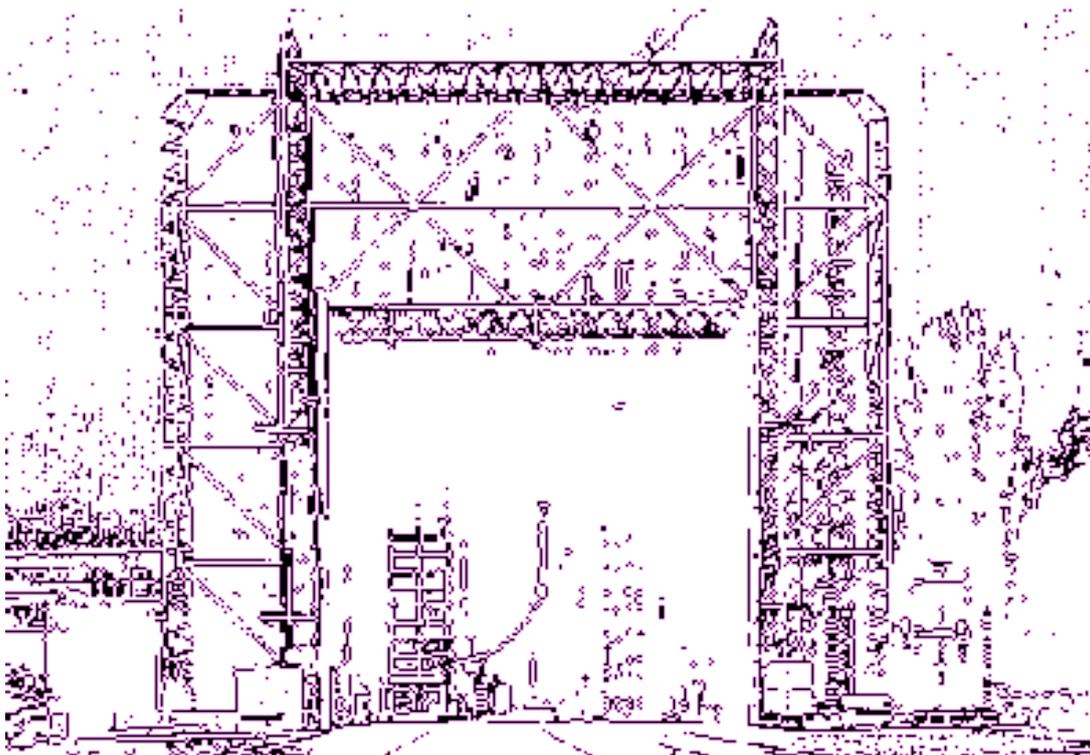


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT



**INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK
UND SYSTEMMANAGEMENT**

Restspannungsfestigkeit von betriebsgealterten Generatorstäben

Residual voltage endurance of operational aged generator bars

Masterarbeit

von

Mario Dolcic

Graz, September 2013

Durchgeführt am

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

an der Technischen Universität Graz



Graz University of Technology

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. techn. Univ.-Doz. Christof Sumederer
Mag. Dipl.-Ing. Christian Rupp, KELAG

Beurteiler: Dipl.-Ing. Dr. techn. Univ.-Doz. Christof Sumederer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei der KELAG, im Besonderen bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Marketz und Herrn Mag. Dipl.-Ing. Christian Rupp sowie beim Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz, recht herzlich für die Möglichkeit zur Durchführung dieser interessanten Arbeit bedanken.

Einen besonderen Dank möchte ich an meine Betreuer aussprechen - Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Univ.-Doz. Christof Sumereder und an Herrn Mag. Dipl.-Ing. Christian Rupp - die mich während der Verfassung dieser Arbeit in allen Lagen unterstützt und mir stets mit Rat zur Seite gestanden haben.

Weiteres möchte ich mich bei allen weiteren Mitarbeitern der KELAG und der Technischen Universität Graz bedanken, die bei den Recherchen und den Messdurchführungen meiner Arbeit mitgewirkt haben.

Zuletzt gilt mein aufrichtigster Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mich während der Zeit meines Studiums und darüber hinaus jederzeit gefördert und vorangetrieben 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 24.09.2013

Mario Dolcic, BSc

Kurzfassung

In die Instandhaltung moderner Maschinensätze im Bereich der elektrischen Energieerzeugung werden große Anstrengungen gesetzt, um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb zu gewährleisten. Ein wichtiger Teilbereich in der Maschineninstandhaltung liegt in der technischen Diagnostik der Generatorständerwicklung beziehungsweise in weiterer Folge der Generatorstäbe, da hier statistisch gesehen sehr häufig Fehlerursachen für Maschinenausfälle liegen.

Diese Arbeit befasst sich mit der Analyse der Restisolierfähigkeit betriebsgealterter Generatoreinzelstäbe aus zwei Maschinensätzen und gelagerten Reservestäben. Die Untersuchungen werden mit gängigen Diagnosemethoden für Statorwicklungen durchgeführt und sollen neben der Information des aktuellen Isolationszustandes der Generatorstabisolierung auch die Aussagekraft einzelner Messmethoden aus den gewonnenen Messergebnissen prüfen. Im Zuge der Untersuchungen für den Momentanzustand der Stabisolierung wird auch eine Abschätzung auf unterschiedliches Alterungsverhalten der Einzelstäbe aufgrund von ungleichmäßiger elektrischer Dauerbeanspruchung während des Betriebes gegeben.

Für eine eingehende Untersuchung werden neben elektrischen Diagnosemessungen unter verschiedenen Temperaturniveaus, auch künstliche Alterungsversuche zur Restlebensdauer angestellt, sowie optische Untersuchungen und thermische Analysemethoden durchgeführt. Dies soll die Aussagekraft einzelner Messmethoden besser durchleuchten und helfen die Sichtweise zur Interpretation der Messergebnisse zu erweitern.

Schlagworte:

- Zustandsbewertung
- Diagnostik
- Alterungsversuch
- Generatoreinzelstäbe

Abstract

Great efforts are put into the maintenance of modern machines in the field of electrical energy production to ensure a smooth and safe operation. An important area herein is the maintenance and monitoring of the generator stator winding and subsequently of the stator bars, since statistically there are common source of error when it comes to machine failure.

In this thesis an analysis of the remaining insulation ability of operational aged individual stator bars from two machines on the one hand and reserve rods on the other hand is presented. The investigations are carried out with common diagnostic methods for stator windings. Beside the current state of the generator insulation rod, the validity of individual test methods based on the measurement results is examined. In the course of the studies on the present state of the rod insulation an estimate on different aging behavior of individual bars due to uneven electrical stress during operation is given as well.

To provide an accurate investigation, in addition to electrical diagnostic measurements at different temperature levels, investigations on residual lifetime as well as optical investigations and thermal analysis are carried out, too.

The aim is to examine the significance and validity of different diagnostic methods, as well as to help expand the view on measurement results and their interpretation.

Keywords:

- condition assessment
- diagnosis
- aging test
- generatorbars

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Vorstellung der Generatoren und der untersuchten Generatorstäbe.....	5
2.1	Historie der Generatoren Af2 und Wu4.....	5
2.2	Systemaufbau der Generatoren Af 2 und Wu4.....	6
2.3	Aufbau der Generatorstäbe und des eingesetzten Isolationssystem	8
2.3.1	Wicklungsschema der Generatoren.....	12
2.3.2	Beschreibung der Versuchsobjekte	13
2.3.3	Statorstäbe aus dem Generator Af2	15
2.3.4	Statorstäbe aus dem Generator Wu4.....	17
2.3.5	Reservestäbe.....	20
3	Durchgeführte Untersuchungen.....	21
3.1	Vorbereitung und Aufbau der Versuchsmessung	23
3.1.1	Vorbereitung der Versuchsstäbe	23
3.1.2	Vorbereitung des Messaufbaus	25
3.2	Eingangsprüfungen.....	29
3.2.1	Visuelle Untersuchung der Stäbe Af2	29
3.2.2	Visuelle Untersuchung der Stäbe Wu4	30
3.2.3	Elektrische Vorfeldmessungen unter definierten Temperaturniveaus.....	32
3.3	Festlegung des Spannungsprüfpegels für die Dauerspannungsprüfung.....	33
3.3.1	Rückblick auf Oschenik 1&2- Versuche.....	35
3.3.2	Strategische Vorgangsweise für die Auswahl des Prüfpegels.....	37
3.3.3	Erwartete Restlebensdauer	39
3.4	Elektrische Messungen vor und zwischen der Dauerspannungsprüfung	40
3.4.1	Isolationswiderstandsmessung.....	40
3.4.1.1	Allgemeines zur Isolationswiderstandsmessung.....	40
3.4.1.2	Messdurchführung der Isolationswiderstandsmessung.....	45
3.4.2	Verlustfaktormessung.....	46
3.4.2.1	Allgemeines zur Verlustfaktormessung	46
3.4.2.2	Messdurchführung der Verlustfaktormessung.....	49
3.4.3	Teilentladungsmessung	52
3.4.3.1	Allgemeines zur Teilentladungsmessung	52
3.4.3.2	Messdurchführung der Teilentladungsmessung	55
3.5	Abschließende Untersuchungen	60
3.5.1	Visuelle Untersuchung nach Ausfällen und beendeter Spannungsprüfung	60

3.5.2	DSC und STA –Analyse	60
3.5.3	Harzanalyse.....	61
4	Auswertung der Messergebnisse	62
4.1	Zustandsbeurteilung nach den Vorfeldmessungen.....	62
4.1.1	Isolationswiderstandsmessung.....	63
4.1.2	Verlustfaktormessung.....	67
4.1.3	Teilentladungsmessung	69
4.1.4	Auswertung der Messergebnisse mittels Auswertungstabelle.....	75
4.2	Zustandsbeurteilung nach den Dauerprüfungen	78
4.2.1	Isolationswiderstandsmessung.....	78
4.2.2	Verlustfaktormessung.....	80
4.2.3	Teilentladungsmessung	82
4.2.4	Harzanalyse.....	85
4.2.5	Restlaufzeit	87
4.2.6	Auswertung der Messergebnisse mittels Auswertungstabelle.....	88
4.2.7	Optische Nachuntersuchungen.....	91
4.2.8	DSC und STA-Analyse	92
4.3	Vergleich der Stäbe an unterschiedlichen Positionen in der Maschine.....	94
4.4	Vergleich der Stäbe beider Generatoren	97
4.5	Abschätzung der Restlebensdauer	103
4.5.1	Beobachtungen des Alterungsverhaltens während den Dauerspannungsversuch	103
4.5.2	Geeignete Diagnoseparameter für die Beschreibung des Alterungsverhaltens.....	104
5	Schlussfolgerungen.....	106
6	Zusammenfassung.....	108
7	Abkürzungsverzeichnis	110
8	Literaturverzeichnis.....	111
9	Anhang	113

1 Einleitung

Energiewende und Nachhaltigkeit sind Schlagwörter, die aktuell von Politik und Wirtschaft gerne verwendet werden und in den Medien allgegenwärtig sind. Die physikalische Umsetzung ist jedoch den technischen Wissenschaften vorbehalten. Nach der Naturkatastrophe und dem Unglück im japanischen Atomreaktor Fukushima gewinnt die Energiegewinnung aus Energiequellen, die sowohl klimaneutral als auch nachhaltig sind, enorm an Bedeutung für die Gesellschaft.

Das verlässliche Zusammenspiel komplexer technischer Komponenten in einem Kraftwerk ist für eine sichere Betriebsführung und Energieerzeugung, nicht zuletzt aufgrund des Kostendruckes im liberalisierten Strommarkt, unverzichtbar. Hierzu zählen alle Maschinen und Einheiten, die den Betrieb einer Wasserkraftanlage ermöglichen. Besonderes Augenmerk wird auf die energiewandelnden Einheiten gelegt, da diese während des Betriebes unter besonderen Belastungen stehen. Somit ist die Gewährleistung zuverlässiger elektrischer Maschinen im Sektor der Energieerzeugung ein hohes Ziel dieser Branche, verursachen ungewollte Ausfallzeiten von Maschinensätzen hohe Kosten. Die Kraftwerksbetreiber sind bestrebt mit regelmäßigen Kontrollen, laufenden Überwachungen und planmäßigen Revisionen die Zuverlässigkeit der Kraftwerke sowie deren Lebensdauer zu maximieren und die entstehenden Kosten zu minimieren.

In Hinblick auf die Generatorkomponenten sind diverse laufende *on-line*, sowie regelmäßige *off-line* Diagnosen zum Erhalt der Funktion und zur Beobachtung des technischen Zustandes mittlerweile fixer Bestandteil von Energieerzeugungsunternehmen. Kamen früher häufig nur *off-line* Diagnosen zur Instandhaltung in Frage, so ist man heute bestrebt mit Hilfe der *on-line* Diagnose permanente Überwachungselemente in die Instandhaltungsstrategie einzubauen, um Entwicklungstrends frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls rechtzeitig entgegenwirken zu können. Je nach Standpunkt und Bedarf bieten sich somit diverse Instandhaltungsstrategien an, um die Komponenten eines Kraftwerksparks kosten- und energieeffizient zu überwachen.

Für die Instandhaltung von Generatoren und deren Komponenten haben sich die zeitorientierte und zustandsorientierte Strategie zur Instandhaltung etabliert. Die zeitorientierte Instandhaltung basiert auf einer *off-line* Instandhaltung der Generatorkomponenten nach festem Zeitintervall. Dies ermöglicht eine hohe Verfügbarkeit der Anlage bei gleichzeitiger hoher Planbarkeit. Ein wesentliches Ziel der zustandsorientierten Instandhaltung ist die Optimierung der Zeitintervalle für Revisionen und die Maximierung der Nutzungsdauer der Anlage bei gleichzeitiger Einsparung von Diagnoseintervallen. Dies erfordert eine ständige Überwachung der Maschine während des Betriebes, die sogenannte *on-line* Überwachung, zur raschen Reaktion auf ungewollte oder abrupte Veränderungen (Hoof, Stephan 2004).

Betrachtet man den Schenkelpolgenerator in einem Wasserkraftwerk als Teilblock der Erzeugungseinheiten, so kann man nach Ausfallstatistiken diesen wiederum in Teilbereiche gliedern und Ausfallhäufigkeiten jedes Gebietes für sich bewerten. Die Bewertung des Zustandes vom Isolationssystem von Generatorstäben im Stator ist von besonderer Bedeutung, da es hier statistisch gesehen sehr häufig Fehlerursachen für Maschinenausfälle gibt. Häufigste Fehlerquelle im Isolationssystem der Ständerwicklung stellt nach einer Langzeitstatistik das Isolationsversagen der Isolierung aufgrund von Alterungserscheinungen, gefolgt von Verschmutzung und internen Teilentladungen dar (Rupp 2005).

Alterungsmechanismen im Isolationssystem verändern die Eigenschaften des Materials derart, dass es zu einem kontinuierlichen Abbau des Isoliervermögens und schlussendlich zum Isolationsversagen der Isolierung eines Generatorstabes kommt. Verantwortlich für die Alterung des Isoliersystems ist die laufende "TEAM-Beanspruchung" der Generatorkomponenten, welche die Belastung der Komponenten durch thermische-, elektrische-, mechanische- und Umgebungseinflüsse repräsentiert. Aufgrund dieser Umstände ist die Überwachung und Bewertung des Zustandes der Ständerwicklung, sowie deren Komponenten ein wichtiger Teil im Instandhaltungsbereich eines Maschinensatzes.

In der Praxis ist es üblich neben einer optischen Untersuchung, technische Diagnosemethoden zur Bewertung von Generatorstäben heranzuziehen und daraus Informationen für zukünftige Instandhaltungsarbeiten zu entwickeln. Die gängigsten Analysemethoden der off-line Diagnostik zur Bewertung von Statorwicklungen sind (Hoof, Stephan 2004) :

- Visuelle Inspektion
- Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung
- Teilentladungsmessung
- Lade- und Entladestromanalyse
- Isolationsstrommessung mittels hoher Gleichspannung
- Kontrolle der Nutverschlussverteilung

Neben einer Risikobewertung ist hier auch oft eine Abschätzung der Restlebensdauer der Generatorkomponenten bzw. eine Empfehlung zur Erneuerung einzelner Komponenten Ziel technischer Diagnosen. Eine Herausforderung hierbei ist die richtige Beurteilung der vorhandenen Messergebnisse. Zwar gibt es Normen und Richtlinien zur Beurteilung von Generatorwicklungen, jedoch ist auf die Charakteristik des verwendeten Isolationssystems zu achten, sodass der Einsatzbereich dieser Richtlinien und Normen beschränkt ist. Im Forschungsbereich ist man international bestrebt den Wissensbereich zur Analyse von Generatorkomponenten zu erweitern und zu modernisieren, jedoch gibt es bisweilen nur wenige Richtlinien zur sauberen Analyse und Beurteilung von gealterten Generatorstäben.

Im Zuge dieser Masterarbeit werden elektrische Untersuchungen zur Abschätzung der Restlebensdauer an betriebsgealterten Generatorstäben durchgeführt, wobei diese ausgewählten Stäbe den Maschinensätzen Außerfragant 2 und Wurten 4, welche in weiterer Folge mit den Abkürzungen Af2 und Wu4 gekennzeichnet werden, der Kraftwerksgruppe Fragant der KELAG entstammen. Die Stäbe dieser Maschinen werden im Zuge von Erneuerungsmaßnahmen an diesen Maschinen ausgebaut und für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. An den ausgebauten, betriebsgealterten Stäben werden nachfolgend Untersuchungen zur Zustandsbewertung der Einzelstäbe angestellt. Es soll auch untersucht werden, ob aufgrund der ausgewählten Positionen der Stäbe in den Maschinensätzen ein unterschiedliches Alterungsverhalten nachgewiesen werden kann. Weiteres ist abzuwägen, inwiefern sich die Diagnosemethoden der Isolationsstrom-, Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung, sowie der Kapazitätsmessung zur Bewertung der Restlebensdauer einzelner, ausgebauter Wicklungsstäbe eignen.

Die Analyse der vorhandenen Stäbe beinhaltet somit optische Untersuchungen und elektrische Messungen als auch werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen sowie die Auswertungen der Messergebnisse. Dabei wird das elektrische Messverfahren in drei Teilbereiche gegliedert und an jedem zu untersuchenden Stab der Maschine durchgeführt. Anfangs werden eine visuelle Voruntersuchung und eine Eingangsmessung durchgeführt, um Referenzwerte für den Zustand der Stäbe zu erlangen. Zur Untersuchung der Restlebensdauer werden die Generatorstäbe anschließend an eine hohe Wechselspannung bei Betriebsfrequenz gelegt und so elektrisch gealtert. In der Thematik der künstlichen Alterung führen, wie in realer Umgebung, die Einflüsse der "TEAM-Beanspruchung" zum kontinuierlichen Abbau des Isoliervermögens, jedoch wird in dieser Arbeit auf eine rein elektrische Beanspruchung des Versuchsmaterials zurückgegriffen (Sumereder 2008). Nach jeweils 40 Stunden Dauerbeanspruchung wird dann eine Zwischenmessung an den Stäben durchgeführt. Diese besteht wiederum aus einer Isolationsstrom-, Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung sowie einer optischen Begutachtung. Der Zweck dieser Zwischenmessungen liegt darin, Veränderungen während der Alterung festhalten zu können.

Beim Vergleich der Zwischenmessungen mit den Eingangsmessungen sollte es dann möglich sein, Rückschlüsse auf den Zustand der einzelnen Stäbe sowie die Eignung der Messmethoden zur Beurteilung dieser zu ziehen.

2 Vorstellung der Generatoren und der untersuchten Generatorstäbe

2.1 Historie der Generatoren Af2 und Wu4

Die Kraftwerksgruppe Fragant ist in Oberkärnten angesiedelt und stellt die größte Kraftwerksgruppe der KELAG (Kärntner Elektrizitäts-AG) im Bereich der Erzeugung dar. Bereits Anfang der sechziger Jahre wurde mit dem Bau der Kraftwerksgruppe Fragant begonnen und das Bauvorhaben bis heute stufenweise ausgebaut und erweitert. Die Gruppe besteht aus Speicher-, Pumpspeicher-, sowie Laufkraftwerken, welche ihre Energie aus den umliegenden Hochgebirgsstauseen sowie dem Fluss Möll beziehen. Im Jahr 2009 und 2011 ist jeweils ein Maschinensatz des neu erbauten Kraftwerkes Feldsee in Betrieb genommen worden, welches seither die Gesamtleistung der Kraftwerksgruppe Fragant um 30% erhöht hat. Die zu untersuchenden Maschinen Af2 und Wu4 sind Teil dieser Kraftwerksgruppe, Leistungsmäßig sowie vom Aufbau der Generatoren her ident jedoch in verschiedenen Krafthäusern untergebracht.

Das Krafthaus Innerfragant ist die hydraulische Zentrale der Kraftwerksgruppe und beinhaltet insgesamt fünf Maschinensätze. Eine dieser Maschinen stellt die Maschine Wu4 dar. Die Maschine wurde 1967 von der *FA. ELIN-UNION AG für elektrische Industrie, Werk Weiz* erbaut und 1968 erstmals in Betrieb genommen. Diese Maschine bezieht ihr Triebwasser aus dem Speicher Wurten. Nach den Ergebnissen einer Inspektion und Maschinendiagnose im Jahr 2012, sowie den Ergebnissen aus Diagnoseuntersuchungen von vergangenen Jahren ist die Maschine einer Revitalisierung unterzogen worden, bei welcher der Stator inklusive Statorblechpaket ausgetauscht, eine Erneuerung der Rotorpole, sowie eine Erneuerung des Erregersystems vorgenommen worden ist. Im Zuge dieser Revitalisierung, ist auch die Scheinleistung der Maschine von 32 MVA auf 36 MVA erhöht worden. Vor dieser Revitalisierung, in der Zeit zwischen 1968 und 2012, leistete diese Maschine insgesamt 105.223 Arbeitsstunden mit 15.091 Starts.

In der Gemeinde Außerfragant steht ein weiteres Krafthaus der Gruppe mit insgesamt drei Maschinensätzen, in der auch der Generator Af2 untergebracht ist. Diese drei Maschinen beziehen ihr Triebwasser aus dem Unterwasser der Kraftwerke Innerfragant und Wölla, sowie Zuleitungen aus dem Ausgleichsbecken und umliegenden Gebirgsbächen. Der Maschinensatz Af2 vom Hersteller *FA. ELIN-UNION AG für elektrische Industrie, Werk Weiz* ist bereits im Jahr 1966 erbaut und 1967 in Betrieb genommen worden. Auch hier ist nach einer Maschinendiagnose im Jahr 2011 und Ergebnissen aus Diagnoseuntersuchungen vergangener Jahre eine Revitalisierung im selben Jahr vollzogen worden. Bis zum Zeitpunkt der Erneuerung leistete die Maschine rund 115.860 Betriebsstunden mit 17.688 Starts. Neben einer Statorerneuerung sind auch die Rotorspulen erneuert und eine neue Erregereinrichtung installiert worden. Gleich wie bei der Maschine Wu4 wurde hier auch eine Leistungserhöhung auf 36 MVA realisiert.

2.2 Systemaufbau der Generatoren Af2 und Wu4

Die Beschreibung des Systemaufbaus der Generatoren bezieht sich auf die eingebauten Komponenten der Maschinen vor der Revitalisierung im Jahr 2011 und 2012. Der Generator Af2 und der Generator Wu4 sind vom Aufbau her zwei baugleiche 3-Phasen-Synchrongeneratoren mit einer Nennleistung von 32.000 kVA bei einer Nennspannung von 10.500 Volt. Der Nennstrom der Maschine beträgt 1.760 Ampere, bei einem Nennleistungsfaktor von 0,85. Die Nenndrehzahl (n_0) der Maschine beträgt nach [1] bei einer Nennfrequenz von 50 Hz und sechs Polpaaren (p), 500 Umdrehungen pro Minute.

$$U = \frac{n_0}{p} = \frac{3000 \text{ U/min}}{6} = 500 \text{ U/min} \quad [1]$$

Der Erregerstrom für die Generatoren wird mittels externer Gleichstromerregemaschine bereitgestellt. Die Erregereinrichtung, welche auch einen Pendelgenerator beinhaltet, ist flexibel mit dem Turbinenläufer gekuppelt. Die Leistungen der Haupterreg- und Hilferregemaschine belaufen sich auf 131 kW beziehungsweise 3,85 kW.

Die beiden Maschinensätze Af2 und Wu4 sind für einen reinen Turbinenbetrieb ausgelegt. Der Maschinensatz besteht aus einem Generator mit horizontal eingebauter Generatorwelle, welche beidseitig jeweils mit einer zweistrahligigen Pelton turbine angetrieben wird. Abbildung 1 stellt den prinzipiellen Aufbau der Maschinen graphisch dar.

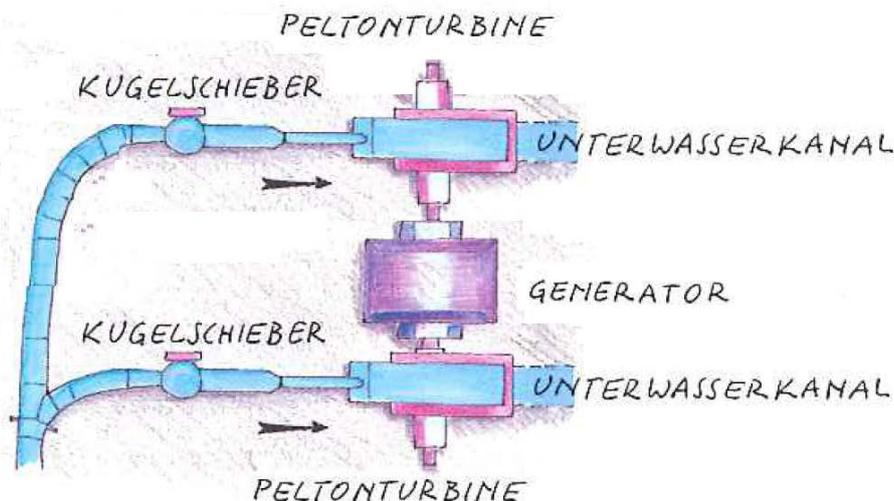


Abbildung 1: Skizze des Aufbaus der Maschine Wu4 [(KELAG) + eigene Ergänzung]

Im Zuge der Revitalisierungen im Jahr 2011 für die Maschine Af2, beziehungsweise im Jahr 2012 für die Maschine Wu4, ist neben einer Statorwicklungserneuerung auch eine Leistungserhöhung beider Maschinen von 32.000 kVA auf 36.000 kVA vollzogen worden. Des Weiteren ist die Erregereinheit beider Maschinen, welche früher aus einer Haupt- und Hilferregermaschine angeflanscht an der Rotorwelle des Generators bestand, durch eine moderne Erregereinrichtung mittels statischer Erregung im Nebenschluss ersetzt worden. Bei beiden Maschinen sind neben der Statoren auch die Rotorpole am Rotor getauscht worden.

2.3 Aufbau der Generatorstäbe und des eingesetzten Isolationssystem

Zu den wichtigsten Generatorkomponenten zählen die im Stator eingebauten Generatorstäbe. Zusammengefügt ergeben die einzelnen Stäbe die Statorwicklung des Generators. Somit kommt den Generatorstäben und in weiterer Folge der Isolation dieser Stäbe besondere Bedeutung für eine sichere Betriebsführung zu. Da sich die Untersuchungen in dieser Arbeit auf Einzelstäbe einer Generatorwicklung konzentrieren, wird in diesem Kapitel eine kurze Einführung zu Isoliermaterialien für Hochspannungswicklungen geben. Eine genaue Erläuterung ist in (Marek 2005, Rupp 2005)(Rupp 2005), (Sumereder 2008) gegeben.

Das eingesetzte Isolationssystem für Generatorstäbe hat sich im Laufe der Zeit sowohl in ihrer Wandstärke, als auch in der Materialzusammensetzung stark verändert. Zu Beginn der Isolationstechnologie ist die Ausführung der Isolierung gerne überdimensioniert für den jeweiligen Einsatz angefertigt worden. Zum einen lag das an den begrenzten Möglichkeiten der individuellen Berechnung bzw. Konstruktion für die jeweiligen Leistungsbereiche und der abgeschätzten Lebensdauer, zum anderen hat das Sparen an Werkstoffmaterial aus Kostengründen damals noch nicht so eine große Rolle gespielt wie heute. Im Laufe der Zeit sind die Isoliermaterialien weiter entwickelt worden, sodass die Wandstärke heut zu Tage aufgrund von Kosten- aber auch technischen Gründen, wie dem Abtransport von Verlustwärme, immer dünner werden. Mit Hilfe moderner Berechnungsmethoden, wie der Finite Elemente Methode, und der Verwendung von Kunstharzen tastet man sich immer näher an die physikalischen Grenzen der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien heran (Sumereder, Muhr 2009). Die stärkere Ausnutzung höherer Betriebsfeldstärken aufgrund eines geringeren Materialeinsatzes wirkt sich jedoch zunehmend auf die durchschnittliche Lebensdauer der Maschinen aus, welche, ausgegangen von den Anfängen der elektrischen Energietechnik, zurückgegangen ist. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Isolierwandstärken von Generatorstäben in den letzten 100 Jahren.

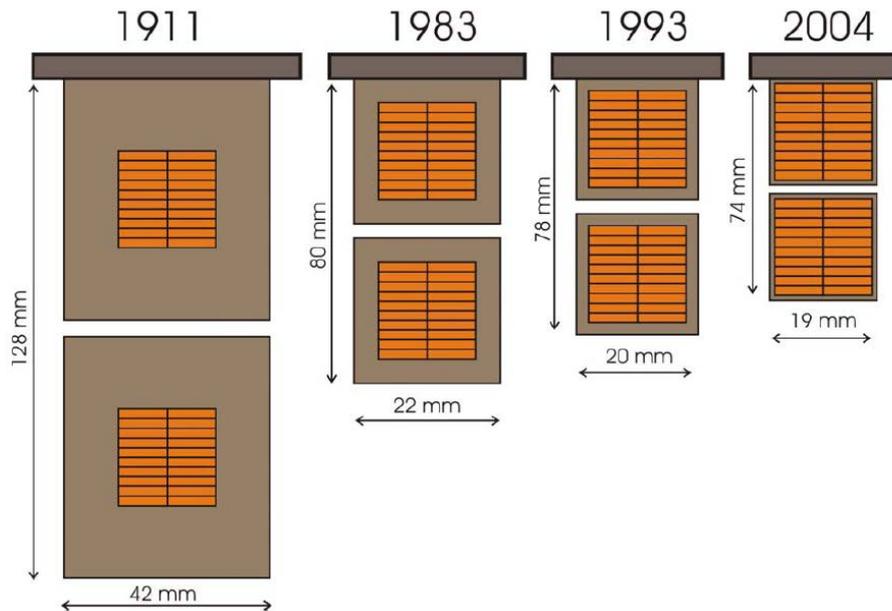


Abbildung 2: Entwicklung der Isolierwandstärken für Generatorstäbe (Sumereder 2008)

Heut zu Tage werden komplexe Kombinationen verschiedener Isoliermedien für die Isolierung von Generatorstäben verwendet. So besteht die vollständige Isolierung eines Generatorstabes aus mehreren Komponenten wie zum Beispiel der Teilleiterisolierung, der Hauptisolierung und diversen Glimmschutzmaterialien. Für die Hauptisolierung der Generatorstäbe von Hochspannungsmaschinen, diese wird in der Regel mittels Bandagen aufgebracht, werden diverse organische und anorganische Komponenten kombiniert, wobei der Aufbau des Isolierverbandes grundsätzlich aus drei Komponenten besteht. Dem Trägermaterial, dem Glimmer und einem Bindematerial. Mit Hilfe des Bindematerials kann der eigentliche Isolierstoff, der Glimmer, auf ein Trägerband aufgebracht werden, welches eine Verarbeitung des Isolierstoffes ermöglicht.

Als Trägermaterial kommen Glasgewebefolien, Glasvliese oder Kunststoffvliese zum Einsatz. Diese haben nur den Zweck, den spröden Glimmer als Träger zu dienen um diesen in Bahnen um den zu isolierenden Leiter zu wickeln. Das Glimmermaterial ist ein anorganisches Material, welches sehr beständig gegen chemische-, thermische- und elektrische Einflüsse ist. Ein weiterer Vorteil dieses Materials liegt in der relativ guten Wärmeleitfähigkeit. Da der Glimmer teilentladungsbeständig ist, wird er gerne bei teilentladungsbehafteten Systemen, wie auch Hochspannungswicklungen, eingesetzt.

Aufgrund der kristallinen Struktur ist es jedoch notwendig, den Glimmer mit Hilfe von Bindematerialien auf Trägerbahnen zu binden, um eine Verarbeitung zu ermöglichen. Als Bindematerial kommen häufig Epoxidharze bei Maschinenisolierungen zum Einsatz. Diese weisen eine gute Imprägnierfähigkeit auf und verdrängen während des Herstellungsprozesses aufgetretene Hohlräume sowie Feuchtigkeit aus der Isolierung. Gleichzeitig ist dieses Material jedoch die Schwachstelle von Hochspannungsisolierungen, da

es teilentladungsbehaftet ist und sich im Laufe der Zeit die Isolierfähigkeit des Epoxidharzes aufgrund von „*electrical treeing*“ herabsetzt. *Electrical treeing* ist ein Phänomen, welches bei teilentladungsbehafteten Systemen auftritt. Aufgrund dieser Teilentladungen bildet sich ein fein verästelter Teilentladungskanal im Isoliermaterial, welcher mit fortlaufender Zeit wachsen und sich ausbreiten kann. Dies führt zur irreversiblen Schädigung des Materials und kann schlussendlich, bei entsprechender Größe, zum Durchschlag und somit zum Versagen der Isolierfähigkeit führen (Rupp 2005).

Bei modernen Stabisolierungen werden heute prinzipiell zwei verschiedene Isoliertechniken praktiziert. Zum einen wird die Isolierung mittels Vakuum Druck Verfahren (VPI-Verfahren, Vakuum Pressure Impregnation) zur Aufbringung der Isolation um den Innenleiter angewandt, zum anderen das Spulenpressverfahren, wofür harzreiche Isolierbänder (RR - Resin Rich) eingesetzt werden.

Bei der Globaltränkung, welche in der Regel nur für kleine Maschinensätze zur Anwendung kommt, wird die bewickelte Spule in den Stator eingebaut und anschließend in einem Druckkessel imprägniert. Beim VPI-Verfahren in Einzelstabfertigung werden die Stäbe nach der Bewicklung mit dem Isolierband einzeln in einem Druckkessel imprägniert und anschließend in den Stator eingebaut. Die Hauptisolierung besteht aus einem harzarmen Glimmerband, auch poröse Bänder genannt. Der Harzanteil beläuft sich auf etwa 10% und dient hauptsächlich der Verklebung des Glimmers mit dem Trägermaterial. Nach vollendeter Wicklung des Stabes wird dieser in einem Kessel positioniert, welcher die Isolierung aushärtet. Im ersten Schritt wird im Kessel ein Vakuum erzeugt, welches der Isolierung Luft und Feuchtigkeit entziehen soll. Anschließend wird mit erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck ein Imprägnierharz in die Isolierung injiziert, welches in die Isolierung eindringt und die Hohlräume füllt. Mit dem bereits vorliegenden oder später eingebrachten Härter reagiert dieses Imprägnierharz und härtet schließlich vollständig aus.

Diese kontinuierliche Wicklung hat den Vorteil, dass Sie aufgrund der Durchgängigkeit des Isoliermaterials keine Stoßstelle aufweist und sehr gute elektrische sowie mechanische Werte der Isolierung erreicht werden. Als nachteilig erweist sich der erhöhte Aufwand der Isolationsherstellung, welcher die Wirtschaftlichkeit dieser Herstellungsart schmälert.

Eine weitere Technologie für die Generatorstabisolierung stellt das Resin Rich-Verfahren dar. Bei diesem Verfahren, werden harzreiche Glimmerbänder mit einem Harzanteil von 30-40% verarbeitet. Das Harz ist während der Wicklung bereits vollständig im Isolierband vorhanden und wird anschließend unter Pressung und hoher Temperatur vollständig ausgehärtet. Das Resin Rich-Verfahren kann auch im diskontinuierlichen Verfahren hergestellt werden, das heißt, dass der Stab nicht in einem Durchgang gewickelt wird. Die Wicklung von Nutteil und Wickelkopf ist unterschiedlich und nur der Nutteil wird mittels Pressung zu einer Nuthülse verpresst und ausgehärtet. Der Wickelkopf bleibt flexibel, was später den Einbau der Stäbe erleichtert (Sumereder 2008).

Die Statorstäbe der Maschinen Af2 und Wu4 bestehen aus 32 Teilleitern aus Profilkupfer, die zu einem Teilleiterverband zusammengefasst sind. Der Sinn der Teilleitertechnologie liegt in der Unterdrückung von Stromverdrängungseffekten im Leiter (Skinneffekt) aufgrund des vorherrschenden Wechselstromes und erhöht somit die Stromtragfähigkeit des Innleiters. Die Teilleiter besitzen eine Teilleiterisolierung aus getränkter Glasseideumspinnung und sind im Bereich des Ständerpaketes zur Verminderung von Verlusten verröbelt. Diese Verröbelung verhindert die Ausbreitung eines Streuflusses, verursacht durch die gebildete Masche zweier Teilleiter und gewährleistet, zumindest im Nutbereich eine konstante Stromaufteilung auf die Teilleiter (Müller, Vogt et al. 2008). Die beiden Ebenen des verröbelten Stabes sind durch ein Schwert aus Mikanit, das ist Glimmer verbunden mit Klebelack, getrennt. Der vorbereitete Röbelstab wird im Nutteil mit Kunstharz verfestigt, sodass das Teilleiterbündel einen soliden Block bildet.

Die Hauptisolation hat die Aufgabe, den Stab elektrisch gegen das Blechpaket zu isolieren und besteht aus Samikathermband. Dieses Isolationsmaterial ist von der Firma *ELIN* eingesetzt worden und war für die damalige Stabisolation gängiger Standard. Es besteht aus Feinglimmer, welcher in Form kleinster Schuppen auf Glasgewebepapieren aufgeklebt ist. Als Bindematerial, das die Aufgabe der Verbindung des Isoliermaterials mit dem Trägermaterial als auch die Verbindung der gewickelten Bänder untereinander hat, wird Epoxidharz verwendet. Der Anteil des Harzes im Isoliermedium beläuft sich auf 30% bis 40% und wird im Resin Rich-Verfahren verarbeitet. Das Isoliermaterial hat eine Bandbreite von 25 mm, besitzt eine Stärke von 0,17 mm und wird ohne Unterbrechungen auf die gesamte Länge des Stabes um den Teilleiterverband gewickelt. Im umpressten Stabteil werden zwölf Lagen halb überlappend, im Bereich des Wickelkopfes werden neun Lagen halb überlappend um den Teilleiterverband aufgewickelt.

Durch eine straffe Wicklung werden Lufteinschlüsse minimiert und die Isolation bis zur gewünschten Stärke aufgebracht. Eine anschließende Pressung des Stabes im Nutbereich unter bestimmter Temperatur lässt die Isolierung auf die gewünschten Abmessungen reduzieren und zu einer Nuthülse aushärten. Die gesamte Isolationsstärke der gepressten Nuthülse entspricht 2,7 mm +/- 0,1 mm Toleranz.

Das Isolationssystem der Generatoren Af2 und Wu4 im Stator sowie im Rotor ist nach ÖVE M10 (abgelöst durch IEC 60085) auf die Isolierstoffklasse B ausgelegt worden. Diese Isolationsklasse beschreibt eine Temperaturfestigkeit von 80°C Übertemperatur am Stator und 90°C Übertemperatur am Rotor. Bei einer betriebsfreundlichen Umgebungstemperatur von 40°C ergibt dies eine Isolationstemperatur von 120°C bzw. 130°C für die Isolationsklasse B (Rupp 2005).

Um Glimmerscheinungen im Statorbereich zu vermeiden, wird jeder Stab in diesem Bereich mit einem leitenden Lack großer Haftfähigkeit versehen, dem Außenglimmschutz (AGS). Im Bereich des Wickelkopfes wird zur Spannungssteuerung ein halbleitender Endenglimmschutzlack (EGS) zur Vermeidung von Gleitentladungen aufgetragen. Die

Verbindung der einzelnen Stäbe passiert an den Stabenden mittels verkeilter Löthülsen und Weichlötung. Diese Löthülsen sind anschließend mit einer aus Phenolharz gepressten Isolierkappe abgedeckt worden.

Die Befestigung der Stäbe in den Nuten erfolgt durch eine konventionelle Verkeilung. Im Wickelkopfbereich werden alle Stabenden untereinander durch mit bandagierte Distanzstücke stabilisiert.

2.3.1 Wicklungsschema der Generatoren

Das Wicklungsschema der Drehstromsynchrongeneratoren besteht aus einer gesehten Zweischicht-Wellenwicklung in Stern-Schaltung mit je 2 Stäben pro Nut. Mit dieser Auslegung wird eine Unterdrückung der Oberwellen und somit eine optimale Form der Sinusspannung gewährleistet. Über den Umfang verteilt beinhaltet der Stator für die drei Phasen insgesamt 144 Nuten (Q) mit je einem Ober- und Unterstab pro Nut. Nachdem die 3-strängige Maschine (m) sechs Polpaare (p), besitzt, entfallen nach [2] rund 4 Nuten je Pol und Phase (q) (Fischer 2009).

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{144}{2 \cdot 6 \cdot 3} = 4 \quad [2]$$

Abbildung 3 zeigt das vollständige Wicklungsschema der Statorwicklung mit den sechs ausgeführten Wicklungsenden. Zu beachten ist, dass die Reihenfolge der Wicklungsenden bei den Maschinen Af2 und Wu4 nicht ident sind. Die Abbildung 3 spiegelt die Ausführungsform der Wicklungsenden der Maschine Af2 wieder. Bei der Maschine Wu4 sind die Ausleitungsseite WVU und die Sternpunktseite ZYX und auch die Phasen WV und YZ vertauscht. Diese Vertauschung spielt bei den Stabpositionen im Stator eine Rolle und muss beim Ausbau beachtet werden. Unter Punkt 2.2.4 und 2.2.5 sind in den Abbildungen 6 und 7 sowie in den Tabellen 1 und 2 die Unterschiede der Stabpositionen im Stator ersichtlich und genauer erläutert.

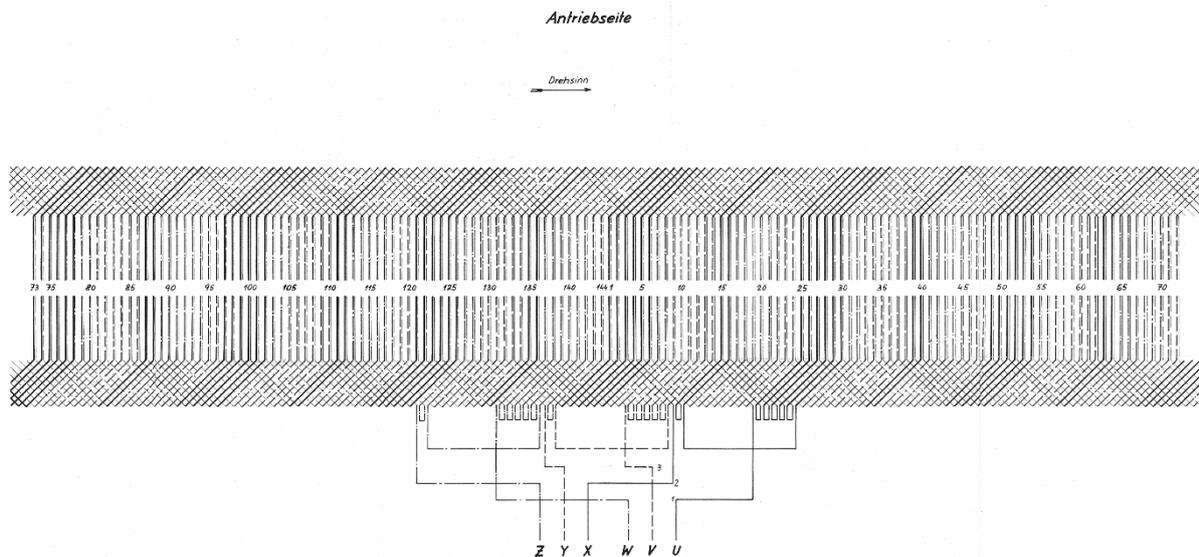


Abbildung 3: Wicklungsschema der Maschine Af2 (KELAG)

2.3.2 Beschreibung der Versuchsobjekte

Die Wicklung eines Stranges der Generatorständerwicklung besteht aus einer seriellen Verbindung einzelner Generatorstäbe zu einer durchgängigen Wicklung. Jeder Stab wird einzeln als Ober- oder Unterstab, je nach Position, in eine Nut im Ständerblechpaket eingebettet, sodass sich am Ende die Wicklungen der drei Stränge auf den gesamten Umfang des Stators verteilen.

Im Zuge der Erneuerungsmaßnahmen an den Maschinen Af2 und Wu4 sind die alten Stäbe am verlöteten Wickelkopf aufgetrennt und einzeln dem Stator entnommen worden. Somit können Untersuchungen an Einzelstäben der Statorwicklung vollzogen werden.

Die Auswahl der Versuchsstäbe und deren Positionen im Wicklungsschema erfolgt bewusst, damit Vergleiche zwischen den verschiedenen Strängen und Maschinen erfolgen können. Es werden je vier Stäbe pro Strang aus einer Statorwicklung ausgewählt, wobei nur Oberstäbe der Zweischichtwicklung als Versuchsobjekte ausgesucht werden. Die Positionen der Stäbe im Wickelschema sind so gewählt, dass der elektrische Abstand von einem Versuchsstab zum Nächsten möglichst konstant bleibt und die Vergleichswerte unter den Stäben aussagekräftig bleiben. Der Abstand zwischen zwei Versuchsstäben beträgt eine Umrundung des Stators im Wickelsinn der Wellenwicklung, was einen Zwischenraum von zwölf Stäben entspricht, wobei der erste Versuchsstab bereits die zwölfte Position in Richtung Ausleitungsseite innehatte. Der Grund dieser Auswahl liegt in der unterschiedlichen Spannungsbeanspruchung der Stabisolierung gegenüber dem geerdeten Blechpaket und der Untersuchung eines möglichen Zusammenhanges von elektrischer Alterung des Isoliermediums mit dem Einbauort. Wegen der sternpunktmäßigen Verschaltung der Stränge im Stator sind ausleitungsseitige Stäbe einer höheren elektrischen Beanspruchung gegen Blechpaket ausgesetzt als sternpunktnahe Stäbe. Da die Nennspannung der

Synchronmaschine mit 10.500 Volt vorgegeben ist, bezieht sich die Spannungsbeanspruchung des ersten Stabes eines Stranges auf Seite der Generatorausleitung auf 6.062 Volt gegenüber dem Blechpaket ($U_N/\sqrt{3}$). Der sternpunktnächste Stab liegt hingegen nahezu am gleichen Potential wie das Blechpaket des Stators, vernachlässigt man den Spannungsabfall am Stab innerhalb einer Stablänge.

