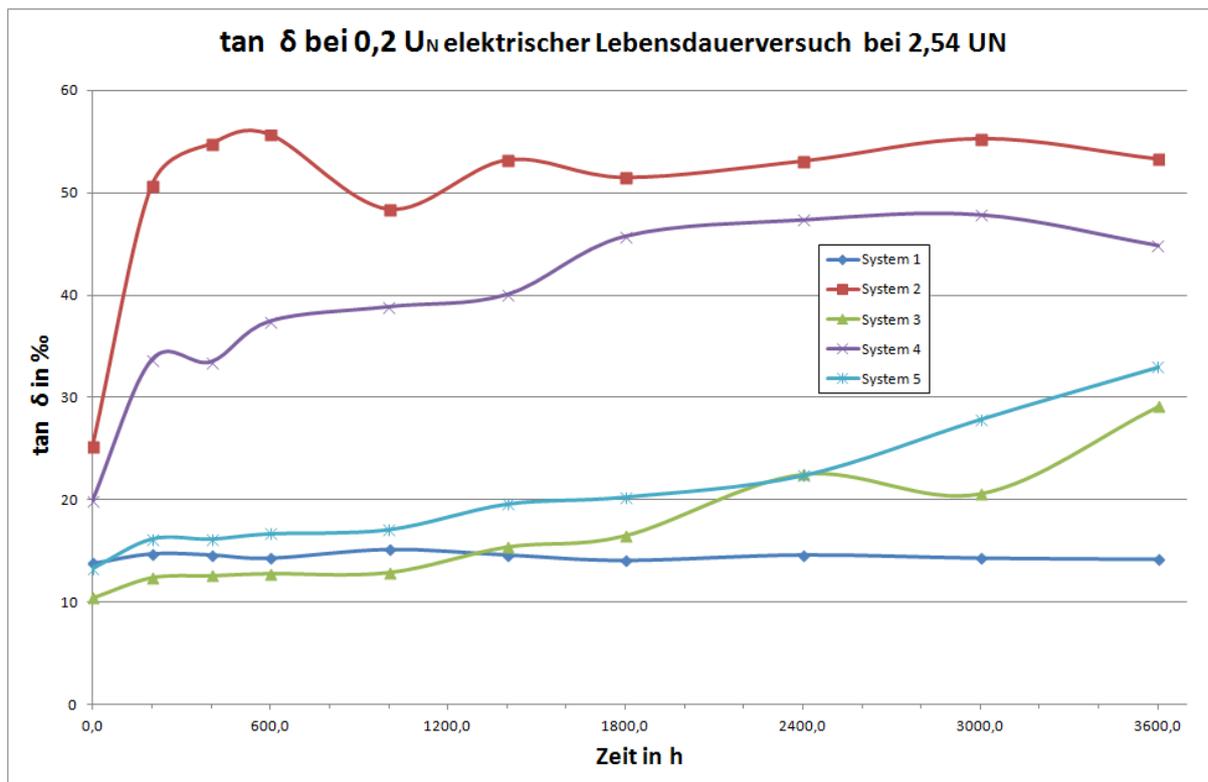


Abbildung 6.2: tan δ – Verlauf bei 0,2 U_N des el. Lebensdauerversuches bei 2,54 x U_N

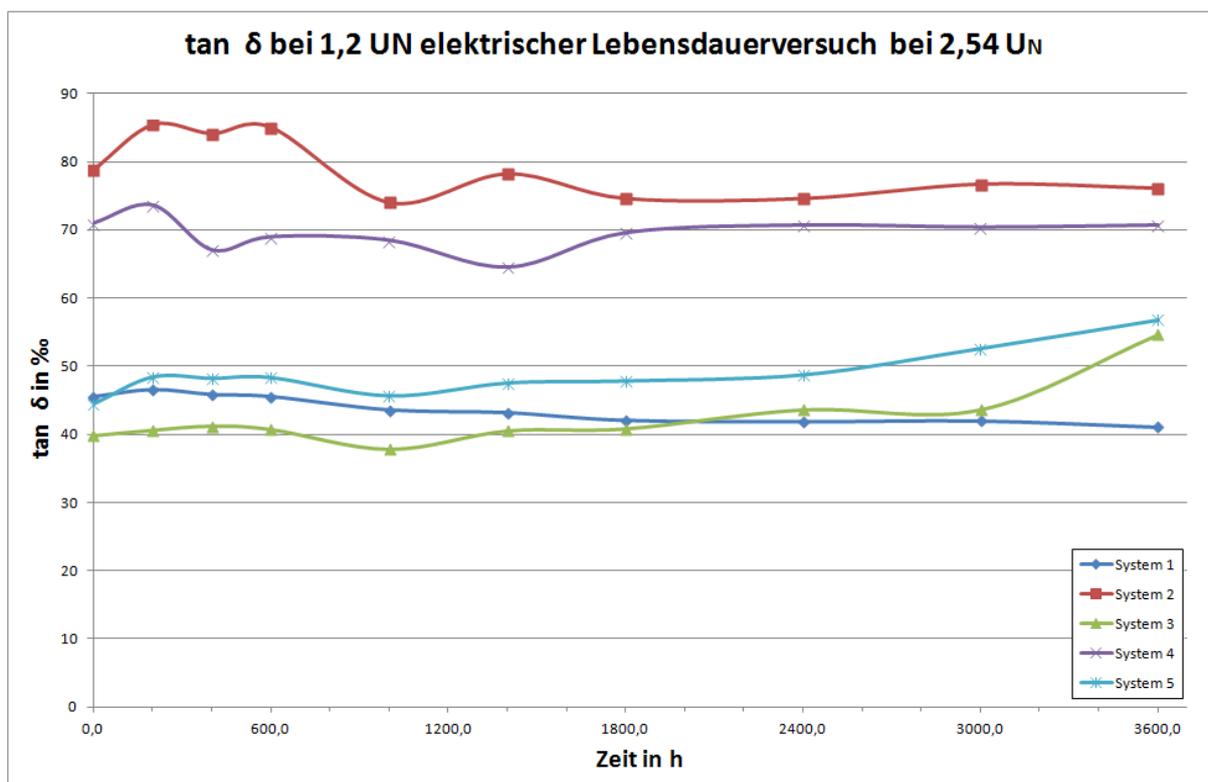


Abbildung 6.3: tan δ – Verlauf bei 1,2 U_N des el. Lebensdauerversuches bei 2,54 x U_N

Diskussion des elektrischen Lebensdauerversuches

Üblicherweise wird der erste Verlustfaktorwert bei $0,2 U_N$ verwendet um den Aushärteteststatus einer Isolation zu bestimmen, [7]. Es lag daher, auf Grund der im Vergleich zu den anderen Systemen deutlich höheren ersten Werte der Polyestersysteme (System 2,4), die Vermutung nahe, dass die Polyestersysteme trotz der in Summe 16-Stündigen Aushärtung noch nicht vollends polymerisiert waren. Es wurde daher eine Messung des Aushärteverlaufes für 92 Stunden vorgenommen. Für diesen Versuch wurde hitzegereinigte Glasrohseide in 4 Lagen mit Polyesterharz bestrichen. Die so hergestellte Probe wurde in eine, auf 155 °C vorgeheizte, Nassmesszelle (Abbildung 6.5) eingebracht. Der Verlustfaktor wurde dabei bei konstanter Temperatur gemessen. Von Interesse sind hier nicht die einzelnen Messwerte sondern viel mehr deren Verlauf (Abbildung 6.4: Aushärtekurve Polyesterharz) aus dem auf den Aushärteteststatus geschlossen werden kann. Sobald sich der Verlustfaktor stabilisiert hat, ist der Aushärteprozess abgeschlossen.

Auf Grund der geringen Spannung (400V) und der geringen Fläche der Probe sind die zu messenden Ströme sehr gering und somit die äußeren Störungen durch die Umgebung vergleichsweise groß. Die hier ermittelten Messwerte lassen sich nicht direkt auf einen Stab umlegen, das hat mehrere Gründe.

- Die Masse der Probe ist wesentlich geringer, die Erwärmung erfolgt somit wesentlich schneller.
- Da die Probe nicht in einem VPI-Prozess hergestellt wurde sind mehr Hohlräume pro Volumeinheit vorhanden als bei einem Leiterstab.
- Die Probe enthält hitzegereinigte Rohseide und Polyesterharz um Einflüsse der Chemie des Bandes zu verhindern.