Die Abnahme der Spannung gegenüber dem Blechpaket vom ausleitungsseitigen zum sternpunktnahen Stab ist in Abbildung 4 dargestellt. In dieser Abbildung wird die Abnahme der Spannung gegenüber dem Blechpaket von einem Stab zum Nächsten als linear angenommen, was für die Aussagekraft der Untersuchungen in dieser Arbeit ausreichend ist. Jeder Stab im Strang repräsentiert eine grüne Linie, wobei die Höhe der Linie von der Spannung des jeweiligen Stabes gegen Blechpaket abhängig ist. Die roten Linien repräsentieren die ausgewählten Versuchsstäbe aus dem jeweiligen Strang.

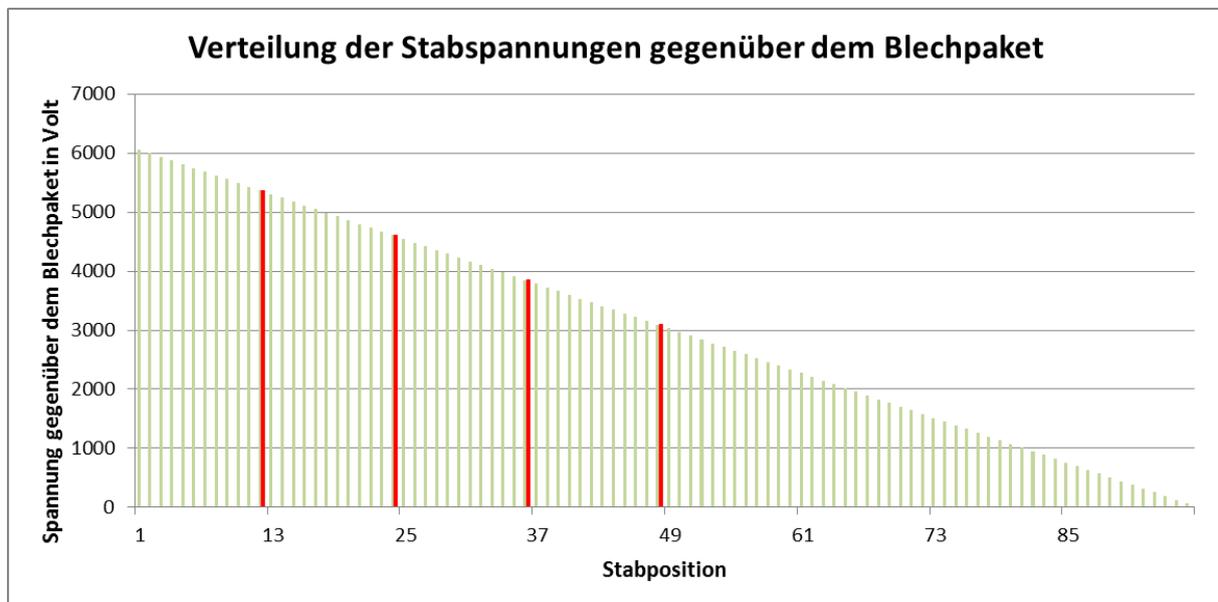


Abbildung 4: Verteilung der Stabspannungen

Wie schon erwähnt, ist der Abstand zwischen den Stabpositionen so gewählt, dass diese auf weit auseinander liegenden Spannungsebenen gegenüber dem Blechpaket liegen. Der Grund hierfür liegt in der Untersuchung des Einflusses von elektrischer Belastung auf das Alterungsverhalten des Isoliermediums. Spielt die elektrische Beanspruchung bei der Alterung während des Normalbetriebes eine große Rolle, so müsste dies messtechnisch in den Nachuntersuchungen erfassbar sein und sich auch während des Dauerspannungsversuches in der Restlebensdauer des Stabes bemerkbar machen.

In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt eines präparierten Versuchsstabes dargestellt. Um den Nutbereich des Stabes zu simulieren wird ein geerdetes Band (Lamettband) um den Stab

aufgewickelt. Zum Ende des Lamettabandes ist der Nutaustrittsbereich mit anschließendem Wickelkopf zu sehen. An der Stirnseite des Wickelkopfes ist noch ein Anschlusspunkt für die Spannungsversorgung ersichtlich. In diesem Bild sind auch die unterschiedlichen Glimmschutzanstriche an dem Stab zu erkennen. Im Wickelkopfbereich der halbleitende Endenglimmschutz in grau und im Nut- und Nutaustrittsbereich der Außenglimmschutz in schwarz des Statorstabes. Der AGS setzt sich auf die gesamte Länge des Nutbereiches, unter dem Lamettaband fort.

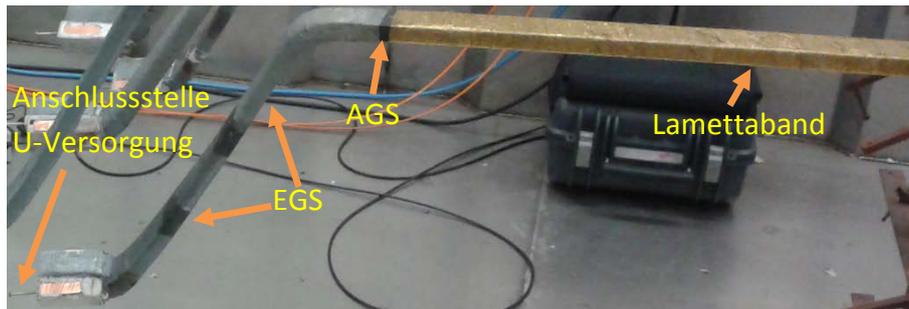


Abbildung 5: Teil eines präparierten Versuchsstabes

2.3.3 Statorstäbe aus dem Generator Af2

Aus der Maschine Af2 werden jeweils vier Versuchsstäbe pro Phase für die Untersuchung ausgewählt. Die Auswahl der Stäbe erfolgt nach den Erläuterungen aus Punkt 2.2.3.

Die Bezeichnungen der Versuchsstäbe decken sich mit der Nutnummerierung im Statorblechpaket, wobei zur besseren Orientierung die jeweilige Phase zur Stabnummerierung in Klammern hinzugefügt ist. Da die Stäbe allesamt Oberstäbe sind, entfällt dieser Hinweis bei den Bezeichnungen. Die Bezeichnungen geben keinen Aufschluss über die Position des Stabes in der Phasenwicklung und somit auch keinen Hinweis auf die ehemalige Spannungsbelastung des Stabes gegen das Blechpaket. Tabelle 1 zeigt den Zusammenhang der Stabbezeichnung und der Position des Stabes in der Phasenwicklung. Weiteres ist die jeweilige Spannungsbeanspruchung gegen das Blechpaket in der Tabelle für jeden Stab aufgeschlüsselt. Die Stabposition in der Phasenwicklung ist die jeweilige Position des Stabes von der Ausleitungsseite der Statorwicklung gezählt. Somit hat in der vorliegenden Wellenwicklung der Stab einer Phase am nächsten zur Ausleitungsseite die Position 1, der Stab am Sternpunkt die Position 96.

Phase U:			
Stabbezeichnung	Nutnummer	Stabposition in d. Phasenwicklung	Spannungsniveau gegen Blechpaket in V
Af2_25(U)	O25	12	5368
Af2_26(U)	O26	24	4610
Af2_27(U)	O27	36	3852
Af2_28(U)	O28	48	3094

Phase V:			
Stabbezeichnung	Nutnummer	Stabposition in d. Phasenwicklung	Spannungsniveau gegen Blechpaket in V
Af2_9(V)	O9	12	5368
Af2_10(V)	O10	24	4610
Af2_11(V)	O11	36	3852
Af2_12(V)	O12	48	3094

Phase W:			
Stabbezeichnung	Nutnummer	Stabposition in d. Phasenwicklung	Spannungsniveau gegen Blechpaket in V
Af2_137(W)	O137	12	5368
Af2_138(W)	O138	24	4610
Af2_139(W)	O139	36	3852
Af2_140(W)	O140	48	3094

Tabelle 1: Stabbezeichnungen der Maschine Af2

Insgesamt stehen zwölf Stäbe der Maschine Af2 für die Untersuchungen in dieser Masterarbeit zur Verfügung. In Abbildung 6 sind die verwendeten Versuchsstäbe farblich nach der jeweiligen Phase gekennzeichnet. Hier ist zu erkennen, dass Stäbe gewählt wurden, die von der Nutposition aus örtlich nebeneinander liegen, jedoch elektrisch gesehen um eine Umrundung der Wellenwicklung des gesamten Stators verschoben sind. Somit liegen immer zwölf Stäbe zwischen zwei ausgewählten Versuchsstäben.

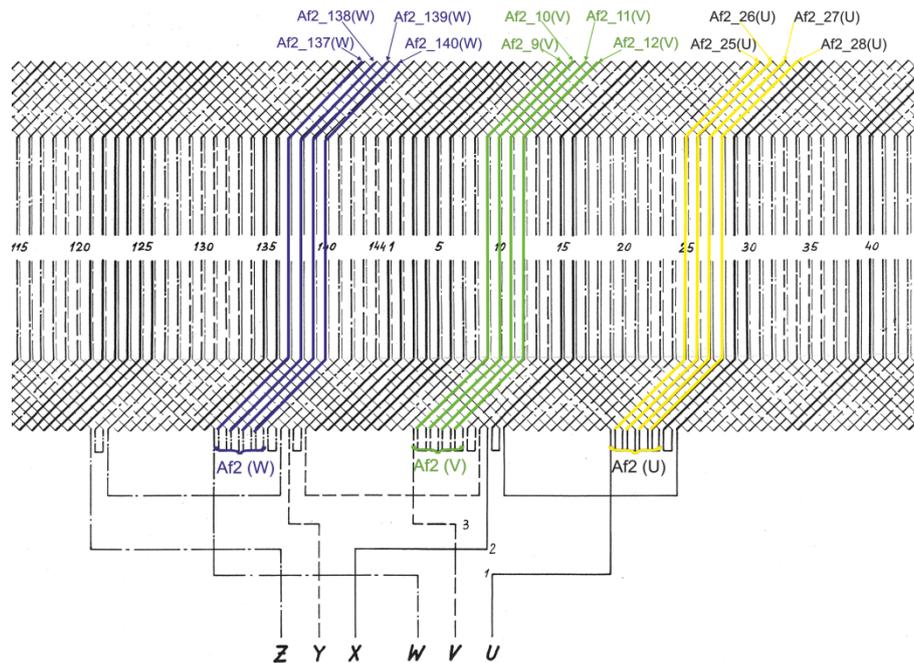


Abbildung 6: Ausgewählte Versuchsstäbe aus der Maschine Af2 [(KELAG) +eigene Ergänzung]

2.3.4 Statorstäbe aus dem Generator Wu4

Zur Untersuchung der Statorstäbe aus der Maschine Wu4 werden insgesamt 14 Stäbe zur Verfügung gestellt. Es werden jeweils vier Stäbe pro Strang, nach den Auswahlkriterien unter Punkt 2.2.3 ausgewählt und zwei weitere Stäbe aus den Strängen V und W mitgeliefert. An diesen beiden Stäben, welche später oft aus Vergleichszwecken mit den Reservestäben zusammengefasst werden, können Testmessungen im Vorfeld abgehandelt werden. Diese Testmessungen dienen dazu, Erfahrungswerte für die Messungen an den regulären Versuchsstäben zu sammeln und die Messmethoden im Vorfeld anzupassen und festzulegen. Aus diesem Grund wird auf eine Positionsermittlung dieser Stäbe verzichtet und die Stäbe in Tabelle 3 zu den Reservestäben hinzugefügt.

Zu beachten ist bei der Maschine Wu4, dass die Anschlusspunkte der Generatorausleitung nicht dieselben der Maschine Af2 sind. Aufgrund dessen ist auch der Wicklungssinn der Ständerwicklung unterschiedlich zur Maschine Af2. Eine Umkehr des Wicklungssinnes innerhalb der ausgewählten Stäbe hat auch eine Verschiebung der Positionen des dritten und vierten Versuchsstabes aus der jeweiligen Phase zur Folge, da eine Wicklungsumkehr im Schema enthalten ist. Da die Verschiebung aber nur eine Position umfasst ändert sich die Spannung gegen Blechpaket nur um etwa 63 V gegenüber den Stäben der Maschine Af2. Somit rücken bei der Maschine Wu4 die Stabpositionen des dritten und vierten Versuchsstabes einer Phase von Position 36 und 48 auf 37 und 49 und sind auch nicht mehr in den Nachbarnuten der anderen Versuchsstäbe eingebaut. Diese geringe

Spannungsdifferenz wird aber in weiterer Betrachtung und speziell beim Vergleich der Ergebnisse der Maschinen vernachlässigt.

Phase U:			
Stabbezeichnung	Nutnummer	Stabposition in d. Phasenwicklung	Spannungsniveau gegen Blechpaket in V
Wu4_15(U)	O15	12	5368
Wu4_16(U)	O16	24	4610
Wu4_29(U)	O29	37	3789
Wu4_28(U)	O28	49	3031

Phase V:			
Stabbezeichnung	Nutnummer	Stabposition in d. Phasenwicklung	Spannungsniveau gegen Blechpaket in V
Wu4_127(V)	O9	12	5368
Wu4_128(V)	O10	24	4610
Wu4_141(V)	O11	37	3789
Wu4_140(V)	O12	49	3031

Phase W:			
Stabbezeichnung	Nutnummer	Stabposition in d. Phasenwicklung	Spannungsniveau gegen Blechpaket in V
Wu_143(W)	O137	12	5368
Wu4_144(W)	O138	24	4610
Wu4_14(W)	O139	37	3789
Wu4_13(W)	O140	49	3031

Tabelle 2: Stabbezeichnung der Maschine Wu4

Ersichtlich ist die Änderung des Wicklungssinnes in Abbildung 7. In dieser Abbildung sind die ehemaligen Positionen der Versuchsstäbe farblich eingezeichnet. Weiteres ist bei einem Vergleich mit Abbildung 6 auch der Unterschied bezüglich Ausleitung und Sternpunkt zur Maschine Af2 zu erkennen.

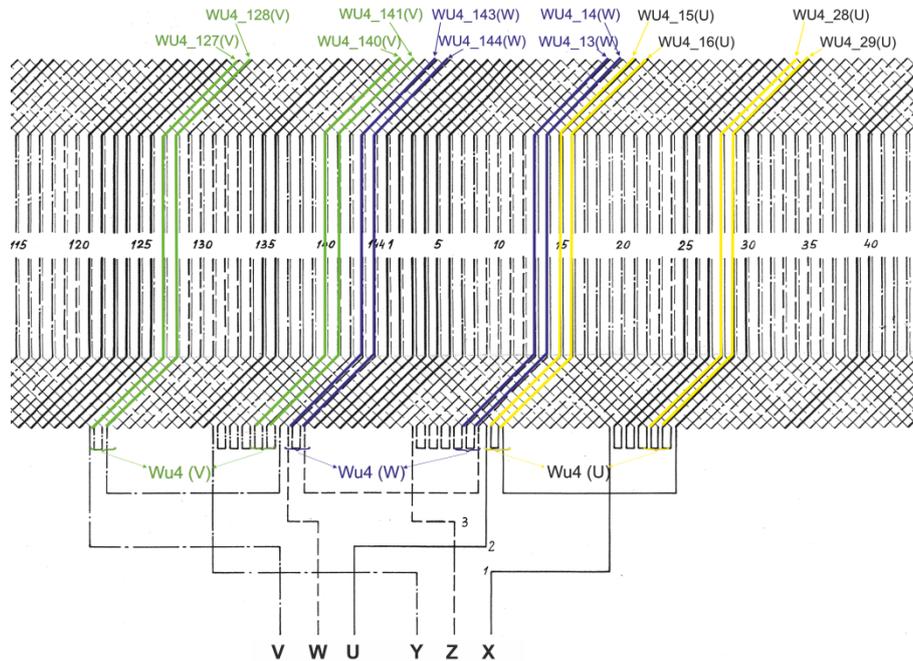


Abbildung 7: Ausgewählte Versuchsstäbe aus der Maschine Wu4 [(KELAG) +eigene Ergänzung]

2.3.5 Reservestäbe

Zu Vergleichszwecken werden den Generatorstäben der Maschine Af2 und Wu4 sechs Reservestäbe hinzugefügt, welche bereits zum Zeitpunkt der Auslieferung und Inbetriebnahme der Maschinen als Reserve gelagert und aufbewahrt worden sind.

Da die Reservestäbe keinerlei Vorbelastung ausgesetzt waren, sollten diese mit neuwertigen Stäben gleichzusetzen sein und liefern somit einen guten Vergleichswert zu den betriebsgealterten Stäben der Maschine Af2 und Wu4. Die Bezeichnung der Stäbe ist in Tabelle 3 aufgelistet, wobei diese lediglich einer einfachen Nummerierung unterzogen sind. Weiteres sind die Zusatzstäbe aus der Maschine Wu4 ebenfalls in dieser Tabelle eingetragen und für eine besondere Bezeichnung dieser Stäbe mit einem „R“ für den Hinweis auf „Reservestab“ markiert. Diese Bezeichnung ist nicht mit einem neuwertigen Reservestab zu verwechseln, sondern soll lediglich die beiden Zusatzstäbe von „regulären“ Versuchsstäben unterscheiden.

Reservestäbe:	
Stabbezeichnung	Vorbelastung:
R1	keine
R2	keine
R3	keine
R4	keine
R5	keine
R6	keine
RWu4_27(W)	Wu4 Phase W
RWu4_139(V)	Wu4 Phase V

Tabelle 3: Stabbezeichnungen der Reservestäbe

R = Reservestäbe

RWu4 = Zusätzliche Stäbe der Maschine Wu4

3 Durchgeführte Untersuchungen

Abbildung 8 gibt einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen, welche in dieser Masterarbeit abgehandelt werden. Eine detailliertere Erörterung findet in den anschließenden Kapiteln statt.

Grundsätzlich kann man die Durchführung der Untersuchungen in drei große Blöcke teilen. Den Vorfelduntersuchungen, der Dauerversuchsmessung und den Nachuntersuchungen.

Zu den Vorfelduntersuchungen zählen neben der optischen Voruntersuchung, welche die Reinigung der Stäbe, die visuelle Schwachstellenuntersuchung und deren Dokumentation beinhaltet, auch die elektrischen Eingangsmessungen. Hier werden elektrische Diagnosemessungen unter drei definierten Temperaturniveaus durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Messungen an den Versuchsobjekten, sowie eine erste Zustandsbewertung der Stäbe veranschaulichen zu können.

Die anschließende Festlegung des Spannungsprüfpegels für die Konstantspannungsprüfung stellt den Übergang zu den Dauerversuchsmessungen dar. Die elektrische Dauerbeanspruchung wird zur künstlichen Alterung der Stäbe eingeführt und alle 40-beziehungsweise 80 Stunden unterbrochen, um elektrische Zwischenmessungen zur Zustandsbewertung an den Versuchsobjekten durchführen zu können. Diese Dauerbeanspruchung wird bis zum Isolationsversagen jedes Stabes fortgeführt.

Nach dem Ausfall eines Stabes wird die Laufzeit während der Dauerversuchsmessung dokumentiert, um später eine statistische Auswertung der Laufzeiten aller Stäbe aufstellen zu können.

Zum Kapitel der Nachuntersuchungen zählen die optische Nachuntersuchung sowie eine anschließende Harzanalyse an ausgewählten Stäben.

Bei den visuellen Nachuntersuchungen werden Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit dokumentiert, sowie die Durchschlagstelle am Generatorstab genau erfasst. Eine anschließende Untersuchung auf den Harzgehalt der Stäbe kann weitere Erkenntnisse zur Isolationsbeschaffenheit ergeben, sowie Schlussfolgerungen der elektrischen Untersuchungen untermauern.

Des Weiteren ist von der UWB in Tschechien eine DSC- (Differential Scanning Calorimetry) und STA-Analyse (Simultaneous Thermal Analysis) an Isolationsproben angeboten worden. Das Angebot wird gerne angenommen und die Messergebnisse dieser Untersuchung im Anschluss kurz erörtert.

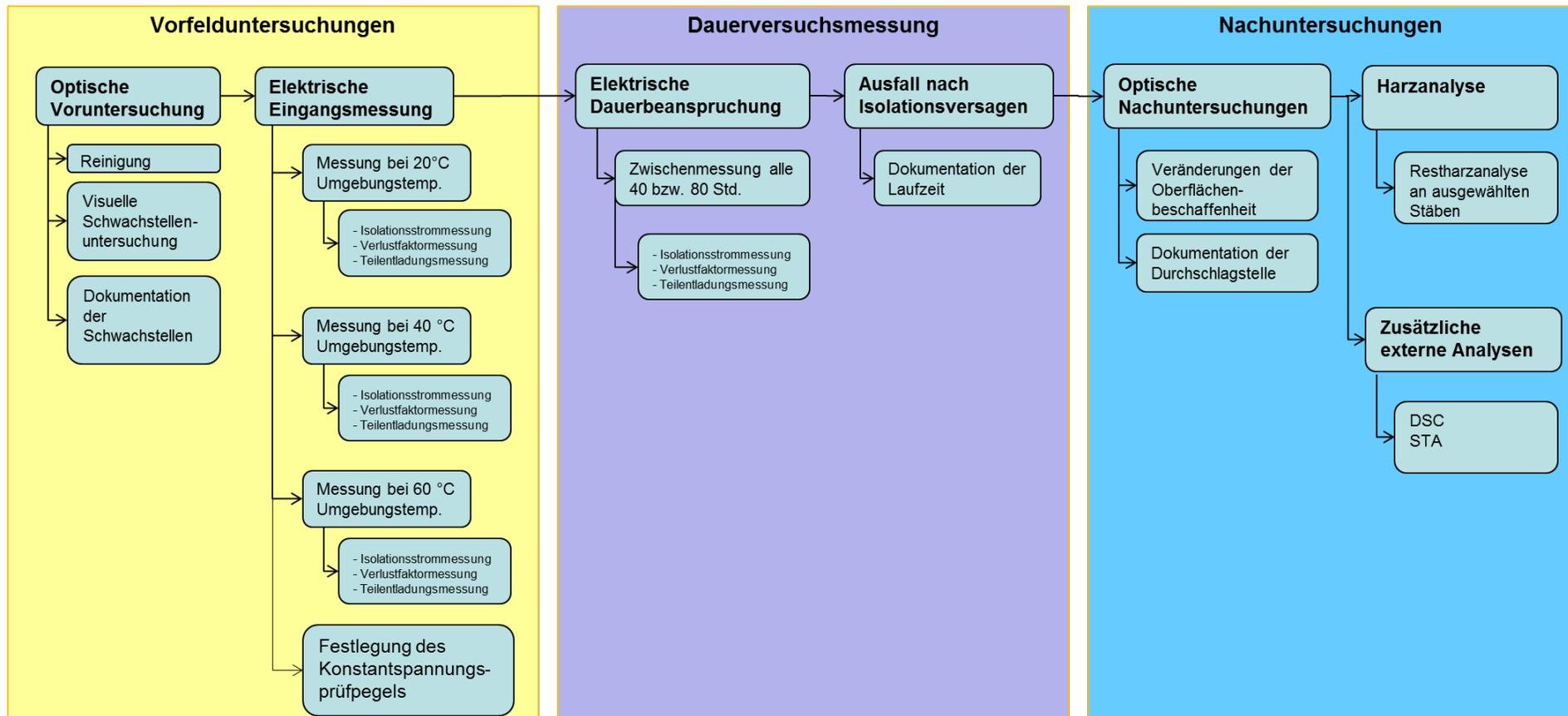


Abbildung 8: Durchgeführte Untersuchungen an den Statorstäben

3.1 Vorbereitung und Aufbau der Versuchsmessung

3.1.1 Vorbereitung der Versuchsstäbe

Der Ablauf der Prüfungen an den Versuchsobjekten von Wu4 und Af2 besteht aus einer definierten Reihenfolge aus optischen Untersuchungen und elektrischen Prüfungen. Im Vorfeld werden die gelieferten Stäbe visuell auf Schäden hin untersucht und gereinigt. Schwachstellen sowie Auffälligkeiten werden dokumentiert und an den Stäben gekennzeichnet sowie bildlich festgehalten, um bei später auftretenden Schäden Rückschlüsse auf Schädigungen vor den Prüfungen an den Stäben ziehen zu können.

Die anschließende Präparierung der Stäbe beschränkt sich bewusst auf eine grobe Reinigung der Staboberfläche und der Montage eines Anschlusspunktes für die Spannungsquelle, um den Originalzustand der gelieferten Versuchsobjekte nicht zu verfälschen. Nur wo aufgrund starker offensichtlicher Beschädigung des Isoliermaterials Ausbesserungsarbeiten zur Fortführung der elektrischen Untersuchungen notwendig sind, werden diese vollzogen. Das Aufbringen eines leitfähigen Lamettabandes, mit welchem der Nutbereich des Stabes umwickelt wird, dient als Gegenelektrode für die Messungen und zur Simulation des Ständerblechpaketes, wobei Augenmerk auf eine straffe Wicklung zur gleichmäßigen Potenzialsteuerung gelegt wird. Das Lamettaband wird geerdet und im Nutbereich des Stabes auf einer Gesamtlänge von 145 cm des Generatorstabes aufgebracht. Diese Länge entspricht der axialen Länge des Statorblechpaketes. Auf die Bildung einer Luftbrücke, für die Verwendung einer Schutzringanordnung während der Verlustfaktormessung wird verzichtet, da einerseits das verwendete Verlustfaktormessgerät keinen potentialfreien Messaufbau verlangt und andererseits zwar Einflüsse des Wickelkopfes in das Messergebnis mit einfließen, diese jedoch auch bei gängigen Routineuntersuchungen eingebauter Wicklungen im Generator mit gemessen werden. Abbildung 9 zeigt den Zustand eines prüfbereiten, präparierten Generatorstabes.

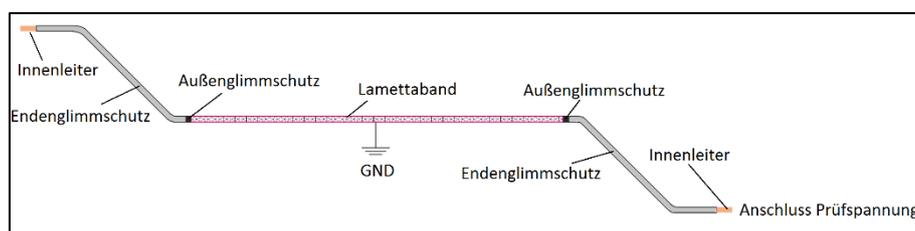


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau des Versuchsstabes

Da der Wickelkopfbereich einiger Stäbe aufgrund des Ausbaus aus dem Statorblechpaket und aufgrund der Entfernung der äußeren Schutzhülle (siehe Abb. 15) teilweise stark beschädigt ist, wird an notwendigen Stellen zur Feldsteuerung ein Endenglimmschutzlack im Krümmungsbereich nahe des Nutaustrittsbereiches des Wickelkopfes aufgetragen. Diese Maßnahme hilft eine gleichmäßige Potentialsteuerung und die Spannungsstabilität des

Wickelkopfes während der Dauerspannungsbeanspruchung zu gewährleisten und Gleitladungen zu vermeiden. Zusätzlich wurde an einigen Stäben während Spannungsbeanspruchung im Dauerversuch ein halbleitendes EGS -Band aufgewickelt, welches vor den Zwischenmessungen wieder entfernt wurde.



Abbildung 10: In die Haltevorrichtung eingespannte Versuchsstäbe

Die Stäbe werden anschließend in eine Eisenhalterung gespannt, wobei hier das leitfähige Lamettband gut mit der Eisenkonstruktion verbunden wird, um eine gute Erdverbindung des Messaufbaus sicher zu stellen. Der Aufbau wird im Extremklimaraum der Technischen Universität Graz vollzogen, da während den Eingangstests auch die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Messungen dokumentiert werden und dieser Raum auf verschiedene Temperaturniveaus geregelt werden kann. In oben stehender Abbildung 10 sind bereits 5 Versuchsstäbe in die Haltevorrichtung messbereit montiert.

3.1.2 Vorbereitung des Messaufbaus

Der Aufbau der Messung kann unterteilt werden in den Aufbau für den Dauerspannungsversuch und den Aufbau für die elektrischen Diagnosemessungen. Hierbei ist die Spannungsversorgung dieselbe, es kommen lediglich weitere Messinstrumente für die Diagnosemessungen hinzu. Die Spannungsversorgung wird, außer bei der Isolationswiderstandsmessung, mit einer Wechselspannungsquelle realisiert. Die Frequenz entspricht mit 50 Hz genau der ursprünglichen Nennfrequenz der Maschine. Tabelle 4 enthält die verwendeten Gerätschaften eingeteilt zu den jeweiligen Messversuchen.

Der Aufbau für den Dauerspannungsversuch besteht in einer einfachen Anordnung aus der spannungsvariablen Hochspannungsquelle mit den Messobjekten und kann als Grundschaltung für die Messungen gesehen werden. Als Spannungsquelle dient der Hochspannungstransformator *HAEFELY PZTL 100-0.25* mit einer Leistung von 25 kVA und 100 kV Maximalspannung auf der Sekundärseite. Aufgrund der begrenzten Leistung des Transformators können während des Dauerversuches nur 5 Stäbe parallel beansprucht werden, was die Dauer der Messungen verlängert. Zur Kontrolle der angelegten Spannung wird diese mit Hilfe eines kapazitiven Teilers, bestehend aus C1 und C2, mit einem einfachen Spannungsmessgerät überwacht. Um den Transformator im Dauerbetrieb nicht zu überlasten, wird nach jedem Einschaltvorgang der Primärstrom am Transformator gemessen. Abbildung 11 stellt die Grundschaltung und die Schaltung für den Dauerspannungsversuch mit den verwendeten Geräten schematisch dar.

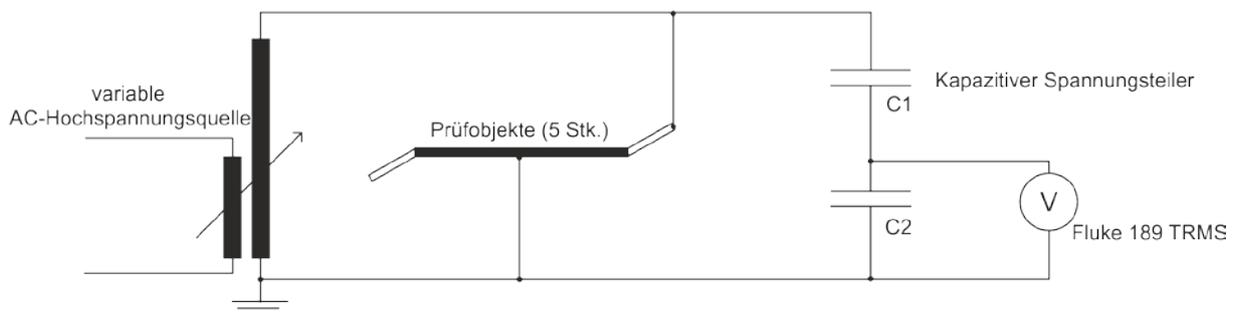


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Dauerspannungsversuches

Die elektrischen Untersuchungen bei der Eingangsprüfung und den Zwischenprüfungen werden einzeln an jedem Versuchsstab durchgeführt und aufgezeichnet. Die gewonnenen Messergebnisse sind sogleich in eine Tabelle zu übertragen, um später Zusammenhänge aus den einzelnen Untersuchungen zu gewinnen.

Bei der Teilentladungsmessung wird die Spannungsmessung mittels Voltmeter nicht mehr benötigt, da die anliegende Spannung am Prüfling mit dem Messsystem automatisch mit aufgezeichnet wurde. Das Messsystem *LDS-6* der Firma *LEMKE* besteht aus einem Koppelkondensator (*PDDC-24*), welcher parallel zum Prüfobjekt geschlossen wird und bereits einen Koaxialausgang zur Signalübertragung an die Messimpedanz besitzt. Die Messimpedanz (*LDM-5/U*) wird an diesen Koppelkondensator angeschlossen und überträgt das Messsignal sowie den Spannungswert der angelegten Spannung an die Auswerteeinheit. Diese wird mit einem PC verbunden und mittels beiliegender Software analysiert. Zur Kalibrierung des Messsignals kommt der Kalibrator *LDC-5/S3* zum Einsatz, der vor der TE-Messung parallel zum Versuchsobjekt angeschlossen wird und das Kalibriersignal einspeist. In Abbildung 12 ist der Versuchsaufbau für die Messung inklusive Kalibrator schematisch dargestellt.

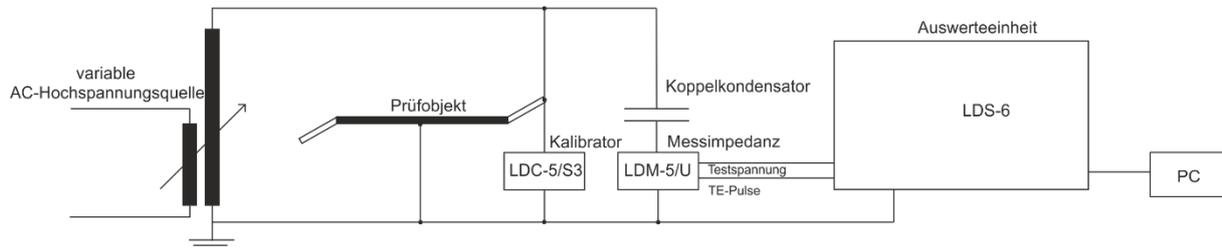


Abbildung 12: Schematischer Aufbau der TE-Messung

Für die Verlustfaktormessung mittels vektorieller Impedanzmessung wird das Messsystem *LEMKE LDV-6* System eingesetzt. Bestehend aus einem Messsensor und einem Referenzsensor wird das gemessene Signal über Lichtwellenleiter an eine USB-Box geleitet. Der Messsensor wird, bei geerdeten Prüfobjekten, in Serie vor das jeweilige Prüfobjekt geschlossen, und der Referenzsensor in Serie zu einem Referenzkondensator. Der Referenzkondensator ist in der verwendeten Prüfschaltung ein Pressgaskondensator mit einer Kapazität von $37,13 \mu\text{F}$. Der Kapazitätswert des Referenzkondensators muss anschließend in der Messsoftware hinterlegt werden, damit der richtige Verlustfaktorwert für das Prüfobjekt ermittelt werden kann. Die USB-Box wandelt das Lichtsignal wieder in ein elektrisches um und sendet es an einen verbundenen PC weiter. Die Messsoftware zeigt dann die gemessenen Verlustfaktorwerte inklusive ermittelter Kapazität des Prüfobjektes am Bildschirm an. Der schematische Aufbau der Versuchsmessung für die Verlustfaktormessung ist in Abbildung 13 dargestellt.

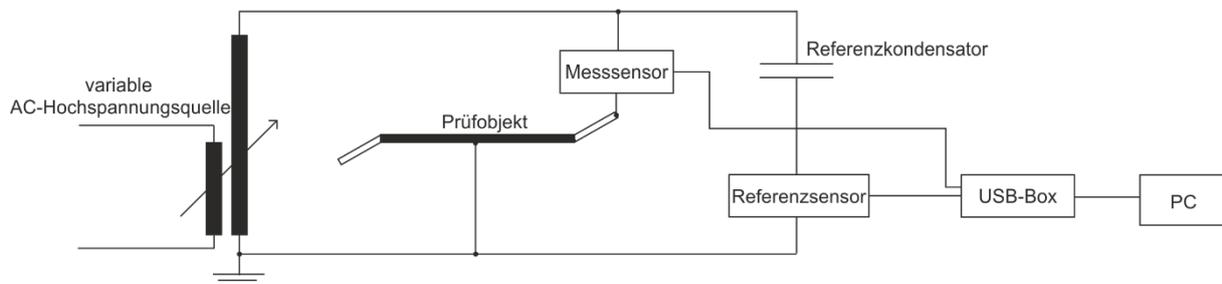


Abbildung 13: Schematischer Aufbau der Verlustfaktormessung

Für die Messung des Isolationswiderstandes werden die Versuchsobjekte vom Hochspannungstransformator getrennt und an das Isolationswiderstandsmessgerät *MEGGER MIT520* angeschlossen. Wie unter Punkt 3.4.1 beschrieben, hat dieses Messgerät eine interne Gleichspannungsquelle mit eingebautem Messwerkzeug. Die Messschaltung hierfür ist in Abbildung 20 in Kapitel 3.4.1.2 ersichtlich.

Durchgeführte Untersuchungen

Vor jeder Versuchsmessung werden mit einem geeigneten Messgerät die Umgebungstemperatur, der Luftdruck sowie die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung gemessen. Gleichzeitig wird die Kupfertemperatur des Innenleiters am Prüfobjekt mittels Thermoelement ermittelt, um diese Daten später beim Vergleich der Messergebnisse berücksichtigen zu können.

Versuch	Gerät	Gerätename	Inventar-/ Seriennummer	Wert
<i>Elektrische Versuche und Temperaturmessungen</i>	AC-Spannungsquelle	HAEFELY PZTL 100-0.25	P3-04028.1	-
	Pressgaskondensator	Pressgaskondensator	70/367 409	37,13pF
	Kondensator	Kondensator	-	1000pF
	Spannungsmessgerät	Fluke 189 TRMS	32925	-
	Digitalthermometer	Greisinger electronic GFTB 100	-	-
	Thermoelement	Fluke Thermoelement	-	-
	Stromzange	Fluke AC-Current Probe 80i-400	-	-
<i>TE-Messung</i>	Koppelkondensator	LDIC PDDC-24	207410091	2/2200nF
	TE-Auswerteeinheit	LDS-6	32246181	-
	Kalibrator	LDC-5/S3	-	-
	Messimpedanz	LDIC LDM-5/U	81926131	-
<i>IR-Messung</i>	Isolationswiderstands- messgerät	Megger MIT520	MIT520- EU/060706/1150	-
<i>Verlustfaktormessung</i>	Verlustfaktormesssensor	LDV-5	1563622/R	-
	Verlustfaktormesssensor	LDV-5	1563622/M	-
	2 Stk. Akku pack	Akku pack	-	-
	USB-LWL Adapter	USB-Box	-	-
<i>Harzanalyse</i>	Industrieofen	Naber Industrieofen	L51/S R	1,2 kW
	Präzisionswaage	A&D Instruments GR- 300-EC	14223844	-
	Temperaturmesspistole	Raytec RAYNGER 3i	-	-

Tabelle 4: Tabelle der verwendeten Messgeräte für die elektrischen Versuchsmessungen

3.2 Eingangsprüfungen

Nach der der Entscheidung, das Wicklungssystem der Generatoren Af2 und Wu4 zu erneuern, wurden die Generatorstäbe ausgebaut und zwischengelagert. Um den aktuellen Zustand der gelieferten Stäbe festzustellen, müssen Voruntersuchungen vollzogen werden. Eingangs wird dies mittels einfacher optischer Begutachtung und einer groben Reinigung der Stäbe von Staub und Schmutz durchgeführt.

3.2.1 Visuelle Untersuchung der Stäbe Af2

Die Visuelle Inspektion ist nicht nur ein fixer Bestandteil vor Instandhaltungsmaßnahmen, sondern auch ein wichtiges Instrument bei jeglicher Art von Überprüfungen. Vor jeder Durchführung von technischen Diagnosemethoden eines Betriebsmittels, ist eine visuelle Inspektion ratsam, da verschiedene Erkenntnisse über den Zustand des Betriebsmittels gewonnen werden und auch längerfristige Entwicklungserscheinungen festgehalten werden können. Auffälligkeiten sollten genau dokumentiert, beschriftet und vor Reinigungen und Reparaturarbeiten aufgezeichnet werden, um später Vergleiche anstellen zu können. Unter Zuhilfenahme von Erfahrungswerten und Expertenwissen gibt eine visuelle Untersuchung schnell Aufschluss über den Grobzustand des vorliegenden Prüfobjektes und kann wichtige Erkenntnisse zur weiteren Vorgehensweise mit technischen Diagnosemethoden liefern.

Der optische Ersteindruck der Maschinenstäbe Af2 erweist sich als durchwegs positiv. Der Außenglimmschutz hat eine kompakte und feste Konsistenz, gleich wie bei den Reservestäben. Teilweise sind im Nutbereich Abnutzungen beziehungsweise kleinere Glimmstellen entdeckt und mittels Permanentmarker markiert worden, um später auf mögliche Schadensursachen, verursacht durch diese Schwachstellen, Rückschlüsse ziehen zu können.

Im Vergleich zu den Stäben Wu4 haben die Stäbe der Maschine Af2 relativ wenig offensichtliche Schadensstellen vorzuweisen. Teilweise sind Spuren von Beschädigungen zu erkennen gewesen, welche vermutlich durch den Ausbau der Stäbe passiert sein dürften. Auch diese sind markiert worden, um später Rückschlüsse auf ein etwaiges Isolationsversagen aufgrund dieser Schädigungen machen zu können.

Bei den Stäben Af2_11(V) sowie Af2_25(U) ist eine erhebliche Beschädigung des AGS und der Hauptisolation vorgefunden worden. Vermutlich passierte die Beschädigung während des Ausbaues, weil hier teilweise die Hauptisolierung herunter gebrochen war. Diese Isolationschwachstelle zeigt nicht nur wegen der verminderten Isolierwandstärke einen erheblichen Mangel auf. Die Tatsache, dass hier ein relativ großer Hohlraum zum geerdeten Lamettband entsteht, lässt ein erhöhtes Teilentladungsaufkommen in diesem Bereich vermuten. Zur Unterbindung dieser ungewollten Aktivität, ist an diesen Punkten ein neuer AGS-Lack aufgetragen worden. In Abbildung 14 ist die Schadensstelle am Generatorstab

Af2_11(V) ersichtlich und einem Stab mit verhältnismäßig gut erhaltenem Nut- und Wickelkopfbereich gegenübergestellt.



Abbildung 14: Links: Af2_27(U) optisch gut erhaltener Stab. Rechts: Af2_11(V) Stab mit starker Vorschädigung

Die Wickelköpfe der Maschinenstäbe Af2 sind vom optischen Ersteindruck relativ sauber gewesen. Beschädigungen des EGS-Lackes und Verschmutzungen hielten sich in Grenzen, sodass hier nur wenige Ausbesserungsmaßnahmen im Bereich des Wickelkopfes gemacht werden müssen. Speziell im Krümmungsbereich des Wickelkopfes, nahe dem Nutaustrittspunkt, ist auf die Konsistenz und auf das Erscheinungsbild des EGS-Lackes geachtet worden, da in diesem Bereich während der Dauerspannungsbeanspruchung eine hohe Feldstärke zu tragen kommt. An Teilen, wo der EGS-Lack herunter geblättert war, ist ein neuer, halbleitender Potentialsteuerungslack aufgetragen worden.

Ziel ist es die ursprüngliche Oberflächenbeschaffenheit der Glimmschutzbeläge vor dem Ausbau der Stäbe zu erhalten, um das Messergebnis dem Zustand der Hauptisolierung der Stäbe zuordnen zu können.

3.2.2 Visuelle Untersuchung der Stäbe Wu4

Der erste Eindruck des Gesamtzustandes der Stäbe von Wu4 fällt um einiges schlechter aus als bei den Versuchsobjekten der Maschine Af2. Der Außenglimmschutzlack ist hier stärker erodiert und hat eine recht ölig/schmierige Konsistenz. Die Haftung des AGS-Lackes an der Hauptisolierung ist hier auch stark beeinträchtigt, sodass dieser relativ leicht ablösbar ist. Die durchschnittliche Anzahl an Schadensstellen an den Stäben ist nicht so leicht abzuschätzen wie bei den Stäben Af2, da die Makel eher großflächiger Natur sind. Der Gesamtzustand des Nutbereiches kann aber als „schlechter“ als bei den Stäben der Maschine Af2 zusammengefasst werden. Auffällig bei den Stäben Wu4 ist, dass diese erheblich viele Mängel im Bereich der Schmalseite aufweisen.

Die Stäbe Wu4_13(W) und Wu4_29(U) haben im Vorfeld markante Schädigungen aufgewiesen, welche vermutlich durch den Ausbau der Stäbe verursacht wurden. Der Stab Wu4_13(W) zeigt im Bereich der Schmalseite erhebliche Mängel am AGS-Lack und an der Isolierung. Beim Stab Wu4_29(U) ist die Hauptisolation, ähnlich wie beim Stab Af2_11(V), stark beschädigt. Hier ist der AGS-Lack teilweise erneuert worden. Eine weitere Auffälligkeit von starker AGS-Erosion zeigt der Stab Wu4_143(W). Hier ist im Bereich des Ständereisens der AGS vollständig abgetragen worden. Auf eine AGS-Erneuerung in diesem Bereich ist verzichtet worden, da der optische Eindruck keine eindeutige Zuordnung auf eine Beschädigung während des Ausbaues erlaubt.

Der Wickelkopfbereich dieser Maschine ist ebenfalls stark verunreinigt und hat eine ölige Oberflächenbeschaffenheit. Eine Reinigung der Oberfläche hat diesem Umstand Abhilfe geschaffen und ermöglicht weiteres die Untersuchung des EGS-Anstriches in diesem Bereich. Dieser Anstrich ist bei den Stäben der Maschine Wurten 4 oft abgeblättert, sodass die Hautisolation darunter gut sichtbar ist. Ein neuer Anstrich, wie teilweise bei den Stäben Af2 passiert, ist hier auf die Fehlerstellen aufgetragen worden, um zu gewährleisten, dass die Versuchsobjekte der dreifachen Nennspannungsbelastung der standhalten. Abbildung 15 zeigt eine solche Abblätterung der Endenpotentialsteuerung am Stab WU4_16(U) vor der Präparation.



Abbildung 15: Links: WU4_16(U) mit abgeblätterter Endenpotentialsteuerung. Rechts: Wu4_127(V) mit AGS – Erosion im Bereich der Stabschmalseite

3.2.3 Elektrische Vorfeldmessungen unter definierten Temperaturniveaus

Nach den optischen Voruntersuchungen sind die Stäbe wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, präpariert und mittels Haltevorrichtung im Extremklimaraum montiert (siehe Abb. 10) worden. Im Anschluss werden die elektrischen Vorfeldmessungen, oder Eingangsmessungen, an allen vorhandenen Versuchsstäben durchgeführt. Diese Messungen bestehen aus einer Isolationswiderstandsmessung, einer Verlustfaktormessung und einer Teilentladungsmessung die an jedem Versuchsstab separat durchgeführt werden. Ziel dieser Eingangsmessungen ist es, den Momentanzustand der Stäbe zu eruieren, bevor diese mit hoher Wechselspannung der künstlichen Alterung zugeführt werden. Mit Hilfe der Eingangsmessungen sollten auch gleich Auffälligkeiten an einzelnen Stäben erkennbar sein, sofern diese Unregelmäßigkeiten im Isoliermaterial aufweisen. Die elektrischen und dielektrischen Diagnosemethoden werden nach Vollendung der Eingangsmessungen miteinander und unter Einbeziehung der optischen Voruntersuchungen verglichen.

Die Eingangsmessungen werden unter drei verschiedenen Umgebungstemperaturen vollzogen. Es sind jeweils Messwerte bei 20°C, bei 40°C und 60°C aufzunehmen. Zu beachten ist, dass mit der Messtemperatur die Umgebungstemperatur im Klimaraum gemeint ist. Die Kupfertemperatur und somit in guter Näherung die Isolationstemperatur liegen aufgrund der eingeschränkten Erwärmungsphase etwas darunter. Wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit von der 20°C, 40°C oder 60°C Messung gesprochen, so ist damit die Umgebungstemperatur gemeint. Der Grund für die Erwärmung der Versuchsobjekte im Extremklimaraum liegt in der Temperaturabhängigkeit der Messwerte. Da sowohl Isolationswiderstand, Verlustfaktor als auch Teilentladungen eine Temperaturabhängigkeit aufweisen, sollte dies bei allen Messmethoden unter den verschiedenen Temperaturen klar ersichtlich sein. Die Ergebnisse der Temperaturmessung geben dann Aufschluss über die Empfindlichkeit der Messung bei verschiedenen Temperaturniveaus und ermöglichen eine Abschätzung inwiefern historisch aufgenommene Messwerte unter verschiedenen Temperaturniveaus überhaupt vergleichbar sind.

Nachdem alle Stäbe im Extremklimaraum gelagert sind, werden diese nach Vorgabe der Solltemperatur (20°C/ 40°C/ 60°C) für ca. 15 Stunden erwärmt. Nach der Erwärmungsphase auf die jeweilige Temperatur wird an allen Stäben eine Isolationswiderstandsmessung, eine Verlustfaktormessung und eine Teilentladungsmessung durchgeführt und das Messprozedere bei allen Temperaturen wiederholt. Gleichzeitig werden die Umgebungstemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck, sowie die Kupfertemperatur der Versuchsobjekte aufgezeichnet. Alle Werte werden maschinenspezifisch zusammengefasst und in eine Tabelle eingetragen. Die verwendeten Gerätschaften sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Da die elektrischen Vorfeldmessungen kongruent mit den Zwischenmessungen während der Dauerspannungsbeanspruchung sind, wird der Ablauf jeder Prozedur in Kapitel 3.4 genau erläutert.

3.3 Festlegung des Spannungsprüfpegels für die Dauerspannungsprüfung

Ziel der Dauerspannungsprüfung ist es, nach den Eingangsprüfungen der betriebsgealterten Generatorstäbe, diese weiter künstlich altern zu lassen und Veränderungen des Isolationswiderstandes und des Verlustfaktors, sowie das Teilentladungsverhalten, mit zunehmenden Alter zu dokumentieren und aufzuzeichnen. Anhand einer Trendanalyse soll dann der Zusammenhang des Alters eines Generatorstabes mit den aufgezeichneten Werten der elektrischen Diagnosemessungen sichtbar werden.

Bei der natürlichen Alterung von Generatorisierungen spielt die TEAM-Beanspruchung (Thermal, Electrical, Ambiente, Mechanical) eine Rolle. Diese Alterungsbeanspruchung repräsentiert die thermische, elektrische und mechanische Beanspruchung sowie den Einfluss der umgebenden Atmosphäre. In der Praxis wirkt eine Kombination dieser Beanspruchungen auf die Isolierung ein und setzt vor allem organischen Isoliermaterialien zu. Alterungsmechanismen haben dann irreversible Materialveränderungen aufgrund der TEAM-Beanspruchung zur Folge und führen zu einer sukzessiven Verschlechterung der Isoliereigenschaft. In weiterer Folge kann dies nach einer gewissen Zeit zum Isolationsversagen führen (Sumereder, Muhr 2006). Dabei stellt sich die wichtige Frage, wann die Alterung der Isolationskomponenten zum Versagen führen. Eine genauere Beschreibung und weiterführende Literatur zum Thema Alterung von Isolierstoffen stellt die Arbeit (Sumereder 2008) dar. Diese befasst sich mit der statistischen Lebensdauer von Wasserkraftgeneratoren und der Fehleranalyse.

Da im Labor keine natürlichen Umgebungsbedingungen zur Alterung nachgebildet werden können, wird in dieser Arbeit auf eine künstliche, rein elektrische Alterung zurückgegriffen. Eine weitere Möglichkeit der Alterung liegt in der thermischen Alterung, die auf der Grundlage von Materialveränderungen aufgrund der thermischen Belastung basiert. Die Beschreibung der Restlebensdauer aufgrund thermischer Zyklierung geschieht mit Hilfe des Arrhenius-Gesetzes. Diese Methode spielt in dieser Arbeit während den Dauerspannungsversuchen jedoch keine aktive Rolle und wird nicht weiter behandelt.

Die elektrische Alterung von Isolierstoffen wird durch das präsente elektrische Feld hervorgerufen, das mit dem Isoliermaterial in Wechselwirkung tritt. Folgende Phänomene können dabei in Erscheinung treten (Sumereder 2008):

- Elektrolyse
- Erhöhte Temperaturen
- Teilentladungen
- Kriechstrombildung/Tracking
- Bäumchenbildung/Treeing
- Raumladungen

Dabei spielt bei festen Isolierstoffen vor allem die Teilentladungsaktivität eine wesentliche Rolle. Speziell organische Isoliermaterialien sind davon in Kombination mit *Treeing* betroffen. Es ist heute allgemein akzeptiert, dass eine elektrische Alterung nur an Isolierstoffen vollzogen werden kann, welche Teilentladungsbehaftet sind, oder Prozesse beinhalten, die Teilentladungen hervorrufen (Sumereder 2008). Somit basiert die Theorie der elektrischen Alterung in festen Isolierstoffen auf das Vorhandensein von Teilentladungen bei einer vorhandenen Belastungsfeldstärke (E). Beschrieben wird die Alterung mit dem Ausdruck des „*Inverse Power Law*“, welches die erwartete Restlebensdauer (t) bei entsprechender Belastungsfeldstärke beschreibt. Auf den doppelt logarithmisch skalierten Achsen nimmt die Lebensdauer mit zunehmender Feldstärke nach Abbildung 16 in der linken Darstellung stetig ab.

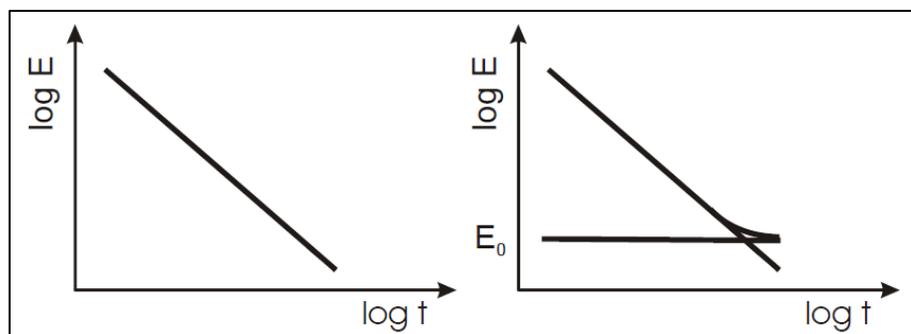


Abbildung 16: „*Inverse Power Law*“, links: ohne Modifizierung; rechts: mit Anpassung an den Schwellenwert (Sumereder 2008)

Bei einer Feldstärkebelastung ohne dem Auftreten von Teilentladungen im Isoliermaterial gibt es jedoch keine Alterungserscheinungen aufgrund von elektrischer Beanspruchung. Diesen Bereich vermag das „*Inverse Power Law*“ nicht zu beschreiben, da es auch für sehr kleine Feldstärken eine endliche Lebensdauer voraussagt. Aus diesem Grund ist eine Schwellenfeldstärke (E_0) eingerichtet worden, unter der es zu keinem Lebensdauerverbrauch aufgrund von elektrischer Belastung kommt. Der Verlauf des Gesetzes ist dem Schwellwert asymptotisch angepasst und das *Inverse Power Law* verliert darunter seine Gültigkeit, wie in Abbildung 16 in der rechten Darstellung ersichtlich ist. Da die Lebensdauer einer Isolationsanordnung einer gewissen Streuung unterliegt, entspricht die erwartete Lebensdauer keiner Linie, wie in Abbildung 16 zu sehen ist, sondern eher einem Band, welches eine Streuung der Lebensdauer berücksichtigt. Aufgrund von Praxiserfahrungen kann ein Streuungsbereich von 20-30% vorausgesagt werden.

Eine mathematische Beschreibung des „Inverse Power Law“ stellt die Formel [3] dar, sofern die Bedingung gegeben ist, dass $E > E_0$ ist und eine reine elektrische Belastung vorherrscht (Sumereder 2008).

$$\log E = k - \frac{1}{n} \cdot \log t \quad [3]$$

E = elektrische Feldstärke in p.u.

k = Konstante

n = Lebensdauerkoeffizient

t = Zeit

3.3.1 Rückblick auf Oschenik 1&2- Versuche

Im Auftrag der KELAG sind bereits im Jahr 2005 Versuche zur Restlebensdauer und zur Zustandsbewertung an einzelnen Generatorstäben der Maschinesätze Oschenik 1 und Oschenik 2 durchgeführt worden. Die Stäbe dieser Maschinen sind vom Aufbau des Isoliermaterials baugleich mit den Stäben der Maschinen Af2 und Wu4 und sind im Zuge einer Wicklungserneuerung der Generatoren ausgebaut und untersucht worden. Mit Hilfe von optischen Untersuchungen und elektrischen Diagnosemessungen sollten Informationen bezüglich Zustand und möglicher Restlebensdauer der Generatorstäbe gewonnen werden. Im Zuge der Analysen ist eine Lebensdauerkennlinie der Stäbe und die mittlere Restlebensdauer der Stäbe ermittelt worden. Insgesamt sind für diesen Versuch 65 Stäbe zur Verfügung gestanden, wobei 37 Stäbe aus der Maschine Oschenik 2 und 19 Stäbe aus der Maschine Oschenik 1 stammten. 9 zusätzliche Reservestäbe sind für Vergleichszwecke geliefert worden. Die praktische Umsetzung der Versuche und der Versuchsaufbau ist auch veröffentlicht worden (Woschitz, Sumereder 2005, Sumereder, Woschitz et al. 2006).

Die Stäbe der Maschinen Oschenik 1 und 2 sind als erstes eigens für die Prüfungen präpariert und einer Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung unterzogen worden. Bei den Vorbereitungen ist der alte AGS-Lack der Stäbe vorsichtig abgetragen und ein neuer Anstrich aufgetragen, sowie ein Endenglimmschutzband zur Feldsteuerung aufgewickelt worden. Weiteres ist zur Simulierung des Nutbereiches ein Lamettband um den Stab gewickelt und der AGS-Lack im Nutaustrittsbereich unterbrochen worden, sodass ein Luftspalt zwischen Schirmelektrode und Messbelag auftritt. Dies war notwendig, weil das damalige Messgerät zur Verlustfaktormessung eine potentialfreie Messung der Stäbe verlangte. Nach den Eingangsmessungen ist der Luftspalt mit dem AGS-Lack neu überstrichen worden, um mit den Spannungssteigerungsversuchen fortfahren zu können. Die Spannungssteigerungsversuche sind an insgesamt 4 Stäben durchgeführt worden um Richtwerte für den aktuellen Isolationszustand und die anschließende

Dauerspannungsversuche zu erlangen. Hierzu sind bei jeweils zwei sternpunktfernen und zwei sternpunktnahen Stäben die Durchschlagspannungen nach einer Minute Vorbelastung mit $2 \cdot U_N$ ermittelt worden. Nach den gewonnenen Erkenntnissen konnten drei Prüfpegel festgelegt werden nach welchen die Stäbe elektrisch belastet wurden. Die Prüfung der Stäbe mit den drei Prüfpegeln war insofern notwendig, da für die Konstruktion einer Lebensdauerkennlinie Prüfergebnisse mit mindestens zwei verschiedenen Spannungsniveaus benötigt werden (Sumereder, Muhr 2006). Nach den erfolgten Messungen und den tatsächlichen Ausfallzeiten unter den vorher festgelegten Spannungswerten, wurde mittels Weibull-Verteilung eine Kurve zur mittleren Lebenserwartung der Stäbe bei gegebener Spannungsbeanspruchung aufgezeichnet, welche in Abbildung 17 dargestellt ist. In dieser Abbildung sind in oben abgebildeter Graphik die Ausfallhäufigkeiten nach Zeitdauer und Spannungsbelastung der Stäbe eingezeichnet. Die Zahlen neben den Maschinenabkürzungen in der Legende repräsentieren den verwendeten Spannungspegel während des Dauerversuches.

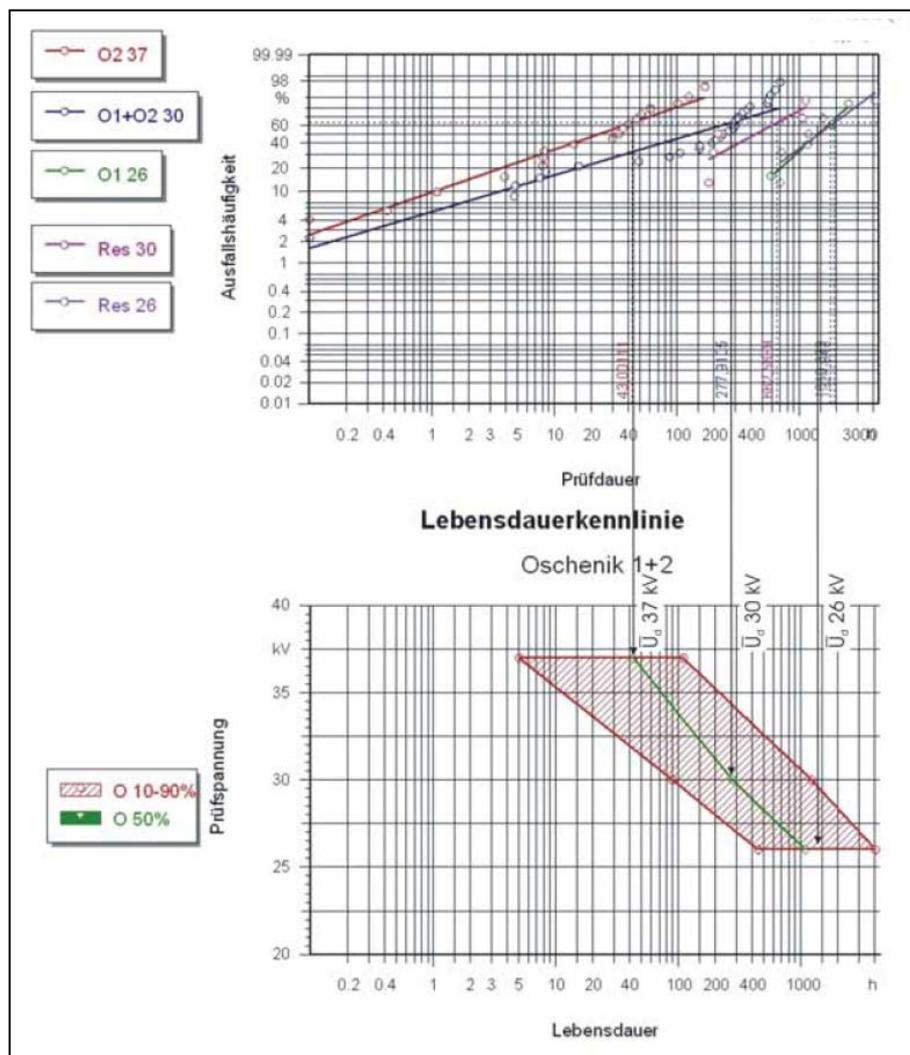


Abbildung 17: Lebensdauerkennlinie und Weibullauswertung aus den Versuchen der Maschine Oschenik (Woschitz, Sumereder 2005)

Aus den Ausfallhäufigkeiten unter den verwendeten Prüfpegeln konnte eine Lebensdauerkennlinie mit einer mittleren Lebenserwartung (63%-Werte) konstruiert werden. Diese ist in Abbildung 17 unten zu sehen. Da die Streuung der Ausfälle während den Messungen aufgrund der Frühausfälle relativ hoch ist, ist ein 10-90% Vertrauensbereich eingeführt worden, welcher die mittlere Lebensdauer umhüllt. Dieser Bereich ist in unten stehender Graphik rot schraffiert dargestellt und berücksichtigt die im Laufe des Versuches aufgetretene Frühausfälle, sowie lang laufende Stäbe während des Dauerversuches. Bei der Interpretation der Lebensdauerkennlinie ist zu beachten, dass die Streuung der Ausfallszeiten relativ groß ist und eine Extrapolation der verwendeten Prüffeldstärke auf die Betriebsfeldstärke nicht Erfolg versprechend ist. Es wurde anschließend auf eine genaue mathematische Beschreibung einer Restlebensdauer verzichtet, jedoch konnte eine qualitative Aussage über den Zustand der geprüften Stäbe gegeben werden. Hierzu flossen neben der konstruierten Restlebensdauer auch die Ergebnisse der optischen Untersuchung sowie die Betriebsmitteldaten, welche die Betriebsstunden sowie die angefallenen Startvorgänge beinhalten, in das Resümee der Untersuchung mit ein (Woschitz, Sumereder 2005).

Die Erfahrungswerte bezüglich Restlebensdauer und Spannungsfestigkeit dieser Untersuchungen werden zur Beurteilung der aktuellen Studie verwendet und bildeten einen wesentlichen Teil zur Festlegung des Spannungsprüfpegels für die Dauerspannungsbelastung. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, eine eigens angefertigte Lebensdauerkennlinie der Versuchsobjekte zu kreieren, sodass der Dauerspannungsversuch mit nur einem Spannungspegel vollzogen wird.

3.3.2 Strategische Vorgangsweise für die Auswahl des Prüfpegels

Bei der Auswahl des Spannungsprüfpegels für die Dauerspannungsbelastung muss diese so gewählt werden, dass die Belastung für die einzelnen Generatorstäbe nicht zu hoch angesetzt ist und dadurch viele Frühausfälle auftreten. Auch sollte der Prüfpegel nicht zu gering gewählt werden, damit die Dauer des Versuches in einem vertretbaren Zeitraum bleibt und sich die Prüfung nicht unnötig in die Länge zieht. Die Form und Frequenz der Spannung ist mit dem gegebenen Prüftransformator mit einer 50 Hz Wechselspannung bereits festgelegt, somit muss nur der Prüfpegel für den Dauerspannungsversuch ermittelt werden.

Für die Auswahl der Spannungshöhe wird, wie bereits in Kapitel 3.3.1 erwähnt, in erster Linie auf die Erfahrungswerte der Oschenik-Versuche zurückgegriffen. In Kombination mit den Erfahrungswerten, der Berücksichtigung der Betriebsdaten der vorliegenden Statorstäbe und zwei realen Spannungsprüfungen an zwei Versuchsstäben ist es dann möglich, einen geeigneten Spannungswert für die Dauerspannungsprüfung zu finden.

Da das Isoliersystem der Generatorstäbe Oschenik 1&2 gleich dem der Maschinen Af2 und Wu4 ist, kann unter Berücksichtigung der höheren Betriebsstundenzahl der Maschinen Af2 und Wu4 gegenüber den Maschinen Oschenik die Lebensdauerkenlinie der Maschinen Oschenik, in Abbildung 17 gezeigt, als Basis herangezogen werden. Aufgrund des fortgeschrittenen Alters der Maschinen Af2 und Wu4 muss eine Korrektur der Lebensdauerkurve nach unten bedacht werden. Die Lebensdauerkenlinie der Maschinen Oschenik 1&2 liegt mit einer mittleren Belastungsfeldstärke von 10,7 kV/mm (30 kV) bei einer statistisch erwarteten Restlebensdauer von 278 Stunden, wobei hier die Streuung der Restlebenserwartung berücksichtigt werden muss. Verfolgt man die Kennlinie in Richtung größerer Feldstärken, so liegt die mittlere erwartete Restlebensdauer mit einer Belastung von 11,42 kV/mm (32 kV) beim vorliegenden Isoliermedium, bei etwa 170 Stunden. Da die Isolierwandstärke und das Isoliermaterial der vier Maschinensätze ident sind und unter Berücksichtigung des fortgeschrittenen Alters der Stäbe Af2 und Wu4, kann mit guter Abschätzung eine mittlere erwartete Restlebensdauer der vorliegenden Versuchsstäbe zwischen 100 und 200 Stunden bei einer mittleren Feldstärkebelastung von 11,42 kV/mm (32 kV) gewagt werden. Tabelle 5 enthält die Betriebsdaten der Maschinen Oschenik sowie Af2 und Wu4 im Vergleich.

<i>Maschinensatz</i>	<i>Betriebsstunden in h</i>	<i>Anzahl der Starts</i>
<i>Außerfragant 2 (Af2)</i>	115.860	17.688
<i>Wurten 4 (Wu4)</i>	105.223	15.091
<i>Oschenik 1 (O1)</i>	75.678	10.940
<i>Oschenik 2 (O2)</i>	74.740	10.427
<i>Reservestäbe</i>	0	0

Tabelle 5: Anzahl der Betriebsstunden und Starts der Maschinensätze

Da für die Reservestäbe keine Vorbelastung gegeben war, können diese in erster Linie mit „neuwertigen“ Stäben verglichen werden und haben aufgrund dessen eine wesentlich längere prognostizierte Restlaufzeit vorzuweisen. Um den bestmöglichen Vergleichswert zu gewährleisten, werden die Reservestäbe jedoch gleich behandelt wie die regulären Versuchsstäbe. Eine etwaige Verlängerung der Dauerversuche aufgrund der langlaufenden Reservestäbe wurde in Kauf genommen.

Nach der Analyse der Restspannungsfestigkeit der vorliegenden Versuchsstäbe aufgrund von Erfahrungswerten aus den Oschenik-Versuchen, wird eine Spannungsprüfung mit den Reserve-Versuchsstäben der Maschine Wu4 vollzogen. Die beiden Generatorstäbe RWu4_27(W) und RWu4_139(V) werden in den Versuchsstand eingespannt und mit 32kV Wechselspannung dauerbelastet, um zu sehen, ob die Abschätzung der Restlebensdauer

unter diesem Spannungsniveau gerechtfertigt ist. Die Spannungshöhe selbst stellte für die Stäbe kein Problem dar und es kam zu keinem Frühausfall. Somit konnte die Annahme getätigt werden, dass der Wert der Restspannungsfestigkeit für beide Stäbe aussagekräftig und für den Rest der Versuchsobjekte repräsentativ ist.

3.3.3 Erwartete Restlebensdauer

Da die Generatorstäbe RWu4_27(W) und RWu4_139(V) während der Probedauerbelastung mit 32 kV beide Laufzeiten über 100 Stunden erreichten, kann die Annahme der vorher getätigten Abschätzung aufgrund der Erfahrungswerte aus den Oschenik-Versuchen bestätigt werden. Wie in Kapitel 3.4.2 erklärt, wird aufgrund der Lebensdauerlinie aus den Oschenik-Versuchen eine Lebensdauer für die beiden Maschinen Af2 und Wu4 zwischen 100 und 200 Stunden bei 32 kV Spannungsbelastung prognostiziert. Die Ergebnisse des Probelaufes mit den Reservestäben von Wu4 liegen genau im prognostizierten Bereich und es ist zu keinem Sofortausfall der Stäbe bei einer Belastungsfeldstärke von 11,43 kV/mm (32 kV) gekommen. Somit kann für die restlichen Untersuchungsobjekte der Maschinen Af2 und Wu4 eine ähnliche zu erwartende Restspannungsfestigkeit vorausgesagt werden.

Da nun die vermutete Restlebensdauer der Versuchsobjekte bei festgelegter Spannungshöhe der Prüfspannung von 32 kV definiert ist, ist noch der Zeitpunkt der Zwischenmessungen für die Stäbe festzulegen. Bei diesen Zwischenmessungen werden, wie schon bei den Eingangsmessungen, Isolationswiderstand, Verlustfaktor und Teilentladungen gemessen, um den Alterungsverlauf der Stabisolation festzuhalten. Aufgrund der Vielzahl der Stäbe und der begrenzten Anzahl Stäbe parallel altern zu lassen, muss optimales Zeitintervall für die Zwischenmessung gefunden werden, welches den Alterungsverlauf der Stäbe gut erkennen lässt. Zum Einen darf es nicht zu weit auseinander liegen, sodass es nur zu wenigen beziehungsweise gar keinen Zwischenmessungen pro Stab kommt, zum Anderen sollten nicht zu viele Zwischenmessungen den Dauerversuch ohne Gewinn an Information in die Länge ziehen. Zu Beginn ist ein Zeitintervall von 80 Stunden für die Zwischenmessungen festgelegt worden, dieser Wert wurde in weiterer Folge aufgrund des Informationsverlustes bei diesem großen Zeitintervall auf 40 Stunden heruntergesetzt. Die Zwischenmessungen werden nun während des gesamten Dauerversuches vollzogen und die Ergebnisse zum späteren Vergleich in eine Tabelle eingetragen.

Zusammengefasst kann nun gesagt werden, dass die vorliegenden Versuchsobjekte während des Dauerversuches mit einer Spannungsbelastung von 32kV Wechselfeldspannung belastet werden. Die Laufzeiten bis zum Isolationsversagen sollten zwischen 100 und 200 Stunden pro Stab liegen, wobei alle 80 beziehungsweise 40 Stunden, elektrische Diagnosezwischenmessungen vollzogen werden. Die Dauerspannungsbelastung wird bis zum Versagen der elektrischen Isolierfestigkeit der Hauptisolation fortgeführt und die Messergebnisse sowie die tatsächliche Restlaufzeit in einer Tabelle strukturiert eingetragen und dokumentiert.

3.4 Elektrische Messungen vor und zwischen der Dauerspannungsprüfung

3.4.1 Isolationswiderstandsmessung

3.4.1.1 Allgemeines zur Isolationswiderstandsmessung

Die Isolationswiderstandsmessung dient in der elektrischen Diagnosetechnik hauptsächlich der Erkennung von Verschmutzung und Verfeuchtung der Maschinenisolierung, aber auch grobe Fehlstellen können mit Hilfe dieser Messmethode erkannt werden.

Die Zusammensetzung des Isolationswiderstandes besteht aus dem Oberflächenwiderstand und dem Durchgangswiderstand des Isoliermaterials. In der Regel wird das resultierende Widerstandsnetzwerk aus einer Parallelschaltung von Durchgangs- und Oberflächenwiderständen nachgebildet. Je nach Oberflächenbeschaffenheit, Verschmutzungsgrad und Luftfeuchte teilen sich die zwei Komponenten unterschiedlich auf. Damit der Anteil des Oberflächenwiderstandes gering bleibt sollte die Verschmutzung der Oberfläche und die relative Luftfeuchtigkeit gering gehalten werden. Speziell bei kunstharzgebundenen Isolierungen wird der Isolationswiderstand wesentlich vom Oberflächenstrom beeinflusst (Küchler 2009).

Der Isolationswiderstand ist neben materialspezifischen Eigenschaften auch wesentlich von Umgebungseinflüssen abhängig. So spielen folgende Faktoren eine wichtige Rolle bei der Ermittlung des Isolationswiderstandes:

- Temperatur der Wicklung
- Feuchtigkeit des Isoliermaterials
- Risse und Beschädigungen der Isolierung
- Leitfähige Verunreinigungen im Material und auf der Oberfläche
- Umgebungsfeuchtigkeit
- Verteilung und Anzahl der Fremdschichten
- Maschinengröße und Geometrie

Bei fortlaufender Beobachtung des Isolationswiderstandes kann im Laufe der Zeit auch das Alterungsverhalten des Isoliermaterials erkannt werden, da Rissbildungen und chemische Veränderungen die Isolationseigenschaften des Materials ändern.

Die Ermittlung des Isolationswiderstandes an Maschinenisolierungen erfolgt mittels Anlegen einer hohen Gleichspannung mit geringer Restwelligkeit. Der Standard der IEEE-Std 43-2000 „*IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*“ gibt eine Anleitung für die Messung des Isolationswiderstandes sowie Anhaltspunkte für die

Analyse. Auch im Schrifttum "*Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen*" vom ÖVE stehen hinreichende Erklärungen zum Thema Isolationswiderstandsmessung. In der Regel wird für Statorisierungen eine Messspannung von -1000V/DC angestrebt, für Rotorwicklungen kann die Messspannung auch darunter liegen. Nach dem Anlegen der Testspannung zwischen dem Innenleiter eines Stranges der Statorwicklung und einer geerdeten Gegenelektrode wird der Lade- und Entladestrom jeweils über einen Zeitraum von zehn Minuten aufgenommen. Der gemessene Ladestrom setzt sich aus drei Komponenten zusammen und zeigt einen Verlauf, wie er in Abbildung 18 dargestellt ist. In dieser Abbildung 18 ist ersichtlich, dass am Anfang der Messung der Ladestrom wesentliche Anteile aus dem kapazitiven Ladestromimpuls und dem Polarisationsstrom, auch Nachladestrom genannt, enthält und sich mit der Zeit einem stationären Stromwert annähert. Dieser stationäre Strom spiegelt letztendlich den Isolationsstrom wieder und wird eigentlich erst nach unendlich langer Ladedauer erreicht. In der Praxis hat sich für das Erreichen des stationären Endwertes jedoch eine Zeitspanne von 10 Minuten bewährt, da sich der Isolationsstrom nach dieser Zeit nur mehr unwesentlich ändert. Beim Entladevorgang, hier werden beide Elektroden kurzgeschlossen, zeigt sich ein spiegelverkehrtes Bild, jedoch ohne stationären Endstrom. Der Isolationswiderstand kann dann aus der angelegten Spannung und dem geflossenen Ladestrom errechnet werden (ÖVE 1990). Nach dem Standard der IEEE soll der Messvorgang der Isolationswiderstandsmessung bei einer Wicklungstemperatur von 40°C erfolgen. Ist dies nicht der Fall oder kann diese Forderung nicht erfüllt werden, so kann mit Hilfe eines Korrekturfaktors der Isolationswiderstandswert auf die 40°C umgerechnet werden. Hierbei wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem Wert des Isolationswiderstandes und der Temperatur angenommen und der Korrekturfaktor einfach berechnet. Zu beachten ist, dass diese Näherung nur für kleine Temperaturspannen gilt und dass diese Anpassung nicht bei großen Temperaturdifferenzen angewendet werden soll (IEEE Std 43-2000 2000).

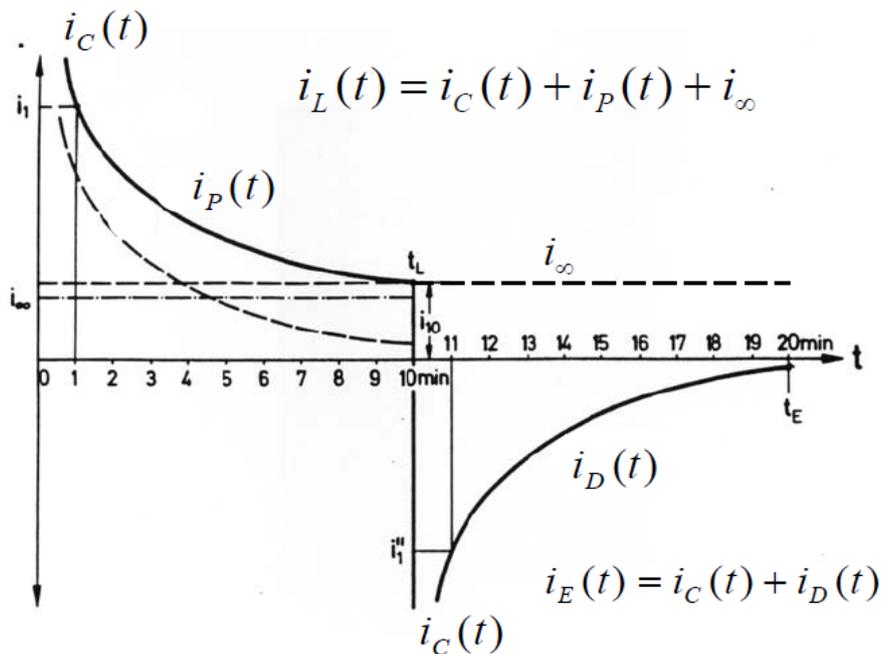


Abbildung 18: Verlauf des Isolationsstromes (Rupp 2005)

- $i_C(t)$ = Kapazitiver Ladestromimpuls in A
- $i_P(t)$ = Polarisationsstrom/Nachladestrom in A
- i_∞ = Stationärer Isolationsstrom in A
- $i_L(t)$ = Ladestrom in A
- $i_E(t)$ = Entladestrom in A
- $i_D(t)$ = Depolarisationsstrom in A

Wichtige Kenngrößen aus dieser Messung sind die Isolationszeitkonstante (τ_{10}) sowie der Polarisationsindex (PI).

Mit Hilfe der Isolationszeitkonstanten kann eine Information über den Feuchtigkeitszustand des Isoliermediums gewonnen werden. Hierbei wird neben dem Isolationswiderstand nach 10 Minuten für Statorwicklungen (R_{10}), auch der Kapazitätswert bei Nennfrequenz und 20% der Nennspannung ($C_{0,2}$) benötigt. Das Produkt dieser Werte, in Formel [4] ersichtlich, ergibt dann den Wert der Isolationszeitkonstante und beinhaltet die Information über eine mögliche Verfeuchtung des Materials. Für Läuferwicklungen wird normalerweise der Isolationswiderstandswert nach einer Minute verwendet. Da die Isolationszeitkonstante eine stark temperaturabhängige Größe ist, muss dies auch bei der Interpretation berücksichtigt werden. Eine trockene Wicklung ist Voraussetzung für eine weiterführende Spannungsprüfung.

Die Isolationszeitkonstante für den Stator ergibt sich nach der Formel 4, die Konstante für den Rotor wird nach Formel 5 berechnet (ÖVE 1990).

$$\tau_{10} = R_{10} \cdot C_{0,2} \quad [4]$$

$$\tau_1 = R_1 \cdot C_{0,2} \quad [5]$$

$\tau_{1/10}$ = Isolationszeitkonstante nach 1/10 Minute/n in s

$R_{10/1}$ = Isolationswiderstand nach 10/1 Minute in Ω

$C_{0,2}$ = Kapazitätswert bei 50 Hz und $0,2 \cdot U_N$ in F

Der Polarisationsindex gibt hauptsächlich über eine mögliche Verschmutzung der Wicklung Aufschluss. Diese weitgehend maschinen- und temperaturunabhängige Kenngröße wird aus dem Quotienten des Isolationswiderstandes nach zehn Minuten (R_{10}) zu einer Minute (R_1) gebildet. Auch der zeitliche Verlauf des Isolationswiderstandes kann Informationen über eine mögliche Verschmutzung der Wicklung beinhalten. Je nach eingesetztem Isolationssystem kann eine Aussage über eventuell auftretende Leck- bzw. Oberflächenströme gegeben werden. Ist der Kurvenverlauf nach einer Minute bereits stark abgeflacht und der stationäre Stromendwert erreicht, so liegt der Grund wahrscheinlich in einer verschmutzten Oberfläche. Ist der Kurvenverlauf stetig steil, so ist eher von einer „sauberen“ Wicklung auszugehen. Abbildung 19 zeigt den unterschiedlichen Verlauf von drei Isolationswiderstandsmessungen. Der Polarisationsindex sollte für Klasse B Isolierungen laut Vorschrift einen Wert größer 2 besitzen, um elektrische Kriechwegbildung zu vermeiden (*IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. 2000).

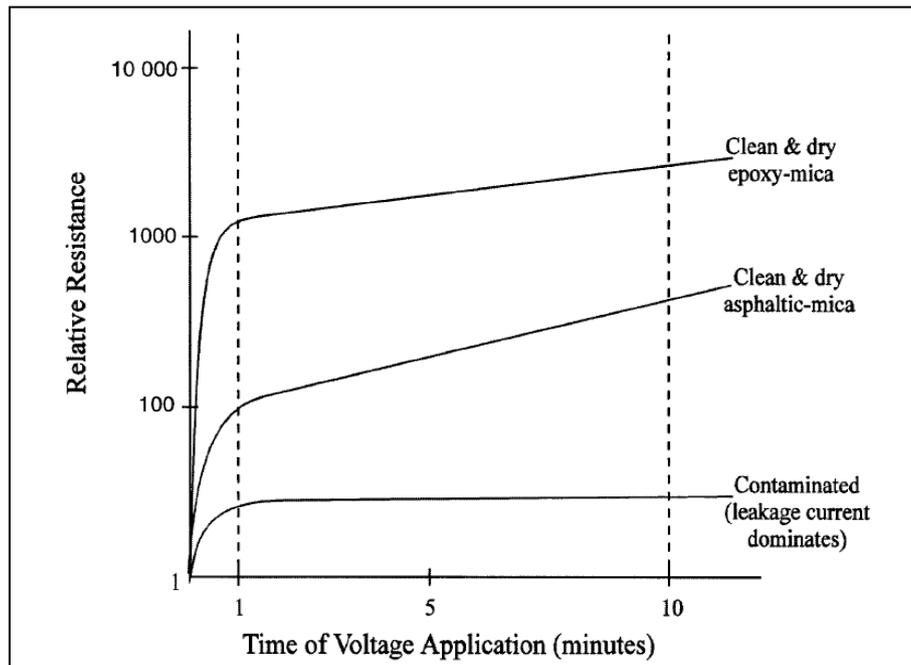


Abbildung 19: Verlauf des Isolationswiderstandes an drei unterschiedlichen Isoliermaterialien (*IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. 2000*)

Die Berechnungsformel für den weitgehend unabhängigen Polarisationsindex (PI) oder der gleichwertigen Nachladezahl (N) ergibt sich wie folgt:

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad [6]$$

$$N = \frac{i_1}{i_{10}} \quad [7]$$

PI = Polarisationsindex

R_{10} = Isolationswiderstand nach 10 Minuten in Ω

R_1 = Isolationswiderstand nach 1 Minute in Ω

N = Nachladezahl

i_1 = Isolationsstrom nach 1 Minute in A

i_{10} = Isolationsstrom nach 10 Minuten in A

3.4.1.2 Messdurchführung der Isolationswiderstandsmessung

Für die Durchführung der Isolationswiderstandsmessungen in der Praxis, gibt es in der Literatur Vorschriften zur Messschaltung und Auswertung. Beschrieben sind diese Messschaltungen unter Anderem in der „Empfehlung für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen“ des ÖVE (ÖVE 1990).

Im Zuge dieser Arbeit wird die Isolationswiderstandsmessung an einzelnen Generatorstäben durchgeführt. Die Messschaltungen reduzieren sich somit auf eine einfache Messschaltung des Isolationswiderstandes eines Einzelstabes, wobei das Isoliervermögen von Nut- und Wickelkopfteil gleichzeitig gemessen wird. In Abbildung 20 ist die verwendete Messschaltung dargestellt.

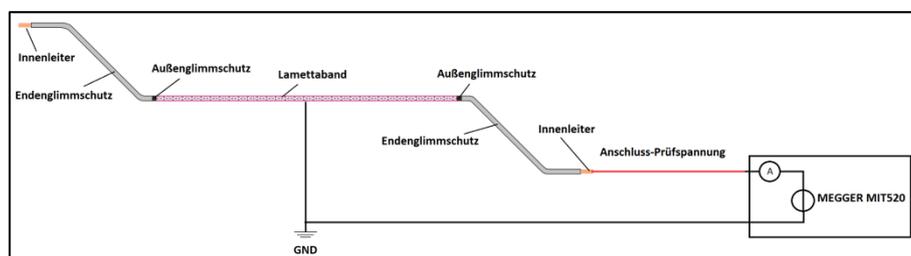


Abbildung 20: Messschaltung für die Isolationswiderstandsmessung an einem präparierten Einzelstab

Die Messspannung wird ebenfalls mit -1000V/DC gewählt und der Ladevorgang automatisch mit dem verwendeten Messgerät MEGGER MIT520 aufgezeichnet. Dies ist ein Isolationstestgerät, welches den Prüfling bereits mit der benötigten Messspannung, bis maximal 5kV, versorgt und gleichzeitig den Isolationsstrom über den Prüfling mit misst und aufzeichnet. Da die Messung hauptsächlich für die Analyse der Isolationszeitkonstanten und des Polarisationsindex benötigt wird, ist die Aufnahme der Isolationswiderstandswerte auf drei Messwerte pro Messung reduziert. Die Messdauer beträgt 10 Minuten pro Stab und es werden jeweils die Isolationswiderstandswerte der Messung nach 30 Sekunden, 1 Minute und 10 Minuten, sowie der Isolationsstrom nach einer und zehn Minuten, aufgezeichnet. Der Polarisationsindex der Isolation wird automatisch ermittelt. In Tabelle 7 ist eine Übersicht über die ermittelten Diagnoseparameter gegeben. Für die Ermittlung der Isolationszeitkonstante unerheblich ist der Entladestromverlauf der Messung. Auf die Aufzeichnung dieser Werte wird aus Zeitgründen verzichtet.

Messwert	Bedeutung	Informationsgehalt
$R_{0,5}$	Isolationswiderstand nach 30 sek.	Verlauf des Isolationswiderstandes
R_1	Isolationswiderstand nach 1 Min.	Verlauf des Isolationswiderstandes
R_{10}	Isolationswiderstand nach 10 Min.	Verlauf des Isolationswiderstandes
PI	Polarisationindex	Maß für den Verschmutzungsgrad einer Isolierung
I_1	Isolationsstrom nach 1 Min.	Nachladestrom nach 1 Min.
I_{10}	Isolationsstrom nach 10 Min.	Nachladestrom nach 10 Min.
τ_{10}	Isolationszeitkonstante	Bestimmung des Feuchtigkeitszustandes

Tabelle 7: Messwerte und Informationen aus der Isolationswiderstandsmessung

Zur Auswertung der Isolationswiderstandsmessung werden anschließend die Verläufe des Isolationswiderstandes sowie der Polarisationsindex nach den Eingangsmessungen und den Zwischenmessungen grafisch dargestellt und verglichen. Weiteres wird zur Erkennung von Feuchtigkeit in der Hauptisolation des Generatorstabes die Isolationszeitkonstante nach der Rechenmethode für eine Ständerwicklung, τ_{10} , ermittelt.

3.4.2 Verlustfaktormessung

3.4.2.1 Allgemeines zur Verlustfaktormessung

An einem idealen Dielektrikum eilt, bei Beanspruchung mit Wechselspannung, der Strom der Spannung um 90° voraus. Da in der Praxis die verwendeten Dielektrika keine idealen Eigenschaften besitzen und verlustbehaftet sind, wird der Phasenwinkel aufgrund von Verlusten kleiner als 90° ausfallen. Der Verlustwinkel δ reduziert den idealen Phasenwinkel φ um dessen Polaritäts-, Leitfähigkeits- und Teilentladungsverluste. Er ist ein Maß für die im Dielektrikum auftretenden Verluste und spiegelt den Anteil der Verlustleistung (P_δ) des Materials wieder. Je nach Ersatzschaltbild des Dielektrikums ist der Verlustfaktor $\tan \delta$ aus dem Verhältnis von Wirk- und Blindleistung der Strom- beziehungsweise Spannungskomponenten zu bilden. Somit kann der Verlustfaktor auch als Verhältnis der umgesetzten Wirk- zur Blindleistung in einem Isoliermaterial gesehen werden. In Abbildung 21 sind die Aufteilung der Stromkomponenten eines Dielektrikums bei verwendetem Parallelersatzschaltbild sowie eine kurze mathematische Beschreibung unter [10] ersichtlich. Weiterführende Literatur zu diesem Thema ist unter anderem im Buch „Hochspannungstechnik“ von A. Küchler zu finden.

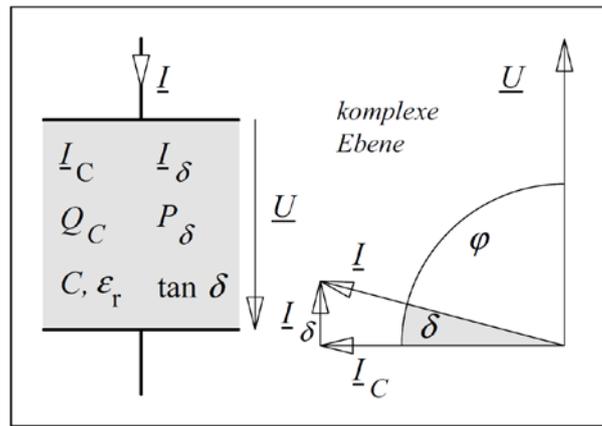


Abbildung 21: Darstellung eines verlustbehafteten Dielektrikums mit den dazugehörigen Komponenten (Kühler 2009)

Mathematische Beschreibung des Verlustfaktors:

$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_C} = \frac{P_C}{Q_C} \quad [8]$$

wenn

$$P_C = U \cdot I_\delta \quad \text{und} \quad Q_C = U \cdot I_C \quad [9] \text{ und } [10]$$

- P_C = Wirkanteil der Verlustleistung am Dielektrikum in W
- Q_C = Blindanteil der Verlustleistung am Dielektrikum in VAR
- I_δ = Verlustbehafteter Stromanteil in A
- I_C = Kapazitiver Stromanteil in A
- U = Angelegte Spannung in V

Der Verlustfaktor eines Dielektrikums ist abhängig von verschiedenen Faktoren, unter anderem von der angelegten Messfrequenz aufgrund der Polarisationsverluste sowie der Höhe der Messspannung aufgrund vorhandener Teilentladungen oder auch der Temperatur aufgrund der variierenden Leitfähigkeit. Um eine genaue Interpretation der Messwerte zu erreichen und eine Vergleichbarkeit mit vergangenen Messwerten zu gewährleisten ist es unbedingt notwendig auf diese Abhängigkeiten der Verlustfaktormessung Augenmerk zu legen. Da im Zuge dieser Arbeit die Messfrequenz konstant bleibt, ist lediglich auf die Abhängigkeiten der Temperatur sowie der Spannung Rücksicht zu nehmen.

Für die Verlustfaktormessung an Generatoreinzelstäben gibt es in der Literatur Empfehlungen zur Durchführung. In der Norm *EN 50209* sowie im Standard *IEEE Std286-2000(R2006)* sind Richtlinien für die Messung des Verlustfaktors an Generatorstäben

enthalten. Laut dem Standard der IEEE Empfehlung ist die Messung an Einzelstäben mit Schutzringanordnung durchzuführen, da die Messungen sonst von den Ableitströmen am Wickelkopf beeinflusst werden und sich dem reinen Verlustfaktor des Dielektrikums überlagern (IEEE Std 286-2000(R2006) 2000). Unter realen Umständen werden Verlustfaktormessungen an kompletten Maschinensätzen jedoch immer unter Einfluss von Ableitströmen im Wickelkopf gemessen, da auch hier keine Schutzringanordnung, wie im Labor, angebracht wird. Die Messwerte von Einzelstabmessungen mit Schutzringanordnung differenzieren sich somit von gängigen Messmethoden an kompletten Maschinensätzen.

Bei den Messungen dieser Untersuchung wird auf eine Schutzringanordnung verzichtet und ein Einfluss von Ableitströmen am Wickelkopf in Kauf genommen. Die Messung ist so auch einer Messung unter realen Umgebungsbedingungen an kompletten Maschinensätzen ähnlicher. Der Fehler der Messung sollte dahingehend gering bleiben, als das die Messanordnung während den Zwischenmessungen unverändert bleibt und eine Veränderung der Ableitströme aufgrund der gegebenen Laborbedingungen praktisch nicht vorhanden ist. Der Wert für eine vergleichende Ergebnisbeurteilung aus den Verlustfaktormessungen bleibt somit vorhanden.

Es gibt Grenzwerte für einzelne Verlustfaktorwerte, welche in der *EN 50209* enthalten sind, jedoch scheinen diese trotz Messung ohne Schutzringanordnung relativ hoch gesetzt und stellen für die Messungen dieser Untersuchung nur im unzureichenden Maße einen Grenzwert dar. Eine Empfehlung des ÖVE in ihrer Informationsschrift zur *"Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen"* gibt für die Messung mit kunstharzgebundenen Generatorstäben an, die Hälfte der Grenzwerte laut *EN 50209* zu verwenden (ÖVE 1990).