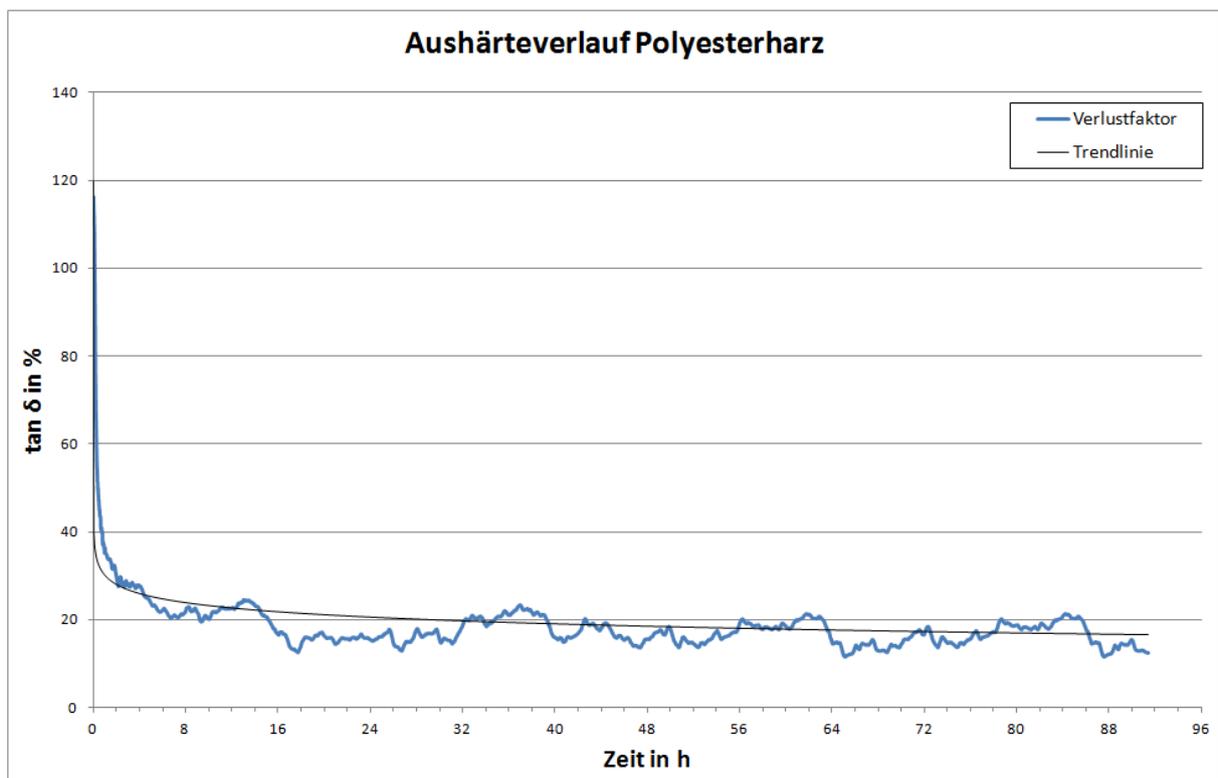


Abbildung 6.4: Aushärtekurve Polyesterharz

Diskussion des elektrischen Lebensdauerversuches

Wie in Abbildung 6.4 ersichtlich, ist die Verringerung des Verlustfaktors nach einer Aushärtezeit von 16 h nur gering, der Aushärteprozess ist also abgeschlossen. Wieso der Verlustfaktor bei 20% der Nennspannung bei den Polyestersystemen einer derart starken Änderung in den ersten 200 Stunden unterliegt konnte nicht geklärt werden.

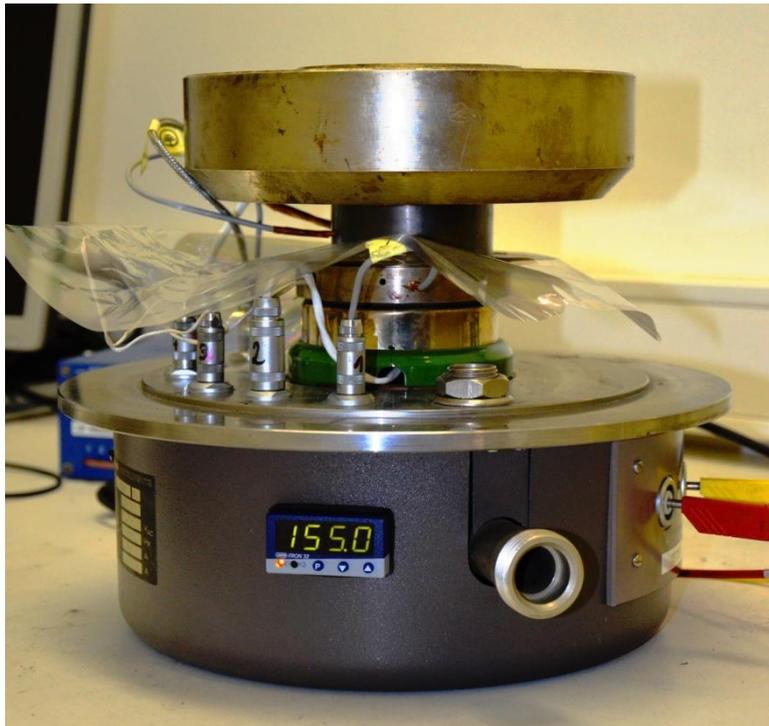


Abbildung 6.5: Nassmesszelle

7 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass ein emissionsarmes Polyesterimid-System ohne Probleme als Ersatz für ein Epoxy-System mit gleichem Temperaturindex dienen kann. Allerdings ist die thermische Zyklenbeständigkeit beim Epoxy-Anhydrid-System deutlich höher, bei der elektrischen Lebensdaueruntersuchung hingegen zeigte dieses System eine immer noch ausgezeichnete Leistung, diese war jedoch deutlich geringer als beim Polyestersystem oder beim beschleunigten Epoxid.

Alle Systeme konnten die Minimalanforderung einer elektrischen Lebensdauer von 250 h bei $2,54 U_N$ [21] bzw. 10 h bei $3 U_N$ [8] um ein Vielfaches übertreffen. In Bezug auf die elektrische Lebensdauer bei $3 U_N$ zeichnet sich bereits jetzt ab, dass, die beiden beschleunigten Epoxidsysteme wohl die höchste Lebensdauer erreichen werden.

Es hat sich gezeigt, dass die mittlere thermische Lebensdauer beim beschleunigten Epoxid und beim Polyestersystem nur gering voneinander abweicht, unabhängig von der Betrachtung des letzten Zyklus nach IEEE oder IEC. In der Gesamtheit zeigt sich jedoch, dass, das Polyesterharz eine geringere Streuung der Ausfälle über die Zyklen aufweist. Auch erfolgen die ersten Ausfälle deutlich früher. Das Polyesterharz hat also tendenziell eine etwas bessere thermische Performance gezeigt. Ob das an der Harzchemie selbst oder an der Verarbeitbarkeit bzw. der Verarbeitung liegt kann aus den vorliegenden Daten nicht geschlossen werden.

Eine weitere Evaluierung bei zwei anderen sich um 20° unterscheidenden Temperaturen zur Vervollständigung der in dieser Arbeit durchgeführten könnte hier größere Klarheit schaffen. Abhängig von der Temperatur sind dabei deutlichere oder in Teilen auch abweichende Ergebnisse möglich.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass alle verwendeten Glimmerbänder in ihrer Chemie auf Epoxidharze abgestimmt sind, ist erkennbar, dass noch eine große Verbesserung der Eigenschaften des Polyester-Glas-Glimmer Isoliersystemes erreicht werden könnte. Dazu müsste jedoch eine bessere Anpassung der Chemie der Bänder an die der Polyesterharze erfolgen. In diesem Vergleich erwies sich, unter Betrachtung der thermischen Evaluierung und der bis dato vorliegenden Ergebnisse der elektrischen Lebensdaueruntersuchung, das Epoxy-Anhydrid-System als das beste System.

Es hat sich gezeigt, dass ein Stehspannungstest von nur einer Minute Dauer wie er in IEC 60034-18-32: 2012 vorgeschlagen wird, nicht in jedem Fall ausreichend ist. In dieser Untersuchung überdauerten 40% der Prüfstäbe mehr als eine Minute bevor ein Durchschlag erfolgte. Die gewählte Norm kann also unter entsprechenden Umständen durchaus Einfluss auf das Ergebnis der thermischen Evaluierung haben.

Des Weiteren konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass diagnostische Verfahren welche bei Glimmer-Epoxid-Systemen den Zustand der Isolation bestens abbilden, bei Polyestersystemen einen wesentlich weniger eindeutigen Befund liefern. Hier wäre die Wahl anderer Diagnoseverfahren oder auch die Modifikation der in dieser Arbeit verwendeten Methoden erforderlich gewesen.

Schlussfolgerungen

Bei den drei untersuchten Epoxid-Systemen zeigte sich, dass die Messung des Verlustfaktors und die Ermittlung des Polarisationsindex den Gesamtzustand der Isolation am besten abzubilden scheinen. Die Bildung anderer Polarisationsindizes als dem allgemein üblichen 10 Minuten PI, so reizvoll diese aus Zeitmanagementgründen auch ist, kann zwar im Rahmen einer Isolationsstrommessung erfolgen, scheint jedoch weniger aussagekräftig zu sein.

Zwar konnte durch mittels TE-Fingerprints gezeigt werden dass, zu Anfangs unterschiedliche Fehler im Isolationssystem vorlagen. Diese konnten jedoch in keinen Zusammenhang mit der thermischen Lebensdauer gebracht werden. Zwischen dem Q_{IEC} -Wert bei Nennspannung und dem Zustand des Isoliersystems konnte kein Zusammenhang festgestellt werden.

Für künftige Projekte ähnlicher Natur wäre es empfehlenswert für den elektrischen Lebensdauerversuch, je System einen zusätzlichen Stab anzufertigen. Dieser könnte benutzt werden, um bei einer noch höheren Spannung durch Vergleich mit einem zur Gänze bekannten System eine Abschätzung darüber zu treffen, ob das Projekt im gegebenen Zeitrahmen finalisierbar ist. Alternativ zur Anfertigung eines zusätzlichen Stabes könnte auch nur die Minimalanforderung von 4 Stäben [21], für die elektrische Lebensdauer erfüllt werden. Dadurch würde allerdings die Aussagekraft des Versuches verringert. Für den die thermische Evaluierung existiert eine derartige Empfehlung, [3].

Bei der thermischen Evaluierung sollte aus Gründen des Zeitmanagements auf Teilentladungsmessung verzichtet. Zwar konnten Papers über den Versuch der Entwicklung eines Beurteilungskriterien anhand von Fingerprints gefunden werden, eine Norm dazu existiert bis dato jedoch noch nicht. Auch auf die Isolationsstrommessung könnte verzichtet werden, da die Verlustfaktormessung sich als ebenfalls aussagekräftig erwies. Generell stellt sich die Frage nach zusätzlichen Diagnoseverfahren bei der Evaluierung nach IEC 60034-18-31 oder IEEE Std. 1776 – 2006 da die Anzahl der überdauernden Zyklen das aussagekräftigste Kriterium ist.

8 Zusammenfassung

Ein Ziel dieser Arbeit war es, Unterschiede zwischen der thermischen Evaluierung nach IEEE Standard und IEC-Standards in Bezug auf ihre Auswirkung auf die Ergebnisse der Evaluierung zu untersuchen. Der andere Zweck war die Kenntnisse über emissionsarme Polyesterimid-Isoliersysteme sowie Isoliersysteme mit beschleunigtem Epoxid zu erweitern.

Dabei wurden komplette Hochspannungsisolationssysteme mit Teilleiterstäben angefertigt. Die Evaluierung erfolgte auf Grund von drei Teilversuchen, dem elektrischen Lebensdauerversuch bei 2,54-facher Nennspannung auf Basis von IEEE Std. 1553 – 2002 und bei 3-facher Nennspannung auf Basis von KEMA S13: 1987, sowie eine thermische Evaluierung auf Basis von IEEE Std. 1776 – 2008. Eingangs dieser Arbeit wurde auf die angewandten Normen eingegangen. Unterschiede zwischen der thermischen Evaluierung nach IEEE Standards und IEC Normen wurden diskutiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Entscheidung für ein bestimmtes Normenwerk Einfluss auf das Ergebnis der Untersuchung haben kann.

Der Aufbau in Summe 75 zur Verfügung stehenden Leiterstäben wurde beschrieben. Weiters wurde auf die Auswahl der Materialien und die angestellten Vorversuche zu deren Auswahl eingegangen. Der hier angewandte Imprägnierprozess wurde erläutert. Es wurde erklärt in welcher Art und Weise die Normen angewandt wurden, sowie die Gründe weshalb Abweichungen vom Standard notwendig und unvermeidbar waren.

Zur Zustandsbewertung wurden in regelmäßigen Abständen Messungen an den künstlich gealterten Stäben vorgenommen. Dabei wurden der Verlustfaktor, der Polarisationsindex und das Teilentladungsverhalten zur Bewertung herangezogen. Es konnte Schlüsse über die Aussagekraft bestimmter Messverfahren gezogen werden. Auf Probleme und Fehler bei den Messungen PI Messungen wurde eingegangen.

Basierend auf den Messungen und den Thermozyklen wurde eine Aussage über die das Potential der Polyestersysteme als Ersatz für Epoxy-Anhydrid-System getroffen werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Rudolf Bruetsch; Makoto Tari; Klaus Froehlich; Tilman Weiers; Ruben Vogelsang, „Insulation Failure Mechanisms of Power Generators,“ *Electrical Insulation Magazine, IEEE (Volume:24 , Issue: 4)*, pp. 17 - 25, Juli - August 2008.
- [2] IEEE Std 1776-2008, *IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Unsealed or Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Pre-Insulated Stator Coils for Machines Rated 15 000 V and Below*.
- [3] IEC 60034-18-31 , *Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for form-wound windings - Thermal Evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines*, 2012.
- [4] IEC 60034-18-31, *Functional evaluation of insulation systems - Test procedures for form-wound windings - Thermal Evaluation and classification of insulation systems used machines up to and including 50 MVA and 15 kV*, 1992.
- [5] IEEE Std 43-2000 (R2006), *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*.
- [6] P. Marek, Neues Trägersystem für Hochspannungsisolierungen, Graz: TU Graz, 2006.
- [7] IEEE Std 286-2000 (R2006), *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.
- [8] KEMA S-13, KEMA specification for air-cooled a.c. generators of 10 MVA and above, 1987.
- [9] KEMA S-14, *KEMA regulations for hydrogen or liquid cooled a.c. generators*, 1987.
- [10] IEC 60270 (VDE 0434), *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*, 2000.
- [11] IEEE Std 1434-2000, *IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*.
- [12] Isovolta Group, *Datenblatt Porofol 2076*, 2009.
- [13] Isovolta Group, *Datenblatt Poroband ME 4020*, 2013.
- [14] Isovolta Group, *Datenblatt Contafel 0865*, 2003.

<Literaturverzeichnis

- [15] Isovolta Group, *Datenblatt Isoseal MF 6111, MF ME 2411*.
- [16] Isovolta Group, *Datenblatt POROBAND 0410*, 2009.
- [17] T. Shantz und R. Versmold, „Types of Vacuum Impregnation Processes,“ Januar 2013. [Online]. Available: www.diecasting.org/dce. [Zugriff am 8 Februar 2014].
- [18] T. Weege, *USING CAPACITANCE MEASUREMENTS TO DETERMINE FILL OF VPI COILS*, Irvine, California.
- [19] H. Clausert und G. Wiesemann, „Grundgebiete der Elektrotechnik 1 Auflage 9,“ in s *Gleichstromnetzte, Operationsverstärke, magnetische und elektrische Felder*, München, Oldenbourg Wissensverlag GmbH, 2005, p. 163.
- [20] Mitsubishi Polyester Film GmbH, „Datenvergleich für Kunststoff-Folien,“ 2004-2011. [Online]. Available: <http://www.m-petfilm.com/Europe/Datenvergleich%20Kunststoff-Folien.htm>. [Zugriff am 8 Februar 2014].
- [21] IEEE Std 1553-2002, *IEEE Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators*.
- [22] Power Diagnostic Systems GmbH, „Typical PD Pattern,“ [Online]. Available: www.pdix.com.
- [23] D. W. Gross und J. Walker, „Partial Discharge Monitoring on Rotating Machines using a Modular Instrument Approach,“ in s *LH Marthinusen Rotating Machines Conference, 2008*, 2008.
- [24] M. Belec, C. Hudon und C. Guddemi, „Laboratory Study of Slot Discharge Characteristic PRPD Patterns,“ IEEE Xplore, Institut de Recherche Hydro-QuCbec IREQ, 2001.
- [25] H. Illias, T. S. Yuan, A. H. A. Bakar, G. Chen, P. L. Lewin und H. Mokhlis, „Partial Discharge Patterns in High Voltage Insulation,“ in s *International Conference on Power and Energy (PECon), 2-5 December 2012,*, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2012.
- [26] IEEE Std 1310-2012, *IEEE Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Rotating Machines*, 2012.
- [27] Metrel, „www.toleka.se,“ [Online]. Available: <http://www.toleka.se/WebDoc/Lev-Manualer-Bruks.-PDF/Isolationsprov-bok.pdf>. [Zugriff am 5 Februar 2014].
- [28] G. Stone, H. Sedding, B. Lloyd und B. Gupta, *THE ABILITY OF DIAGNOSTIC TESTS TO ESTIMATE THE REMAINING LIFE OF STATOR INSULATION*, Ontario Hydro Research Division Toronto, Canada: IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3,

<Literaturverzeichnis

No. 4, December 1988.