Wird der Verlustfaktor eines Isoliermaterials nun über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet, so können Veränderungen im Isoliergefüge erkannt und Abschätzungen über den Zustand des Materials gegeben werden. Nachteilig erweist sich jedoch, dass mit der Verlustfaktormessung nur eine Aussage über den Globalzustand des Isolierstoffes selbst und keine Lokalisierung von Fehlstellen möglich ist. Keinen Einfluss auf die Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Messergebnisse hat die Wahl der Messmethode, sofern die verwendeten Messgeräte sich innerhalb der zulässigen Toleranzen befinden (Sumereder 2008).

3.4.2.2 Messdurchführung der Verlustfaktormessung

Die Durchführung der Verlustfaktormessung wird mit Hilfe einer vektoriellen Impedanzmessung vollzogen. Verwendet wird das Messsystem *LEMKE LDV-6*. Dieses System besteht aus einem Messsensor, welcher direkt mit dem Untersuchungsobjekt verbunden ist und einem Referenzsensor mit Referenzkondensator. Bei der vektoriellen Impedanzmessung im Frequenzbereich, auch unbalancierte Messbrücke genannt, wird der Strom über einen Referenzzweig (I_N) und den Prüfling (I_X) gemessen. Anschließend wird mittels harmonischer Analyse die Grundschiwingung der gemessenen Ströme ermittelt und der Verlustfaktor aus der Phasenverschiebung (ψ) der Grundschiwingungen berechnet. Mit Hilfe der Information aus der angelegten Spannungshöhe kann auch gleichzeitig der Kapazitätswert des Isolierstoffes ermittelt werden. Beide Messsensoren haben zur Messwertübertragung ein Lichtwellenleitersystem installiert. Eine USB-Box wandelt das Lichtsignal wieder in einen für das Computersystem auswertbaren Messwert um. Der unter Hochspannung stehende Versuchsaufbau ist somit galvanisch von der Rechneinheit getrennt. Eine beiliegende Software wertet die Daten aus und berechnet aus der anliegenden Spannung und dem Messstrom den Kapazitätswert des Versuchsobjektes aus. Anders als bei der Messung mit Scheringmessbrücke ist hierbei kein Abgleich der Messanordnung notwendig. In Abbildung 22 ist das Funktionsprinzip dieser Messmethode dargestellt.

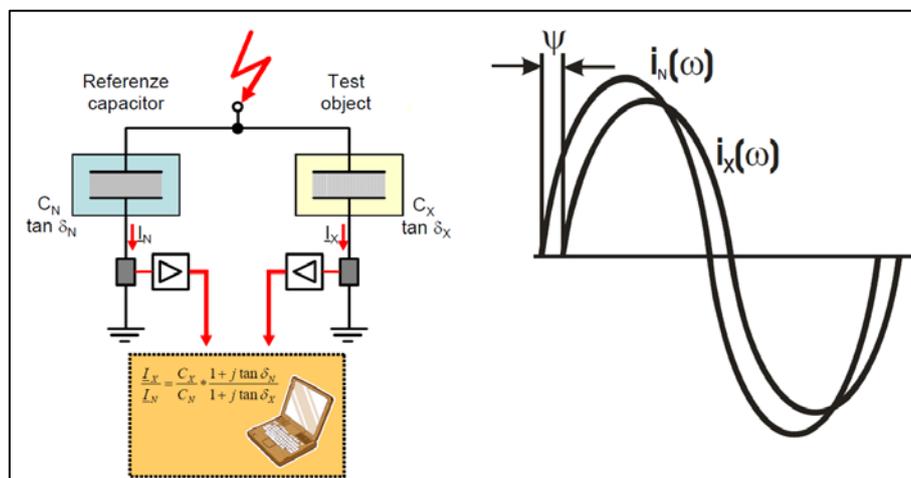


Abbildung 22: Aufbau und Funktionsprinzip der vektoriellen Impedanzmessung (Sumederer 2008)

Die Genauigkeit der Messung hängt hauptsächlich von der Empfindlichkeit der Messsensoren und der der Bezugsnormale ab. Die Vorteile dieser Messmethode liegen in der automatischen Messdatenverarbeitung und Protokollierung sowie in der Tatsache, dass dieses Messsystem nicht abgeglichen werden muss.

Nach Messung von EN 50209 sind die Verlustfaktorwerte am Versuchsobjekt an verschiedenen Spannungsniveaus, von 20% bis 120% der Maschinennennspannung

aufzunehmen. Dabei soll eine Spannungssteigerung von 20% der Nennspannung zwischen den einzelnen Messwerten liegen, wobei heutzutage eher eine 10% Steigerungsrate üblich ist. Für die Interpretation sind nach vollendeter Messung folgende Messwerte für die Analyse von Bedeutung:

- Verlustfaktor $\tan \delta$
- Verlustfaktor bei 20% der Nennspannung $\tan \delta_{0,2}$ (Verlustfaktoranzfangswert)
- Verlustfaktoranstieg $\Delta \tan \delta$
- Verlustfaktorzunahme $1/2 * (\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2})$
- Kapazitätswerte

Der Verlustfaktor ist ein Maß für die Verluste im Isolierstoff. Der Verlustfaktoranzfangswert wird dabei hauptsächlich von den Ableitströmen am Wickelkopf und dem Durchgangswiderstand des Isoliermaterials bestimmt. Der Verlustfaktoranstiegswert ist ein Maß für den Hohlraumgehalt einer Isolierung. Zuletzt können mit der Methode der vektoriellen Impedanzmessung parallel zur Verlustfaktormessung die Kapazitätswerte der Isolieranordnung bestimmt werden (Sumereder 2008).

Der Verlustfaktor jedes Einzelstabes wird in dieser Arbeit bis zu einer Spannung von 22 kV/AC aufgezeichnet, was einem Spannungswert von $2 * U_N + 1$ kV der Maschinennennspannung entspricht. Somit kann der Verlauf des Verlustfaktors über die üblichen Messungen bis 120% der Nennspannung hinaus beobachtet werden und möglicherweise neue oder bessere Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Verlustfaktor und Isolationszustand gewonnen werden. Die Durchführung der Verlustfaktormessung wird mit derselben 50 Hz-Wechselspannungsquelle vollzogen, die auch für den Dauerversuch verwendet wird. Der Startwert der Messung ist mit 20% der Nennspannung festgelegt, anschließend wird der Spannungswert um jeweils 10% der Nennspannung bis zum Endwert von 22 kV erhöht und der Verlustfaktorwert bei jeder Stufe aufgezeichnet. Gleichzeitig ermittelt das Messsystem automatisch den Kapazitätswert des Prüflings und speichert diesen gemeinsam mit dem Wert des Verlustfaktors ab.

Aus dem gewonnenen Verlauf können nun nach EN 50209 bestimmte Werte der Verlustfaktormessung ermittelt und auf Grenzwertüberschreitung untersucht werden. Wichtige Informationen liegen im 20%-Wert des Verlustfaktors ($\tan \delta_{0,2}$) sowie im sogenannten „*tip-up factor*“, dem Verlustfaktoranstiegswert ($\Delta \tan \delta$).

Nach Aufzeichnung der Verlustfaktorkurven werden die Verläufe graphisch dargestellt, sowie die Messwerte auf Einhaltung der Grenzwerte überprüft. Somit können wichtige Informationen bezüglich Verlustfaktorverlauf und Temperaturabhängigkeit, sowie Alterung des Isoliermediums gefunden werden. In unten angeführter Aufzählung sind die gemessenen sowie ermittelten Werte aus der Verlustfaktormessung dargestellt und aufgelistet.

Messwert	Bedeutung	Informationsgehalt
$\tan \delta_{0,2}$	Verlustfaktoranzfangswert	Kennzahl für den Durchgangswiderstand und den Oberflächenwiderstand im Wickelkopf.
$\Delta \tan \delta \max$	Maximaler Verlustfaktoranstieg	Maß für den Hohlraumgehalt
$1/2 * (\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2})$	Verlustfaktorzunahme	Charakteristisch für die Beanspruchung im Bereich 20% bis 60% der Nennspannung
$\tan \delta$ - Verlauf	Verlustfaktorverlauf	Darstellung der Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors
C_x	Kapazitätswert	Kapazitätswert des Prüflings bei $X \cdot U_N$

Tabelle 8: Messwerte und Informationen aus der Verlustfaktormessung

In Tabelle 9 sind die Grenzwerte für markante Verlustfaktorwerte laut EN 50209 aufgelistet, wobei hier beachtet werden muss, dass diese nur bis zur Nennspannung gültig sind. Darüber hinaus gibt es in der Fachliteratur keine Anhaltspunkte für Grenzwerte für dieses Isolationssystem.

$\tan \delta_{0,2}$	$1/2 * (\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2})$		$\Delta \tan \delta$ je Messintervall (0,2 U_N)	
Alle Prüflinge	95%	restliche 5%	95%	restliche 5%
	der Prüflinge		der Prüflinge	
30×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$	3×10^{-3}	5×10^{-3}	6×10^{-3}

Tabelle 9: Grenzwerte für die Verlustfaktormessung nach EN 50209 (ÖVE EN 50209:1998-11. 1998)

3.4.3 Teilentladungsmessung

3.4.3.1 Allgemeines zur Teilentladungsmessung

Die Teilentladungsmessung ist eine oft verwendete Diagnosemethode zur Beurteilung und Überwachung von technischen Betriebsmitteln. Schon seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist man sich des Phänomens der Teilentladung in Isoliermedien bewusst, und kennt auch die meist schadhafte Wirkung von Teilentladungen auf das Isoliermaterial (Schwarz 2013). Mit Hilfe der Teilentladungsdiagnose lässt sich eine Analyse des vorliegenden Isolierstoffes anfertigen, mit derer Experten eine Diagnose über den Zustand des Isolierverbandes geben können. Somit wird die Teilentladungsmessung zur Erfassung, Lokalisierung und Kategorisierung von Fehlstellen in der Isolierung und zur Abschätzung von Isolationsschädigungen verwendet. Im Folgenden werden Teilentladungen häufig mit der gängigen Abkürzung „TE“ bezeichnet. Oft findet sich auch der englische Fachausdruck „*partial discharge*“ mit der Abkürzung „PD“ in der Literatur wieder.

Teilentladungen sind Teildurchschläge in einem Isoliermedium aufgrund von örtlichen Feldstärkeüberhöhungen oder lokaler Minderung der Isolierfestigkeit. Diese Feldstärkeüberhöhungen entstehen infolge von Inhomogenitäten im Isoliermaterial, welche produktionsbedingt oder im Laufe von natürlicher Alterung des Isoliermaterials und der damit verbundenen Materialeigenschaftsänderung entstehen können. Inhomogenitäten im Isoliermaterial können aufgrund von Fehlstellen oder Hohlräumen im Isolierverband erscheinen. Permanent präsente Teilentladungsaktivitäten führen bei organischen Isoliermaterialien zu Erosionen und somit zu einem stetigen Abbau der Isolierfähigkeit. Dies kann soweit führen, dass die Teildurchschläge im Material zu einem Durchschlag übergehen und zum Versagen der Isolierfähigkeit führen. Die Intensität der Teilentladungen in einem festen Isoliermedium hängt neben dem geometrischen Erscheinungsbild der Fehlerstelle auch von der angelegten Spannung und deren Amplitude ab. Somit ist in der Regel das Teilentladungsverhalten des Isoliermediums bei Nennspannung des Betriebsmittels relevant. Die Entstehung von Teilentladungen wurde in der Fachliteratur bereits des Öfteren beschrieben und ist unter anderem im Buch „*Hochspannungstechnik*“ von A. Küchler genau erörtert (Küchler 2009). Weitere Informationen zur Beschreibung der Teilentladungsmessung und Analyse geben die Norm EN 60270 sowie die Informationsbroschüre 226 der CIGRE (*DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08. 2001*) (*CIGRE Brochure 226*).

Bei Isolierungen von rotierenden Hochspannungsmaschinen entstehen Hohlräume meist schon während der Fertigung. Somit sind auch neu gefertigte Maschinenisolierungen nicht hundertprozentig Teilentladungsfrei, jedoch durchlaufen diese die Qualitätssicherung des Erzeugers und sind somit als nicht maßgeblich schädigend einzustufen. Überhaupt spielt der Ort der Teilentladung im Isoliermedium eine wesentliche Rolle, da die schadhafte Wirkung von Teilentladungsaktivitäten an verschiedenen Orten unterschiedlich ausgeprägt ist. Abbildung 23 gibt einen guten Überblick über mögliche Teilentladungsorte in einer Generatorstabisolierung.

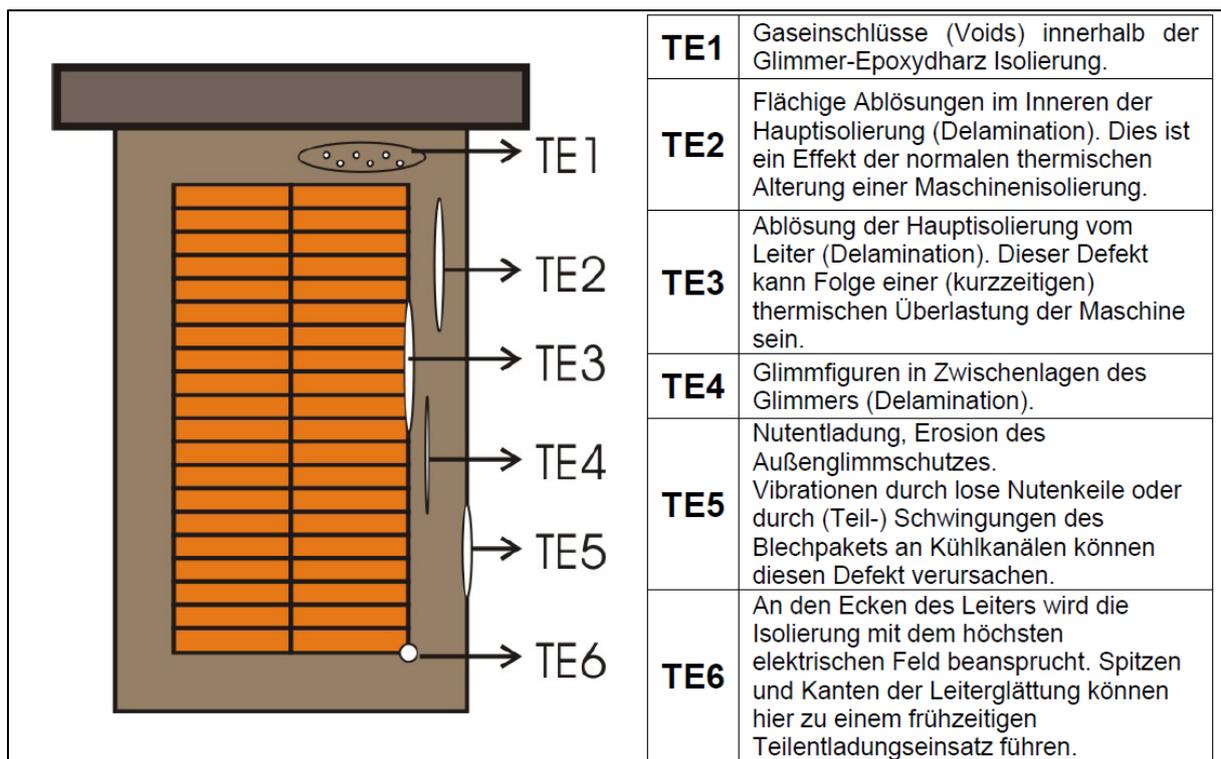


Abbildung 23: Teilentladungsorte an einem Generatorstab (Groß 2003)

Je nach Ort sind Teilentladungen dann in Stufen zu unterteilen, welche die Gefährdung beziehungsweise die schadhafte Wirkung am Isolierstoff selbst beschreiben. Eine Kategorisierung dieser Stufen ist der IEC 60034-27 entnommen und in Tabelle 10 dargestellt. Der verwendete Teil 27 dieser Norm beschäftigt sich speziell mit der *off-line* Teilentladungsmessung von Statorwicklungsisolierungen rotierender Maschinen.

TE-Quelle	Risiko	Bemerkungen
Innere Hohlräume	Niedrig	Innere TE werden in luft- und gasgefüllten Hohlräumen innerhalb der Hauptisolation erzeugt. Diese Hohlräume entstehen meist schon während der Fertigungsphase und stellen in der Regel keine nennenswerte Alterung des Isolierstoffes dar.
Innere Delamination	Hoch	Durch Überhitzungen im Isolierstoff kann es zur Ablösungen innerhalb des Isolierstoffgefüges der Hauptisolation in Längsrichtung kommen. Es bilden sich Lunker welche sich im Laufe der Zeit und auch unter Einwirkung von mechanischen Kräften ausweiten können.
Delamination zwischen Hauptisolation und Leiter	Hoch	Ablösung der Hauptisolierung in Längsrichtung vom Leiter durch gas- oder luftgefüllte Hohlräume. Diese können durch mechanische Einwirkung oder lokaler Überhitzung entstehen.
Nutentladungen	Hoch	Entladungen zwischen Statorblechpaket und Hauptisolation aufgrund eines defekten Außenglimmschutzes. Aufgrund von Kontaktfehlern können Lichtbögen zwischen AGS und Blechpaket entstehen. Diese Entladungen treten in der Regel nur während des Betriebes oder bei bereits stark beschädigtem Außenglimmschutz auf, sind jedoch in ihrer Erscheinungsform der Delamination zwischen Isolierung und Leiter ähnlich.
Oberflächenentladungen im Wickelkopf	Normal	Entladungen an der Oberfläche im Nutaustrittsbereich meist aufgrund von Verschmutzung und leitfähigen Partikeln am Generatorstab oder beschädigtem Feldsteuermaterialien. Da diese Entladungen nur an der Oberfläche in Erscheinung treten, haben sie in der Regel keinen Einfluss auf eine beschleunigende Alterung der Hauptisolierung
Leitende Partikel	Normal	TE-Aktivitäten aufgrund von Verunreinigungen an der Oberfläche oder separierte Bereiche von Glimmschutzmaterialien. Wegen der oberflächlichen Erscheinung führen diese zu keiner signifikanten Verschlechterung der Hauptisolierung.

Tabelle 10: Beschreibung der Risikostufen von Teilentladungen in der Generatorstabisolierung(DIN IEC 60034-27. 2005)

Aus der Teilentladungsmessung gehen folgende Werte hervor, die für die Auswertung und Beurteilung des vorliegenden Isoliermaterials wichtig sind:

- Scheinbare Ladung der TE-Pulse
- Phasenlage und Polarität der Pulse
- Impulshäufigkeit und Impulsregelmäßigkeit
- Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung (PDIV/PDEV)
- Teilentladungsfingerprint oder Teilentladungshüllkurve

Die Teilentladungsmessung ist eine probate Methode zur Zustandsbeurteilung und Zustandsentwicklung von Generatorwicklungsisolierungen und kann auch zur Lokalisierung und Kategorisierung von Fehlstellen eingesetzt werden.

3.4.3.2 Messdurchführung der Teilentladungsmessung

Die Durchführung der Teilentladungsmessung in dieser Masterarbeit geschieht unter Anleitung der Normen *EN 60270:2001* sowie *DIN IEC 60034-27*. Diese Beschreiben den genauen Aufbau zur Messung an einem einzelnen Generatorstab, sowie die vorher notwendige Kalibrierung des Messkreises zur aussagekräftigen Auswertung der Messergebnisse. In Abbildung 24 ist der Prüfaufbau, wie er während den Untersuchungen verwendet wird, nach Norm schematisch dargestellt. Darin abgebildet sieht man die Einbindung des Prüflings in den Messkreis, wobei der Anschluss des Prüflings selbst an dem Kupferleiter und dem außen angebrachten Lamettband erfolgt.

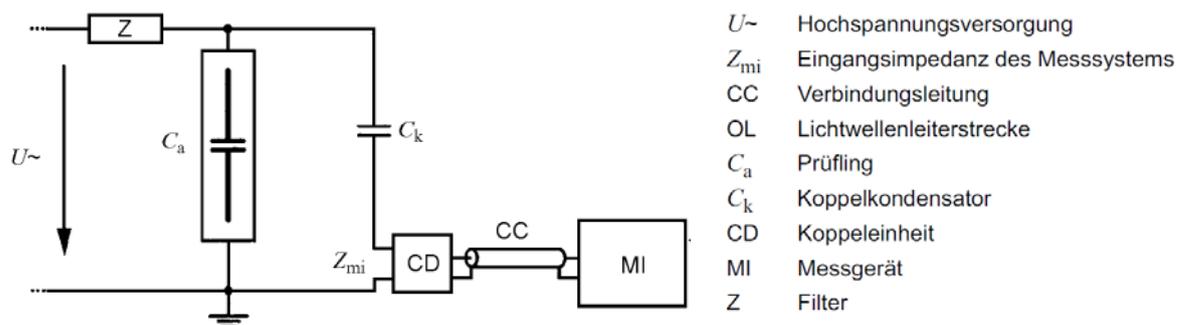


Abbildung 24: Prüfaufbau für die TE-Messung an einem Prüfling nach IEC 60270 für geerdete Objekte (*DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08. 2001*)

Die Teilentladungsmessung wird mit dem Messsystem *LEMKE LDS-6*, in Abbildung 24 ist das Messsystem durch die Blöcke „MI“, „CC“ und „CD“ dargestellt, durchgeführt. Der Vorteil dieses Messsystems liegt in der computerunterstützten Auswertung der Messung und Digitalisierung der Messdaten. Somit ist im Anschluss durch die gegebene Software eine vereinfachte Weiterverarbeitung der Messdaten möglich. Das *LDS-6* zählt zu den

breitbandigen Messsystemen in der TE-Messung und hat somit den Vorteil, dass nahezu die gesamte Information der Entladungen detektiert werden kann. Nachteilig erweist sich jedoch, dass die Messung ungewollt durch äußere Störeinflüsse beeinflusst werden kann. Dieser Faktor sollte jedoch aufgrund der guten Laborbedingungen weitgehend minimiert sein.

Ein wichtiger Schritt vor dem eigentlichen Messzyklus ist die Kalibrierung des Messkreises mit dem jeweiligen Prüfling, um einen Absolutpegel für die scheinbare Entladung zu erhalten. Zwar ist es prinzipiell möglich den Kalibriervorgang auch nach der Messung durchzuführen und den Entladungspegel anschließend nachzurechnen, jedoch ist eine Kalibrierung im Vorhinein unbedingt empfehlenswert, da etwaige Störungen oder Fehler im Prüfaufbau selbst frühzeitig erkannt werden können. Der Ablauf der Kalibrierung ist wiederum in *EN 60270:2001* festgehalten. Hierbei wird ein geprüfter und für den Aufbau des Messsystems geeigneter Kalibrator parallel zum Prüfling geschlossen. Die eingestellte Entladungshöhe des Kalibrators richtet sich nach der später auftretenden Entladungshöhe während der Prüfung, sollte etwa gleich hoch sein und liefert den Vergleichswert für die anschließende TE-Messung. Mit Hilfe des Kalibrators wird dann der Messaufbau für die computerunterstützte Auswertung voreingestellt. Für das verwendete TE-Messsystem *LEMKE LDS-6* wurde der Kalibrator *LDC-5/S3* derselben Firma verwendet. Wichtig ist, dass während der Kalibrierung die Hochspannungsquelle ausgeschaltet bleibt, da sonst die hohe Spannungsbeanspruchung den Kalibrator zerstören würde (*DIN EN 60270:2001*).

Die zum Messsystem zugehörige Messsoftware bietet zwar die Möglichkeit der automatischen Anpassung der Verstärkung des Messsignals, jedoch ist diese Einstellung aufgrund der Nichtlinearität der Verstärkerstufen nicht ratsam. Es wird somit die Messung mit einem Kalibrierpegel von 5.000 pC und einer Eingangsverstärkung von 42 dB eingestellt und während der Messung nicht mehr verändert.

Der Messablauf der Teilentladungsmessung verläuft ähnlich wie die Verlustfaktormessung. Zu Beginn werden die TE-Einsatzspannung und die TE-Aussetzspannung des Versuchsstabes ermittelt. Hierbei wird am Prüfling die Messspannung schrittweise so weit erhöht, bis mit Hilfe des TE-Messsystems Teilentladungsaktivitäten ersichtlich sind. Anschließend wird die Spannung bis auf Nennspannung erhöht, und soweit wieder heruntersetzt, bis keine Teilentladungsaktivitäten am Prüfling mehr vorhanden sind. Die beiden Werte werden aufgezeichnet und in der Messtabelle eingetragen. Im englischen Sprachgebrauch und in der Literatur wird für die TE-Einsatzspannung und TE-Aussetzspannung oft der Begriff PDIV für Partial Discharge Inception Voltage und PDEV für Partial Discharge Extinction Voltage verwendet. Zur Aufzeichnung der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung ist noch zu sagen, dass in der Theorie die Unregelmäßigkeit der Einsetz- und Aussetzspannung erwähnt wird. Diese Unregelmäßigkeit der beiden Messwerte ist darauf zurückzuführen, dass es bei niedrigen Spannungen aufgrund eines Mangels von Startelektronen in kleinen Hohlräumen zu einer statistischen Streuung kommt (Küchler 2009).

Im Anschluss an diese Messung kann der TE-Verlauf am Prüfling aufgenommen werden. Hierbei startet die Messung wieder bei 20% der Nennspannung. Die Prüfspannung wird alle 5 Sekunden um 10% der Nennspannung erhöht bis die 100%ige Nennspannung erreicht ist. Nach einer Spannungshaltung von 30 Sekunden bei Nennspannung wird diese wieder in gleichen Schritten wie bei der Steigerung bis auf 20% der Nennspannung gesenkt. Die Teilentladungsaktivitäten werden während der gesamten Messzeit automatisch und kontinuierlich aufgezeichnet. Die Spannungspausen von 5 Sekunden bei jeder Spannungsstufe garantierten ein Einpendeln der TE-Aktivität nach jeder Steigerung beziehungsweise Senkung, um eine repräsentative TE-Aktivität bei jeder Stufe rekonstruieren zu können. Der maximale Q_{IEC} -Wert, dieser spiegelt den Mittelwert der positiven/negativen Spitzenentladungswerte über 20 Perioden wieder, entspricht dem Messwert nach 30 Sekunden Spannungsbelastung bei Nennspannung. In Abbildung 25 ist in der unteren Hälfte repräsentativ der Verlauf der Messspannung über den Messzeitraum aufgetragen sowie der TE-Fingerprint des Versuchsstabes, welcher Resultat der kontinuierlichen Aufzeichnung der TE-Aktivität während der Prüfung am Messobjekt ist.

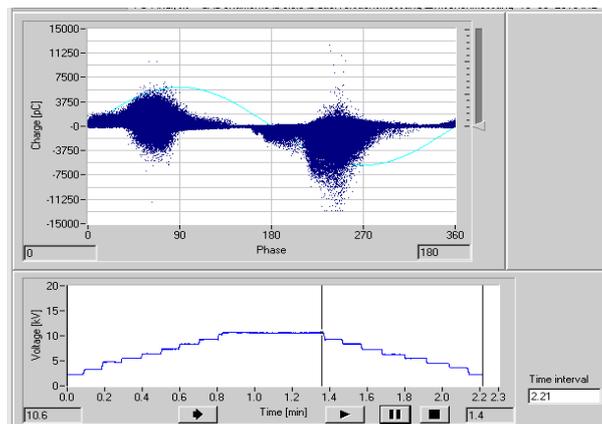


Abbildung 25: Ergebnis der TE-Messung am Stab R2 nach 80 Stunden Dauerbelastung

Für die Auswertung der Messung sind im Anschluss die positiven und negativen Q_{IEC} -Werte, sowie die PDIV und die PDEV von Bedeutung, als auch der aus dem TE-Verlauf gewonnene *Fingerprint* des Versuchsstabes. Dieser *Fingerprint* kann nun Aufschluss über die Art und den Entstehungsort der Teilentladung im Isoliermedium liefern. In (Hudon, Belec 2005) und (CIGRE Brochure 226 2003) sind Hilfestellungen zur Interpretation der TE-Fingerprints zusammengefasst. Die unten stehende Auflistung beinhaltet noch einmal die gewonnenen Messwerte aus der Teilentladungsmessung.

Messwert	Bedeutung	Informationsgehalt
<i>PDIV</i>	TE-Einsatzspannung	Information über Art und Größe der Hohlräume und Zustand der Isolation
<i>PDEV</i>	TE-Aussetzspannung	Information über Art und Größe der Hohlräume und Zustand der Isolation
Q_{IEC+}	Mittelwert der pos. Spitzenwerte der Entladungen über 20 Perioden	Information über die Intensität der Entladung
Q_{IEC-}	Mittelwert der neg. Spitzenwerte der Entladungen über 20 Perioden	Information über die Intensität der Entladung
<i>Fingerprint</i>	-	Informationen über vorhandene Delaminationen sowie andere Arten von Teilentladungen am Versuchsobjekt

Tabelle 11: Messwerte und Informationen aus der Teilentladungsmessung

Die Q_{IEC} -Werte geben Auskunft über die Höhe der Teilentladungen in einem Isoliermedium. Mit fortlaufender Zeit können sich Lunker und Hohlräume in einer festen Isolierung ausweiten und somit die Intensität der Teilentladungen immer weiter erhöhen, bis es zum Durchschlag der Isolation kommt. Gleichzeitig ist die Aussagekraft dieser These umstritten, da angenommen wird, dass sich im Laufe der Zeit an den Hohlraumwänden aufgrund der ständigen TE-Aktivität eine leitende Schicht aus Kohlenstoff, oder leitende Säuren bilden können, welche die TE-Aktivität und Intensität wieder sinken lassen. Somit kann das Phänomen auftreten, dass die TE-Aktivität ab einem gewissen Zeitpunkt, kurz vor dem Isolationsversagen, wieder abnimmt (Weiers 2007).

Mittels Auswertung der TE-Fingerprints kann eine Aussage über die Art und den Entstehungsort der Teilentladungen gegeben werden. Die Form der Entladungswolke gibt Aufschluss über die Art der Entladung. Bei Einschlüssen und Delaminationen ist die Verteilung der Entladungen gleichverteilt (Gauß-Verteilung) mit einer Standardabweichung von etwa 15° . Bei einer ungleichmäßigen Entladungsform handelt es sich meist um Entladungen anderer Natur. Weiteres gibt die Polarität der Entladung und die Phasenlage Auskunft über den Entstehungsort. Bei TE aufgrund von Nutentladungen treten mehr positive als negative Entladungen auf. Entladungen in der Nähe des Innenleiters weisen ein umgekehrtes Entladungsbild auf, beinhalten also mehr negative als positive Entladungen. Bei Oberflächenentladungen tritt eine Dominanz von positiven Entladungen im Bereich von 225° der Phasenlagen auf, wohingegen Entladungen in der Nähe des Innenleiters aufgrund von Hohlräumen oder Delamination eine negative TE-Dominanz bei einer Phasenlage von 45° aufweisen. Bei einem Gleichgewicht zwischen positiver und negativer Entladungen im Bereich von 45° und 225° treten Entladungen in der Isolierung auf, welche aufgrund von Einschlüssen in der Isolierung, thermischer Überlastung oder schlechter Imprägnierung

während des Herstellungsprozesses hervorgerufen werden können (Sumereder 2008). Aus der Summe diverser Fehlstellen in einer Isolation ergibt sich dann das Gesamtbild der Teilentladungen. Somit ist die TE-Interpretation durch Überlagerung mehrerer Fehler schwierig und oft gestört.

Auch über die Lage der Teilentladungseinsetzspannung und Teilentladungsaussetzspannung kann eine Information über den Zustand des Isoliermediums und eine Unterscheidung in Hohlraum- und Oberflächenentladung getroffen werden. So werden bei qualitativ hochwertigen Isolationssystemen Teilentladungen erst bei höherer Spannungsbeanspruchung entstehen. Die Differenz der PDIV und PDEV kann eine Aussage über die Größe der Hohlräume zulassen, so werden bei nahe aneinander liegenden PDIV und PDEV-Werten die Hohlräume im Isoliermedium größerer Natur sein, als bei eng zusammenliegenden Werten (Sumereder 2008).

Die unten stehende Abbildung 26 stellt den Verlauf von Teilentladungsein- und aussetzspannung mit dem charakteristischen Kurvenbild bei gegebenem Isolationszustand dar. Auf der Ordinate ist die Teilentladungsintensität logarithmisch dargestellt gegenüber der Spannungsbeanspruchung auf der Abszisse. Die Teilentladungseinsetzspannung ist in der Graphik mittels weißem Pfeil, die Teilentladungsaussetzspannung mittels schwarzem Pfeil gekennzeichnet.

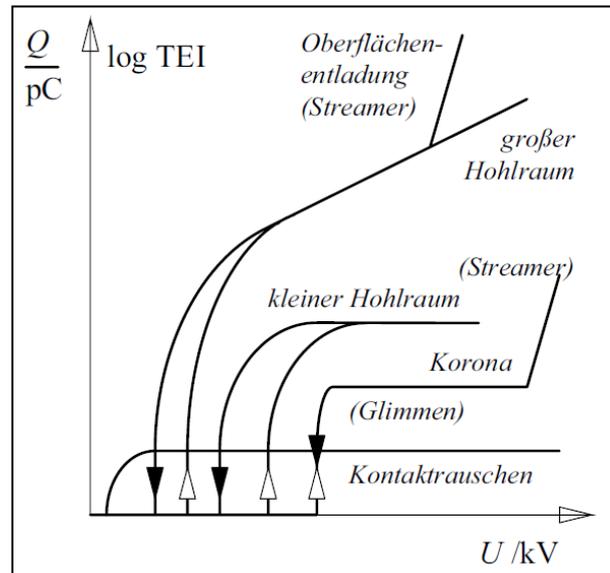


Abbildung 26: Charakteristische Kurven der Teilentladungsintensität in Abhängigkeit der Spannung (Küchler 2009)

3.5 Abschließende Untersuchungen

3.5.1 Visuelle Untersuchung nach Ausfällen und beendeter Spannungsprüfung

Die visuellen Nachuntersuchungen werden stets nach Isolationsversagen am jeweiligen Versuchsobjekt durchgeführt. Nach einem Isolationsversagen ist es zwischen Innenleiter des Generatorstabes und dem außen angebrachten Lamettband zum Kurzschluss gekommen, sodass der Überstromschutz der Spannungsversorgung die Messung automatisch unterbrochen hat. Auch der Stundenzähler, welche zur Aufzeichnung der Prüfdauer diente, ist gestoppt worden. Nach dem Ausbau des Stabes und der Dokumentation der Ausfallzeit wird das Lamettband am Stab entfernt und der Generatorstab optisch nachuntersucht. Hierbei wird Augenmerk auf die Durchschlagstelle und das optische Erscheinungsbild des Stabes nach der Dauerbelastung gelegt. Die Durchschlagstelle wird genau dokumentiert und markiert und ein Kurzbericht über die visuelle Nachuntersuchung mit Fotodokumentation jedes Generatorstabes angefertigt. Mit Hilfe dieser Dokumentation und der vorher angefertigten Messwerttabelle aus den elektrischen Untersuchungen kann eine statistische Auswertung der Fehlerdurchschlagstelle und den Messergebnissen im Vorfeld, sowie eine Analyse der Restlaufzeit und der Isolationsbeschaffenheit angefertigt werden.

3.5.2 DSC und STA –Analyse

Zusätzlich zu den Untersuchungen, welche an der TU-Graz vorgenommen werden, erklärte sich die FEE/RICE UWB aus Pilsen (Faculty of Electrical Engineering/Regional Innovation Centre for Electrical Engineering; University of West Bohemia) bereit, aus Materialproben einiger Generatorstäbe DSC- und STA-Analysen durchzuführen. Somit sind an sechs Probestücken aus drei verschiedenen Generatorstäben die DSC-Analysen vollzogen worden und an einem Probestück eine STA-Analyse. Die Auswahl der Stäbe basierte auf einem Reservestab, welcher als Referenz dienen sollte, und jeweils einem Stab aus der Maschine Af2 und Wu4 mit jeweils durchschnittlichen Restlaufzeiten von ca. 100 Stunden bei 32 kV Prüfspannung.

Die DSC-Analyse (Differential Scanning Calorimetry) ist eine thermoanalytische Technik bei der die Glasübergangstemperatur des Isoliermediums als wichtigster Parameter untersucht wird. Bei dieser Technik wird während der Erwärmungsphase der Materialprobe gemessen, welche Wärmemenge für eine bestimmte Temperaturerhöhung der Probe benötigt wird. Im sogenannten Glasübergangspunkt gibt es einen sprunghaften Anstieg der Wärmekapazität bei vermindertem Wärmefluss, da sich das chemische Gefüge des Isoliermaterials ändert. Die Enthalpieänderung enthält dann Informationen bezüglich der Alterung des Isolierstoffes (Polanský, Prosr et al. 2013).

Die STA-Analyse (Simultaneous Scanning Calorimetry) wurde nur an einem Probestück der Generatorisolierung durchgeführt. Diese Messung ist eine Kombination aus einer Gewichtsmessung und einer Differenzwärmeflussmessung (DSC-Analyse) während der

Erhitzung der Probe auf ca. 800°C. Die STA-Analyse ermöglicht mit ihrer Messung die Darstellung von Masseverlust durch organische Materialien wie zum Beispiel Harz. Nach zwei signifikanten Temperaturpunkten, bei welchen der Gewichtsverlust am deutlichsten sichtbar ist, erreicht das Material schließlich einen stationären Massepunkt in welchem nur mehr organischen Materialien, wie Glimmer oder Glas vorhanden sind. Während der Messung und Auswertung des Differenzwärmeflusses gibt es in der Regel drei charakteristische Punkte beziehungsweise Spitzenwerte, wobei nur der erste Spitzenwert Informationen bezüglich der Alterung der Isolierung geben kann. Aus der STA-Analyse können dann Informationen über das Gewicht und Zusammensetzung der Probe, Schmelzverhalten und Enthalpie, sowie Aktivierungsenergie für chemische Reaktionen gewonnen werden (Polanský, Prosr et al. 2013). Weitere Informationen zur DSC und STA – Analyse können in (Prosr, Mentlik et al. 2011) nachgelesen werden.

3.5.3 Harzanalyse

Im Anschluss an die elektrischen und optischen Untersuchungen wird noch eine Untersuchung des Restharzgehaltes an ausgewählten Versuchsobjekten durchgeführt. Mit Hilfe einer Gewichtsanalyse während der Erwärmung von Isolationsprobestücken soll der Restharzgehalt der Proben ermittelt werden. Wie bei der STA-Analyse werden hier Probestücke in einem Ofen bis zu einer Temperatur von 800°C erhitzt und die Gewichtsabnahme aufgrund der Verbrennung organischer Materialien gemessen. Bei entsprechend hoher Temperatur bleiben dann fast ausschließlich anorganische Materialien wie Mica und Glas zurück. Aufgrund der Massedifferenz zu Beginn und am Ende der Messung kann auf den Restharzgehalt im Material rückgeschlossen werden.

Für die Durchführung der Messung werden bei ausgewählten Stäben nach Beendigung des Dauerversuches Proben aus der Hauptisolierung entnommen. Die Auswahl der Stäbe basiert auf eine breite Streuung der Restlaufzeiten aus dem Dauerversuch. Als Referenz werden zwei Reservestäbe, wobei einer davon nicht in den Dauerversuch eingeschlossen war, analysiert, sowie drei Stäbe der Maschine Af2 und zwei Stäbe der Maschine Wu4. Bei der Auswahl der Maschinenstäbe werden sowohl Versuchsobjekte mit sehr langer Laufzeit, mit mittlerer und kurzer Laufzeit sowie Sofortausfälle, also Stäbe welche bei einer Spannungsbelastung von 32 kV keine Restisolierfähigkeit aufweisen konnten, gewählt. Nach der Gewichtsanalyse jedes Probestückes werden diese parallel in einem Ofen erhitzt. Die Temperaturerhöhungsstufen werden mit 200°C festgelegt und nach einer Erwärmungsphase der Probestücke wird die Gewichtsmessung wiederholt. Die Messung soll so mit einem Steigerungsintervall von jeweils 200 °C bis zu einer Temperatur von 800°C fortgeführt werden, sodass die organischen Materialien im Isoliermedium vollständig ausbrennen können. Nach vollendetem Ausbrennen kann mit Hilfe der relativen Gewichtsabnahme jedes Probestückes ein Vergleich der Versuchsstäbe auf ihren Restharzgehalt hin angestellt werden.

4 Auswertung der Messergebnisse

Die Auswertung der Messergebnisse aus den Untersuchungen gliedert sich grundsätzlich in zwei Bereiche. Als erstes werden die Ergebnisse aus den Vorfelduntersuchungen separat begutachtet um in Anschluss die Messungen aus den Dauerversuchen zu beurteilen. Anschließend folgen Quervergleiche der unterschiedlichen Maschinen sowie der unterschiedlichen Stabpositionen im Generatorständer. Da in diesem Kapitel nicht alle Messwerte der Statorstäbe einzeln aus den Messungen präsentiert werden können, ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Messwerte jedes einzelnen Statorstabes im Anhang enthalten.

4.1 Zustandsbeurteilung nach den Vorfeldmessungen

Wie schon unter Kapitel 3.2.3 beschrieben werden für die Temperaturversuche drei verschiedene Temperaturwerte gewählt. Da es zum Einen Abweichungen der Soll- und Ist-Temperatur der Umgebungsluft gibt, und zum Anderen die Stabtemperatur aufgrund der beschränkten Erwärmungsphase nicht der Raumtemperatur entsprechen, wird in Tabelle 12 eine Auflistung der wahren Temperaturwerte gezeigt. Im Folgenden wird bei der Auswertung der Messergebnisse nur von Soll-Temperaturen gesprochen. Hierbei ist die Abweichung zur Ist-Temperatur jedoch immer zu beachten.

Umgebungstemperatur		Stabtemperatur
soll	ist	ist
20°C	20,5°C	19,6°C
40°C	39,2°C	37,2°C
60°C	57,0°C	52,0°C

Tabelle 12: Temperaturwerte während den Eingangsmessungen

Aufgrund der Auswertungen der visuellen Untersuchungen können 9 von 12 Stäben der Maschine Af2 einen guten Isolationszustand aufweisen. Lediglich 3 Stäbe weisen Mängel auf, wobei bei einem nur mittelschwere Mängel zu sehen waren. Die optische Auswertung der Maschinenstäbe Wu4 ergibt bei 3 von 12 Stäben erhebliche Mängel, wobei hier nur bei einem Stab diese aufgrund des Ausbaus entstanden sein dürften. 5 Stäbe weisen mittelschwere Mängel auf, wobei diese meist aufgrund von Erosionen des AGS zustande gekommen sind. Die restlichen 4 Stäbe hinterließen einen optisch guten Eindruck. Bei den Reservestäben gab es wie erwartet keine optischen Mängel, auch die zusätzlich gelieferten Generatorstäbe RWu4_139(V) und RWu4_27(W) für die Probemessungen sind in einem optisch guten Zustand. In Tabelle 13 bis 15 auf Seite 76 und 77 sind die Ergebnisse der optischen Untersuchung noch einmal aufgelistet.

Während den Eingangsmessungen, beziehungsweise vor Abschluss der Eingangsmessungen sind bereits zwei Versuchsstäbe wegen Isolationsversagen ausgeschieden. Die Versuche sind mit den restlichen Stäben weitergeführt worden.

4.1.1 Isolationswiderstandsmessung

Die Auswertung des Isolationswiderstandsverlaufes ergibt ein ähnliches Bild wie die Verlustfaktormessung. Die Werte der Maschine Af2 sind, bis auf eine Ausnahme, zwar durchwegs in Ordnung, beinhalten jedoch unter den Stäben eine relativ große Streuung. Eine Ausnahme mit verhältnismäßig flachem Verlauf bildet der Stab Af2_10(V). Die Ergebnisse der Versuchsobjekte aus Wu4 sind über den gesamten Temperaturbereich hin konstant und recht hoch angesiedelt. Bei den Reservestäben zeigt sich, ähnlich wie bei den Verlustfaktorkurven in Kapitel 4.1.2, eine stärkere Streuung der Verläufe der Isolationswiderstände, wobei die Reservestäbe aus der Maschine Wu4 am besten abschneiden. Für eine aussagekräftige Interpretation werden für die Eingangsmessungen hauptsächlich die Isolationswiderstandswerte aus der 40°C-Messung genommen, wie es laut IEEE empfohlen und in Abbildung 27 dargestellt ist. Somit sind 5 von 30 Stäben in ihrem Isolationswiderstandsverlauf auffällig, wobei nur drei hiervon offensichtlich flachere Verläufe aufweisen. (ÖVE 1998)(IEEE Std 43-2000 2000)

Auffällig sind die verhältnismäßig schlechten Werte der Stäbe Af2_10(V) sowie R1 und R3 während der Isolationswiderstandsmessung.

Zur weiteren Selektierung kann die Isolationszeitkonstante Auskunft über mögliche Verfeuchtung des Isolierstoffes geben. Laut Empfehlung des ÖVE gibt es Richtwerte für die Verfeuchtung von Generatorwicklungen. Auch berücksichtigt die Isolationszeitkonstante annähernd die Maschinengrößen, so können unterschiedlich große Maschinen mit gleicher Wicklungstemperatur untereinander verglichen werden (ÖVE 1990). Da es sich jedoch um Einzelstäbe handelt und der Richtwert nie unterschritten wurde, kann für die Aussage einer feuchten Isolierung nur der Vergleich mit den anderen Stäben herangezogen werden.