[29] D.-P. Tilman Weiers, „Eine Methode zur aussagekräftigeren Bewertung von Maschinenisolierungen,“ ETH Zürich, 2007, pp. 58-59.

[30] IEC 60034-18-1, *Functional evaluation of insulation systems for rotating electrical machines*, 1992.

10Anhang

Im Anhang werden weitere Bilder, Grafiken und Messwerte zur Verfügung gestellt auf die im Hauptteil der Arbeit nicht oder nur allgemein eingegangen wurde.

10.1 Fertigungsprozess



Abbildung 10.1: Teilleiterstäbe



Abbildung 10.2: Wickeln der Hauptisolation

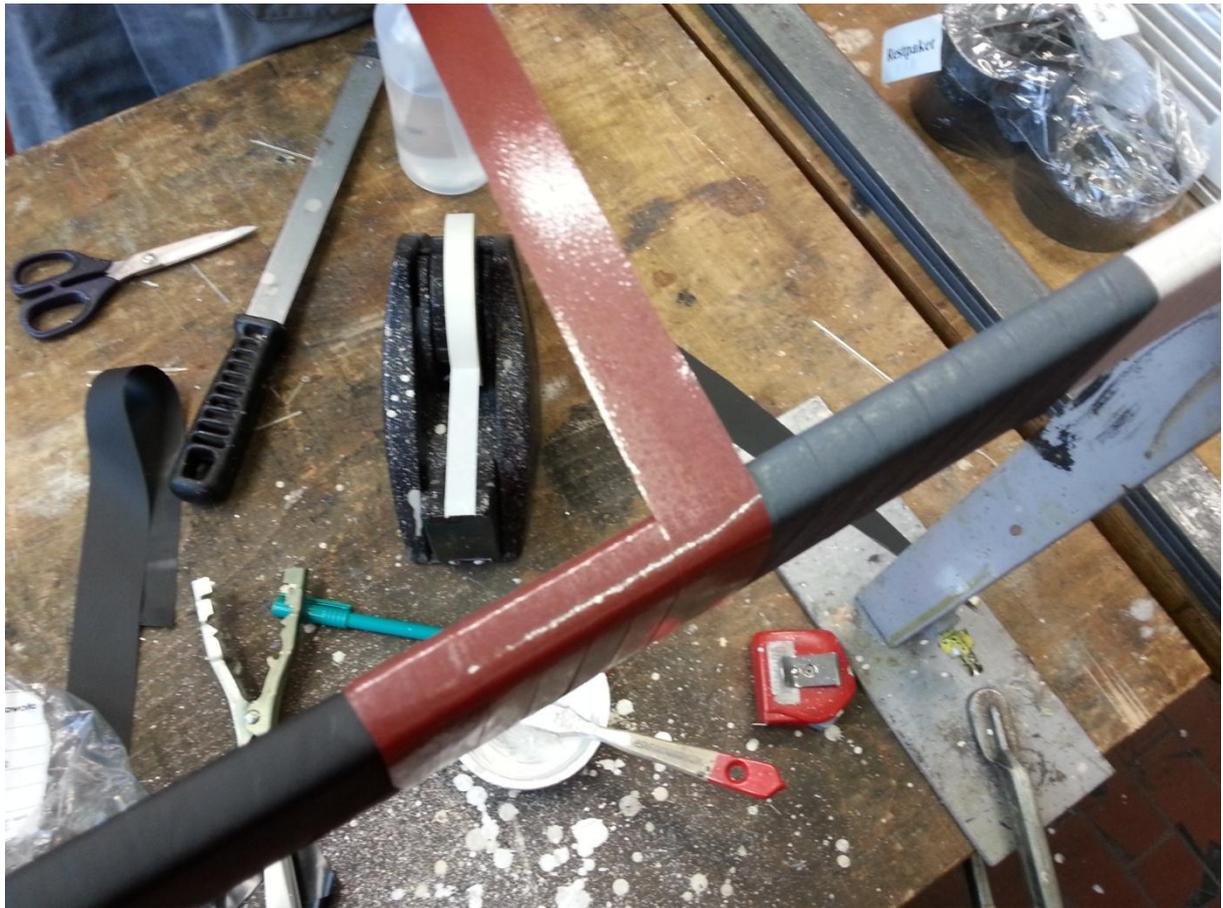


Abbildung 10.3: Manuelles wickeln von AGS, EGS und Wickelkopfschutz

10.2 Thermozyklus



Abbildung 10.4: Prüfstäbe nach dem ersten Thermozyklus

Bereits nach dem ersten Thermozyklus waren erhebliche, farbliche Veränderungen erkennbar (Abbildung 10.4). System 5 (13-124, zweiter Stab von unten) zeigte die geringsten Änderungen (Tabelle 5.5)



Abbildung 10.5: elektrische Diganoseprüfung

In Abbildung 10.5 ist ein Glühen des Wickelkopfes im EGS-Bereich zu sehen. Dieses Glühen konnte mit zunehmender Anzahl der Belastungs- und Diagnosezyklen während der thermischen Evaluierung in größere Intensität beobachtet werden. Es erfolgte kein Ausfall.



Abbildung 10.6: Zerstörung des Wickelkopfes

Abbildung 10.6 zeigt die Zerstörung des Wickelkopfes während der elektrischen Prüfspannungsbeanspruchung. Der Ausfall erfolgte auf Grund der raschen Ausbildung eines elektrischen Kriechweges.

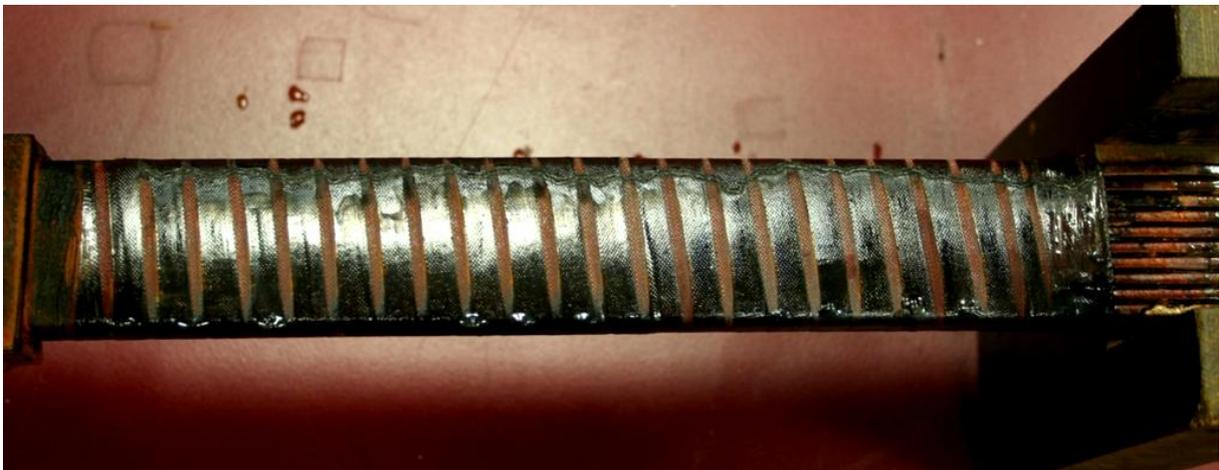


Abbildung 10.7: Kriechweg

Abbildung 10.7 zeigt den Kriechweg von der Nutimitation ausgehend über den gesamten Wickelkopf zum Leiter.

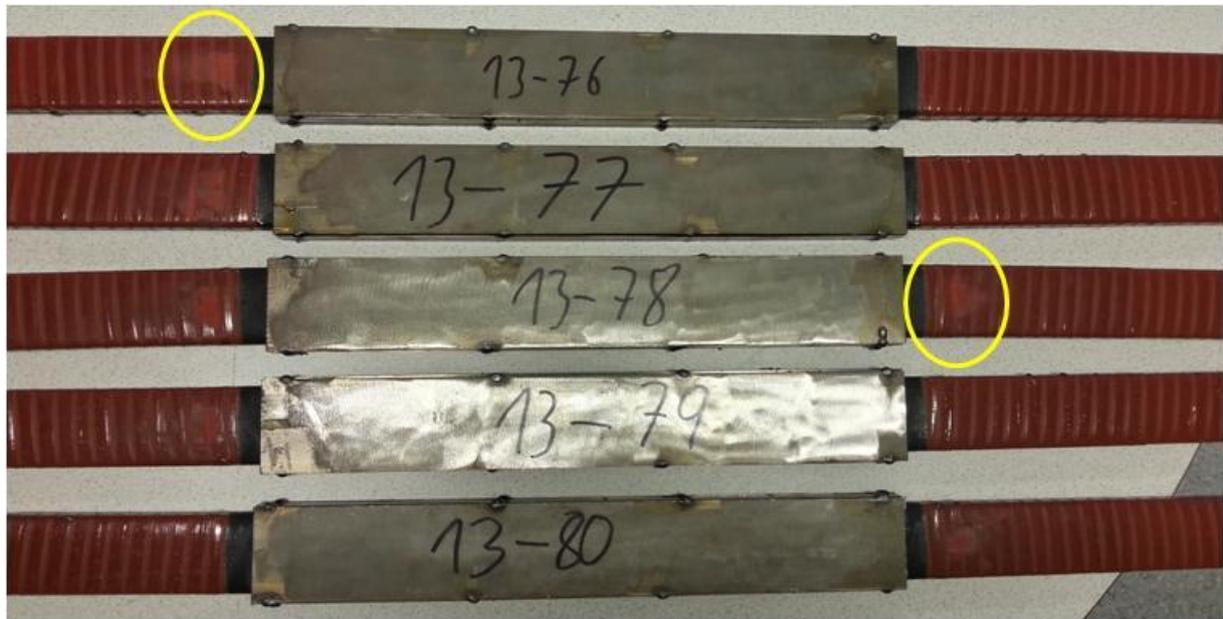


Abbildung 10.8: Stäbe nach 4200 Stunden bei 2,54 U_N

Die einzig erkennbare Beschädigung nach 2400 Stunden bei 2,54 U_N ist eine Erosion im Bereich des Endenglimmschutzes (gilt für alle Systeme).