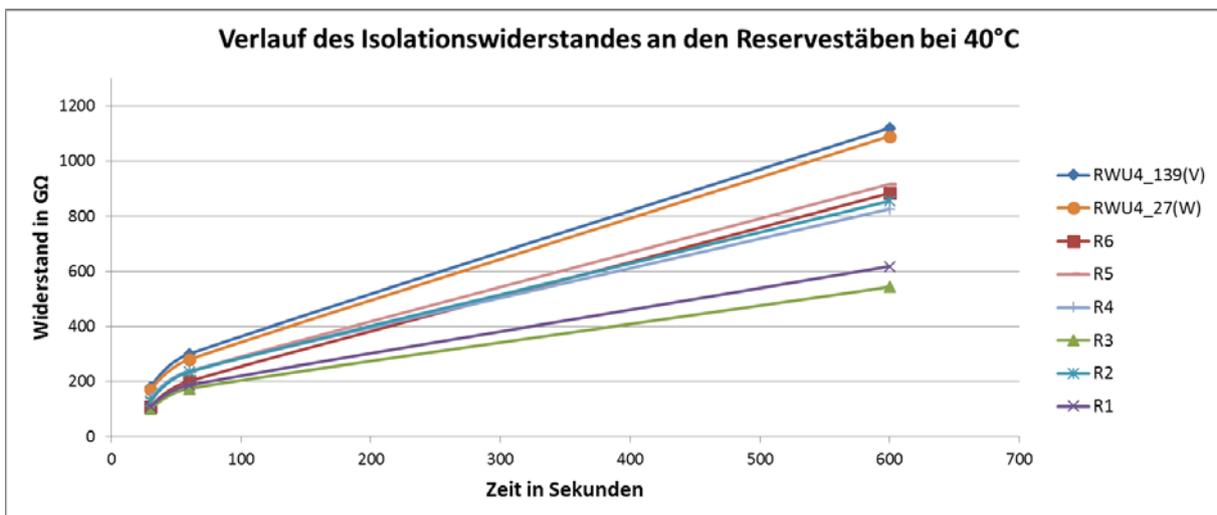
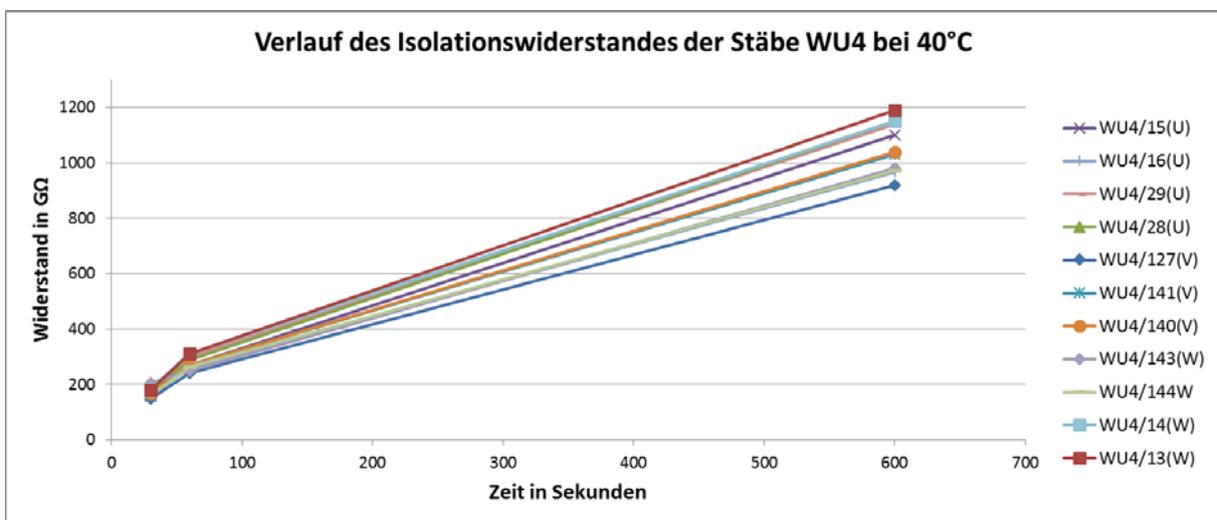
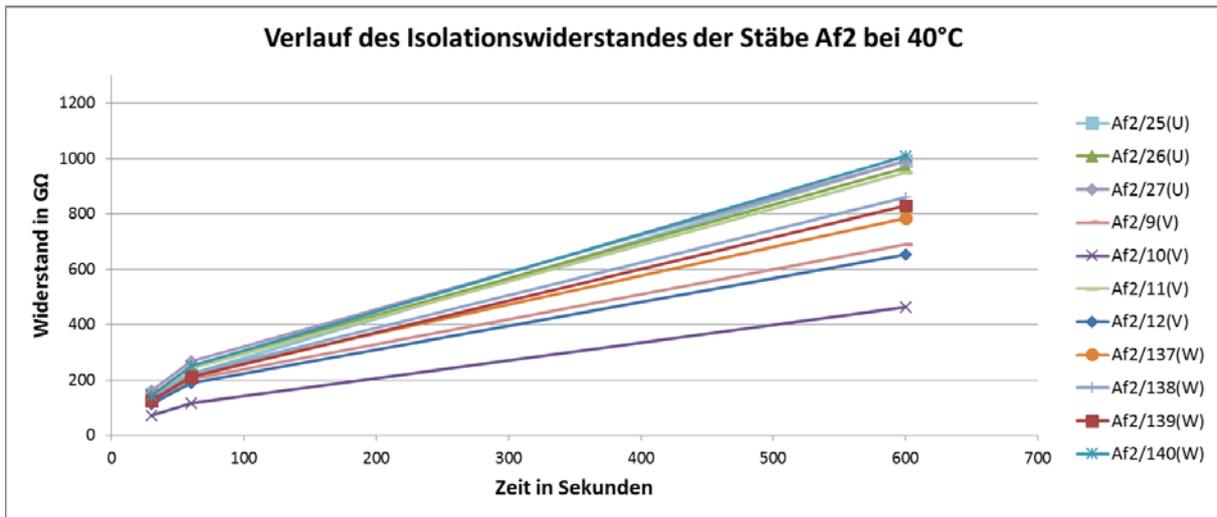


Abbildung 27: Verlauf der Isolationswiderstandswerte bei 40°C - Messtemperatur

Abbildung 28 stellt die Isolationszeitkonstanten der Versuchsstäbe im Vergleich dar. Wieder sind die Messwerte der einzelnen Stäbe maschinenspezifisch, beziehungsweise als Reservestäbe, zusammengefasst. Auf der Ordinate der Graphik ist der Wert der Isolationszeitkonstanten ersichtlich, wobei hier aufgrund der besseren Darstellungsmöglichkeit der Wertebereich zwischen 1000 s und 4500 s zu sehen ist. Für die Berechnung der Isolationszeitkonstante sei auf Kapitel 3.4.1 verwiesen. Die Abszisse zeigt die Messtemperatur, bei welcher die Isolationszeitkonstante ermittelt worden ist. Die Werte der Maschinen Af2 und der Reservestäbe haben hier teilweise Streuungen bei den Messwerten, wobei die Werte der Maschine Wu4 relativ konzentriert und durchgängig sehr hoch angesiedelt sind. Bei den Reservestäben ist ersichtlich, dass die Stäbe RWu4_139(V) und RWu4_27(W) sich etwas von den restlichen, „regulären Reservestäben“ abheben. Die schlechtesten Werte haben die Stäbe R1 und R3. Bei der Verteilung der Messwerte der Maschine Af2 ist ebenfalls ersichtlich, dass ein Stab einen verhältnismäßig schlechten Wert aufdeckt (Af2_10(V)) und noch die Stäbe Af2_12(V) und Af2_9(V) geringere Werte aufweisen. Insgesamt weisen somit 5 von 30 Stäben eine marginale Minderung der Isolationszeitkonstante auf.

Stäbe mit auffälligen Werten nach Auswertung der Isolationszeitkonstante bei 40°C:

- R1
- R3
- Af2_10(V)
- Af2_12(V)
- Af2_9(V)

Bei den Messergebnissen sind aufgrund des verwendeten Wertebereiches zwar Unterschiede bezüglich der Isolationszeitkonstante zu erkennen, jedoch sind diese zu gering und die Werte der Einzelstäbe zu hoch, als eindeutig von feuchter Isolierung gesprochen werden könnte. Laut Richtwert liegt der Grenzwert für Isolationszeitkonstanten der Statorwicklung mit 40°C Wicklungstemperatur unter 100 s, die Messergebnisse dieser Messung liegen jedoch weit darüber.

Auch der Polarisationsindex der Einzelstäbe ist durchwegs über den vorgegebenen Werten laut Norm für Klasse B-Isolierungen von 2, und lässt daher keine Hinweise auf übermäßig verschmutzte Versuchsobjekte zu.

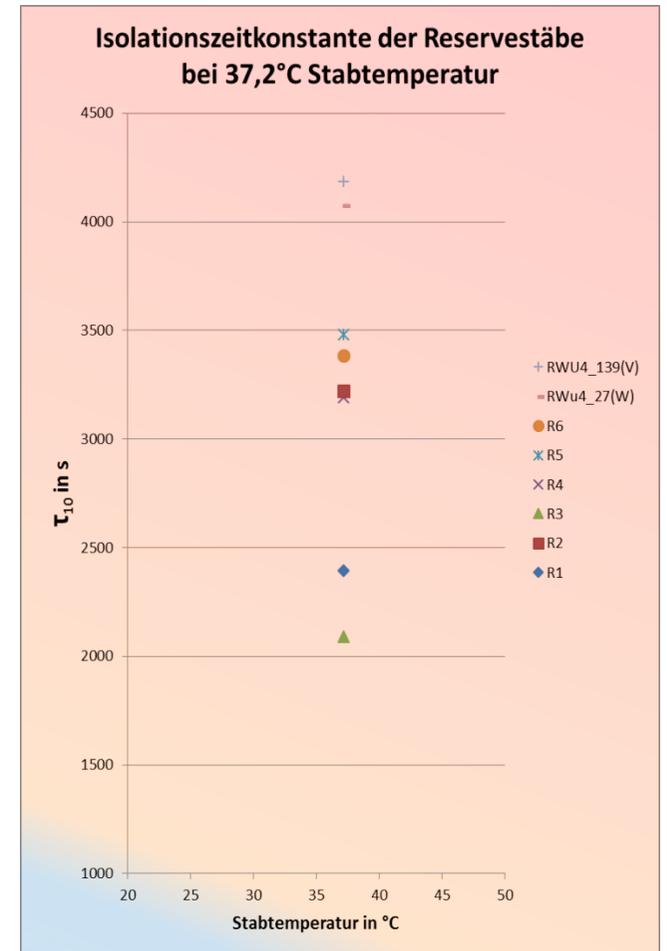
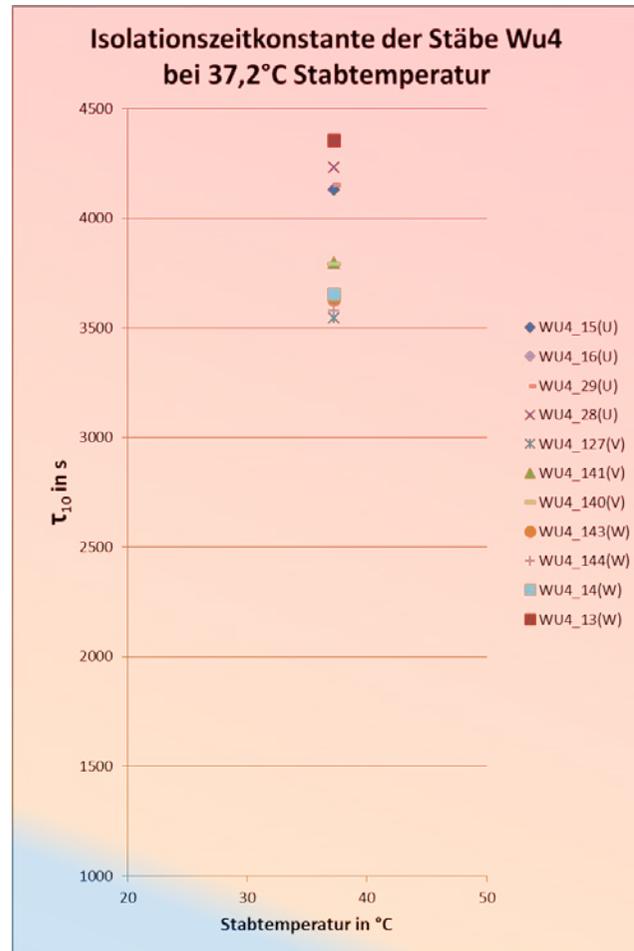
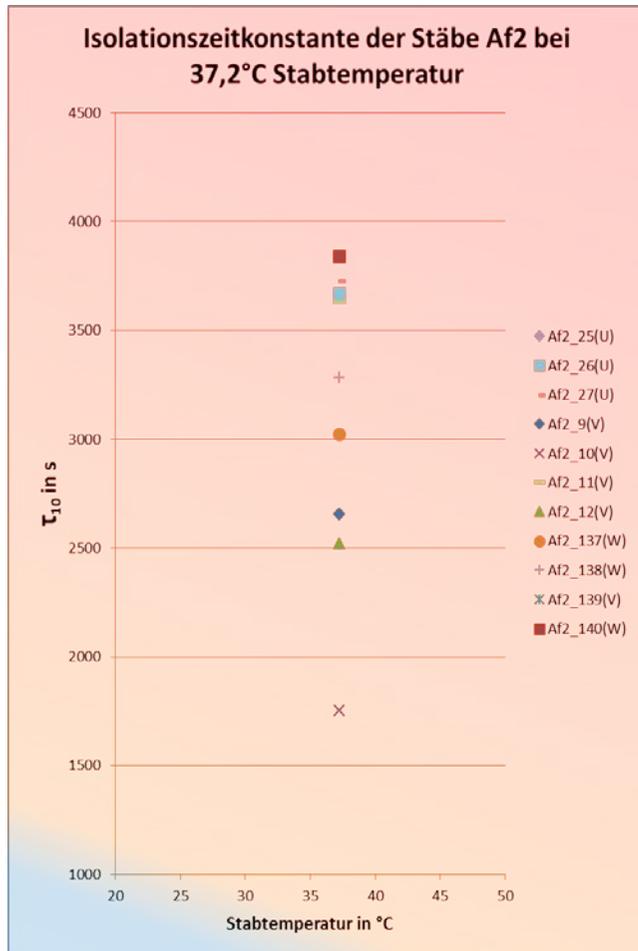


Abbildung 28: Isolationszeitkonstanten der Maschinen Af2, Wu4 und Reservestäbe nach der 40°C Eingangsmessung

4.1.2 Verlustfaktormessung

Der Verlauf des Verlustfaktors in Abhängigkeit der Temperatur ist an den beiden Maschinen und den Reservestäben unterschiedlich stark ausgeprägt. Dargestellt sind die Verlustfaktorkurven der einzelnen Stäbe in Abbildung 29. Hierbei sind jeweils die Stäbe einer Maschine, beziehungsweise die Reservestäbe bei einer gegebenen Raumtemperatur in einem Diagramm zusammengefasst, wobei jeder Stab mit seinem individuellen Verlustfaktorverlauf im Diagramm eingezeichnet ist. Es wurde auf eine gleiche Skalierung der Achsen bei allen Graphiken geachtet. Auf der Ordinate ist der Verlustfaktorwert bis 0,05 aufgetragen, was einem Wert von 5% entspricht. Zwar sind somit manche Messwerte der Reservestäbe nicht auf der Graphik ersichtlich, jedoch sind die Relationen der anderen Stäbe besser zu erkennen. Auf der Abszisse ist der jeweilige Spannungswert bis zu einer Spannung von 22 kV ersichtlich.

Bei den Maschinenstäben Wu4 ist der Verlauf über alle Stäbe relativ flach verteilt und in Abhängigkeit der Temperatur nur nach oben hin parallel verschoben. Einzige Ausnahme ist der Stab Wu4_29(U). Die Streuung der Verlustfaktorkurven bei der Maschine Af2 ist gegenüber den Stäben Wu4 recht signifikant. Die Stäbe Af2_25(U) und Af2_11(V) sowie Af2_10(V) haben hier einen besonders starken Anstieg beziehungsweise Verlustfaktorendwert. Bei den Reservestäben ist stark auffällig, dass sie verglichen mit den betriebsgealterten Stäben der Maschinen Af2 und Wu4 stark erhöhte Verlustfaktorwerte aufweisen.

Betrachtet man alleine die Verläufe der Verlustfaktorwerte der einzelnen Stäbe in Abbildung 27, so weisen folgende Stäbe einen erhöhten Verlustfaktoranstieg bis 22 kV Spannungsbeanspruchung gegenüber dem Durchschnitt auf:

- Af2_10(V)
- Af2_11(V)
- Af2_25(U)
- WU_29(U)
- R1
- R3
- R4
- R5
- R6

Eine mögliche Ursache dieser erhöhten Verlustfaktoranstiegswerte könnten Schwachstellen im Isoliergefüge, eventuell durch vorhandene Feuchte und/oder Schäden im Isoliergefüge selbst sein. Die Richtwerte laut (ÖVE EN 50209:1998-11. 1998) für Messungen an Einzelstäben werden von den betriebsgealterten Maschinenstäben bei 20°C gänzlich eingehalten. Lediglich bei 3 von 6 Reservestäben wurde die Verlustfaktorzunahme nach Norm überschritten.

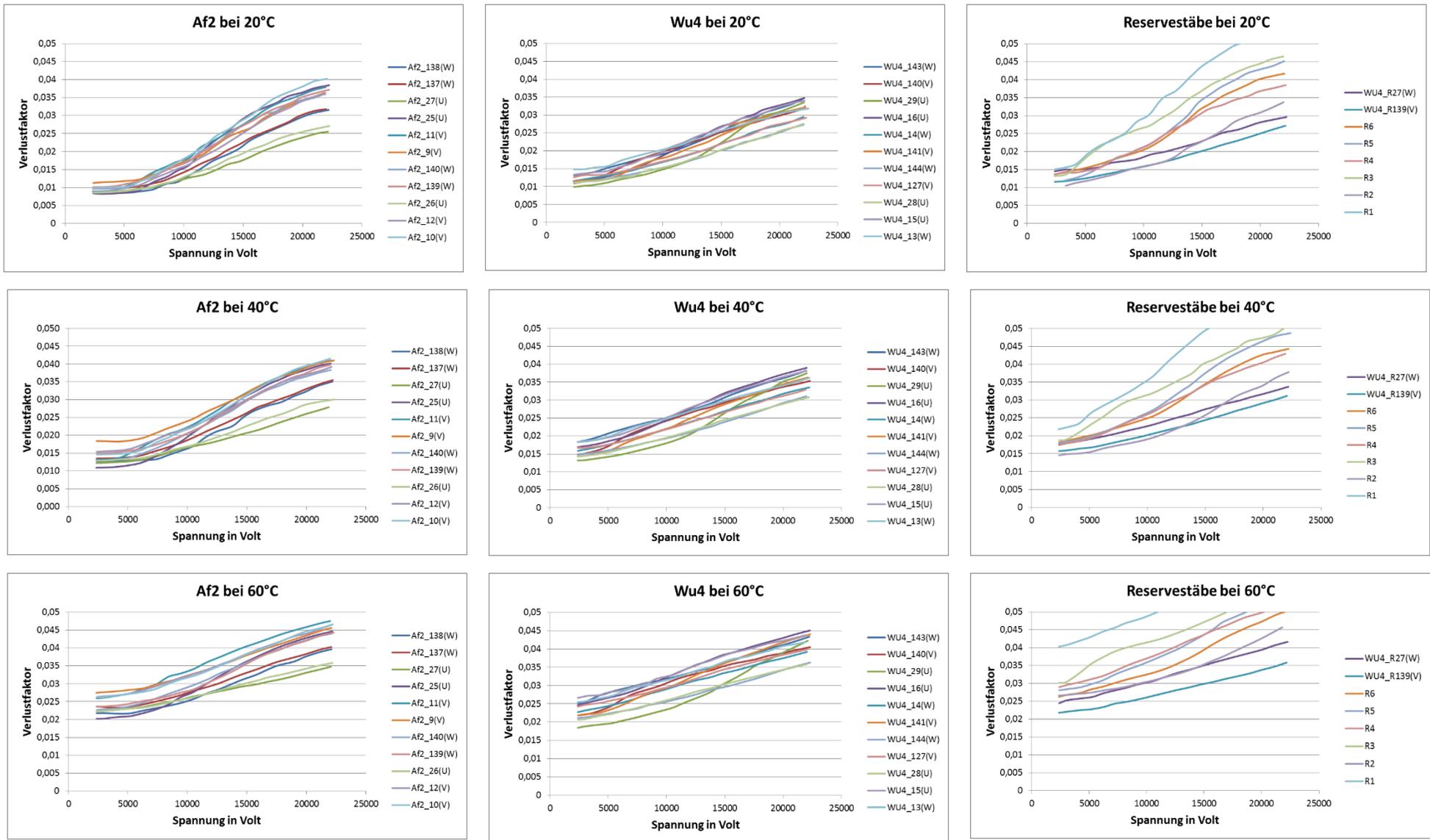


Abbildung 29: Verlauf der Verlustfaktorwerte aller Versuchsstäbe bei 20°C, 40°C und 60°C-Messtemperatur

4.1.3 Teilentladungsmessung

Bei der Teilentladungsmessung wird Augenmerk auf Hinweise bezüglich Schäden oder Alterung aufgrund der Ergebnisse der Q_{IEC} -Werte, der TE-Pattern und der PDIV/PDEV- Werte gelegt. Die Ergebnisse werden separat begutachtet und ausgewertet. Bei der Teilentladungsmessung, zumeist bei der 20°C-Messung, ist es während den Eingangsmessungen teilweise zu Aufnahme Fehlern während der Aufzeichnungen der TE-Fingerprints gekommen. Somit sind manche Messwerte nicht gänzlich aussagekräftig. Die Interpretation der Messauswertung wird für diese nicht aussagekräftigen Messwerte ausgelassen. Die Auswertung der Teilentladungsmessung wird somit auf Grundlage der 40°C-Messung durchgeführt.

Betrachtet man die Ergebnisse aus den Q_{IEC} -Werten so ist ersichtlich, dass die Messwerte der Stäbe aus dem Maschinensatz Af2 wiederum eine starke Streuung aufweisen. Der Stab Af2_137(W) hat über den gesamten Temperaturbereich hin verhältnismäßig hohe Entladungswerte. Im Gegensatz dazu weisen die Stäbe Af2_138(W) und Af2_27(V) eher geringe Entladungswerte auf. Die Streuung der Werte ist bei den Wu4-Stäben und Reservestäben nicht so stark ausgeprägt. Es ist ein Trend zu erkennen, wonach die Intensität der TE mit der Temperatur in der Regel abnimmt, wobei es hier auch Ausnahmen gibt, bei welchen der Q_{IEC} -Wert mit der Temperatur steigt. In Abbildung 30 und 31 sind die Auswertungen der Q_{IEC} -Werte maschinenspezifisch zusammengefasst. Die Graphik links in Abb. 30 repräsentiert die Ergebnisse aller Versuchsstäbe während der 20°C-Messung, die rechte Graphik zeigt die 40°C-Messung. Die Ergebnisse der 60°C-Messung sind in Abbildung 31 dargestellt. Eine genauere Aufschlüsselung inwiefern die Q_{IEC} -Werte im Vergleich abschneiden, ist wieder in den Tabellen 13 bis 15 auf Seite 76 und 77 aufgelistet.

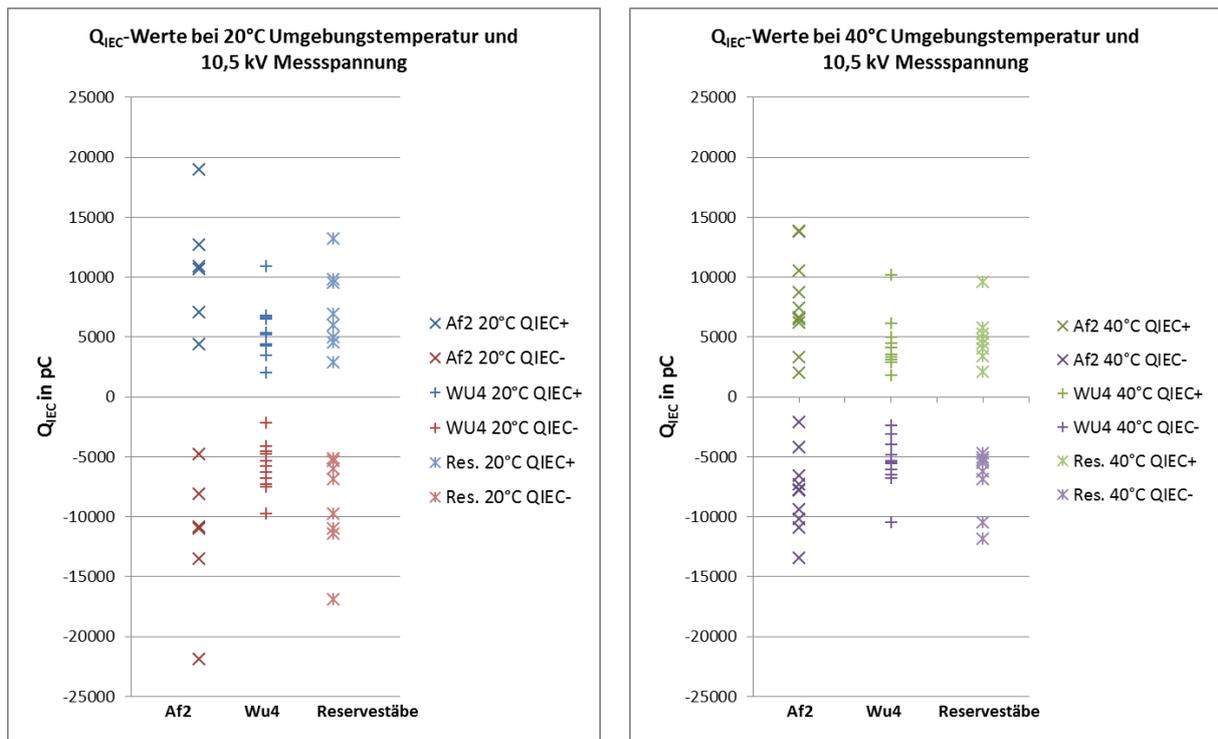


Abbildung 30: Ergebnisse der Q_{IEC}-Werte aus den Eingangsmessungen bei 20°C (links) und 40°C (rechts)

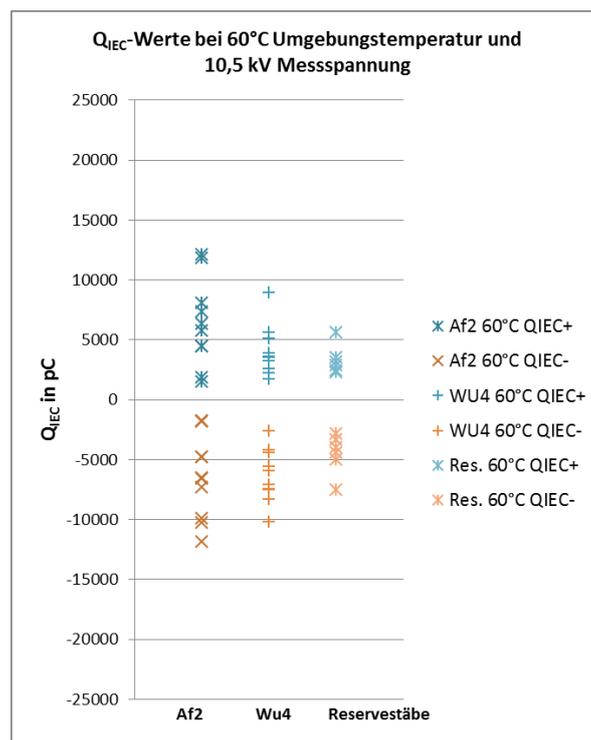


Abbildung 31: Ergebnisse der Q_{IEC}-Werte aus den Eingangsmessungen bei 60°C

Auffällig ist, dass die Entladungshöhen bei einzelnen Stäben der Maschine Af2 im Schnitt höher ausgefallen sind, als bei den Stäben Wu4 und den Reservestäben. Die Stäbe der Maschine Wu4 zeigen einen relativ konstanten Verlauf der Entladungswerte mit nur einem

Ausreißer, dem Stab Wu4_15(U). Die Messwerte der Reservestäbe sind bei der 20°C-Messung noch recht hoch und verstreut, verbessern sich aber zusehends mit steigender Temperatur.

Allgemein kann bei 4 von 30 Probanden ein Zusammenhang zwischen Vorschädigung aus der optischen Auswertung und der Q_{IEC} -Werte nach den Eingangsmessungen gezogen werden (vgl. Tab 13-15 Seite 84 und 85). Auch hier kann kein Trend unterschiedlich starker Spannungsbeanspruchung während des Betriebes aufgrund der Stabpositionen im Stator erkannt werden.

Die Auswertung der TE-Fingerprints gestaltet sich als sehr schwierig und ergibt unterschiedliche Bilder, wobei hier der Trend der abnehmenden TE-Aktivität aufgrund erhöhter Temperatur stärker ersichtlich ist als bei der Q_{IEC} -Auswertung. Aufgrund der Vielzahl der TE-Fingerprints werden Messwerte von zwei Stäben in Abbildung 32 und 33 repräsentativ gezeigt. Zu sehen sind die TE-Fingerprints bei gegebener Temperatur und einer Spannungsbeanspruchung von 10,5 kV, sowie die Q_{IEC} -Werte und PDIV/PDEV.

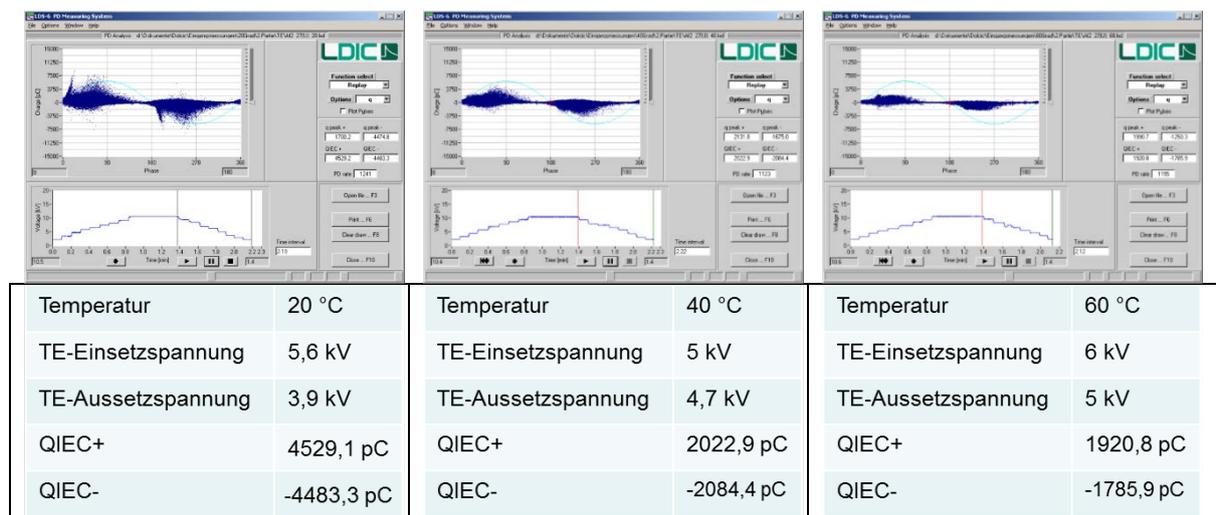


Abbildung 32: TE-Fingerprints am Generatorstab Af2_27(U) nach den Eingangsmessungen bei 10,5 kV Messspannung

Bei dem Stab Af2_27(U) sind, nach Form des Entladungsmusters, lediglich während der 20°C-Messung mögliche Oberflächenentladungen präsent. Die 40°C und 60°C-Messwerte fallen kontinuierlich ab und zeigen eher ein typisches Entladungsmuster eines gesunden Stabes. Die Höhe der Entladungen ist bei diesem Exemplar auch verhältnismäßig gering und die PDIV/PDEV-Werte erreichen überdurchschnittlich gute Werte.

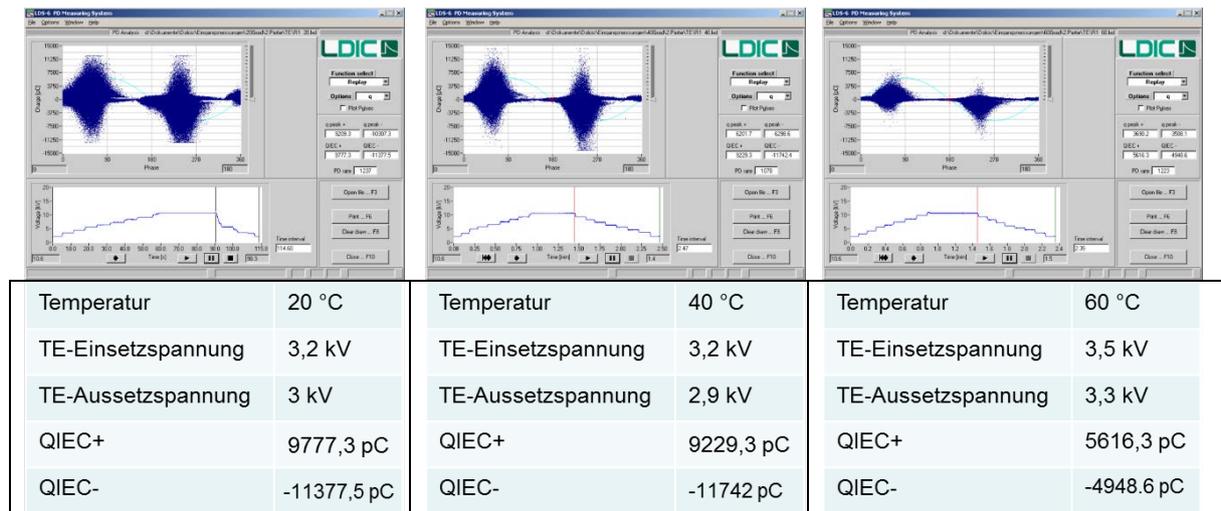


Abbildung 33: TE-Fingerprints am Generatorstab R1 nach den Eingangsmessungen bei 10,5 kV Messspannung

In Abbildung 33 ist die Aufnahme der TE-Messung des Reservestabes R1 zu sehen. Im Gegensatz zur Abbildung 32 weist dieser Proband eine starke Entladungswolke auf, die eher Einschlüssen oder Lunkern im Inneren des Isoliergefüges ähnlich ist. Die Q_{IEC} -Werte sind recht hoch angesiedelt und auch die Werte der PDIV/PDEV-Messung weisen auf eine eher schwache Isolierfähigkeit hin.

Aufgrund der Ergebnisse der PDIV und PDEV kann laut Theorie in Bezug auf die Qualität der Isolierung folgende Aussage gemacht werden (Sumereder 2008).

- Liegen die Werte PDIV und PDEV sehr hoch, so sind erst spät Teilentladungen im Isoliermedium anzutreffen, was einen Hinweis auf eine qualitativ hochwertige Isolierung zulässt.
- Liegen die Werte nahe beieinander, so sind größere Hohlräume im Isoliermedium vorhanden.
- Sind die PDIV und PDEV weit auseinander, so kann eher auf das Vorliegen von kleinen Hohlräumen geschlossen werden.

Bei der Auswertung der PDIV/PDEV-Werte haben die Stäbe der Maschine Af2 im Schnitt einen höheren Messwert aufzuweisen als die Probanden aus Wu4 und die Reservestäbe. Bei einigen Stäben kann aufgrund signifikant erhöhtem PDIV/PDEV-Wert während den Eingangsmessungen eine Vermutung auf guten Isolationszustand gegeben werden. Diese Stäbe haben auch keine Frühausfälle zu verzeichnen und deckten sich auch bei 5 von 20 Exemplaren mit den positiven Ergebnissen der Auswertung aus der Verlustfaktorkurve. Eine Deckung eines schlechten Verlustfaktorverlaufes mit schlechten PDIV/PDEV-Werten ist bei 7 von 10 Stäben zu erkennen. Interessant ist, dass zwei der Stäbe mit offensichtlichen Vorschaden, Af2_11(V) und Wu4_29(U), hier auch auffallen.

Die Auswertung dieser Messwerte der 40°C-Messung ergibt, dass 6 von 30 Stäben einen überdurchschnittlich hohen Q_{IEC} -Wert erreichen, wobei hier drei Stäbe der Maschine Af2 und nur ein Stab der Maschine Wu4 entstammen. Verhältnismäßig geringe Ergebnisse, mit PDIV-Werte unter 4kV weisen 17 von 30 Stäbe auf, wobei hier 4 Stäbe aus Af2 und 10 aus Wu4 stammen (siehe Abbildung 34 und Tabellen 13 bis 15 auf Seite 76 und 77).

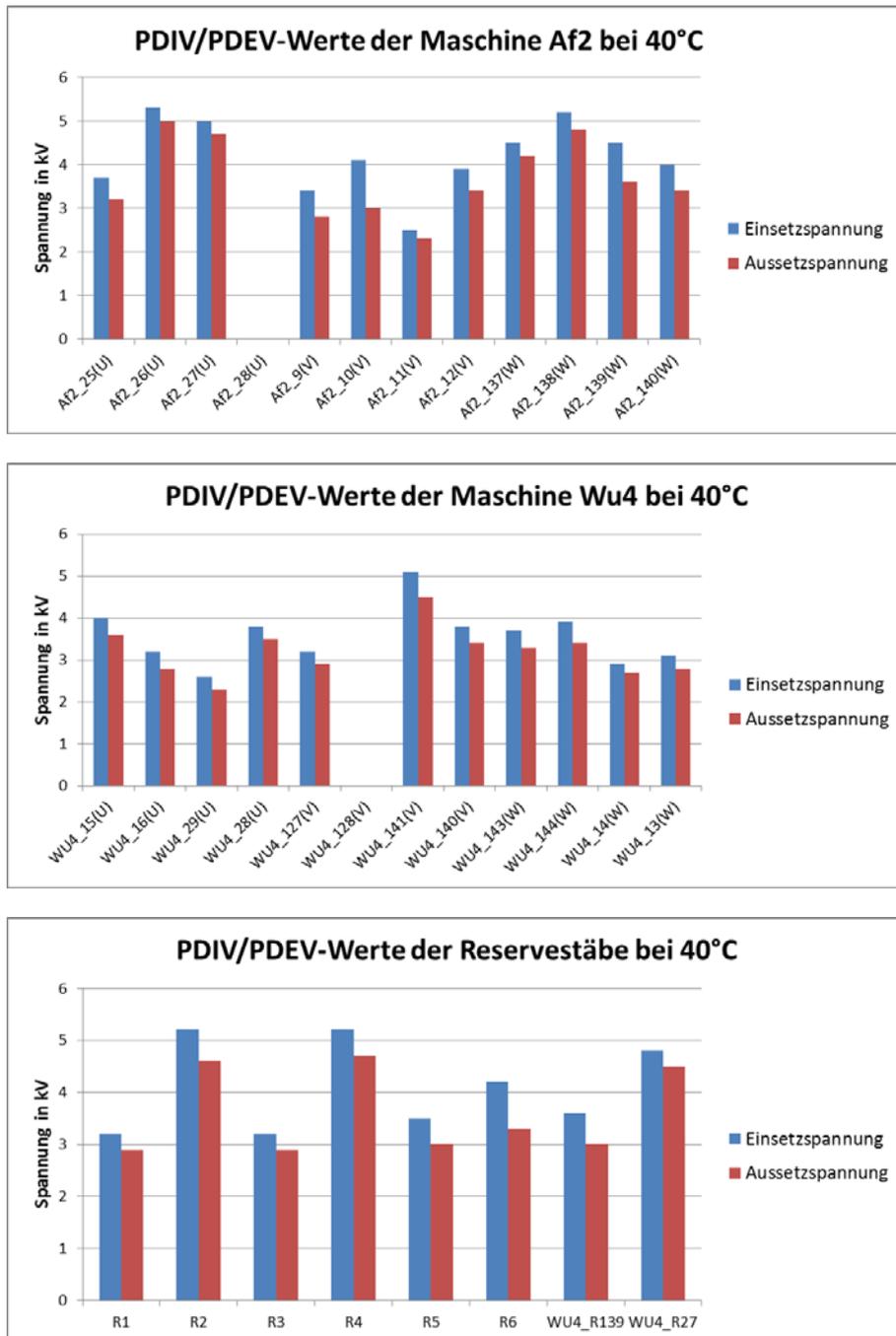


Abbildung 34: Auswertung der PDIV/PDEV-Werte aus der 40°C-Eingangsmessung für Af2 (oben), Wu4 (Mitte) und Reservestäbe (unten)

4.1.4 Auswertung der Messergebnisse mittels Auswertungstabelle

Die Tabellen 13 bis 15 fassen die Ergebnisse aus den einzelnen Eingangsversuchen nach der 40°C-Messung für die Isolationsstrom- und Teilentladungsmessung, und 20°C-Messung der Verlustfaktorwerte zusammen. Sie geben einen guten Überblick über Korrelationen der verschiedenen Diagnosemethoden. In den Tabellen eingetragen sind Teilergebnisse aus den Versuchen, wobei farblich gekennzeichnet ist, ob der jeweilige Stab die Grenzwerte nach Norm, oder selbst definierte Grenzwerte einhält oder nicht. Bei selbst definierten Grenzwerten liegt kein Grenzwert laut Norm für die verwendeten Prüfobjekte vor und es wird aus der Summe aller Messungen ein Mittelwert eruiert und eine Bewertung des Stabes aufgrund dieser Grundlage vollzogen. Die nachfolgende Legende in Tabelle 16 enthält die Grenzwerte der jeweiligen Messung. Das Ergebnis wird in der passenden Tabellenposition farblich gekennzeichnet. So sind Werte mit gutem Ergebnis grün, mit mittelmäßigem Ergebnis gelb und mit schlechtem Ergebnis rot markiert. In weiß markierten Feldern liegen aufgrund eines Stabausfalles (Af2_28(U) und Wu4_128(V)) oder Messfehlers keine Messwerte (R5, Af2_9(V)) vor.

Vergleicht man die optischen Voruntersuchungen mit den elektrischen Diagnosemessungen, so kann erkannt werden, dass durchaus eine Korrelation mit den Ergebnissen aus der Teilentladungsmessung und dem Verlustfaktorverlauf vorhanden ist. Am besten spiegelt sich dieses Bild bei den Stäben der Maschine Wu4 wieder. Umgekehrt ist bei den Reservestäben zusehen, dass ein optisch einwandfreier Stab nicht unbedingt hervorragende elektrische Messwerte erzielen muss.

Die Verlustfaktorauswertung nach Norm ergibt für alle Versuchsobjekte der Maschinen Af2 und Wu4, mit Ausnahme von Wu4_140(V), gute Werte. Im Vergleich weisen jedoch einige Stäbe einen steileren Verlustfaktorverlauf auf als andere. In der Liste ist daher auch der *tan δ-Verlauf* eingetragen. Die Beurteilung dieses Verlaufes erfolgt rein aufgrund von Vergleichswerten und ist keinem normativen Grenzwert unterstellt. Die Bewertung erfolgt hier nur auf zwei Werte, „gut“ bzw. „schlecht“ und ist in der Legende nicht aufgezeichnet. Auf Grundlage dieser Beurteilung erkennt man, dass 3 von 4 Stäbe mit erheblich schwerem optischen Mangel auch eine erhöhte Verlustfaktorkurve aufweisen. Lediglich 3 von 6 Reservestäben kommen mit den Messwerten der Verlustfaktormessung über die Grenzen laut Norm, obwohl der Verlauf der Verlustfaktorkurven bei allen Reservestäben signifikant erhöht ist.

Bei den Maschinenstäben kann auf den ersten Blick keine Korrelation der Ergebnisse aus den Verlustfaktormessungen und Teilentladungsmessungen erkannt werden. Sehr wohl ergibt sich ein zusammenhängendes Bild bei den Reservestäben, wo bei 3 von 6 Stäben „schlechte“ Werte mit beiden Messmethoden ermittelt werden. Auch die Isolationswiderstandsmessung ergibt bei 2 von 6 Stäben einen verhältnismäßig schlechten Wert. (vgl. Tabellen 13 bis 15) Eine Darstellung der graphischen Verläufe der ausgewerteten Messergebnisse ist im Anhang zu sehen.

	25(U)	26(U)	27(U)	28(U)	9(V)	10(V)	11(V)	12(V)	137(W)	138(W)	139(W)	140(W)
opt. Voruntersuchung	-	+	+	+	~	+	-	+	+	+	+	+
$\tan\delta_{0,2\text{in}}$	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
$\Delta \tan\delta$	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
$\tan\delta$ -Verlauf	-	+	+		+	-	-	+	+	+	+	+
Q_{IEC} -Wert	+	+	+			-	~	+	-	+	~	+
PDIV	-	+	+		-	~	-	-	~	+	~	~
IR-Verlauf	+	+	+		~	-	+	~	+	+	+	+
PI	+	+	+		~	+	+	~	~	+	+	+

Tabelle 13: Ergebnistabelle aus den Eingangsuntersuchungen für die Maschinenstäbe Af2

	15(U)	16(U)	29(U)	28(U)	127(V)	128(V)	141(V)	140(V)	143(W)	144(W)	14(W)	13(W)
opt. Voruntersuchung	~	~	-	+	~	-	+	+	~	+	~	-
$\tan\delta_{0,2}$	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$	+	+	+	+	+		+	~	+	+	+	+
$\Delta \tan\delta$	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
$\tan\delta$ -Verlauf	+	+	-	+	+		+	+	+	+	+	+
Q_{IEC} -Wert	~	+	+	+	+		+	+	+	+	~	+
PDIV	~	-	-	-	-		+	-	-	-	-	-
IR-Verlauf	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
PI	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+

Tabelle 14: Ergebnistabelle aus den Eingangsuntersuchungen für die Maschinenstäbe Wu4

	RWU4_27(W)	RWu4_139(V)	R1	R2	R3	R4	R5	R6
opt. Voruntersuchung	+	+	+	+	+	+	+	+
$\tan\delta_{0,2}$	+	+	+	+	+	+		+
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$	+	+	-	+	-	+	-	+
$\Delta \tan\delta$	+	+	~	+	~	+	-	+
$\tan\delta$ -Verlauf	+	+	-	+	-	-	-	-
Q_{IEC} -Wert	+	+	~	+	+	+	~	+
PDIV	~	-	-	+	-	+	-	~
IR-Verlauf	+	+	-	+	-	+	+	+
PI	+	+	~	+	~	~	+	+

Tabelle 15: Ergebnistabelle aus den Eingangsuntersuchungen für die Reservestäbe

Die unten stehende Tabelle beinhaltet die Legende zur Auswertungsmatrix der Eingangsmessungen. Sofern keine Grenzwerte laut Norm gegeben waren, wurde aus dem Durchschnitt der jeweiligen Diagnosemessung ein aussagekräftiger Vergleichswert gebildet, diese unterliegen in der Tabelle keiner besonderen Kennzeichnung. Grenzwerte, die der Vorgabe einer Norm entstammen sind in der Tabelle 16 mit (N) gekennzeichnet. Der Q_{IEC} -Wert in den Auswertungstabellen bezieht sich auf den Messwert bei 10,5 kV Messspannung.

	gut	mittelmäßig	schlecht
optische Voruntersuchung	keine/wenige Mängel im Nutbereich und Wickelkopf. Keine Schädigung der Hauptisolation	mittelschwere Beschädigungen im Nutbereich oder stärkere Erosionen von AGS und EGS	schwere Beschädigungen im Wickelkopf oder Nutbereich
$\tan\delta_{0,2}$ (N)	< 30 ‰	-	> 30 ‰
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$ (N)	< 2,5 ‰	2,5 ‰ - 3 ‰	> 3 ‰
$\Delta \tan\delta$ (N)	< 5 ‰	5 ‰ - 6 ‰	> 6 ‰
Q_{IEC} -Wert	< 8000 pC	8000 pC - 12000 pC	> 12000 pC
PDIV/PDEV	> 5 kV	4 kV - 5 kV	< 4kV
IR-Verlauf	< 600 Ω	600 Ω - 800 Ω	> 800 Ω
PI	> 4	2 bis 4	< 2

Tabelle 16: Legende für Ergebnistabellen der Eingangsmessungen

4.2 Zustandsbeurteilung nach den Dauerprüfungen

Da es im Laufe der Dauerversuchsmessungen zu einigen Frühausfällen gekommen ist, konnten nicht an allen Versuchsstäben Zwischenmessungen durchgeführt werden. Insgesamt war die Durchführung von Zwischenmessungen nur mehr an 20 von 27 Stäben möglich. Die Auswertung der Datensätze wurde mit Hilfe einer Auswertungstabelle vollzogen, in welcher, zur besseren Vergleichbarkeit, auch die Daten der Eingangsmessungen mit eingebunden wurden. Die Auswertungstabelle enthält alle relevanten Daten der elektrischen Untersuchungen sowie eine graphische Auswertung des Verlustfaktorverlaufes, Isolationswiderstandsmessung, PDIV/PDEV-Verläufe, Q_{IEC} -Werte und PI-Werte im Verlauf des gesamten Dauerspannungsversuches. Aufgrund der Fülle an Daten aus den Untersuchungen werden die wichtigsten Messwerte und Diagramme jedes Statorstabes im Anhang zusammengefasst. Im folgenden Kapitel beschränkt sich die Darstellung von Diagrammen aus den elektrischen Untersuchungen auf einen repräsentativen Versuchsstab aus der Untersuchungsreihe.