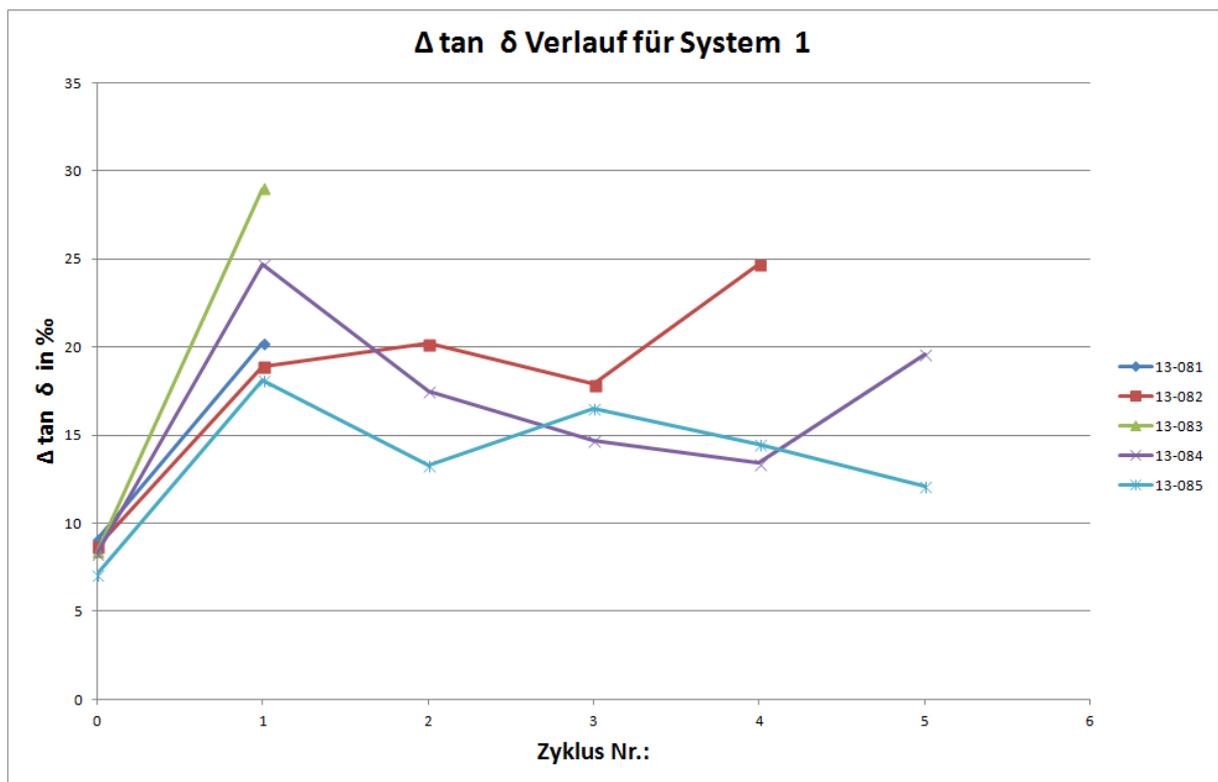


Abbildung 10.9: $\Delta \tan \delta$ Verlauf für System 1

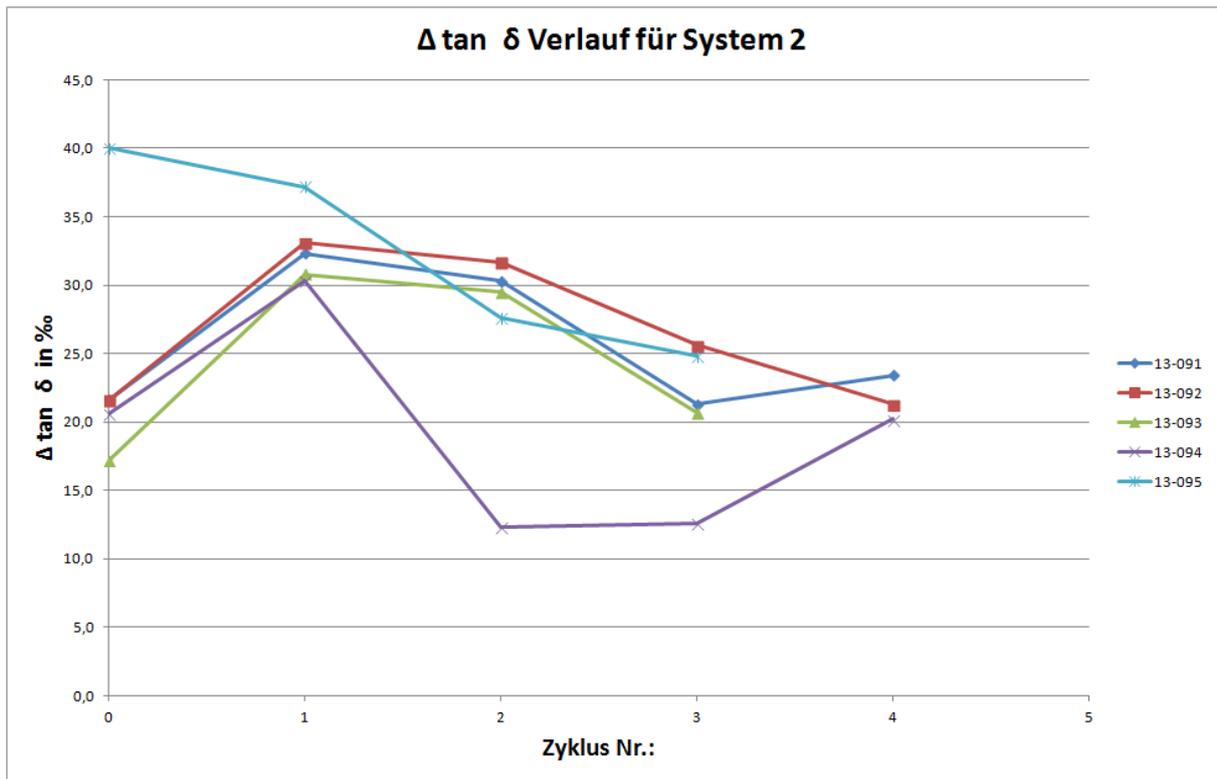


Abbildung 10.10: Δ tan δ Verlauf für System 2

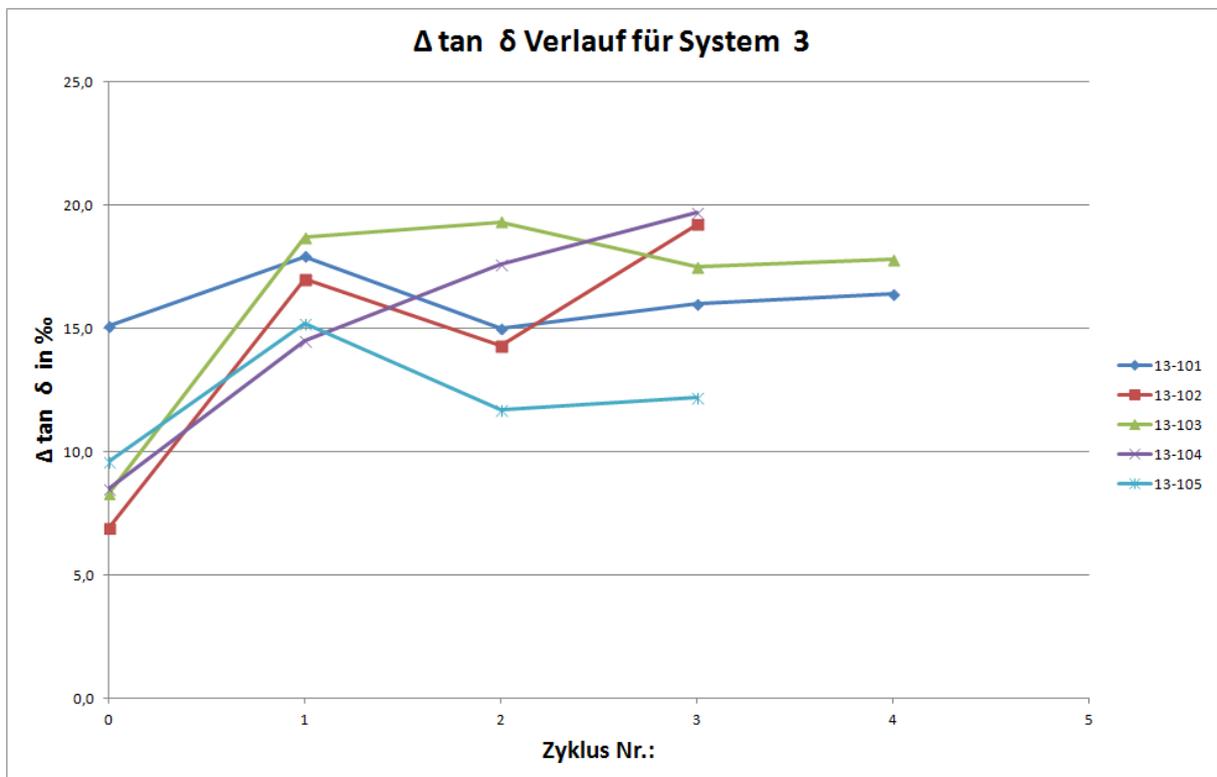


Abbildung 10.11: Δ tan δ Verlauf für System 3

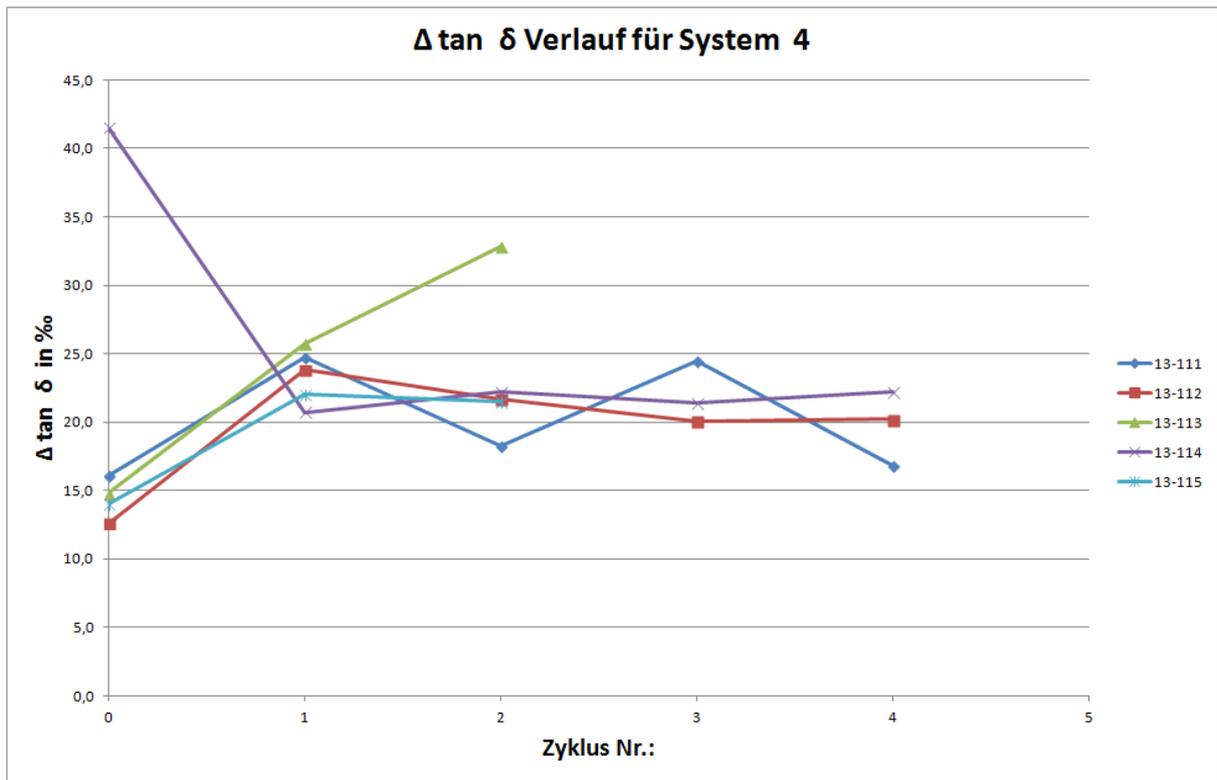


Abbildung 10.12: Δ tan δ Verlauf für System 4

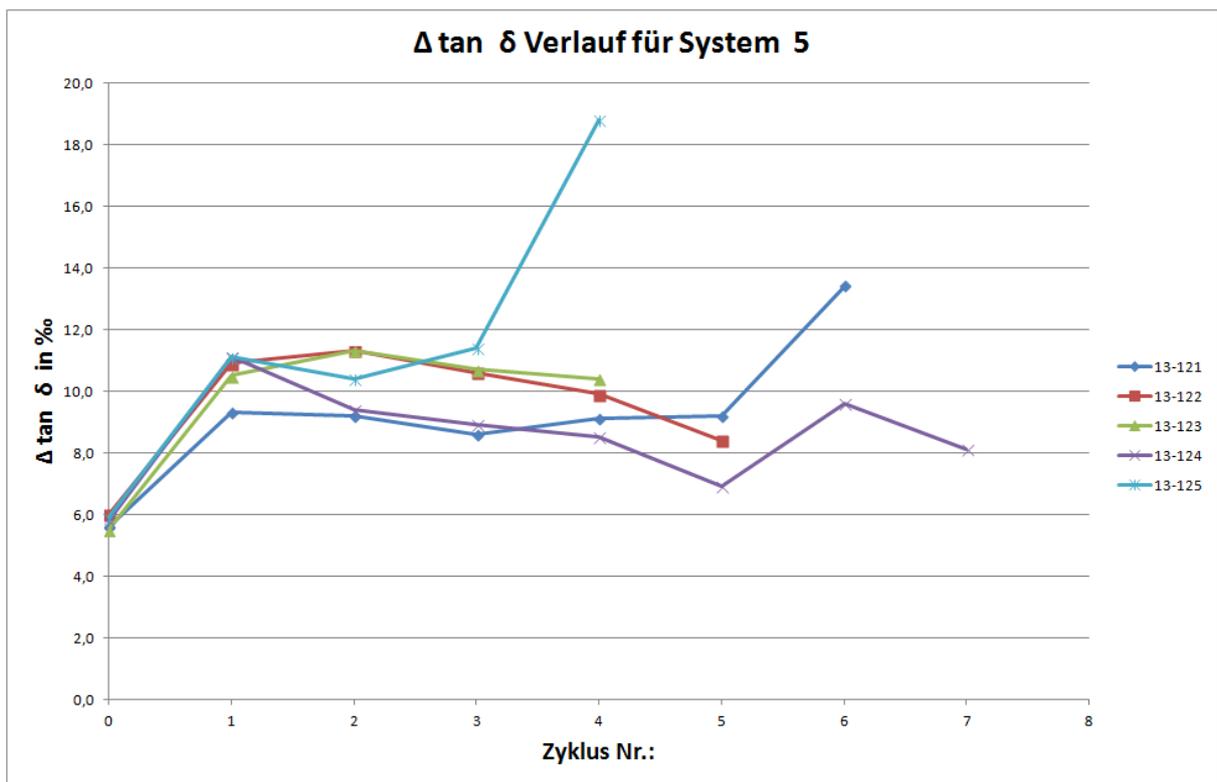


Abbildung 10.13: Δ tan δ Verlauf für System 5

	Stab Nr.:	0. Zyklus		2. Zyklus		4. Zyklus		5. Zyklus		6. Zyklus		7. Zyklus	
		Wert in pc	Ue in 1										
System 1	13-081	250	0,6										
	13-082	1800	0,4	7500	0,4	1600	0,4						
	13-083	1800	0,4										
	13-084	2200	0,4	8600	0,4	1900	0,4	1500	0,4				
	13-085	1400	0,4	8200	0,4	2800	0,6	2300	0,6				
System 2	13-091	3200	0,6	4800	0,6	5500	0,6						
	13-092	1700	0,6	5000	0,6	6400	0,6						
	13-093	1400	0,6	3600	0,6								
	13-094	1300	0,6	2500	0,6	3500	0,6						
	13-095	1300	0,4	8600	0,6								
System 3	13-101	2700	0,4	4800	0,6	2800	0,6						
	13-102	2600	0,4	5400	0,6								
	13-103	2200	0,4	5600	0,6	5000	0,4						
	13-104	7600	0,4	7100	0,4								
	13-105	2600	0,4	3400	0,6								
System 4	13-111	1600	0,4	11000	0,6	5200	0,6						
	13-112	900	0,6	5800	0,6	7200	0,6						
	13-113	1500	0,6	6800	0,6								
	13-114	800	0,4	6700	0,6	6800	0,6						
	13-115	1300	0,6	10100	0,6								
System 5	13-121	5800	0,8	3000	0,6	1700	0,6	1400	0,6	1700	0,6		
	13-122	5500	0,8	3200	0,6	2800	0,6	1000	0,6				
	13-123	2500	0,8	3100	0,6	2200	0,6						
	13-124	4700	0,8	1900	0,6	1900	0,6	1200	0,6	1200	0,4	1200	0,6
	13-125	4700	0,8	4100	0,6	2500	0,6						

Tabelle 10.1: Übersicht über Q_{IEC} -Werte und Einsetzspannung

Anhang

System Nr.:	Stab Nr.:	I30	I60	I600	R60	PI
	1	A	A	A	Ω	1
1	13-076	3,75E-09	1,75E-09	7,71E-11	5,71E+11	22,71
	13-077	3,66E-09	1,78E-09	8,60E-11	5,60E+11	20,74
	13-078	4,19E-09	2,02E-09	8,53E-11	4,94E+11	23,74
	13-079	3,94E-09	2,11E-09	1,02E-10	4,73E+11	20,77
	13-080	3,66E-09	2,00E-09	9,78E-11	5,00E+11	20,45
	13-081	4,64E-09	2,25E-09	9,37E-11	4,44E+11	24,03
	13-082	4,15E-09	2,12E-09	9,68E-11	4,71E+11	21,95
	13-083	3,69E-09	1,95E-09	9,95E-11	5,12E+11	19,63
	13-084	3,92E-09	1,97E-09	8,84E-11	5,08E+11	22,29
	13-085	3,23E-09	1,72E-09	7,54E-11	5,80E+11	22,86
2	13-086	4,87E-09	2,58E-09	3,22E-10	3,88E+11	8,02
	13-087	4,32E-09	2,53E-09	3,52E-10	3,96E+11	7,18
	13-088	4,74E-09	2,70E-09	3,39E-10	3,70E+11	7,98
	13-089	5,00E-09	2,53E-09	3,07E-10	3,96E+11	8,23
	13-090	4,99E-09	2,68E-09	3,29E-10	3,73E+11	8,14
	13-091	5,02E-09	2,60E-09	3,36E-10	3,85E+11	7,73
	13-092	4,29E-09	2,44E-09	3,05E-10	4,10E+11	8,00
	13-093	5,05E-09	2,78E-09	3,55E-10	3,60E+11	7,83
	13-094	4,89E-09	2,60E-09	2,60E-10	3,85E+11	9,98
	13-095	5,07E-09	2,86E-09	4,42E-10	3,49E+11	6,48