4.2.1 Isolationswiderstandsmessung

Es ist eine kontinuierliche Abnahme des Isolationswiderstandes mit fortschreitendem Alter bei nahezu allen Probanden bemerkbar. Sehr zu beachten ist, dass diese Messung stark temperaturabhängig ist und die Isolationstemperatur bei Vergleichen unbedingt berücksichtigt werden muss. In der Regel verändern sich die Messergebnisse im Bereich der 20°C- und 40°C-Kurve der Eingangsmessung. Nur sehr selten wird die Kurve des Isolationswiderstandes bei 40°C unterschritten ($Af2_{25}(U)$, $R2$), meist von Generatorstäben mit überdurchschnittlich langer Laufzeit im Dauerversuch. Es konnte kein Zusammenhang zwischen dem Endwert oder dem Verlauf des Isolationswiderstandes und einen baldigen Ausfall des Stabes gefunden werden. Abbildung 35 zeigt die Isolationswiderstandsverläufe am Stab $Af2_{138}(W)$. Zu erkennen sind klar die Temperaturabhängigkeiten der Eingangsmessungen bei 20°C, 40°C und 60°C. Man sieht, dass in diesem Beispiel (Abb. 36.) die Messung aus dem 4. Messzyklus bessere Isolationswiderstandswerte aufweist, als frühere Messungen. Grund hierfür ist eine geringere Isolationstemperatur während den Messungen. Da die Stäbe nach der Dauerbelastung warm sind, wird den Stäben vor einer Zwischenmessungen immer eine Abkühlungsphase gewährt. Im Falle der 4. Zwischenmessung ist diese Phase über das Wochenende ausgedehnt gewesen. Somit konnte der Stab besser auskühlen. Zwar sind die Verlustfaktormessung und die Teilentladungsmessung auch temperaturabhängig, jedoch ist dieses Verhalten bei der Isolationswiderstandsmessung am stärksten zu beobachten.

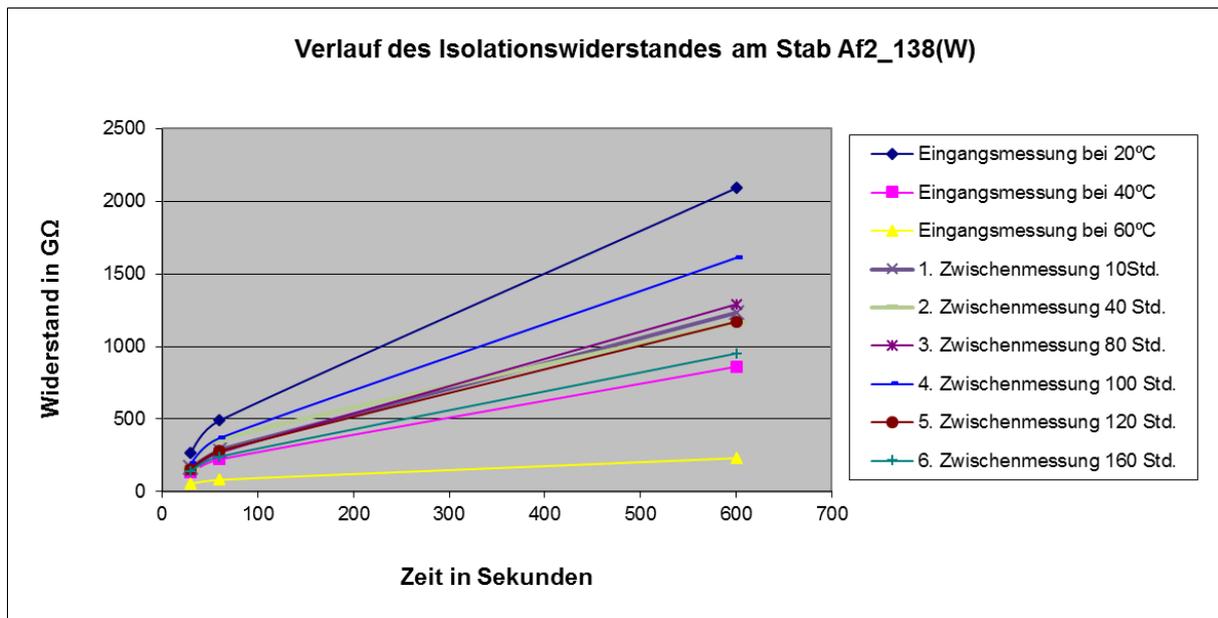


Abbildung 35: Verlauf des Isolationswiderstandes am Stab Af2_138(W) über den gesamten Messzyklus

Aus dem Verlauf des Polarisationsindex kann kein schlüssiger Zusammenhang zwischen Alter und Messwert gefunden werden. Als kurzes Resümee der Informationen aus der Isolationswiderstandsmessung kann zusammengefasst werden:

- Starke Temperaturabhängigkeit der Messung
- Geringfügige Abnahme des Isolationswiderstandes mit der Dauer der Spannungsbelastung

4.2.2 Verlustfaktormessung

Während den Zwischenmessungen fällt bei der Verlustfaktormessung auf, dass der Verlauf nach der hohen Spannungsbeanspruchung mit ca. $3 \cdot U_N$ steiler ansteigt als während den Eingangsmessungen. In Abbildung 36 ist der Verlauf der Verlustfaktorkurven eines Versuchsexemplars dargestellt. Zum Vergleich werden hier auch die Verlustfaktorkurven der Eingangsmessungen eingetragen. Der signifikant hohe Anstieg der Kurve während den Zwischenmessungen fällt hier sofort auf. Eine mögliche Ursache könnte in der Ausweitung von Hohlräumen innerhalb des Isoliergefüges aufgrund der hohen Belastungsfeldstärke liegen. Wegen dieses steilen Verlustfaktoranstieges, kommt es eher zur Überschreitung von Grenzwerten bezüglich des Verlustfaktoranstieges, was bei 14 von 20 Stäben zu beobachten war. Da diese über einen sehr langen Zeitraum, also über mehrere Zwischenmessungen die Grenzwerte überschritten haben, kann dieser Grenzwert nach Norm alleine kein Kriterium für den Hinweis auf baldiges Ableben bringen. Es zeichnet sich jedoch ein Trend zur erhöhten Ausfallsrate, bei erhöhtem Verlustfaktoranstiegswert hin ab. Oft liegt die maximale Steigung bei $1,2$ - bis $1,6 \cdot U_N$ und ist somit im konventionellen Messtechnikbereich ($1,2 \cdot U_N$) nicht erfassbar.

Die Betrachtung der Verlustfaktorwerte nach den Zwischenmessungen ergibt zusammengefasst:

- Trend einer steiler ansteigenden Kurve nach elektrischer Dauerbelastung
- Signifikante Steigung des Verlustfaktors ab ca. 8 kV Messspannung nach einer elektrischen Dauerbelastung
- Mehrfach Versuchsstäbe mit wenigen Zwischenmessungen wegen Frühausfällen
- Signifikanter Anstieg des Verlustfaktors im Bereich $0,6 \cdot U_N$ bis $1,6 \cdot U_N$
- Sehr starke Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur
- Verlustfaktoranzfangswert nimmt nur wenig mit fortschreitendem Alter zu
- Signifikanter Schnittpunkt aller gealterten Kurven mit der „60°C-Kurve“
- Grenzwerte laut Norm scheinen wenig Aussagekräftig zu sein

In der unten stehenden Graphik sieht man den Verlauf der Verlustfaktorkurven nach den Eingangsmessungen und den Zwischenmessungen während des Dauerversuches. Auffällig ist hier der signifikant erhöhte Verlustfaktoranstieg der Zwischenmessungen. Im Laufe der Zeit wird dieser zwar nicht unbedingt steiler, jedoch ist eine Verschiebung der Kurve in Richtung vertikaler Achse zu beobachten. Dies hat zur Folge, dass der Verlustfaktoranstieg bereits bei geringerer Spannungsbeanspruchung signifikant steigt und bei Nennspannung bereits einen hohen Wert erreicht. Der Verlustfaktoranzfangswert hingegen steigt mit zunehmendem Alter nur im geringen Maße.

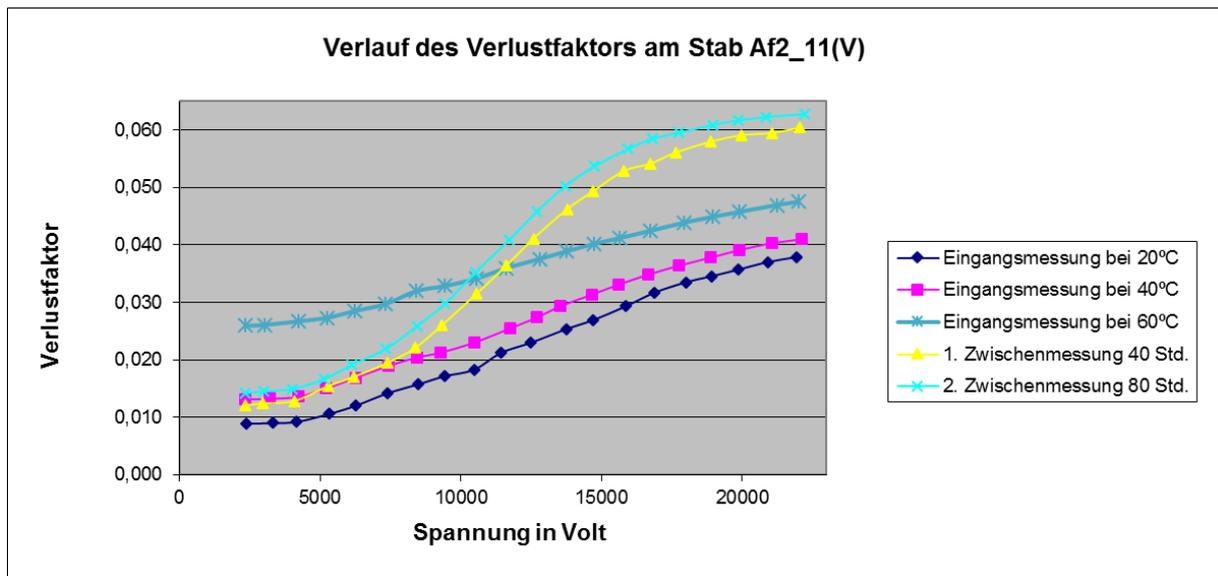


Abbildung 36: Verlustfaktormessung am Stab Af1_11(V)

Leider kann bisher kein Zusammenhang zwischen dem Schnittpunkt der 60 °C Kurve der Eingangsmessung mit der Verlustfaktorkurve der Zwischenmessung gemacht werden. Die Abweichung der Position an der Abszisse (Messspannung) schwankt zu stark, um eine allgemeine Grenze für alle Stäbe der Maschine zu geben. Weitere Untersuchungen diesbezüglich wären notwendig, um möglicherweise einen Rückschluss ziehen zu können. Aufgrund der Nachuntersuchungen kann erwähnt werden, dass sich bei 3 von 4 betriebsgealterten Maschinenstäben mit offensichtlich schlechtem Verlustfaktorverlauf der Durchschlag im Nutbereich des Stabes und ein Durchschlag im Wickelkopfbereich ereignete.

4.2.3 Teilentladungsmessung

Die Auswertung der TE-Fingerprints nach den Zwischenmessungen ergibt eine signifikante Änderung der Entladungswolke. Ein ähnliches Phänomen ist auch bei der Verlustfaktormessung zu beobachten. Die Entladungswolke entwickelt nach der hohen Belastungsfeldstärke eine Ausprägung von negativen Entladungen im Phasenbereich von 45°. Laut Beschreibung unter Kapitel 3.4.3 treten bei diesem Erscheinungsbild vermehrt Entladungen im Bereich des Innenleiters auf, was Delamination des Teileleiterverbandes von der Hauptisolierung zur Folge haben könnte. Bei 19 von 20 Probanden ist diese Ausprägung klar zu erkennen, wie in Abbildung 37 exemplarisch am Stab Af2_138(W) dargestellt ist.

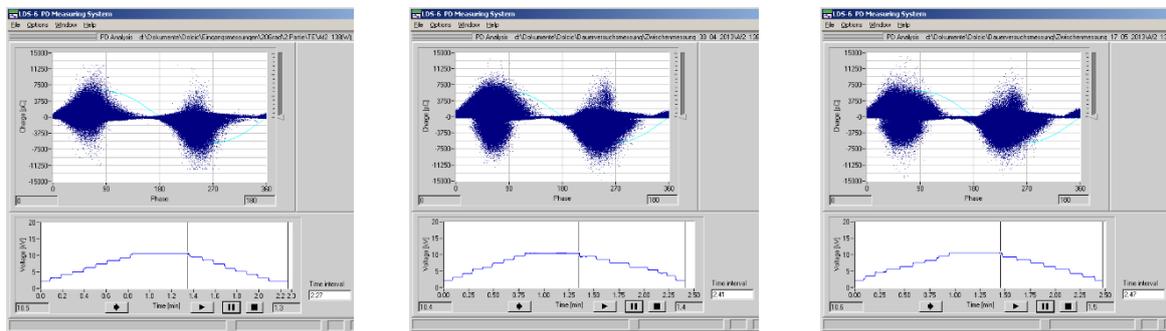


Abbildung 37 : TE-Fingerprints des Stabes Af2_138(W) links: bei der 20°C-Eingangsmessung; mitte: bei der Zwischenmessung nach 40 Std. Dauerbelastung; rechts: nach 160 Std. Dauerbelastung bei jeweils 10,5 kV Messspannung

Auf das Verhalten der Q_{IEC} -Werte während der Dauerversuche und vor dem Ausfall kann wie folgt eingegangen werden. Aufgrund des Verlaufes kann ein Sinken der Q_{IEC} -Werte vor dem Ausfall bei 7 Versuchsstäben beobachtet werden. Bei 6 Versuchsstäben ist ein Anstieg vor dem Ausfall erkennbar, und bei den restlichen 14 Versuchsstäben kann aufgrund von Frühausfällen oder unzureichender Information wegen zu wenigen Zwischenmessungen keine Aussage über den Verlauf des Q_{IEC} gemacht werden. Interessant wäre ein Messpunkt bei den 6 Stäben mit steigendem Q_{IEC} -Verlauf ganz kurz vor dem Ausfall gewesen, da hier der Q_{IEC} -Wert möglicherweise noch gesunken wäre. Der Verlauf des Stabes Af2_138(W) ist wiederum exemplarisch in Abbildung 38 dargestellt. Hier ist eine Abnahme der Teilentladungsintensität nur in geringem Maße erkennbar.

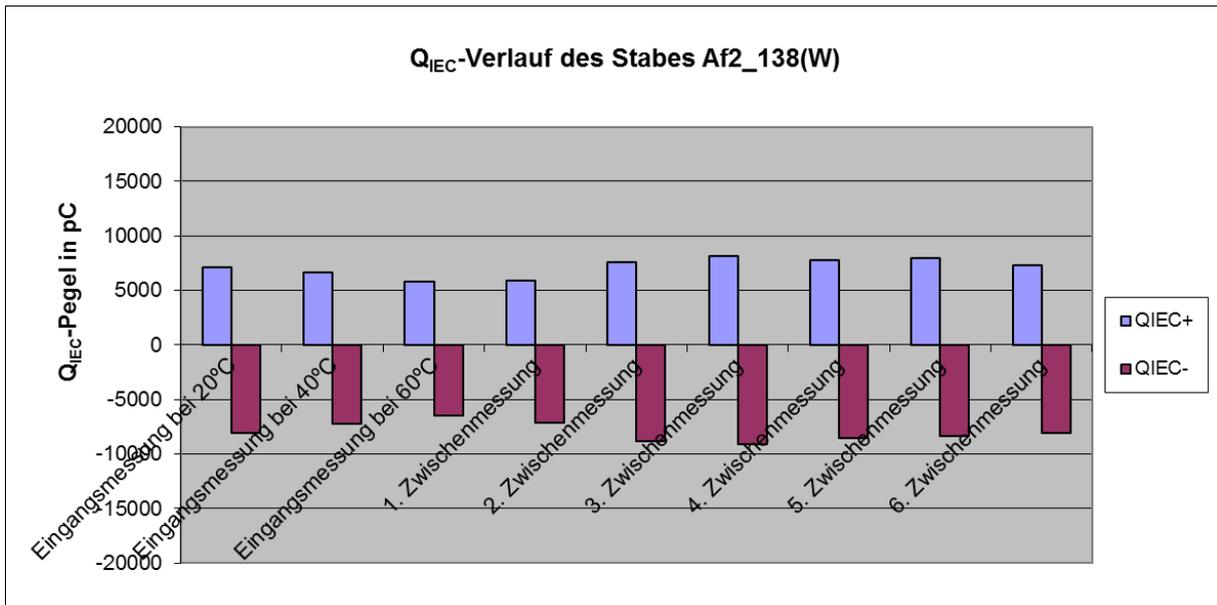


Abbildung 38: Verlauf der Q_{IEC} -Werte des Stabes Af2_138(W) über den gesamten Messzyklus

Die Ergebnisse aus den Aufzeichnungen der Teilentladungsein- und Aussetzspannung ergeben bei 12 von 17 Exemplaren eine Abnahme der PDIV/PDEV-Werte vor dem Isolationsversagen. Bei 5 von 17 Stäben wurde eher ein Anstieg beobachtet. Bei den restlichen Versuchsobjekten kann aufgrund von Frühausfällen oder fehlenden Informationen keine Aussage über den zeitlichen Verlauf der PDIV/PDEV -Werte gegeben werden. Wieder ist der Verlauf des Stabes Af2_138(W) in Abbildung 39 dargestellt. Erkennbar ist hier deutlich die Abnahme der Teilentladungsein- und Aussetzspannungen zum Ende der Laufzeit hin.

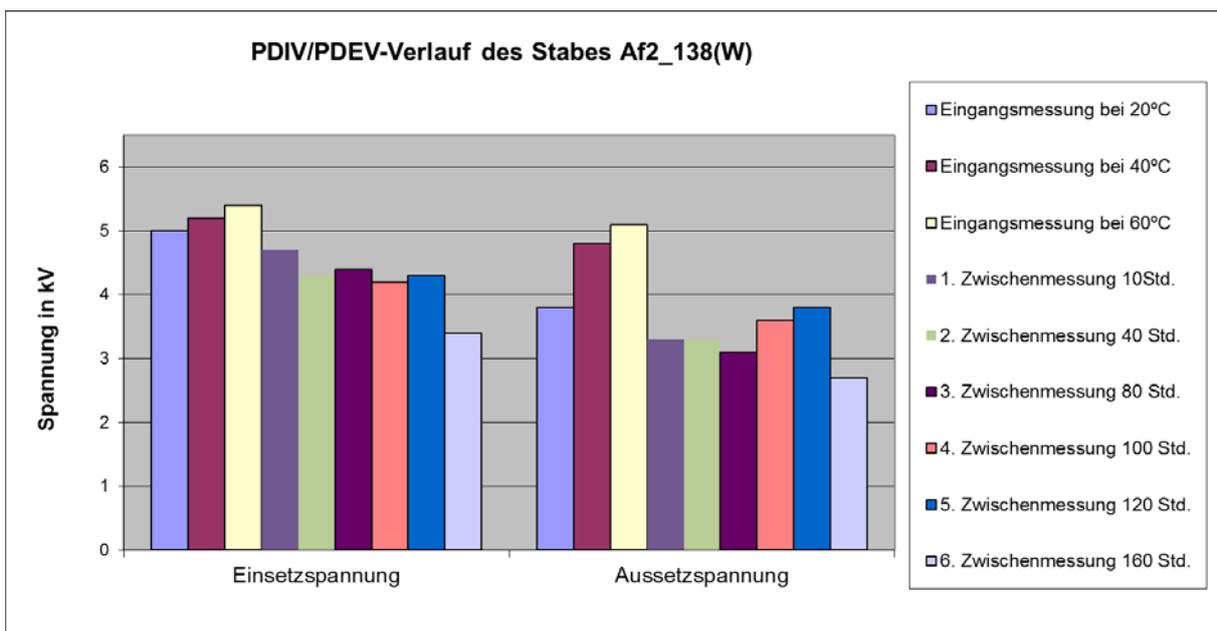


Abbildung 39: Verlauf der PDIV/PDEV-Werte am Stab Af2_138(W) über den gesamten Messzyklus

Als kurzes Resümee der Erkenntnisse aus den Teilentladungsmessungen kann folgendes zusammengefasst werden:

- Verringerung der TE-Aktivität mit steigender Temperatur
- Änderung des Fingerprints nach der Dauerbelastung
- Unterschiedliche Form der TE-Wolke nach der Eingangsmessung und den Zwischenmessungen
- Bildung einer negativen Entladungswolke bei etwa 45°
- Bei 7 von 13 Stäben: Verringerung der TE-Aktivität kurz vor dem Durchschlag
- Bei 12 von 17 Stäben: Verringerung der PDIV/PDEV-Werte kurz vor dem Durchschlag

4.2.4 Harzanalyse

In Tabelle 17 sind die Messwerte aus dem Versuch der Harzanalyse aufgelistet und in Abbildung 40 ist der relative Gewichtsverlust der Probestücke zu sehen. Vor der Messung werden die Probestücke sowie das Behältnis, in welchem die Probestücke aufbewahrt wurden, abgewogen. Anschließend wird nach dem Erhitzen des Materials an jeder Probe eine Zwischenmessung durchgeführt und der Gewichtsverlust dokumentiert. In der Tabelle sind die tatsächlichen Temperaturwerte der Probestücke eingetragen, wie sie mit der Temperaturpistole gemessen worden sind. Rechts in der Tabelle sind noch die Laufzeiten der Stäbe, von welchen die Probestücke stammen, aufgelistet. Diese werden ebenfalls in der Tabelle verzeichnet, um einen möglichen Zusammenhang der Restlaufzeit im Dauerversuch mit dem Restharzgehalt herstellen zu können.

Stab	Gewicht							relativer Gewichtsverlust der Probe			Laufzeit
	inkl. Schale	Gesamt bei 20°C	bei 210°C	bei 450 °C	bei 550 °C	bei 800°C	Gewicht der Probe	von 20 °C auf 200°C	von 20 °C auf 450°C	von 20 °C auf 550°C	
	in g	in g	in g	in g	in g	in g	in g	in %	in %	in %	
R4	47,302	64,681	64,597	62,096	61,272	fällt aus	17,379	0,486	14.794	19.618	0
R2	47,575	63,337	63,292	61,529	60,478	fällt aus	15,761	0,286	11.469	18.140	342,24
WU4_15(U)	50,394	65,444	65,394	64,741	62,825	fällt aus	15,049	0,330	4.669	17.401	144,24
WU4_13(W)	50,387	66,011	65,958	65,456	63,430	fällt aus	15,623	0,334	3.551	16.514	13,69
Af2_12(V)	47,707	63,654	63,598	63,005	60,609	fällt aus	15,947	0,345	4.069	19.091	160,08
Af2_26(U)	49,937	63,787	63,725	61,722	60,929	fällt aus	13,85	0,452	14.910	20.638	66,56
Af2_27(U)	51,170	67,370	67,304	65,362	64,497	fällt aus	16,200	0,412	12.395	17.738	302,63

Tabelle 17: Gewichtsmessungen und Berechnungen der Probestücke aus der Restharzanalyse

In der unteren Graphik zu sehen ist nun die Abnahme des Gewichtes der Probestücke in Abhängigkeit der Temperatur. Zu beachten ist, dass der Ordinatenwert nur bis zur 75%-Marke reicht. Der letzte Messwert ist bei 550°C aufgenommen worden. Die Messung bei 800°C ist leider entfallen, da die Gefäße, in denen die Probestücke erhitzt wurden, der Ofentemperatur nicht standgehalten haben und der Versuch somit abgebrochen werden musste.

Aus der Graphik erkennt man, dass das Restgewicht der Probestücke bei etwa 80% den letzten Wert erreicht. Da es sich bei den Probestücken jedoch um eine Resin Rich-Isolierung

handelt und diese in der Regel einen größeren Harzgehalt aufweisen, ist zu vermuten, dass das Harz bei dieser Temperatur noch nicht vollständig aus dem Isoliermedium entwichen ist. Dieser Verdacht bestätigt sich auch mit der STC-Analyse (Abbildung 43 Seite 103), welche die UWB an Probestücken dieser Isolierung durchgeführt hat.

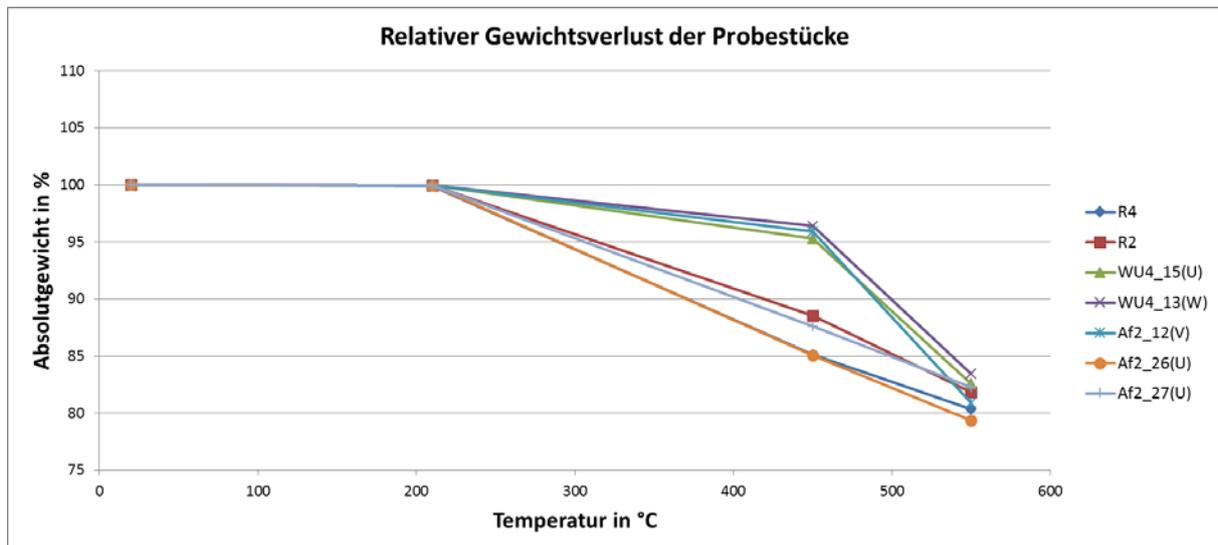


Abbildung 40: Ergebnisse der Restharzanalyse

Die Ergebnisse der Harzanalyse zeigen, dass die Stäbe der Maschine Af2 tendenziell mehr Gewicht bei geringerer Heiztemperatur verlieren, als die Stäbe der Maschine Wu4. Dies lässt einen höheren Feuchtigkeitsgehalt in der Isolierung vermuten, was auch im Vergleich der Stäbe R4 sowie R2 zu beobachten ist. Der Stab R4 ist nie in den Dauerversuch eingespannt worden und dient als Referenzwert. Der Stab R2 weist einen recht geringen Gewichtsverlust bis 250°C auf und ist im Dauerversuch ein langlebiger Stab gewesen. Aufgrund des hohen Gewichtsverlustes des Stabes R4 bei recht geringer Temperatur, sollte eigentlich auf eine feuchte Isolation im rückgeschlossen werden können und sich dieser Verdacht in der Isolationszeitkonstante widerspiegeln. Leider ist dies nicht der Fall. Ob ein Vergleich der restlichen Stäbe der Harzanalyse mit der Isolationszeitkonstante sinnvoll ist, lässt sich aufgrund dessen, dass diese Stäbe im Dauerversuch eingespannt und somit durch die Beanspruchung erhitzt wurden, nicht sagen.

Prinzipiell müssten mehr Stäbe vor der Eingangsmessung einer Harzanalyse unterzogen werden, um mehrere Referenzwerte zu erhalten.

Beim Vergleich stellte sich heraus, dass nur der Stab Af2_12(V) eine geringere Isolationszeitkonstante aufweist. In Bezug auf den Restharzgehalt kann keine Aussage über einen verminderten Harzgehalt der Stäbe im Dauerversuchsfeld gemacht werden.

4.2.5 Restlaufzeit

Die Auswertung der Restlaufzeit ist die letzte messtechnische Information aus dem Dauerversuch. Sie vervollständigt die Messungen und gibt schlussendlich Aufschluss über im Vorfeld vermutete Schlussfolgerungen über die Restlebensdauer aufgrund von optischen und elektrischen Diagnoseuntersuchungen. Die Abbildung 41 zeigt die Laufzeit jedes Stabes zusammengefasst zur jeweiligen Maschine auf einer Zeitskala aufgetragen. Bei beiden Maschinen gibt es eine Häufung der Ausfallsraten, bei denen rund 60% der Stäbe aus Af2 und Wu4 beteiligt waren. Diese Häufungen liegen bei der Maschine Wu4 mit ca. 119 Stunden im Mittelwert etwas höher als bei der Maschine Af2 mit ca. 105 Stunden im Mittelwert. Aufgrund der drei überdurchschnittlich lang laufenden Stäbe Af2_27(U), Af2_25(U) und Af2_138(W), hat in Summe die Maschine Af2 jedoch die längere Restlebensdauer, aber auch die größte Streuung der Restlaufzeiten aufzuweisen. Ins Gewicht fällt hier auch, dass es bei der Maschine Af2 nur einen Stab mit einer Restlaufzeit von weniger als 50 Stunden gibt. Die Versuchsobjekte von Wu4 hatten insgesamt 4 Stäbe mit weniger als 50 Stunden Restlaufzeit und nur ein Versuchsobjekt mit überdurchschnittlich langer Laufzeit. Die Laufzeiten der Maschine Wu4 waren somit zwar konzentrierter jedoch etwas geringer. Zieht man den Mittelwert über alle Versuchsstäbe einer Maschine, so liegt der gesamte Mittelwert der Stäbe Af2 bei ca. 162 Stunden und der Mittelwert der Maschine Wu4 bei ca. 95 Std. Die Reservestäbe hatten bis auf eine Ausnahme, alle Frühausfälle mit Laufzeiten von weniger als 50 Stunden zu verzeichnen.

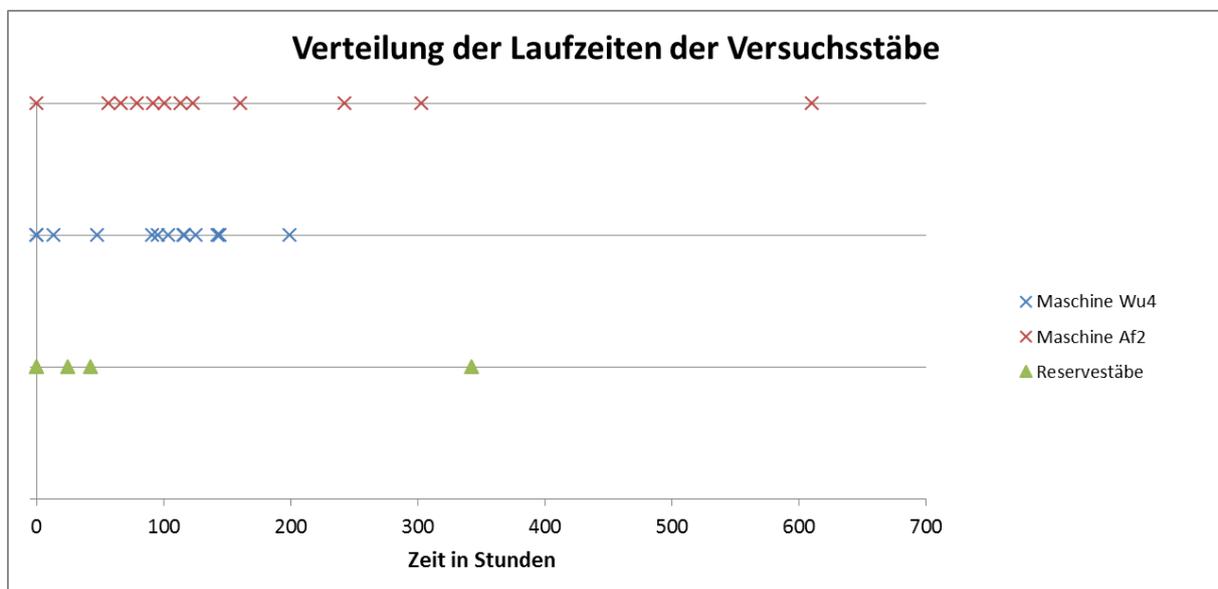


Abbildung 41: Restlaufzeiten der Stäbe Af2, Wu4 und Reservestäbe auf der Zeitachse markiert

4.2.6 Auswertung der Messergebnisse mittels Auswertungstabelle

Die Auswertungsmatrix in den Tabellen 18 bis 20 fasst die Ergebnisse aus den Zwischenmessungen noch einmal zusammen. Wie bei den Eingangsmessungen, sind die Ergebnisse aus den einzelnen Untersuchungen für jeden Probanden eingetragen. Da es pro Stab im Schnitt mehrere Zwischenmessungen gibt, werden jeweils die Ergebnisse der letzten Zwischenmessung vor Isolationsversagen eingetragen. Es ist leider bei einigen Stäben zu Frühausfällen gekommen, sodass keine Zwischenmessungen an diesen Versuchsobjekten durchgeführt werden konnten. Somit können für diese Probanden nur die Werte der Eingangsmessung noch einmal eingetragen werden. Diese sind jedoch farblich vom Rest abgehoben, indem die Farben blass dargestellt werden. Der Reservestab R4 wird aus der Wertung herausgenommen, da er vor Beginn des Dauerversuches für die DSC-Messung zersägt worden ist. Der Analysewert für den Verlauf der Verlustfaktorkurve wird hier so gewählt, dass auf den Schnittpunkt der Verlustfaktorkurve aus der Zwischenmessung mit der 60°C-Verlustfaktorkurve geachtet wurde. Bei einem Schnittpunkt kleiner als 10,5 kV Messspannung wird von einem schlechten Verlauf gesprochen. Man sollte sich von der Markierung der Laufzeit und der Markierung der Messergebnisse in diesen Diagrammen nicht irreführen lassen. Die Bewertung der Laufzeit wird aufgrund der Verweildauer im Dauerversuchstest angefertigt. Die Ergebnisse der Diagnosemessungen spiegeln jedoch den Isolationszustand der letzten Zwischenmessung vor Versagen der Isolation wieder. Somit besteht beispielsweise keine Korrelation zwischen einer „guten“ Laufzeit und einem „schlechten“ Q_{IEC} -Wert. In Tabelle 21 ist wieder eine Legende für die dargestellten Tabellen 18 bis 20 vorhanden, welche die Grenzwerte für diese Tabellen beinhaltet. Werte, die einer Norm entnommen wurden, wurden wieder mit einem (N) gekennzeichnet. Weiß gebliebene Felder weisen auf ein Fehlen von Messwerten in diesem Punkt hin. Der Q_{IEC} -Wert in der Auswertungstabelle bezieht sich auf den Messwert bei 10,5 kV Messspannung.

	25(U)	26(U)	27(U)	9(V)	10(V)	11(V)	12(V)	137(W)	138(W)	139(W)	140(W)
$\tan\delta_{0,2 \text{ in}}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$	+	+	+	+	~	-	-	+	+	-	+
$\Delta \tan\delta$	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+
$\tan\delta$ -Verlauf	-	+	+	~	~	-	~	~	-	-	+
Q_{IEC} -Wert	~	+	-	-	+	~	+	+	+	+	+
PDIV	~	+	-	~	-	-	-	~	-	~	~
IR-Verlauf	-	~	~	-	-	~	-	-	-	-	+
PI	-	+	+	~	+	+	+	+	-	-	+
Restlaufzeit in Stunden	610	67	303	123	113	92	160	57	242	101	79

Tabelle 18: Ergebnistabelle aus den Dauerversuchsmessungen für die Stäbe Af2

	15(U)	16(U)	29(U)	28(U)	127(V)	141(V)	140(V)	143(W)	144(W)	14(W)	13(W)
$\tan\delta_{0,2}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$	-	~	+	+	+	-	+	-	+	~	+
$\Delta \tan\delta$	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
$\tan\delta$ -Verlauf	-	~	-	~	+	-	+	~	+	+	+
Q_{IEC} -Wert	+	-	+	~	~	+	-	+	+	+	+
PDIV	-	-	-	~	-	-	-	-	-	-	-
IR-Verlauf	~	+	+	+	~	-	~	+	+	+	+
PI	+	+	+	+	+	+	~	+	+	+	+
Restlaufzeit in Stunden	144	91	0	199	95	117	144	104	48	126	14

Tabelle 19: Ergebnistabelle aus den Dauerversuchsmessungen für die Stäbe Wu4

	RWU4_27(W)	RWu4_139(V)	R1	R2	R3	R5	R6
$\tan\delta_{0,2}$	+	+	+	+	+		+
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2})$	+	+	-	~	-	-	+
$\Delta \tan\delta$	+	+	~	-	-	-	+
$\tan\delta$ -Verlauf	+	+	-	-	-	-	-
Q_{IEC} -Wert	+	+	~	~	+	~	+
PDIV	~	-	-	-	-	-	~
IR-Verlauf	+	+	-	-	-	+	+
PI	+	+	~	~	~	+	+
Restlaufzeit in Stunden	115	142	25	342	43	25	0,2

Tabelle 20: Ergebnistabelle aus den Dauerversuchsmessungen für die Reservestäbe

	gut	mittelmäßig	schlecht
optische Auswertung	keine/wenige Mängel im Nutbereich und Wickelkopf/ Keine Schädigung der Hauptisolation	mittelschwere Beschädigungen im Wickelkopf oder Nutbereich oder stärkere Erosionen von AGS und EGS	schwere Beschädigungen im Wickelkopf oder Nutbereich
$\tan\delta_{0,2} (N)$	< 30 ‰	-	> 30 ‰
$1/2(\tan\delta_{0,6}-\tan\delta_{0,2}) (N)$	< 2,5 ‰	2,5 ‰ - 3 ‰	> 3 ‰
$\Delta \tan\delta (N)$	< 5 ‰	5 ‰ - 6 ‰	> 6 ‰
Q_{IEC} -Wert	< 8000 pC	8000 pC - 12000 pC	> 12000 pC
PDIV/PDEV	> 5 kV	4 kV - 5 kV	< 4kV
IR-Verlauf	< 1300 Ω	1300 Ω - 1600 Ω	> 1600 Ω
PI	> 4	2 bis 4	<2
Restlaufzeit	>100 Std.	80-100 Std.	<80 Std.
$\tan \delta$ –Verlauf (Schnittpunkt mit der 60°C- $\tan \delta$ Kurve)	> 12,5kV	10,5kV-12,5kV	<10,5kV

Tabelle 10: Legende der Auswertematrix für die Dauerversuchsmessung

Aus der Auswertung der Tabellen ist zu erkennen, dass die Messwerte kurz vor Isolationsversagen deutlich schlechtere Werte aufweisen als bei den Eingangsmessungen. Aufgrund der recht hoch angesetzten Grenzwerte laut Norm für die Verlustfaktormessung, können hier nur 14 von 20 Versuchsobjekte vor Isolationsversagen eine Grenzwertüberschreitung aufweisen. Hiermit stellt sich die Frage, inwiefern nun die Grenzwerte für die Kennzeichnung von einem schlechten Isolationszustand eines Generatorstabes laut dieser Norm aussagekräftig sind. Wie schon unter Kapitel 3.4.2 erwähnt, wurde die Höhe der Grenzwerte für kunstharzisierte Generatorstäbe bereits von (ÖVE 1990) angezweifelt. Vergleicht man zusätzlich den Verlauf der Verlustfaktorkurven so kann ein besseres Bild vom Isolationszustand des Generatorstabes geschaffen werden. Bei

der Auswertung der Teilentladungsmessungen ist in den Tabellen zu erkennen, dass auch der PDIV/PDEV-Wert bei 19 von 20 Probanden entweder verminderte, oder schlechte Werte weist. Auch die Auswertung der Q_{IEC} -Werte kann einige Isolationschwächen klassifizieren. Der Polarisationsindex hat nach Ergebnissen der Messauswertungen die geringste Aussagekraft über den Isolationszustand, vergleicht man ihn mit den anderen Messwerten.

4.2.7 Optische Nachuntersuchungen

An jedem Stab wird nach Isolationsversagen im Dauerversuch eine Post-Mortem Untersuchung durchgeführt (siehe Anhang). Bei dieser Untersuchung wird noch einmal Augenmerk auf optische Veränderungen des Stabes nach der Dauerbeanspruchung gelegt sowie die Durchschlagstelle der Isolierung markiert. Aufgrund der Aufzeichnungen der Durchschlagstellen kann eine Unterteilung der Durchschläge im Wickelkopf und im Nutbereich durchgeführt werden. Bei Durchschlägen am Wickelkopf versagt die Isolation des Stabes nicht im AGS-Bereich, sondern außerhalb im Bereich des EGS-Anstriches. Der Kurzschluss bildet sich dann in Richtung Lamettband aus.

Aus den Aufzeichnungen geht hervor, dass bei 5 von 12 Stäben aus der Maschine Af2 ein Wickelkopfdurchschlag zu verzeichnen ist. Bei den restlichen 7 Fehlern handelt es sich um Durchschläge im Nutbereich, meist an einer Kante der Isolierung. Von allen Durchschlägen der Stäbe Af2 wird nur bei einem Stab die Fehlerstelle als Schwachstelle markiert.

Auffällig ist der Stab Af2_25(U) mit seiner erheblichen Schädigung der Hauptisolation und sehr langen Restlaufzeit. Auch der Durchschlag ereignete sich hier nicht, wie eigentlich zu erwarten gewesen wäre, an der Fehlerstelle, sondern an einer nicht markierten Stelle im mittleren Nutbereich.

Bei den Stäben Wu4 gibt es eine Häufung der Durchschläge im Nutbereich. Bei insgesamt 12 von 14 gelieferten Stäben ist es zu einem Isolationsversagen im Nutbereich gekommen. Nur zwei Fehler entstanden im Wickelkopfbereich. Hier ist aufgrund der Voruntersuchungen bei 6 Stäben die Fehlerstelle schon im Vorfeld als Schwachstelle markiert worden.

Die Verteilung der Ausfälle bei den Reservestäben ergibt eine Ausfallsrate von 3 Stäben aufgrund von Isolationszusammenbrüchen im Wickelkopfbereich und 2 Durchschlägen im Nutbereich. Aufgrund des optisch guten Zustandes der Reservestäbe sind die Durchschlagstellen im Vorfeld hier nicht markiert worden.

4.2.8 DSC und STA-Analyse

An den insgesamt sechs Probestücken sind DSC-Analysen durchgeführt und die Ergebnisse in unten stehender Graphik dargestellt worden. Es sind an jedem Probestück drei Messungen vollzogen und der Mittelwert der Glasübergangstemperatur (T_g) als Ergebnis präsentiert worden. Die Standardabweichung (σ), sowie der Variationskoeffizient (CV) sind mit den Ergebnissen der Analyse in Tabelle 22 zu sehen. Für die Kurzbezeichnung A1 und A2 steht der Stab Af2_12(V), für R1 und R2 der Reservestab R4 und für W1 und W2 der Stab Wu4_15(U). Die Ergebnisse der Maschine zeigen durchaus Unterschiede zwischen den Proben aus verschiedenen Stäben, wobei der Stab der Maschine Wu4 im Schnitt die höchste Glasübergangstemperatur besitzt.

	Sample					
	A1	A2	R1	R2	W1	W2
T_g [°C]	153.37	157.52	154.21	158.28	165.85	154.94
	149.44	149.02	160.11	150.30	153.61	154.92
	148.89	147.91	153.09	158.05	157.31	149.41
$T_{g-avr.}$ [°C]	150.57	151.48	155.80	155.54	158.92	153.09
σ [°C]	1.99	4.29	3.08	3.71	5.13	2.60
CV [%]	1.32	2.83	1.98	2.38	3.23	1.70

Tabelle 11: Ergebnisse der DSC-Analyse (Polanský, Prosr et al. 2013)

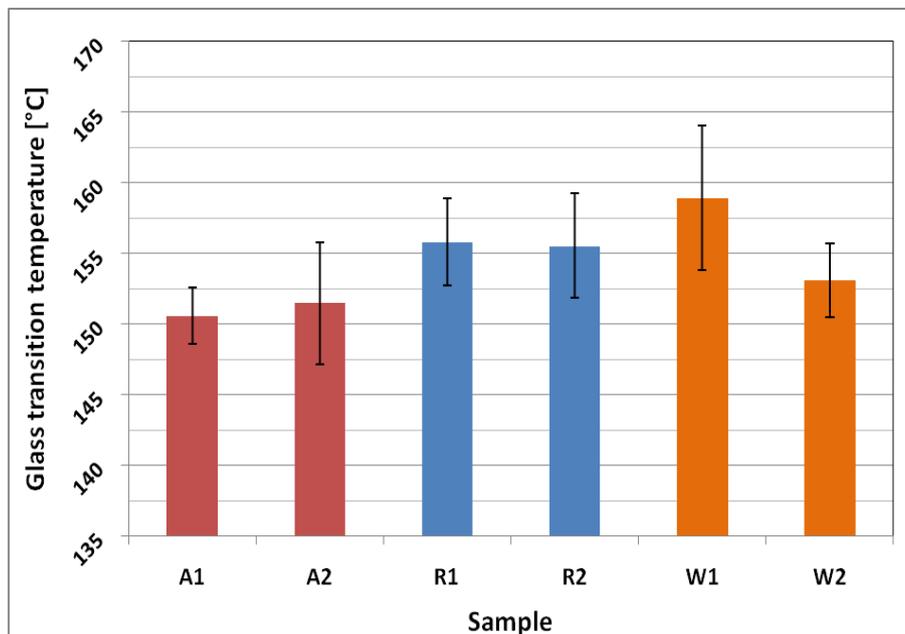


Abbildung 42: Auswertung der mittleren Glasübergangstemperatur (T_g) (Polanský, Prosr et al. 2013)

Zusätzlich ist eine STA-Analyse an dem Probestück R2 durchgeführt worden. Die Thermogravimetrie enthält hauptsächlich Informationen über Gewichtsveränderungen entlang einer Erwärmungsphase. Wie in Abbildung 43 zu erkennen ist, durchläuft die getestete Probe zwei expressive Zersetzungsschritte während der Erwärmung. Hierbei stellt die Verdunstung von organischen Materialien, wie zum Beispiel Harz, die wesentlichste Rolle. Danach erreicht die Probe einen stationären Wert von 58,6%. Dieser Rückstand enthält wahrscheinlich nur mehr anorganische Teile der Probe, wie Glas und Glimmer.