3	13-096	2,94E-09	1,83E-09	1,72E-10	5,48E+11	10,63
	13-097	4,03E-09	2,22E-09	9,80E-11	4,50E+11	22,70
	13-098	3,58E-09	1,80E-09	8,70E-11	5,54E+11	20,74
	13-099	3,76E-09	2,15E-09	1,21E-10	4,65E+11	17,70
	13-100	3,80E-09	2,02E-09	9,02E-11	4,96E+11	22,35
	13-101	3,92E-09	2,12E-09	9,37E-11	4,73E+11	22,58
	13-102	3,37E-09	1,69E-09	7,51E-11	5,91E+11	22,53
	13-103	3,66E-09	2,05E-09	9,36E-11	4,88E+11	21,91
	13-104	3,98E-09	2,12E-09	8,96E-11	4,72E+11	23,63
	13-105	3,92E-09	2,25E-09	1,02E-10	4,44E+11	22,04
4	13-106	3,56E-09	2,10E-09	1,85E-10	4,77E+11	11,32
	13-107	3,75E-09	2,18E-09	2,91E-10	4,59E+11	7,49
	13-108	3,96E-09	2,36E-09	3,16E-10	4,24E+11	7,46
	13-109	3,52E-09	2,25E-09	3,54E-10	4,45E+11	6,35
	13-110	3,55E-09	2,20E-09	3,07E-10	4,54E+11	7,19
	13-111	3,49E-09	2,10E-09	2,48E-10	4,77E+11	8,48
	13-112	3,64E-09	2,23E-09	2,00E-10	4,47E+11	11,19
	13-113	3,94E-09	2,38E-09	2,98E-10	4,21E+11	7,98
	13-114	3,83E-09	2,29E-09	2,44E-10	4,37E+11	9,38
	13-115	3,44E-09	2,20E-09	3,81E-10	4,55E+11	5,78

5	13-116	2,93E-09	1,40E-09	7,08E-11	7,13E+11	19,82
	13-117	2,94E-09	1,71E-09	1,29E-10	5,86E+11	13,23
	13-118	3,16E-09	1,77E-09	1,33E-10	5,66E+11	13,34
	13-119	2,05E-09	1,22E-09	9,35E-11	8,19E+11	13,06
	13-120	2,71E-09	1,53E-09	1,31E-10	6,54E+11	11,71
	13-121	2,01E-09	1,23E-09	9,32E-11	8,14E+11	13,18
	13-122	1,14E-09	7,23E-10	8,38E-11	1,38E+12	8,62
	13-123	2,15E-09	1,28E-09	1,87E-10	7,78E+11	6,87
	13-124	2,30E-09	1,37E-09	1,59E-10	7,31E+11	8,60
	13-125	1,85E-09	1,14E-09	1,23E-10	8,76E+11	9,32
1	13-342	3,07E-09	1,89E-09	2,25E-10	5,28E+11	8,39
	13-343	3,26E-09	2,05E-09	2,07E-10	4,89E+11	9,89
	13-344	3,07E-09	2,02E-09	2,72E-10	4,96E+11	7,40
	13-345	3,28E-09	2,02E-09	2,94E-10	4,95E+11	6,89
	13-346	3,04E-09	1,95E-09	2,26E-10	5,13E+11	8,65
2	13-347	4,83E-09	2,32E-09	1,64E-10	4,30E+11	14,16
	13-348	4,99E-09	2,65E-09	1,65E-10	3,77E+11	16,07
	13-349	4,85E-09	2,50E-09	1,68E-10	4,00E+11	14,92
	13-350	4,75E-09	2,40E-09	2,96E-10	4,16E+11	8,12
	13-351	4,88E-09	2,70E-09	1,88E-10	3,70E+11	14,37
3	13-352	2,81E-09	1,68E-09	1,96E-10	5,96E+11	8,55
	13-353	3,20E-09	2,02E-09	1,65E-10	4,96E+11	12,19
	13-354	2,93E-09	1,73E-09	1,77E-10	5,79E+11	9,78
	13-355	3,23E-09	2,09E-09	1,98E-10	4,79E+11	10,53
	13-356	3,24E-09	2,08E-09	1,98E-10	4,80E+11	10,53
4	13-357	4,65E-09	2,61E-09	1,69E-10	3,83E+11	15,40
	13-358	4,67E-09	2,40E-09	1,42E-10	4,17E+11	16,94
	13-359	4,55E-09	2,44E-09	1,70E-10	4,10E+11	14,32
	13-360	4,69E-09	2,44E-09	1,73E-10	4,10E+11	14,09
	13-361	4,71E-09	2,69E-09	1,57E-10	3,72E+11	17,09
5	13-362	3,90E-09	1,76E-09	9,09E-11	5,69E+11	19,33
	13-363	4,21E-09	1,89E-09	8,90E-11	5,29E+11	21,23
	13-364	3,68E-09	1,71E-09	9,36E-11	5,86E+11	18,24
	13-365	4,03E-09	1,79E-09	8,95E-11	5,59E+11	19,98
	13-366	3,82E-09	2,04E-09	1,07E-10	4,90E+11	19,07