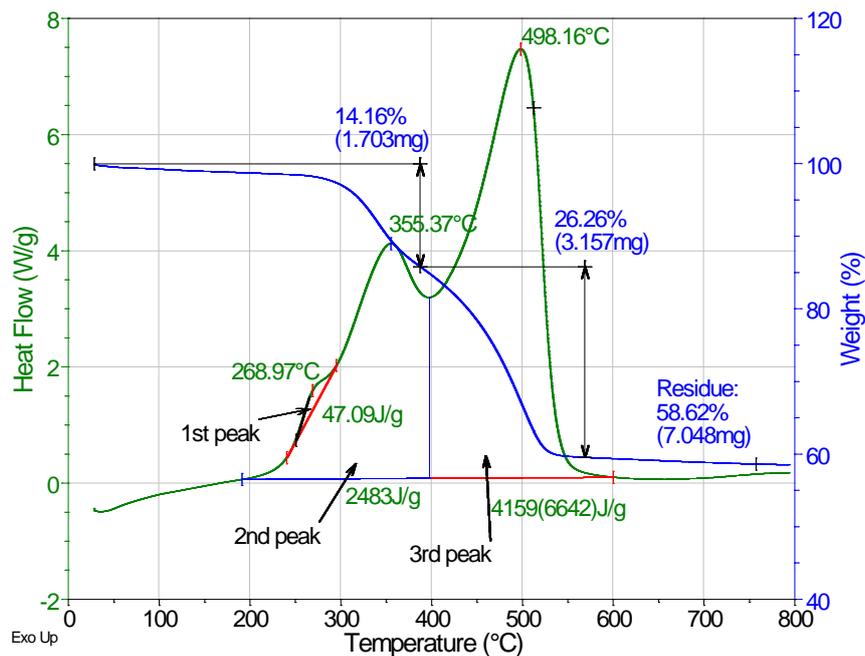


Abbildung 43: Ergebnisse der STA-Analyse des Reservestabes R4 (Polanský, Prosr et al. 2013)

Gleichzeitig ist, wie schon unter Punkt 3.5.2 beschrieben, eine DSC-Analyse am Probestück durchgeführt worden. Hierbei sind drei signifikante Spitzenwerte, welche eine Änderung des Wärmeflusses markieren, während der STA-Analyse zu sehen und eingezeichnet. Hierbei spielt die Enthalpieänderung der ersten Spitze die größte Rolle in der Alterungsanalyse. Für genaue Interpretationen der STA-Analyse sei auf (Prosr, Mentlik et al. 2011) verwiesen. (Polanský, Prosr et al. 2013)

4.3 Vergleich der Stäbe an unterschiedlichen Positionen in der Maschine

Wie eingangs schon erwähnt, sind die Stäbe bei den Voruntersuchungen genau markiert und ihrer ursprünglichen Position im Stator zugeordnet worden, um nach und während den Messungen in Erfahrung zu bringen, ob ein Zusammenhang zwischen dem Isolationszustand, beziehungsweise verbrauchter Lebensdauer, und der betrieblichen Spannungsbeanspruchung gegen das Blechpaket, besteht.

Die Auswertung der einzelnen Diagnosemessungen erfolgt immer unter Beachtung der Stabpositionen und möglichen Indizien, welche einen früheren Einbau der Generatorstäbe in den Stator verraten würden. Aus den elektrischen Untersuchungen der vorliegenden Versuchsstäbe vor und während des Dauerversuches können jedoch keine klaren Hinweise oder Rückschlüsse auf die elektrische Position im Ständerisen erkannt werden. Weder bei den Stäben der Maschine Af2, noch der Maschine Wu4 kommt es zu einem Trend der diese Theorie unterstreicht.

Auch die Auswertung der Restlaufzeiten aus dem Dauerversuch bringt keine Hinweise, dass ein ausleitungsseitig eingebauter Generatorstab eine reduzierte Isolierfähigkeit gegenüber einem sternpunktseitig eingebauten Stab besitzt. Die Tabellen 23 bis 25 stellen die verwendeten Prüfobjekte zusammengefasst in Gruppen der jeweiligen Phase und nach ehemaliger Position im Stator gereiht dar. Links steht die jeweilige Bezeichnung des Probanden. In der Mitte ist die ehemalige Stabposition im Stator von der Ausleitungsseite weggezählt gekennzeichnet und rechts die Restlaufzeit des Probanden im Dauerversuch vermerkt. Man sieht, dass die Ausfallszeiten der Stäbe eher willkürlich ausfallen und kein Zusammenhang erkannt werden kann.

Die farbliche Kennzeichnung der Versuchsobjekte dient der Hervorhebung der Stäbe aufgrund ihrer Laufzeit. Es werden jeweils die beiden Stäbe mit der kürzesten (rot) und der längsten (blau) Restlaufzeit der jeweiligen Maschine markiert.

Stab:	Position:	Betriebliche Spannungsbeanspruchung geg. dem Blechpaket in Volt	Gesamtlaufzeit in Std.
Af2_9(V)	12	5368	123,35
Af2_10(V)	24	4610	113,47
Af2_11(V)	36	3852	91,72
Af2_12(V)	48	3094	160,08
Af2_137(W)	12	5368	56,52
Af2_138(W)	24	4610	242,24
Af2_139(W)	36	3852	100,52
Af2_140(W)	48	3094	79,02
Af2_25(U)	12	5368	606
Af2_26(U)	24	4610	66,56
Af2_27(U)	36	3852	302,63
Af2_28(U)	48	3094	0

Tabelle 23: Restlaufzeiten der Maschinenstäbe Af2

Stab:	Position:	Betriebliche Spannungsbeanspruchung geg. dem Blechpaket in Volt	Gesamtlaufzeit in Std.
WU4_127(V)	12	5368	95,46
WU4_128(V)	24	4610	0
WU4_141(V)	37	3789	116,55
WU4_140(V)	49	3031	143,58
WU4_143(W)	12	5368	103,64
WU4_144(W)	24	4610	48,02
WU4_14(W)	37	3789	125,51
WU4_13(W)	49	3031	13,69
WU4_15(U)	12	5368	144,24
WU4_16(U)	24	4610	90,63
WU4_29(U)	37	3789	0
WU4_28(U)	49	3031	199,46
RWU4_139(V)	-		142,12
RWU4_27(W)	-		115,49

Tabelle 24: Restlaufzeiten der Maschinenstäbe Wu4

Stab:	Position:	Gesamtlaufzeit in Std.
R1	-	0
R6	-	0,2
R5	-	24,81
R3	-	42,64
R2	-	342,24

Tabelle 25: Restlaufzeiten der Reservestäbe

4.4 Vergleich der Stäbe beider Generatoren

Im Folgenden wird ein kompakt zusammengefasster Vergleich der Maschinenstäbe auf Grundlage der Messwertanalyse aufgelistet und einem Ranking unterzogen. Die Reservestäbe werden zwar auch in den Vergleich mit eingebunden, jedoch werden diese nicht im Endresultat erwähnt. Eine Folge von kurzen Stichwörtern zur jeweiligen Diagnosemethode sollen die positiven sowie negativen Argumente zu den Ergebnissen zusammenfassen. Die Auswertung basiert unter Einbeziehung aller Untersuchungen, die während dieser Arbeit vollzogen worden sind.

Optische Voruntersuchung

Besserer Eindruck aus den optischen Voruntersuchungen: Statorstäbe der Maschine Af2

Af2:

- Nutbereich teilweise beschädigt bzw. leichte AGS Abnutzung
- Wickelkopfbereich teilweise verschmutzt

Wu4 :

- Teilweise starke Abnutzung des AGS im Nutbereich
- AGS ist relativ schmierig und leicht von der Oberfläche zu lösen
- Wickelkopfbereiche sind leicht ölig-verschmutzt

Reservestäbe:

- Optisch tadelloser Zustand

Verlustfaktormessung

Durchschnittlich besseres Ergebnis während der Verlustfaktormessung: Statorstäbe Wu4

Af2:

- Relativ starke Streuung der Verlustfaktorwerte bei den Eingangsmessungen
- Zahlenmäßig mehr Stäbe mit steilem Verlustfaktorverlauf
- Nach der Dauerbelastung stärkerer Anstieg der Verlustfaktorkurven
- Steilere Verlustfaktorkurven als Wu4

Wu4:

- Geringere Streuung der Verlustfaktorverläufe als Af2 und Reservestäbe
- Nur ein Stab mit signifikant erhöhtem Verlustfaktoranstieg während den Eingangsmessungen
- Geringere Abweichungen der Verlustfaktorverläufe während den Zwischenmessungen bei niedrigen Spannungen bis zur Nennspannung

Reservestäbe:

- Sehr steiler Verlustfaktoranstieg bei fast allen Stäben mit Ausnahme von R2
- Grenzwerte laut Norm (ÖVE EN 50209:1998-11. 1998) bereits während den Eingangsmessungen überschritten
- Starke Streuung der Verläufe

Isolationswiderstandsmessung:

Bessere Ergebnisse nach Auswertung der Isolationswiderstandsmessung: Statorstäbe Wu4

Af2:

- Verläufe im Durchschnitt gut, jedoch wurde eine gröbere Streuung während den Eingangsmessungen gegenüber den Stäben von Wu4 erkannt
- Während den Eingangsmessungen hat es einen Stab mit verhältnismäßig flachem Isolationswiderstandsverlauf gegeben

Wu4:

- Verläufe der Isolationswiderstandswerte bei den Eingangsmessungen konzentriert und durchgängig steil

Reservestäbe:

- Große Streuung der Ergebnisse aus den Eingangsmessungen
- Zwei Stäbe mit verhältnismäßig flachem Verlauf während den Eingangsmessungen

Isolationszeitkonstante

Bessere Ergebnisse nach Auswertung der Isolationszeitkonstante aus der Eingangsmessung: Statorstäbe Wu4

Af2:

- Wiederum starke Streuung der Werte mit einem signifikant schlechten Wert

Wu4:

- Konstant hohe Werte ohne Ausnahmen

Reservestäbe:

- Starke Streuung der Messwerte mit zwei schlechten Werten (R1 und R3)

Teilentladungsmessung

Durchschnittlich bessere Werte aufgrund der Q_{IEC} -Analyse: Statorstäbe der Maschine Wu4

Af2:

- Ähnlich große Streuung wie bei der Verlustfaktormessung nach den Vorversuchen
- Durchschnittlich höhere Spitzenwerte als bei der Maschine Wu4 während den Eingangsmessungen
- Auch während den Zwischenmessungen bleiben die durchschnittlichen Q_{IEC} -Werte über den Stäben von Wu4

Wu4:

- Geringere Streuung während den Eingangsmessungen
- Geringere Entladungswerte während den Eingangsmessungen
- Q_{IEC} -Werte auch während den Zwischenmessungen durchgehend verhältnismäßig gering
- Geringere Variation der Q_{IEC} -Werte über den gesamten Messzeitraum

Reservestäbe:

- Geringere Streuung während den Eingangsmessungen
- Entladungshöhe während den Eingangsmessungen im durchschnittlichem bis leicht erhöhtem Bereich

Keine Reihung lässt sich bei den TE-Fingerprints durchführen, da die Interpretation hierfür zu viel Spielraum für Argumente beiderseits zulässt.

Auffällige Fingerprints sind bei einigen Stäben zu erkennen, wobei hier keinerlei Frühausfälle zu verzeichnen sind. Lediglich bei dem Stab Af2_25(U) kann im Vorfeld eine starke Isolationsschädigung vermutet werden. Bei den anderen Stäben mit Vorschaden sind keine Auffälligkeiten mittels Fingerprintanalyse erkannt worden. Es können keine Unterschiede bezüglich Maschinensatz oder Warnhinweise auf Frühausfälle, beziehungsweise bevorstehenden Ausfall erkannt werden.

PDIV/PDEV-Werte:

Bessere Ergebnisse aufgrund der Messungen aus der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung: Statorstäbe der Maschine Af2

Af2:

- Im Schnitt höhere PDIV/PDEV-Werte während den Eingangsmessungen als auch bei den Zwischenmessungen
- Bei den Eingangsmessungen nur ein Stab mit verhältnismäßig schlechtem PDIV-Wert

Wu4:

- PDIV/PDEV-Werte liegen etwas unter den Werten der Maschine Af2

Reservestäbe:

- Kein Stab mit überdurchschnittlich hohem PDIV/PDEV-Wert während den Eingangsmessungen
- Werte bei den zwei Probanden an denen Zwischenmessungen durchgeführt wurden, befinden sich eher im unteren Bereich

Restlaufzeit

Durchschnittlich längere Restlaufzeit während des Dauerversuches: Statorstäbe Af2

Af2:

- Im Gesamtdurchschnitt längere Restlaufzeit (162 Std.)
- Ein Frühausfall/Sofortausfall
- 3 Stäbe mit überdurchschnittlich langer Laufzeit
- Häufung der Restlaufzeiten um die 105 Stunden-Marke (60% der Versuchsstäbe)

Wu4:

- Im Gesamtdurchschnitt geringere Restlaufzeit (95 Std.)
- Geringere Streuung der Restlaufzeiten
- 4 Stäbe mit Laufzeiten unter 50 Stunden, wobei 2 Sofortausfälle mit 0 Stunden Restlaufzeit zu verzeichnen waren
- Häufung der Restlaufzeiten um die 119 Stunden-Marke (60% der Versuchsstäbe)
- Nur ein Stab mit längerer Laufzeit, jedoch noch innerhalb des erwarteten Bereiches

Reservestäbe:

- 4 von 5 Stäbe waren Frühausfälle mit Laufzeiten unter 50 Stunden
- Nur ein Stab mit überdurchschnittlich langer Restlaufzeit

Ein Vergleich der Stäbe aus den zwei verschiedenen Maschinen zeigt, dass die Probanden der Maschine Wu4 zwar weniger Betriebsstunden und Starts aufweisen, jedoch bei den optischen Voruntersuchungen einen deutlich schlechteren Eindruck aufweisen als die Stäbe der Maschine Af2. Während den elektrischen Diagnoseuntersuchungen hatten die Stäbe der Maschine Wu4 in Summe jedoch das etwas bessere Messergebnis, wenn auch nur mit geringem Vorsprung zu den Stäben Af2. Die Restlaufzeit der Stäbe zeigt zwar, dass es für die Probanden von Wu4 eine Häufung der Ausfallszeiten um die 117 Stundenmarke gibt, aber mit vier Ausfällen der Stäbe unter 50 Stunden und nur einem überdurchschnittlich lang laufenden Stab, sind die Restlaufzeiten dieser Maschine trotzdem hinter der durchschnittlichen Restlaufzeit der Maschine Af2 einzuordnen. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die Maschinenstäbe der Maschine Af2 den optisch besseren Eindruck hinterlassen und auch die durchschnittlich längere Restlaufzeit besitzen, jedoch die Maschinenstäbe von Wu4 während den Diagnosemessungen besser abschneiden.

4.5 Abschätzung der Restlebensdauer

4.5.1 Beobachtungen des Alterungsverhaltens während den Dauerspannungsversuch

Nach der ersten Zwischenmessung der Dauerspannungsbeanspruchung hat sich das Erscheinungsbild der Verlustfaktormessung und des Teilentladungsmusters signifikant geändert.

War bei den Eingangsmessungen der Verlustfaktorverlauf über den gesamten Messbereich eher einer Geraden ähnlich, so verändert sich der Verlauf während den Zwischenmessungen zu einer „S“-Kurve. Hier ist schließlich ein Schnittpunkt der Verlustfaktorkurven aus den Zwischenmessungen mit der 60°C-Eingangsmessung klar zu erkennen. Die 20°C-Kurve wird meist schon mit dem Verlustfaktoranzangswert überragt. Wichtig zu wissen ist, dass dieses Erscheinungsbild nur bei einer Messung bis zur zweifachen Nennspannung plus 1 kV zu sehen ist. Wird der Verlustfaktor wie üblich nur bis etwa 100-120% der Nennspannung aufgezeichnet, so ist meist nur ein signifikanter Anstieg im Bereich zwischen 80-100% der Nennspannung zu sehen. Zwar reicht dieses Bild für Interpretationen oft aus, jedoch fällt die Aufnahmeurve beziehungsweise eine Veränderung dieser bei einer Messung bis $2 \cdot U_N + 1$ kV mehr auf. Es ist versucht worden einen Zusammenhang zwischen dem Schnittpunkt der 60°C-Verlustfaktorkurve mit den Verlustfaktorkurven nach elektrischer Überbeanspruchung herzustellen, jedoch wird dieses Ziel aufgrund von zu großer Streuungen der Interpretationswerte nicht erreicht.

Auch die Teilentladungsmessung weist ein verändertes Bild nach den Zwischenmessungen gegenüber den Eingangsmessungen auf. Es wird bei nahezu allen Versuchsobjekten die Ausprägung von negativen Entladungen im Bereich der 45° Phase beobachtet. Des Weiteren scheint es, als würde die Intensität der Teilentladungen mit der Dauer der Beanspruchung leicht steigen und kurz vor Ausfall wieder sinken. Bei fortschreitender Dauerbeanspruchung ändert sich auch das Erscheinungsbild der Fingerprints meist nur im geringen Maße. Zwar gibt es Änderungen in der Intensität der Entladungen, jedoch veränderte sich die Form meist nur unwesentlich.

Bei der Isolationswiderstandsmessung gibt es zwar auch eine Veränderung des Verlaufes, jedoch ist diese nicht so signifikant wie bei den anderen beiden Diagnosemessmethoden. Die Verläufe des Isolationswiderstandes werden im Laufe des Dauerversuches, und somit mit zunehmendem Alter, immer flacher. Während den Messungen und zum Vergleich mit andern Messungen fällt hier die starke Temperaturabhängigkeit dieser Messung auf. Schon die Eingangsmessungen zeigen, dass der Verlauf des Isolationswiderstandes mit zunehmender Temperatur immer flacher wird.

4.5.2 Geeignete Diagnoseparameter für die Beschreibung des Alterungsverhaltens

Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens eignen sich alle drei, in dieser Arbeit verwendeten, elektrischen Diagnosemethoden. Zwar kann jede einzelne Methode mit diversen Vor- und Nachteilen Hinweise auf Alterung geben und Alterungsverläufe darstellen, jedoch ist eine Kombination mehrerer Diagnosemethoden trotzdem ratsam, um Nachteile beziehungsweise Defizite einzelner Methoden auszugleichen.

Die Messung des Verlustfaktorverlaufes liefert, nach Ergebnissen dieser Arbeit, die deutlichsten Ergebnisse in Bezug auf eine Beobachtung des Alterungsverhaltens. Aufgrund von Vergleichsmessungen sind Veränderungen im Isoliergefüge schneller und vor allem einfacher zu erkennen als mittels Teilentladungsmessung oder Isolationswiderstandsmessung. Ratsam ist daher ein Vergleich verschiedener Verlustfaktorverläufe ähnlicher oder gleicher Versuchsobjekte. Der Beschreibung des globalen Zustandes eines Probanden ist somit recht gut durchführbar. Nachteilig erweist sich, dass zwar Fehlerstellen erkannt werden können, die Lokalisierung dieser Fehlerstellen jedoch nicht möglich ist. Eine Beurteilung einer Stabisolation aufgrund der Grenzwerte nach Norm EN 50209 kann zwar ein Anhaltspunkt für eine genaue Beobachtung des Probanden und eventuelle genaue Untersuchungen sein, jedoch ist eine Beurteilung auf Grundlage der Grenzwerte nicht unbedingt zielführend. Die Messungen haben gezeigt, dass Überschreitungen dieser Grenzwerte kein Garant für sofortigen Ausfall sind. Auch gibt es viele Ausfälle von Versuchsobjekten, die keinen der Grenzwerte nach Norm überschritten haben. Die Messung ohne Schutzringanordnung hatte für diese Untersuchungen keine offensichtlichen Nachteile mit sich gebracht.

Die Methode der Teilentladungsmessung ermöglicht ebenfalls eine Beobachtung des Alterungsverhaltens eines Isoliermediums. Aus der Messung lassen sich, neben dem Fingerprint, auch Messwerte ableiten, welche eine Alterungsbeschreibung für sich ermöglichen. Die Auswertung und Beobachtung des Q_{IEC} -Wertes kann zum einen Informationen über den Globalzustand der Isolierung und bei Betrachtung über einen längeren Zeitraum, Vergleichswerte zur Beurteilung der Isolationsentwicklung geben. Ähnliches ist mit der Auswertung der PDIV/PDEV-Werte möglich. Diese Messwerte liefern auch gleichzeitig eine erste Abschätzung über den allgemeinen Zustand der Isolierung. Durch Beobachtung kann oft eine Verschlechterung des Isolationszustandes mit einem Sinken der Messwerte aus der PDIV/PDEV-Messung im Zusammenhang gebracht werden. Die Auswertung des Fingerprints selbst kann Informationen über den Globalzustand der Isolierung liefern und ermöglicht gleichzeitig eine Lokalisierung von möglichen Fehlerstellen. Diese Auswertung erweist sich aufgrund der Überlagerung vieler Einflussfaktoren als sehr schwierig und ist Experten vorbehalten. Eine eindeutige Beurteilung des Zustandes einer Stabisolation kann nach den gewonnenen Ergebnissen aus diesen Untersuchungen auch diese Messung nicht vollbringen.

Mit Hilfe der Isolationswiderstandsmessung ist eine Alterung eines Isolierstoffes durchaus beobachtbar, jedoch sind die Indizien nicht so eindeutig und hervorstechend wie bei den vorangegangenen Messungen. Eine Interpretation des Gesamtzustandes einer Isolierung lässt sich nur im geringen Maße durchführen. Auch ist das Erkennen von Schäden sehr schwierig und nur in seltenen Fällen eindeutig genug für eine Beurteilung. Die Isolationszeitkonstante gibt Aufschluss über den Feuchtegehalt im Isoliermedium, jedoch konnten Vermutungen auf Feuchtigkeit aufgrund von sehr schlechten Verlustfaktorwerten und niederem Isolationswiderstand keine Bestätigung durch diese Messung erfahren.

Mit Hilfe der vorgestellten elektrischen Diagnosemethoden ist es möglich den Verlauf der Alterung eines Isolierstoffes zu beobachten. Jedoch liefern die Messungen keine schlagkräftigen Argumente für einen bevorstehenden Ausfall oder eine vermeintliche Restlaufzeit. Bei längerfristiger Betrachtung und ständiger Aufzeichnung von Messwerten wie der Isolationswiderstandsmessung, Verlustfaktormessung oder Teilentladungsmessung kann ein Trend der Isolationsentwicklung sehr gut beobachtet werden. Mit Hilfe der Verläufe kann eine Abschätzung über eine Vorteil bringende Änderung des Betriebsverhaltens der Maschine oder Empfehlungen für Instandhaltungen oder Revitalisierungen gegeben werden. Die Vielzahl an Einflussfaktoren und marginalen Differenzen von Materialänderungen während der Alterung macht es aber schlicht unmöglich eine Voraussage über einen genauen Zeitpunkt des Ablebens einer Wicklungsisolierung vorher zu sagen.

5 Schlussfolgerungen

Die optischen Voruntersuchungen geben im Vorfeld der Messungen eine erste Abschätzung über den technischen Zustand der vorliegenden Versuchsobjekte. Jedoch sollte man aufgrund dieser Erkenntnisse keine vorzeitigen Schlussfolgerungen ziehen, da die Auswertungen gezeigt haben, dass der Zustand der Isolierung im Inneren oft gegenteilige Eigenschaften aufweist. Mit Hilfe der visuellen Voruntersuchung konnten bereits im Vorfeld drei Stäbe aufgrund des optischen Erscheinungsbildes als mangelhafte Stäbe klassifiziert werden, welche sich schlussendlich als Frühhausfälle im Dauerversuch etablierten. Ein schlechter Zustand bei den optischen Voruntersuchungen ist aber nicht unbedingt ein Garant für einen schlechten Zustand der Isolation, wie der Versuchsstab Af2_25(U) beweist. Eine weiterführende messtechnische Diagnose ist zur Beurteilung also unabdingbar.

Um das Alterungsverhalten von Generatorstabisolierungen zu beobachten empfiehlt es sich in regelmäßigen Abständen eine Kombination von elektrischen und dielektrischen Diagnosemethoden zur Beobachtung und Beurteilung des Isolationszustandes heranzuziehen. Hierbei sei auf die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Diagnosemethoden hingewiesen, um die Vergleichbarkeit der Messwerte sicherstellen zu können. Eine mathematische Korrektur von Messwerten, welche bei unterschiedlichen Isolationstemperaturen aufgenommen wurden, gestaltet sich in der Regel als schwierig und ist meist nur in kleinen Bereichen zulässig.

Bei der Auswertung der Verlustfaktorkurven ist ersichtlich, dass eine Messung des Verlustfaktors bis über die zweifache Nennspannung durchaus informative Daten zum Quervergleich der einzelnen Stäbe enthält. Bei manchen Stäben ist eine Erhöhung des Verlustfaktoranstiegswertes erst unmittelbar vor oder bei Erreichen der Nennspannung gegeben. Dieses Verhalten wird erst durch eine Aufnahme der Messwerte, welche über der üblichen Spannungsbelastung liegt, hervorgehoben.

Die Annahme einer durchschnittlichen Restlaufzeit von 100 bis 200 Stunden bei $3 \cdot U_N$ für die vorliegenden Untersuchungsobjekte ist gut gewählt, wobei die mittlere Restlaufzeit im Bereich von 100 Stunden zu finden ist. Im Nachhinein muss erwähnt werden, dass die Zeitintervalle der Zwischenmessungen optimiert werden könnten, um den Informationsgehalt der Messungen zu erhöhen. Ein Vorschlag wäre ein Messintervall, welches Anfangs alle 10 Stunden Zwischenmessungen vorschreibt und im Laufe der Alterung sukzessive erhöht wird.

Ein unterschiedliches Alterungsverhalten aufgrund des Einbauortes der Stäbe im Stator kann bei den vorliegenden Versuchsobjekten nicht festgestellt werden. Ursprünglich war die Annahme gegeben, dass Stäbe an der Ausleitungsseite der Statorwicklung aufgrund ihrer höheren Spannungsbeanspruchung gegenüber dem Blechpaket auch eine erhöhte Alterung aufweisen, als elektrisch nieder beanspruchte, sternpunktseitige Stäbe. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass das Alterungsverhalten in elektrischen Maschinen nicht maßgeblich von der

elektrischen Beanspruchung geprägt wird, sondern dass die thermische, mechanische und chemische Alterung eine größere Rolle spielen.

Aufgrund der Frühausfälle ist eine fortgeschrittene Alterung der vorliegenden Versuchsstäbe bei beiden Maschinen erkennbar. Eine Quantifizierung der Messergebnisse und ein exakter Rückschluss auf die vorhandene Restlebensdauer sind zu diesem Zeitpunkt für die Gesamtheit der Generatorstäbe nicht sinnvoll. Obwohl der Großteil der Versuchsobjekte durchwegs Restlaufzeiten im erwarteten Bereich aufzuweisen hat, sind Generatorstäbe dabei, welche einen sehr schlechten Zustand aufzeigen. Aufgrund des Umstandes, dass die Wicklung als Summe der Einzelstäbe zu sehen ist und die Isolierfähigkeit vom schwächsten Glied bestimmt wird, kann von einer vorhandenen aber stark reduzierten Restlebensdauer ausgegangen werden.

Besonderes Augenmerk sollte in weiterer Folge auf die Reservestäbe gelegt werden, da diese eine sehr hohe Kurzeitenausfallsrate aufweisen, obwohl sie isoliertechnisch als neuwertig anzusehen sind. Die Auswertung der Isolationszeitkonstante zeigt, dass diese Stäbe im Vergleich zu den betriebsgealterten Stäben der Maschine Wu4 verhältnismäßig „schlechte“ Werte aufweisen. Der Zustand der Isolierung scheint sich aber am deutlichsten in der Verlustfaktormessung wieder zu spiegeln. Auch die Auswertung der PDIV/PDEV-Werte der Reservestäbe lässt eine verminderte Isolierfähigkeit der Reservestäbe vermuten. Zu berücksichtigen ist allerdings der Umstand, dass sich die Isoliereigenschaften bei neuwertigen Statorstäben nach einem Einbau in den Stator und während des Betriebes aufgrund von vollständiger Aushärtung des Isoliermaterials noch etwas verbessern.

Zur genauen Beurteilung des Isolationszustandes der gelagerten Reservestäbe ist es notwendig weitere Untersuchungen an mehreren Probanden anzustellen, welche sich gezielt auf die Auswertung der Reservestäbe richten.

6 Zusammenfassung

Die Durchführung dieser Arbeit basiert auf der Untersuchung betriebsgealterter Generatorstäbe ausrangierter Statorwicklungen aus zwei Synchronmaschinen der KELAG. Weiteres sind sechs gelagerte Reservestäbe den Versuchsstäben der Maschinen hinzugefügt worden, um Vergleichswerte zu erhalten. Somit werden an insgesamt 30 Generatorstäben technische Diagnoseuntersuchungen durchgeführt. Zwei weitere betriebsgealterte Stäbe dienen zur Erprobung der Messdurchführungen und zur Festlegung des Spannungsprüfpegels. Ziel ist es, eine Untersuchung der Restspannungsfestigkeit dieser gealterten Stäbe anzustellen und die verwendeten Diagnosemessungen auf ihre Eignung für diese Untersuchung zu prüfen. Des Weiteren sollen die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, ob ein Zusammenhang zwischen der Position der Generatorstäbe im Stator und dem Zustand der Isolation hergestellt werden kann.

Eingangs wird in dieser Arbeit kurz auf das Isolationssystem der Versuchsstäbe und die Vorgeschichte der Generatoren eingegangen. Zur Untersuchung der Alterungsabhängigkeit vom Einbauort müssen die Versuchsobjekte auch den genauen elektrischen Positionen im Statorblechpaket zugeordnet werden. Die Abhandlung der Diagnoseuntersuchungen folgt einem strikten Schema, wie es unter Kapitel 3 vorgestellt wird. Die Untersuchungen werden an jedem Stab durchgeführt, um genug Messergebnisse für eine qualitative Auswertung zu erhalten. Die Versuchsstäbe werden nach einer Vorfelduntersuchung mit Hilfe erhöhter elektrischer Beanspruchung im Dauerversuch künstlich gealtert. Zwischenmessungen geben Auskunft über den aktuellen Isolationszustand und ermöglichen eine Aufzeichnung des Alterungsverlaufes jedes Probanden bis zum Isolationsversagen hin.

Die Abschätzung der durchschnittlichen Restlebensdauer der Versuchsobjekte für die Festlegung des Spannungsprüfpegels wird unter Zuhilfenahme von Untersuchungsergebnissen aus Generatorstabprüfungen mit gleichem Isolationssystem, sowie der Berücksichtigung aktueller Betriebsdaten der Maschinen vollzogen. Eine anschließende Überprüfung der Annahme an zwei Probanden bestätigt diese, sodass die Dauerprüfung mit dem gegebenen Spannungspegel von $3 \cdot U_N$ durchgeführt werden kann. Die mittleren Restlaufzeiten der Versuchsstäbe zeigen, dass die Annahme der Restlebensdauer bei gegebener Spannung durchaus vertretbar ist. Die mittlere Restlaufzeit der Versuchsstäbe liegt bei 162 Stunden bei der Maschine Af2 beziehungsweise 92 Stunden bei der Maschine Wu4, werden alle Versuchsstäbe der Maschine miteinbezogen. Neben Stäben mit sehr langer Laufzeit gibt es auch einige Frühausfälle mit Restlaufzeiten unter 50 Stunden, die für die Beurteilung der Statorstäbe relevant sind. Fünf betriebsgealterte Versuchsstäbe haben bei einer Spannungsbeanspruchung von 32 kV Restlaufzeiten von weniger als 50 Stunden vorzuweisen, wobei unter diesen Probanden drei Stäbe einen Sofortausfall zu verzeichnen haben. Eine Überraschung zeigt sich in der Auswertung der Restlaufzeiten der Reservestäbe. Hier wird empfohlen weitere Untersuchungen anzustellen, um ein genaueres Bild der Situation dieser Stäbe zu erhalten.

Jede Diagnoseuntersuchung hat ihre Vorzüge sowie Vor- und Nachteile. Der schwierige Teil der Messungen ist es die Eigenschaften der jeweiligen Methode optimal zu nutzen und Quervergleiche mit anderen Messmethoden und Messergebnissen anstellen zu können, sowie Messergebnisse richtig zu interpretieren. Für die Analyse des Isolationszustandes der vorhandenen Probanden wird eine Reihe ausgewählter Messwerte zur Interpretation des Isolationszustandes gewählt. Hierbei wird darauf geachtet, dass die Messwerte zusammenhängende Aussagewerte liefern, sodass Vergleiche zwischen den Messwerten unterschiedlicher Diagnosemittel angestellt werden können. Somit lassen sich aus einer Kombination der Messergebnisse von elektrischen und optischen Untersuchungen Zusammenhänge und Vermutungen auf Veränderungen im Isoliergefüge leichter anstellen.

Zu beachten sind Abhängigkeiten der jeweiligen Messmethoden von den Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel der Wicklungstemperatur. Damit in weiterer Folge Diagnosemessungen untereinander verglichen werden können, empfiehlt es sich immer die gleichen Messbedingungen am Prüfobjekt herzustellen.

Zusätzlich zu den optischen und elektrischen Untersuchungen wird nach Vollendung der Dauerversuchsmessung noch eine Restharzanalyse an ausgewählten Stäben durchgeführt. Mit Hilfe dieser Methode können unter anderem Feuchtigkeit in der Isolierung und ein Vergleich von Versuchstäben mit unterschiedlich langen Laufzeiten im Dauerversuch bezüglich ihres Restharzgehaltes angestellt werden. Des Weiteren wird eine externe DSC- und STA-Analyse der UWB an sechs Probestücken angestellt, um die Isolationseigenschaften näher zu untersuchen.

Zur weiteren Untersuchung wäre eine Zerlegung der Isolierhülle zu empfehlen, um die Harzersetzung im Inneren des Isoliergefüges zu überprüfen. Möglicherweise ergeben sich somit neue Zusammenhänge zwischen elektrischer Diagnosemessung und Isolationszustand im Inneren des Gefüges. Chemische und thermische Analysemethoden zeigen durchaus Interpretationspotential jedoch mit dem Nachteil, dass diese meist nur Post-mortem an Generatorwicklungsisolierungen durchführbar sind.

7 Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
<i>AGS</i>	Außenglimmschutz
<i>DSC</i>	Differential Scanning Calorimetry
<i>EGS</i>	Endenglimmschutz
<i>FEE/RICE</i>	Faculty of Electrical Engineering/Regional Innovation Centre for Electrical Engineering
<i>PD</i>	Partial Discharge
<i>STA</i>	Simultaneous Thermal Analysis
<i>Std.</i>	Stunde(n)
<i>TE</i>	Teilentladung
<i>UWB</i>	University of West Bohemia
<i>A</i>	Ampere
<i>F</i>	Farad
Ω	Ohm
<i>s</i>	Sekunden
<i>V</i>	Volt

8 Literaturverzeichnis

FISCHER, R., 2009. *Elektrische Maschinen*. 14 edn. München: Carl Hanser Verlag München.

GROSS, D., 2003. *Teilentladungsdiagnose an Motoren und Generatoren*. Deutschland: Power Diagnostix Systems GmbH.

HOOFF, M. and STEPHAN, C., 2004. *Diagnose des Isolationssystems elektrischer Maschinen Aktueller Stand und Entwicklungstendenzen*. Diagnostik elektrischer Betriebsmittel ETG-Fachbericht, **97**(Vorträge der ETG-Fachtagung am 09. und 10. März in Köln),.

HUDON, C. and BELEC, M., 2005. *Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, **12**(2), pp. 297-319.

IEEE STD 286-2000(R2006), 2000. *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.

IEEE STD 43-2000, 2000. *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

KELAG, *Plan des Wicklungsschemas Af2 1.2.1.4*.

KELAG, *Informationsbroschüre: Kraftwerksgruppe Fragant*.

KÜCHLER, A., 2009. *Hochspannungstechnik Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. 3. Heidelberg: Springer.

MAREK, P., 2005. *Neues Trägersystem für Hochspannungsisolierungen*. Dr. techn. edn. TU Graz.

MÜLLER, G., VOGT, K. and PONICK, B., 2008. *Berechnung elektrischer Maschinen*. 6 edn. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & CoKGaA.

ÖVE, 1998. *EN 50209:1998-11; Prüfung der Isolierung von Stäben und Spulen von Hochspannungsmaschinen*. 11 edn. ÖVE.

ÖVE, 1990. *Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen Merkblatt 2 2. Auflage*. 2 edn. Wien: ÖVE.

POLANSKÝ, R., PROSR, P. and ČERMÁK, M., 2013. *Results of DSC and STA Analysis*. Pilsen: FEE/RICE UWB in Pilsen.

PROSR, P., MENTLIK, V. and POLANSKY, R., 2011. *A new method of lifetime estimation for high-voltage insulating systems in rotating machines*, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011 Annual Report Conference on 2011, pp. 607-610.

RUPP, C., 2005. *Zustandsbewertung rotierender elektrischer Maschinen*. Dipl.- Ing. edn. Graz: TU Graz.

SCHWARZ, R., 2013. *Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik*. Unterlagen zur Vorlesung, TU Graz: Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement.

SUMEREDER, C., 2008. *Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik*. 2., Graz: TU Graz.

SUMEREDER C, MUHR, M. *Umfassende Zustandsbewertung von Generatoren*. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik. 2009;126(3):126-31.

SUMEREDER, C., MUHR, M., 2006. *Zuverlässigkeits- und Risikoabschätzung von elektrischen Betriebsmitteln*. TU Graz: Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement.

SUMEREDER, C., 2008. *Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis*. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, **15**(3), pp. 678-685.

SUMEREDER, C., WOSCHITZ, R., MUHR M, EGGER, H. and MARKETZ, M., 2006. *Extension of generator lifetime by winding renewal*, *Electrical Insulation*, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on 2006, pp. 106-109.

WEIERS, T., 2007. *Eine Methode zur aussagekräftigeren Bewertung von Maschinenisolationen*, Diss. ETH-Nr.: 17363. ETH Zürich.

WOSCHITZ, R. and SUMEREDER, C., 2005. *Beurteilung des Isolationszustandes an den Generatorstäben der Maschine Oschenik 1 und 2 sowie Reservestäbe*. VAG 05063. Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH:

9 Anhang

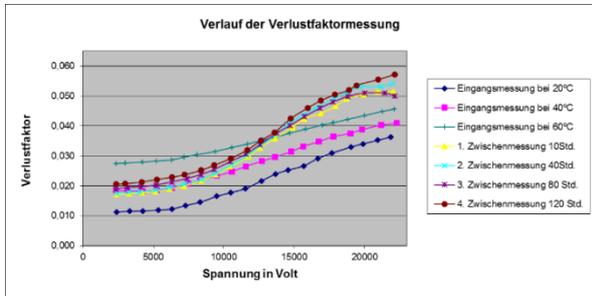
Auf den folgenden Seiten sind die Messergebnisse aus den elektrischen Diagnoseuntersuchungen, sowie den visuellen Untersuchungen für jeden einzelnen Stab verzeichnet. Die wichtigsten Diagramme aus den elektrischen Messungen sind für jedes Versuchsobjekt auf einer Seite zusammengefasst. So beinhalten die Diagramme sowohl die Messergebnisse der Voruntersuchungen, als auch die Messergebnisse aus dem Dauerversuch. Bei der Q_{IEC} - und PDIV/PDEV-Messung sind teilweise Messwerte in den Diagrammen verschiedener Stäbe, meist bei der 20°C-Eingangsmessung, nicht vorhanden. Hierbei liegt entweder ein Messfehler vor, sodass der Messwert nicht aussagekräftig und daher nicht im Diagramm zu finden ist, oder der Messwert konnte aufgrund von Messbereichseinschränkungen nicht aufgenommen werden. Es wird bereits in Kapitel 4.1 auf diesen Umstand hingewiesen.

Unter den Diagrammen befinden sich die Tabellen mit den Informationen über die klimatischen Gegebenheiten zur jeweiligen Eingangsmessung oder Zwischenmessung für den untersuchten Stab. Der anschließende Punkt der visuellen Untersuchung beinhaltet sowohl eine kurze Zusammenfassung der Informationen aus den optischen Voruntersuchungen der Stäbe, als auch aus den optischen Nachtuntersuchungen.

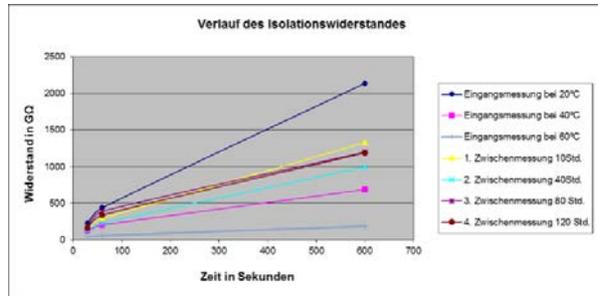
Stab: Af2_9(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 123,35 Std.

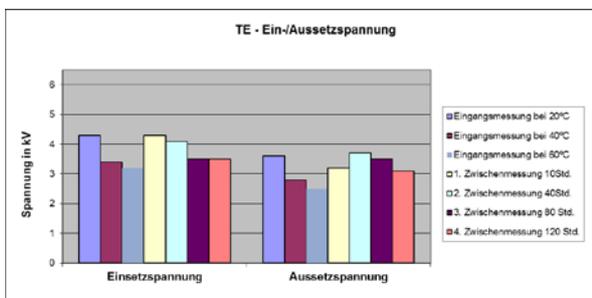
Verlustfaktormessungen:



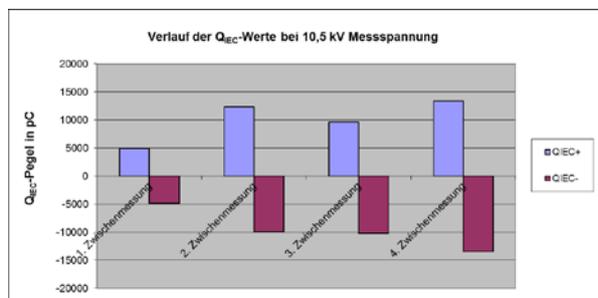
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC+}/Q_{IEC-} bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	26,2 °C	T _{Umgebung}	26,9 °C
rel. Luftfeuchte	33,3 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	35,1 %	rel. Luftfeuchte	36,6 %
Luftdruck	982,7 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	980,3 hPa	Luftdruck	979,1 hPa
T _{Kupfer}	21,9 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	27,7 °C	T _{Kupfer}	26,9 °C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	26,9 °C	T _{Umgebung}	25,1 °C	T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte	42,3 %	rel. Luftfeuchte	50,9 %	rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck	976,5 hPa	Luftdruck	978,2 hPa	Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck	
T _{Kupfer}	26,2 °C	T _{Kupfer}	24,4 °C	T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}	
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz	

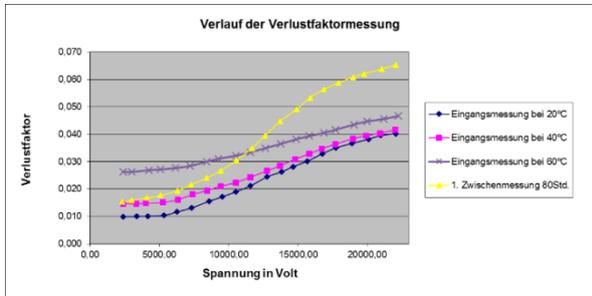
Visuelle Untersuchungen:

Der Durchschlag liegt im hinteren Nutbereich des Stabes. Im Bereich der Durchschlagstelle sind mehrere Schwachstellen vor dem Dauerspannungsversuch festgestellt worden, jedoch ist die Durchschlagstelle an sich nicht explizit als Schwachstelle gekennzeichnet worden. Wenige AGS - Fehlstellen. Im oberen Nutbereich waren starke Abschürfungen zu sehen, welche vermutlich während des Ausbaus passierten. Der EGS -Lack im Wickelkopfbereich wurde teilweise erneuert und während der Spannungsbeanspruchung im Dauerversuch wurde zusätzlich ein EGS -Band angebracht. Das EGS-Band ist vor den Zwischenmessungen wieder entfernt worden.

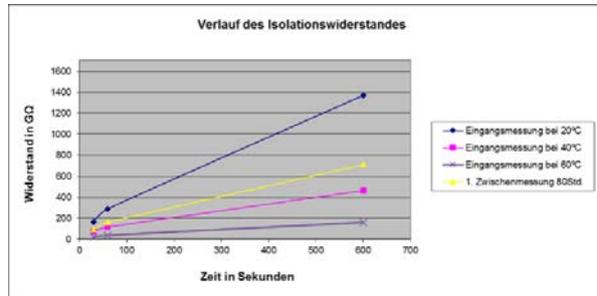
Stab: Af2_10(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 113,47 Std.

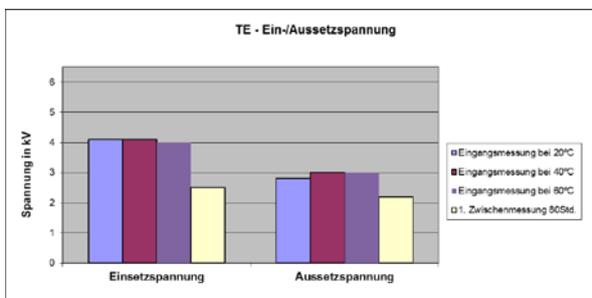
Verlustfaktormessungen:



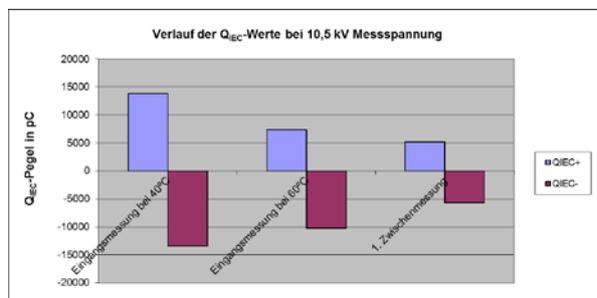
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21,6 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	27,5 °C	T _{Umgebung}	°C
rel. Luftfeuchte	33,7 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	20,8 %	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	982,4 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	968,6 hPa	Luftdruck	hPa
T _{Kupfer}	21,1 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	28,3 °C	T _{Kupfer}	°C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C
rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa
T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C
Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz

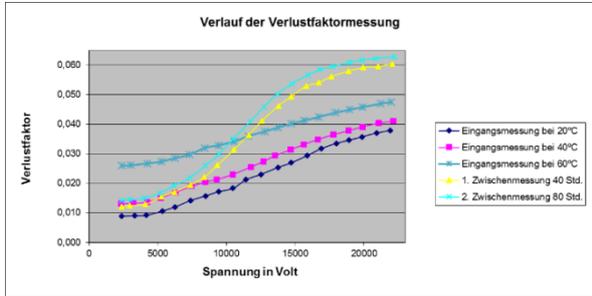
Visuelle Untersuchungen:

Ausfall nach Isolationsversagen im Bereich des Wickelkopfes durch das zusätzlich aufgewickelte EGS-Band. Der Durchschlag ist im Vorfeld nicht als Schwachstelle markiert worden. Der AGS ist allgemein im guten Zustand und nur wenige Fehlerstellen sind im Nutbereich markiert, welche sich aber nach 113 Std. nicht ausgeweitet hatten. Es sind auch keine neuen Glimmstellen am AGS gefunden worden. Der Wickelkopf ist vorher teilweise mit neuem EGS-Lack ausgebessert und während der Spannungsbeanspruchung im Dauerversuch zusätzlich mit einem EGS -Band bewickelt worden. Das EGS-Band ist vor den Zwischenmessungen wieder entfernt worden.