Tabelle 10.2: Messwerte der initialen Isolationswiderstandsmessung

Hier in Tabelle 10.2: Messwerte der initialen Isolationswiderstandsmessung sind alle gemessenen Isolationsströme und die daraus ermittelten Polarisationsindizes abgebildet. Stäbe die im Thermozyklus geprüft wurden sind blau markiert. Stäbe die für die elektrischen Lebensdauerexperimente verwendet wurden sind grün markiert.

Anhang

System Nr.:	Stab Nr.:	U in kV						max
	1	1,32	2,64	3,96	5,28	6,6	7,92	‰
1	13-076	14,1	19,7	28,5	35,9	42,0	46,7	8,8
	13-077	14,1	21,5	30,7	35,3	40,3	44,6	9,2
	13-078	13,7	22,3	29,2	36,0	41,6	46,5	8,6
	13-079	13,5	21,4	29,5	36,1	41,7	45,9	8,1
	13-080	13,8	20,9	28,4	35,4	41,0	45,5	7,5
	13-081	14,1	19,9	28,0	37,1	44,3	48,9	9,1
	13-082	13,7	20,4	29,1	35,6	41,6	46,4	8,7
	13-083	13,4	20,4	27,7	36,1	41,5	46,1	8,4
	13-084	14,7	23,0	30,7	37,3	43,5	47,8	8,3
	13-085	14,5	21,6	26,5	33,0	38,8	43,2	7,1
2	13-086	25,2	32,0	52,4	62,7	75,0	82,8	20,4
	13-087	24,1	31,6	49,1	58,0	67,1	74,0	17,5
	13-088	25,2	32,1	51,6	62,5	71,6	78,8	19,5
	13-089	27,2	34,8	54,2	66,3	76,4	83,9	19,4
	13-090	27,6	35,2	55,2	66,4	76,4	83,1	20,0
	13-091	27,1	34,1	55,7	66,5	75,0	82,3	21,6
	13-092	23,7	30,3	51,9	61,6	70,1	75,7	21,6
	13-093	26,1	33,4	50,6	62,5	73,3	81,2	17,2
	13-094	26,3	33,5	54,1	67,1	78,8	85,4	20,6
	13-095	27,0	34,6	74,6	65,3	74,9	82,0	40,0
3	13-096	10,4	15,2	22,2	29,5	35,1	39,8	7,3
	13-097	12,1	17,7	25,1	33,4	39,5	45,3	8,3
	13-098	16,2	22,9	52,0	38,0	47,1	50,1	29,1
	13-099	11,4	17,7	25,7	32,9	38,7	43,9	8,0
	13-100	12,8	18,3	26,8	34,4	42,0	47,3	8,5
	13-101	12,4	18,3	26,2	41,3	44,3	50,2	15,1
	13-102	11,9	17,2	23,9	30,8	36,7	41,8	6,9
	13-103	12,0	17,7	26,0	33,8	40,4	46,0	8,3
	13-104	12,3	17,9	25,3	33,8	40,8	46,4	8,5
	13-105	12,0	17,8	27,4	34,1	39,9	45,4	9,6
4	13-106	20,7	26,9	38,2	50,5	62,7	69,5	12,3
	13-107	19,9	27,1	38,5	52,8	63,1	71,0	14,3
	13-108	20,9	28,0	45,1	58,2	68,0	75,0	17,1
	13-109	19,7	26,5	39,1	52,2	65,5	73,0	13,3
	13-110	20,7	27,4	43,3	57,5	69,5	77,2	15,9
	13-111	19,2	26,2	39,1	55,2	65,2	72,0	16,1
	13-112	20,4	27,8	40,4	52,6	64,9	73,6	12,6
	13-113	20,8	28,0	41,4	56,2	67,8	74,5	14,8
	13-114	20,0	26,5	68,0	56,4	67,4	75,3	41,5
	13-115	20,2	26,1	35,6	49,6	60,5	68,6	14,0

System Nr.:	Stab Nr.:	U in kV						max
	1	1,32	2,64	3,96	5,28	6,6	7,92	‰
5	13-116	13,3	19,1	25,2	32,5	39,1	44,4	7,3
	13-117	12,7	17,8	23,2	28,4	34,5	39,5	6,1
	13-118	12,1	17,1	22,7	29,7	35,1	40,1	7,0
	13-119	11,3	16,2	21,8	27,7	35,5	40,6	7,8
	13-120	11,1	15,6	20,8	26,3	31,6	36,1	5,5
	13-121	11,5	15,6	20,5	26,1	31,6	35,9	5,6
	13-122	10,2	14,6	19,2	25,2	30,1	35,1	6,0
	13-123	9,5	13,6	18,1	23,6	28,8	33,1	5,5
	13-124	10,3	14,5	18,6	23,8	29,6	34,3	5,8
	13-125	10,5	14,9	19,5	23,6	29,5	34,3	5,9
1	13-342	11,6	16,8	23,3	30,8	36,6	42,0	7,5
	13-343	12,0	17,9	24,3	32,1	38,5	43,8	7,8
	13-344	12,1	16,8	23,2	30,4	36,1	41,2	7,2
	13-345	13,1	19,0	27,4	35,2	41,2	46,5	8,4
	13-346	12,1	17,8	24,2	32,5	38,1	43,2	8,3
2	13-347	23,5	31,2	35,8	54,1	63,2	69,6	18,3
	13-348	22,7	29,3	39,5	49,3	59,8	66,8	10,5
	13-349	22,3	28,3	37,9	50,3	58,9	66,3	12,4
	13-350	21,7	28,3	40,2	51,8	60,7	68,2	11,9
	13-351	22,0	28,5	37,0	47,4	55,7	63,2	10,4
3	13-352	11,3	16,7	23,2	32,9	42,1	47,8	9,7
	13-353	12,3	17,5	23,7	32,1	38,6	45,3	8,4
	13-354	11,5	16,8	22,3	30,2	37,8	43,8	7,9
	13-355	12,2	17,3	23,7	32,5	39,3	45,2	8,8
	13-356	13,7	17,2	22,5	31,4	38,7	45,2	8,9
4	13-357	20,3	26,4	34,2	44,2	52,5	59,0	10,0
	13-358	19,3	25,4	33,7	43,4	53,2	59,6	9,8
	13-359	19,7	25,1	31,8	41,3	49,0	56,8	9,5
	13-360	18,5	24,7	31,7	40,9	48,6	54,5	9,2
	13-361	19,5	25,4	32,4	40,7	48,2	54,3	8,3
5	13-362	15,5	22,8	28,9	37,0	44,6	50,4	8,1
	13-363	15,9	23,1	29,1	35,6	41,5	47,2	7,2
	13-364	13,6	20,0	26,2	32,7	40,8	47,5	8,1
	13-365	15,4	21,4	27,3	34,6	41,4	47,8	7,3
	13-366	14,2	19,9	25,2	32,7	40,2	45,4	7,5

Tabelle 10.3: Initiale Verlustfaktormessung alle Stäbe und Systeme

Hier in Tabelle 10.3 sind die Verlustfaktorwerte vor dem ersten Thermozyklus für sämtliche Stäbe (ausgenommen Vorversuche) abgebildet. Stäbe die im Thermozyklus geprüft wurden sind blau markiert. Stäbe die für die elektrischen Lebensdauerexperimente verwendet wurden sind grün markiert.