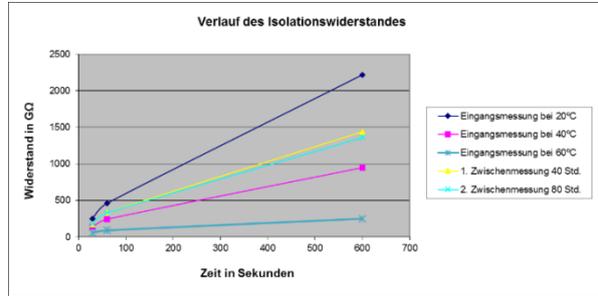
Stab: Af2_11(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 91,72 Std.

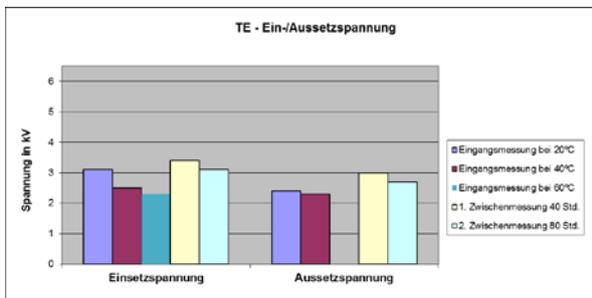
Verlustfaktormessungen:



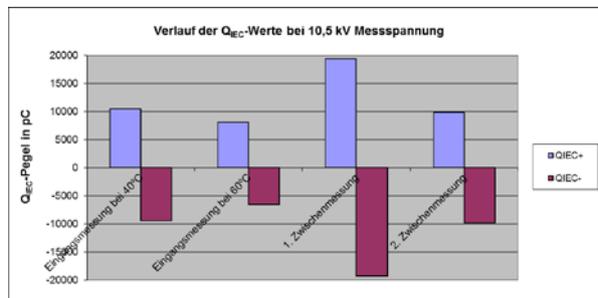
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:			Eingangsmessung 40°C:			Eingangsmessung 60°C:			1. Zwischenmessung:			2. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	21	°C	T _{Umgebung}	39,1	°C	T _{Umgebung}	57	°C	T _{Umgebung}	26,9	°C	T _{Umgebung}	25,1	°C
rel. Luftfeuchte	33,3	%	rel. Luftfeuchte	34,2	%	rel. Luftfeuchte	10,1	%	rel. Luftfeuchte	42,3	%	rel. Luftfeuchte	50,9	%
Luftdruck	982,7	hPa	Luftdruck	971,8	hPa	Luftdruck	963	hPa	Luftdruck	976,5	hPa	Luftdruck	978,2	hPa
T _{Kupfer}	21,9	°C	T _{Kupfer}	37,2	°C	T _{Kupfer}	52	°C	T _{Kupfer}	26,2	°C	T _{Kupfer}	24,4	°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz
3. Zwischenmessung:			4. Zwischenmessung:			5. Zwischenmessung:			6. Zwischenmessung:			7. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz

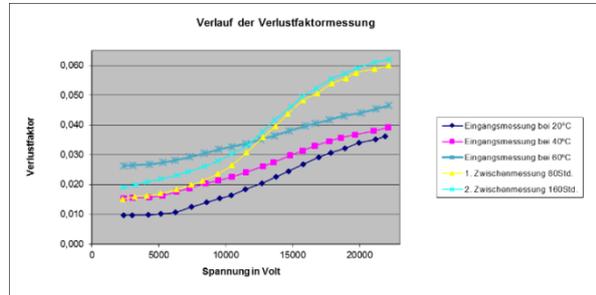
Visuelle Untersuchungen:

Der Ausfallort ereignete sich an einer bereits markierten Stelle im Nutaustrittsbereich. Hier waren massive Schädigungen der Hauptisolierung, welche wahrscheinlich während des Ausbaus der Stäbe passierten, die Ursache für den Ausfall. Der Nutbereich wies schon im Vorfeld viele Fehlstellen auf, jedoch war die Durchschlagstelle derart beschädigt, dass dort ein neuer AGS- Anstrich unbedingt notwendig war. Umso verwunderlicher war die lange Durchhaltedauer des Stabes. Der EGS-Bereich wurde teilweise erneuert.

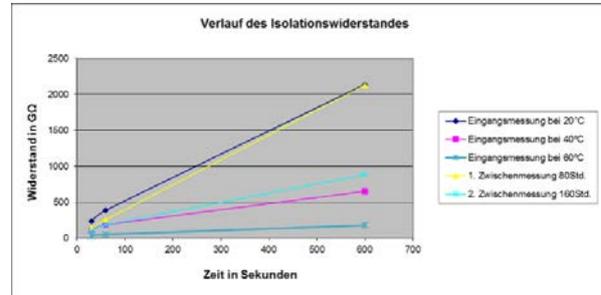
Stab: Af2_12(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 160,08 Std.

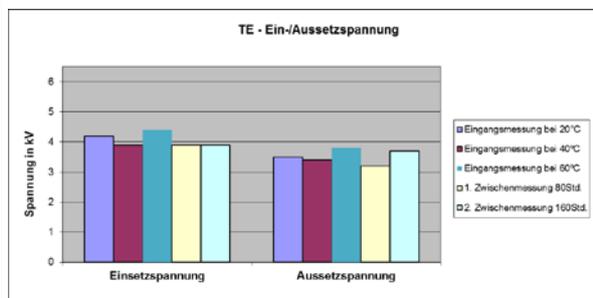
Verlustfaktormessungen:



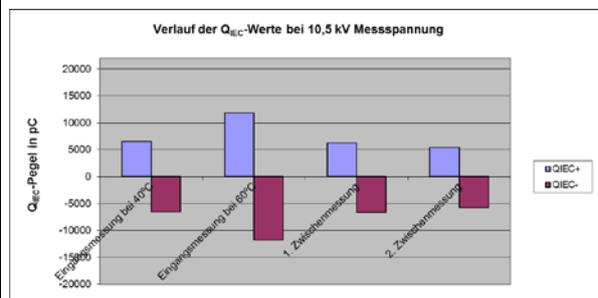
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/- Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21,6 °C rel. Luftfeuchte 33,7 % Luftdruck 982,4 hPa T _{Kupfer} 21,1 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 27,2 °C rel. Luftfeuchte 24 % Luftdruck 964,5 hPa T _{Kupfer} 27,8 °C Messfrequenz 50 Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 27,5 °C rel. Luftfeuchte 20,8 % Luftdruck 968,6 hPa T _{Kupfer} 28,3 °C Messfrequenz 50 Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz

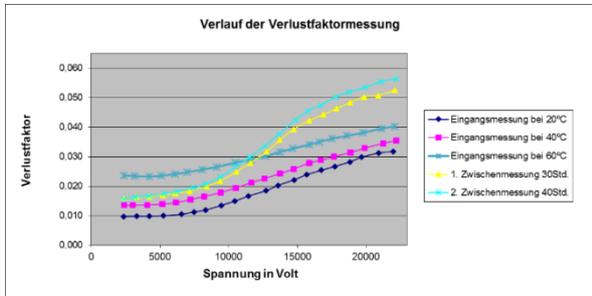
Visuelle Untersuchungen:

Ausfall nach Isolationsversagen im Wickelkopfbereich. Vom EGS-Bereich ausgehend hat sich der Fehler in Richtung Lamettband entwickelt. Der Durchschlag ist im Vorfeld nicht explizit als Fehlerstelle gekennzeichnet oder markiert worden. Während den Nachuntersuchungen ergeben sich nur wenige Abnützungen des AGS, jedoch sind neue Glimmstellen im Nutaustrittsbereich gefunden worden. Der EGS-Lack musste für die Dauerspannungsbelastung teilweise ausgebessert werden.

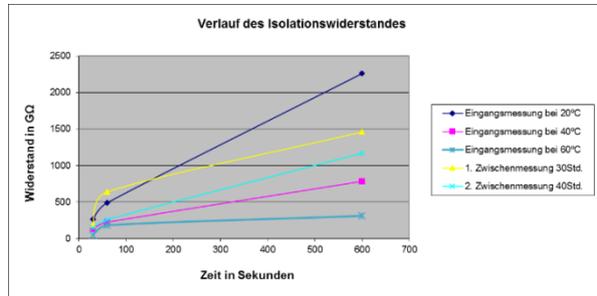
Stab: Af2_137(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 56,52 Std.

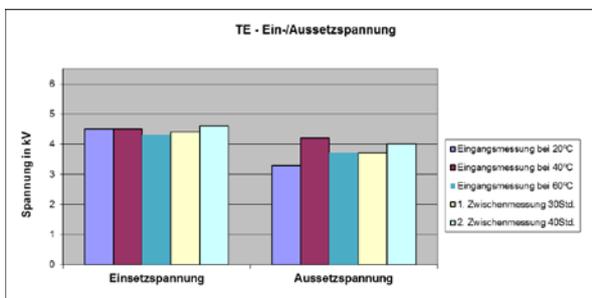
Verlustfaktormessungen:



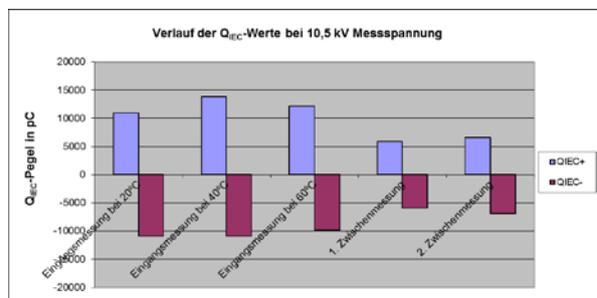
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	26,2 °C	T _{Umgebung}	26,9 °C
rel. Luftfeuchte	33,3 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	35,1 %	rel. Luftfeuchte	36,6 %
Luftdruck	982,7 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	980,3 hPa	Luftdruck	979,1 hPa
T _{Kupfer}	21,9 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	27,7 °C	T _{Kupfer}	26,9 °C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck	
T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}	
Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz	

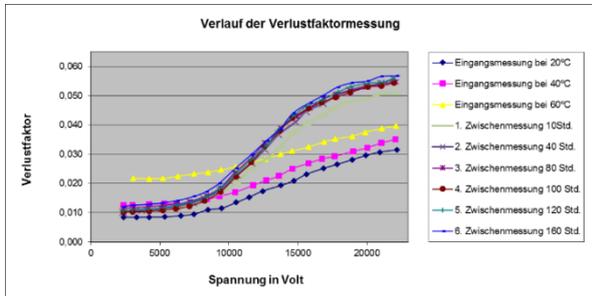
Visuelle Untersuchungen:

Der Fehler hat sich im Krümmungsbereich des Wickelkopfes zum Nutaustrittsbereich hin ereignet. Der EGS -Lack ist vor dem Dauerversuch im Krümmungsbereich des Wickelkopfes neu aufgetragen worden. Der Nutbereich war im guten Zustand.

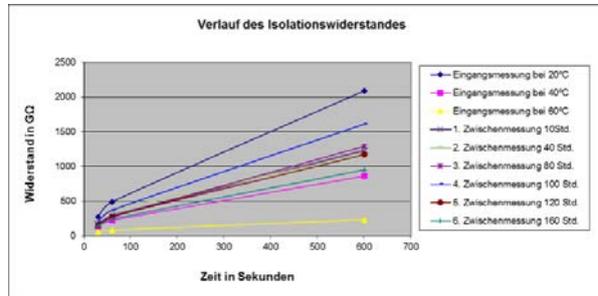
Stab: Af2_138(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 242,24 Std.

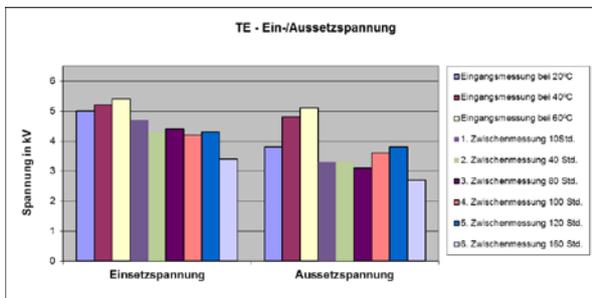
Verlustfaktormessungen:



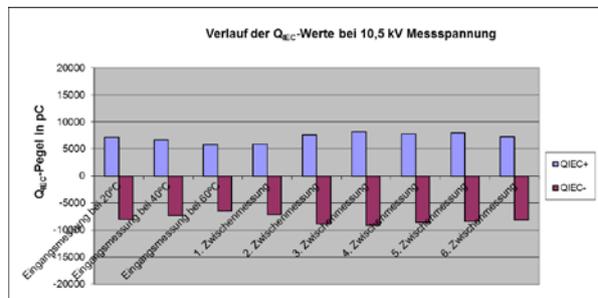
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21 °C rel. Luftfeuchte 33,3 % Luftdruck 982,7 hPa T _{Kupfer} 21,9 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 26,2 °C rel. Luftfeuchte 35,1 % Luftdruck 980,3 hPa T _{Kupfer} 27,7 °C Messfrequenz 50 Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 26,9 °C rel. Luftfeuchte 42,3 % Luftdruck 976,5 hPa T _{Kupfer} 28,2 °C Messfrequenz 50 Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,1 °C rel. Luftfeuchte 50,9 % Luftdruck 978,2 hPa T _{Kupfer} 24,4 °C Messfrequenz 50 Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 21,40 °C rel. Luftfeuchte 30,70 % Luftdruck 975,7 hPa T _{Kupfer} 20,3 °C Messfrequenz 50 Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,40 °C rel. Luftfeuchte 39,60 % Luftdruck 967,9 hPa T _{Kupfer} 24,5 °C Messfrequenz 50 Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,90 °C rel. Luftfeuchte 46,70 % Luftdruck 962,3 hPa T _{Kupfer} 28,3 °C Messfrequenz 50 Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz

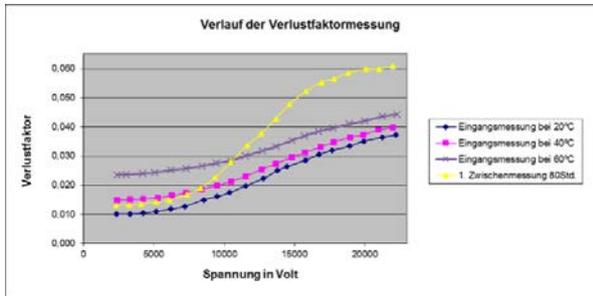
Visuelle Untersuchungen:

Sehr starke Glimmentladung im Übergangsbereich des Wickelkopfes zum Nutbereich während des Dauerspannungsversuches. Der Durchschlag hat sich im mittleren Nutbereich auf der Breitseite zur Schmalseite hin ereignet. Der AGS weist relativ wenige Schädigungen auf. Auch der Durchschlagbereich ist im Vorfeld nicht als Schwachstelle markiert worden. Der EGS im Krümmungsbereich des Wickelkopfes ist neu aufgetragen worden und während des Dauerversuches ist zusätzlich ein EGS-Band aufgebracht worden. Trotzdem kam es aus unerklärlichen Gründen zur starken Entladungen im Nutaustrittsbereich während der hohen Dauerspannungsbeanspruchung. Das EGS-Band ist vor den Zwischenmessungen wieder entfernt worden.

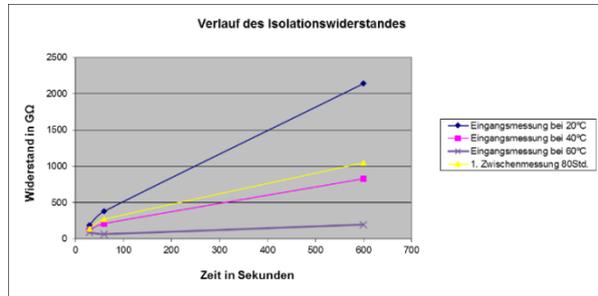
Stab: Af2_139(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 100,52 Std.

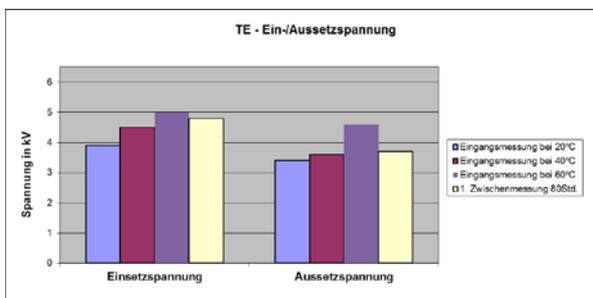
Verlustfaktormessungen:



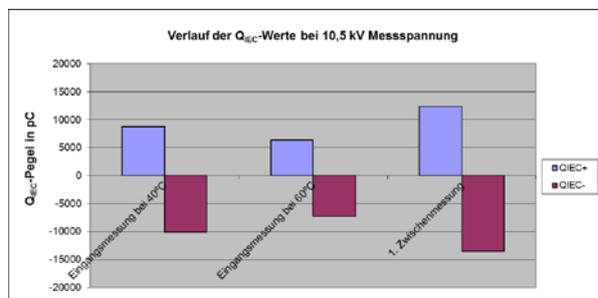
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: TUmgebung: 21,6 °C rel. Luftfeuchte: 33,7 % Luftdruck: 982,4 hPa TKupfer: 21,1 °C Messfrequenz: 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz	Eingangsmessung 60°C: TUmgebung: 57 °C rel. Luftfeuchte: 10,1 % Luftdruck: 963 hPa TKupfer: 52 °C Messfrequenz: 50 Hz	1. Zwischenmessung: TUmgebung: 28,8 °C rel. Luftfeuchte: 23 % Luftdruck: 967,5 hPa TKupfer: 28,7 °C Messfrequenz: 50 Hz	2. Zwischenmessung: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz
3. Zwischenmessung: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz	4. Zwischenmessung: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz	5. Zwischenmessung: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz	6. Zwischenmessung: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz	7. Zwischenmessung: TUmgebung: °C rel. Luftfeuchte: % Luftdruck: hPa TKupfer: °C Messfrequenz: Hz

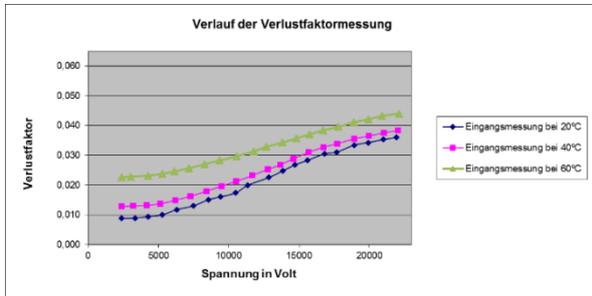
Visuelle Untersuchungen:

Die Fehlerstelle befindet sich an der Kante im Nutbereich. Der AGS dieses Stabes wies viele Fehlerstellen auf, insbesondere im Bereich der Kanten. Der Fehlerort wurde im Vorfeld jedoch nicht markiert oder als Schwachstelle gekennzeichnet. Auch war im Bereich der Durchschlagstelle der AGS vollständig intakt. Der EGS wies im Vorhinein Schwachstellen auf und wurde an bestimmten Bereichen ausgebessert.

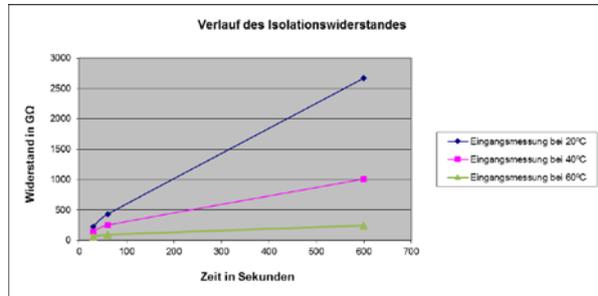
Stab: Af2_140(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 79,02 Std.

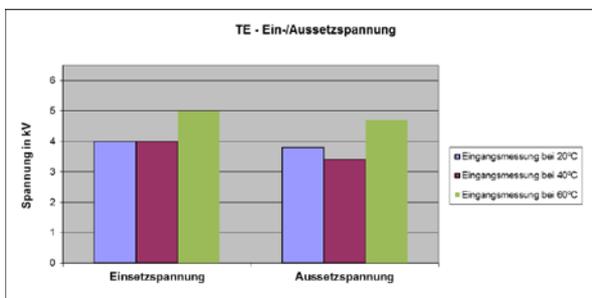
Verlustfaktormessungen:



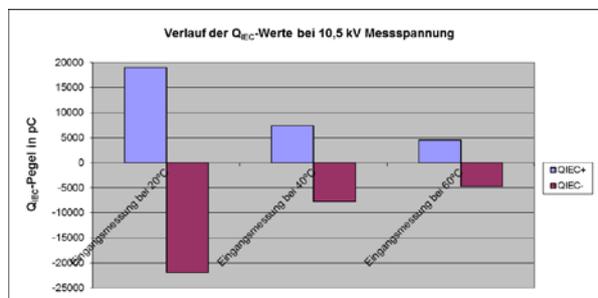
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21,6 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C
rel. Luftfeuchte	33,7 %	rel. Luftfeuchte	44,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	392,4 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa
T _{Kupfer}	21,1 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C
rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa
T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C
Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz

Visuelle Untersuchungen:

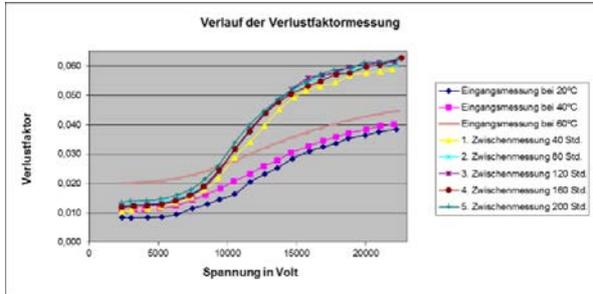
Ausfall nach Isolationsversagen zwischen Wickelkopf- und Nutaustrittsbereich. Die optische Nachuntersuchung des Stabes ergibt einen verhältnismäßig gut erhaltenen Nutbereich mit wenigen Fehlstellen. Insgesamt sind 7 Fehlstellen im Vorfeld, vor den Dauerspannungsversuchen, markiert worden. Die Nachuntersuchung ergibt keine Ausweitung der im Vorfeld markierten Fehlerstellen.

Der Wickelkopf des Stabes wurde wegen der optisch relativ schlechten Beschaffenheit in der oberen Hälfte des Wickelkopfes mit neuem EGS-Lack angestrichen. Am Fehlerort selbst ist wegen der guten Beschaffenheit kein neuer EGS-Lack aufgetragen worden.

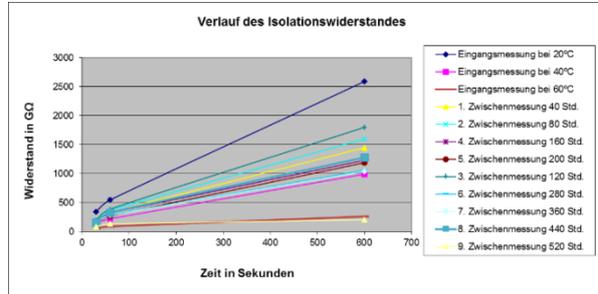
Stab: Af2_25(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 609,62 Std.

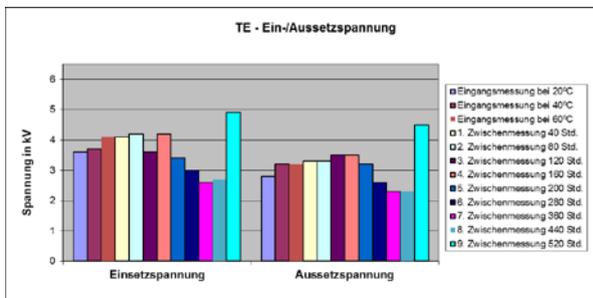
Verlustfaktormessungen:



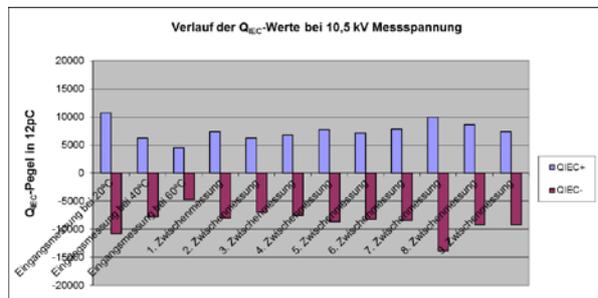
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21 °C rel. Luftfeuchte 33,3 % Luftdruck 982,7 hPa T _{Kupfer} 21,9 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 26,9 °C rel. Luftfeuchte 42,3 % Luftdruck 976,5 hPa T _{Kupfer} 26,2 °C Messfrequenz 50 Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,1 °C rel. Luftfeuchte 50,9 % Luftdruck 978,2 hPa T _{Kupfer} 24,4 °C Messfrequenz 50 Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 21,40 °C rel. Luftfeuchte 30,70 % Luftdruck 975,7 hPa T _{Kupfer} 20,3 °C Messfrequenz 50 Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,40 °C rel. Luftfeuchte 39,60 % Luftdruck 967,9 hPa T _{Kupfer} 25,9 °C Messfrequenz 50 Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,90 °C rel. Luftfeuchte 46,70 % Luftdruck 962,3 hPa T _{Kupfer} 28,3 °C Messfrequenz 50 Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 27,70 °C rel. Luftfeuchte 27,50 % Luftdruck 965 hPa T _{Kupfer} 26,7 °C Messfrequenz 50 Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,9 °C rel. Luftfeuchte 46,7 % Luftdruck 962,7 hPa T _{Kupfer} 28,3 °C Messfrequenz 50 Hz
8. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 23,8 °C rel. Luftfeuchte 43,3 % Luftdruck 978,6 hPa T _{Kupfer} 20,3 °C Messfrequenz 50 Hz	9. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25 °C rel. Luftfeuchte 70,5 % Luftdruck 973,2 hPa T _{Kupfer} 27 °C Messfrequenz 50 Hz			

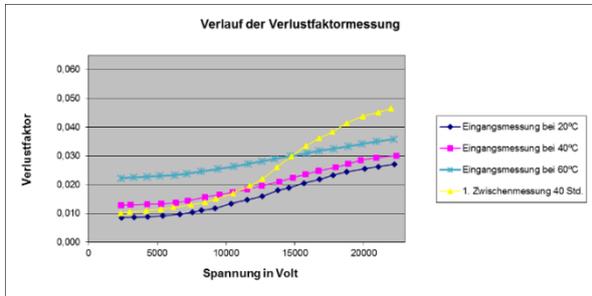
Visuelle Untersuchungen:

Der Durchschlag hat sich im mittleren Nutbereich direkt an einer Kante ereignet. Obwohl dieser Stab im unteren Nutbereich einen erheblichen Isolationsschaden, vermutlich aufgrund des Ausbaus, erlitten hat, ist der Durchschlag an einer anderen Stelle passiert. Die DS-Stelle ist im Vorfeld nicht als Schwachstelle gekennzeichnet worden. Auch der EGS-Bereich war recht gut erhalten, und hat nur wenige Ausbesserungen erhalten. Im Nutaustrittsbereich war der AGS aufgrund Oberflächenentladungen stark erodiert und praktisch nicht mehr vorhanden. Auch der EGS war in diesem Bereich stark angegriffen.

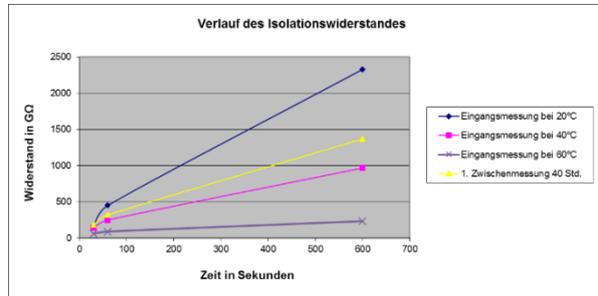
Stab: Af2_26(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 66,56 Std.

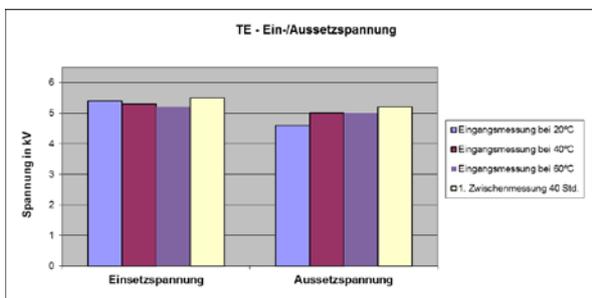
Verlustfaktormessungen:



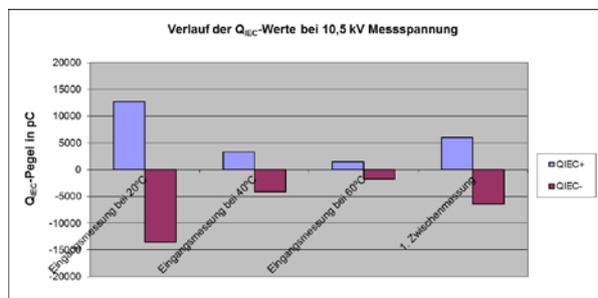
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21,6 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	26,9 °C	T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte	33,7 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	42,3 %	rel. Luftfeuchte	
Luftdruck	982,4 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	976,5 hPa	Luftdruck	
T _{Kupfer}	21,1 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	26,2 °C	T _{Kupfer}	
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck	
T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}	
Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz	

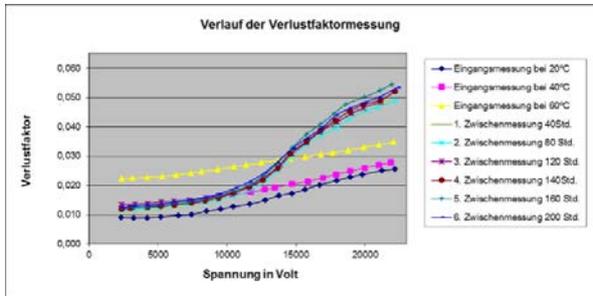
Visuelle Untersuchungen:

Der Ausfall hat sich im Nutaustrittsbereich des Stabes an einer Kante ereignet. Der AGS ist noch in einem sehr guten Zustand. Der EGS - Lack ist teilweise erneuert und ein EGS -Band während des Dauerversuches aufgewickelt worden. Der Durchschlag ist im Vorfeld nicht als Schwachstelle markiert worden, jedoch sind im Laufe der Dauerbelastung an der Durchschlagstelle Glimmstellenbildung beobachtet worden.

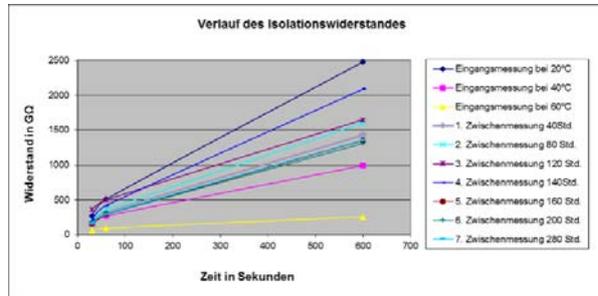
Stab: Af2_27(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 302,63 Std.

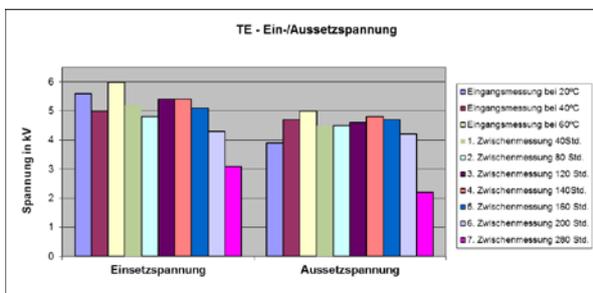
Verlustfaktormessungen:



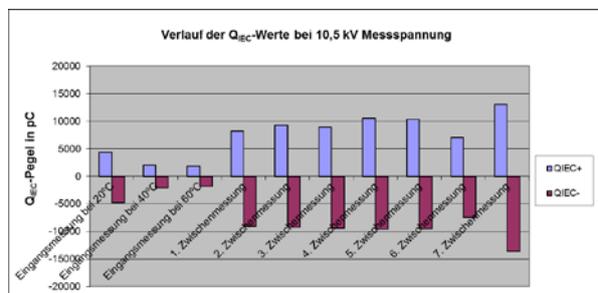
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21 °C rel. Luftfeuchte 33,3 % Luftdruck 982,7 hPa T _{Kupfer} 21,9 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 26,9 °C rel. Luftfeuchte 36,6 % Luftdruck 979,1 hPa T _{Kupfer} 26,9 °C Messfrequenz 50 Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 26,9 °C rel. Luftfeuchte 42,3 % Luftdruck 976,5 hPa T _{Kupfer} 28,2 °C Messfrequenz 50 Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,1 °C rel. Luftfeuchte 50,9 % Luftdruck 978,2 hPa T _{Kupfer} 24,4 °C Messfrequenz 50 Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 21,40 °C rel. Luftfeuchte 30,70 % Luftdruck 975,7 hPa T _{Kupfer} 20,3 °C Messfrequenz 50 Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,40 °C rel. Luftfeuchte 39,60 % Luftdruck 967,9 hPa T _{Kupfer} 24,5 °C Messfrequenz 50 Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 25,90 °C rel. Luftfeuchte 46,70 % Luftdruck 962,3 hPa T _{Kupfer} 28,3 °C Messfrequenz 50 Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} 27,70 °C rel. Luftfeuchte 27,50 % Luftdruck 985 hPa T _{Kupfer} 28,7 °C Messfrequenz 50 Hz

Visuelle Untersuchungen:

Die Fehlerstelle liegt im Wickelkopfbereich. Vom EGS-Bereich ausgehend hat sich der Fehler in Richtung Lamettband ausgebreitet. Der Durchschlagsbereich ist im Vorfeld nicht explizit als Fehlerstelle gekennzeichnet oder markiert worden. Die Nachuntersuchung ergibt, dass der AGS-Lack wenige Schwachstellen aufweist. Es sind neue Glimmstellen im Nutaustrittsbereich gefunden worden.

Der Wickelkopf ist vom Nutaustrittsbereich bis etwa 20cm den Wickelkopf hinauf mit neuem EGS-Lack bestrichen worden.

Stab: Af2_28(U)

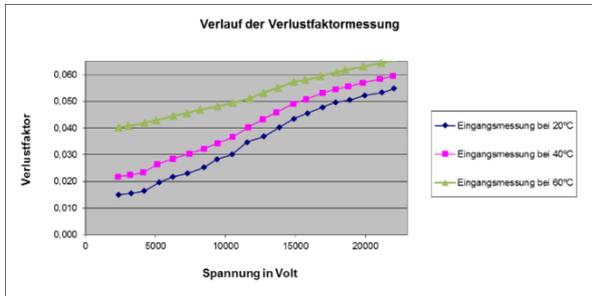
Restlaufzeit während des Dauerversuches: 0Std.

<p>Verlustfaktormessungen:</p> <p>Keine Messung Vorhanden.</p>	<p>Isolationswiderstandsmessungen:</p> <p>Keine Messung Vorhanden.</p>																																																																																																												
<p>PDIV/PDEV:</p> <p>Keine Messung Vorhanden.</p>	<p>$Q_{IEC} +/ Q_{IEC} -$ bei 10,5 kV:</p> <p>Keine Messung Vorhanden.</p>																																																																																																												
<p>Klimadaten der aktuellen Messungen:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 16.6%;"> <p>Eingangsmessung 20°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>Eingangsmessung 40°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>Eingangsmessung 60°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>1. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>2. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="width: 16.6%;"> <p>3. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>4. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>5. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>6. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> <td style="width: 16.6%;"> <p>7. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table> </td> </tr> </table>		<p>Eingangsmessung 20°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>Eingangsmessung 40°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>Eingangsmessung 60°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>1. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>2. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>3. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>4. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>5. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>6. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>7. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz
<p>Eingangsmessung 20°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>Eingangsmessung 40°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>Eingangsmessung 60°C:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>1. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>2. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz																																																									
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
<p>3. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>4. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>5. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>6. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<p>7. Zwischenmessung:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz																																																							
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
TUmgebung	°C																																																																																																												
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																												
Luftdruck	hPa																																																																																																												
TKupfer	°C																																																																																																												
Messfrequenz	Hz																																																																																																												
<p>Visuelle Untersuchungen:</p> <p>Ausfall nach einer Spannungsprobe bei ca. 24kV. Leider ist an diesem Stab im Vorfeld kein Eingangstest vollzogen worden. Die Fehlstelle befindet sich außerhalb des Nutbereichs im Bereich der Schnittstelle AGS und EGS. Der Nutbereich selbst befindet sich im guten Zustand, es wurden keine groben Fehlerstellen gefunden. Der Wickelkopf ist entsprechend gut erhalten.</p>																																																																																																													

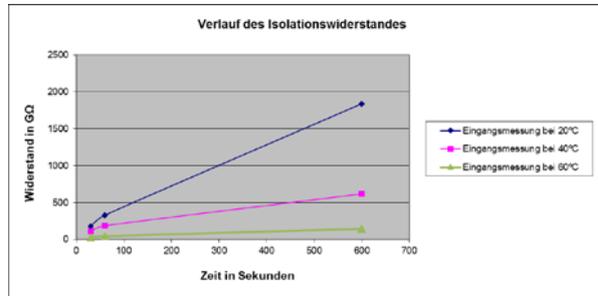
Stab: R1

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 24,81 Std.

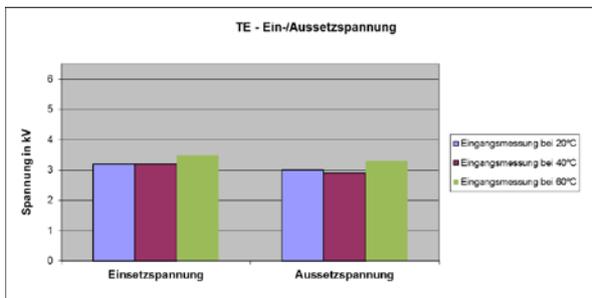
Verlustfaktormessungen:



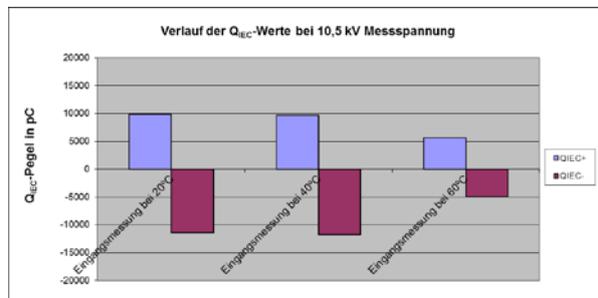
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 20,5 °C rel. Luftfeuchte 36,20 % Luftdruck 984,6 hPa T _{Kupfer} 19,8 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,2 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz

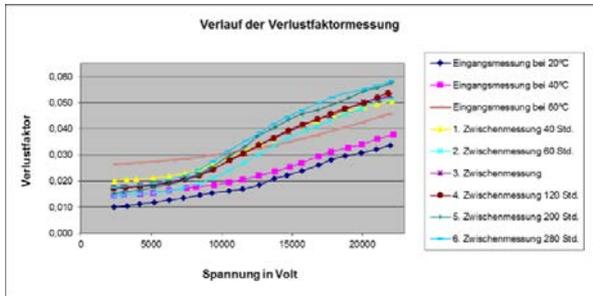
Visuelle Untersuchungen:

Der Ausfall dieses Stabes ist aufgrund eines Isolationsversagens im Nutbereich der Hauptisolierung passiert. Obwohl der Stab optisch bei den Vorfelduntersuchungen keinerlei Fehler aufgewiesen hatte, hat die Isolierung im unteren Drittel des Nutbereiches versagt.

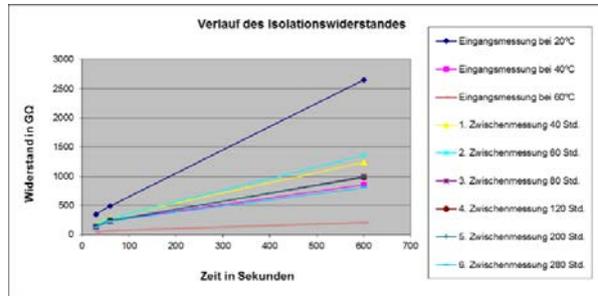
Stab: R2

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 342,24 Std.

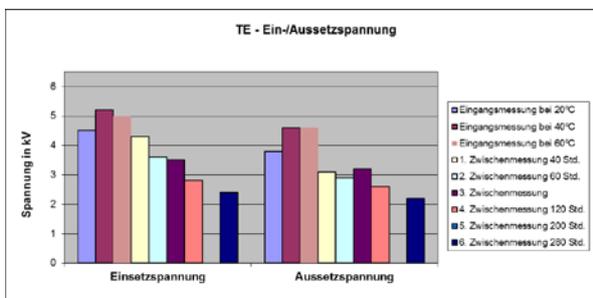
Verlustfaktormessungen:



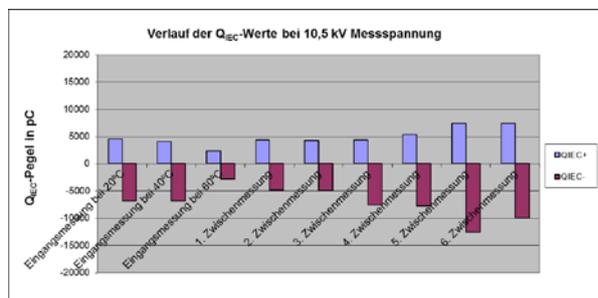
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:	Eingangsmessung 40°C:	Eingangsmessung 60°C:	1. Zwischenmessung:	2. Zwischenmessung:
T _{Umgebung} 20,5 °C	T _{Umgebung} 39,1 °C	T _{Umgebung} 57 °C	T _{Umgebung} 26,9 °C	T _{Umgebung} 21,4 °C
rel. Luftfeuchte 36,2 %	rel. Luftfeuchte 14,2 %	rel. Luftfeuchte 10,1 %	rel. Luftfeuchte 42,3 %	rel. Luftfeuchte 30,7 %
Luftdruck 984,6 hPa	Luftdruck 971,8 hPa	Luftdruck 963 hPa	Luftdruck 976,5 hPa	Luftdruck 975,7 hPa
T _{Kupfer} 19,8 °C	T _{Kupfer} 37,2 °C	T _{Kupfer} 52 °C	T _{Kupfer} 26,2 °C	T _{Kupfer} 20,3 °C
Messfrequenz 50 Hz				
3. Zwischenmessung:	4. Zwischenmessung:	5. Zwischenmessung:	6. Zwischenmessung:	7. Zwischenmessung:
T _{Umgebung} 25,4 °C	T _{Umgebung} 27,7 °C	T _{Umgebung} 25,2 °C	T _{Umgebung} 25,9 °C	T _{Umgebung} °C
rel. Luftfeuchte 39,6 %	rel. Luftfeuchte 27,7 %	rel. Luftfeuchte 49,5 %	rel. Luftfeuchte 46,7 %	rel. Luftfeuchte %
Luftdruck 967,9 hPa	Luftdruck 965 hPa	Luftdruck 978,1 hPa	Luftdruck 962,7 hPa	Luftdruck hPa
T _{Kupfer} 24,6 °C	T _{Kupfer} 26,7 °C	T _{Kupfer} 26,9 °C	T _{Kupfer} 28,3 °C	T _{Kupfer} °C
Messfrequenz 50 Hz	Messfrequenz 50 Hz	Messfrequenz 50 Hz	Messfrequenz 50 Hz	Messfrequenz Hz

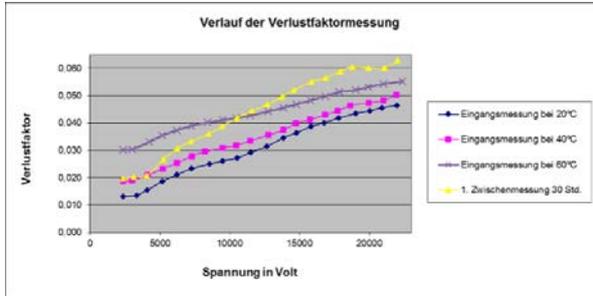
Visuelle Untersuchungen:

Durchschlag im Wickelkopfbereich. An der Durchschlagstelle ist der AGS aufgrund von Gleitentladungen deutlich abgetragen und erodiert gewesen. Sonst war der Stab gut erhalten.

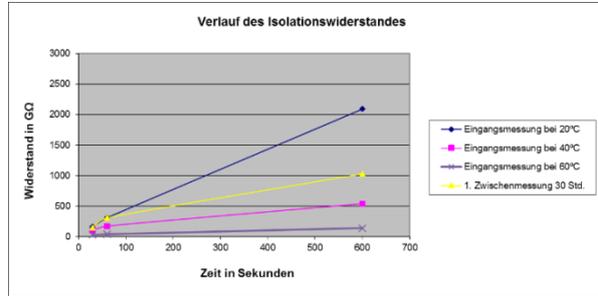
Stab: R3

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 42,64 Std.

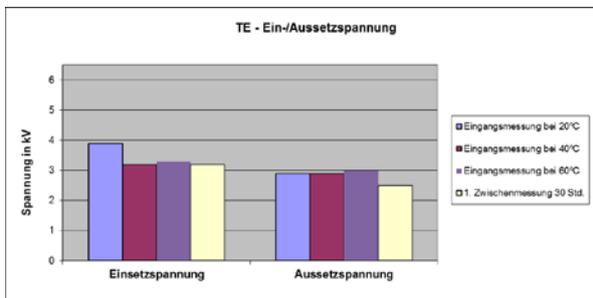
Verlustfaktormessungen:



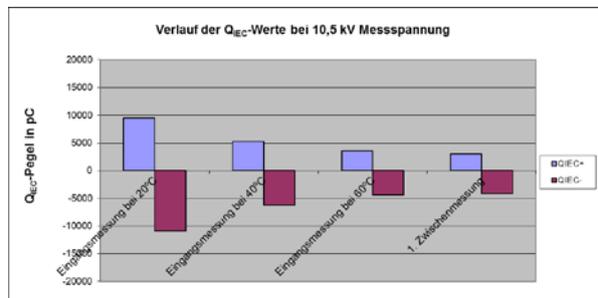
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21,8 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	26,2 °C	T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte	33 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	35,1 %	rel. Luftfeuchte	
Luftdruck	982,6 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	980,3 hPa	Luftdruck	
T _{Kupfer}	21,2 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	27,7 °C	T _{Kupfer}	
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck	
T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}	
Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz	

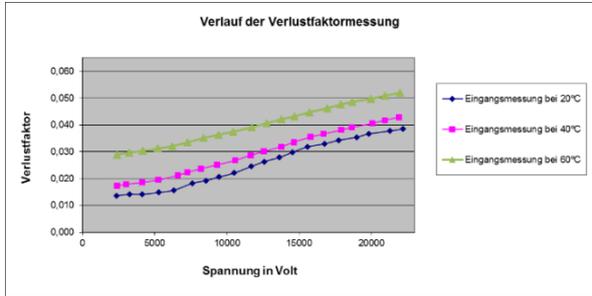
Visuelle Untersuchungen:

Durchschlag im Wickelkopfbereich. Der Nutbereich des Stabes ist in sehr guter Verfassung gewesen, lediglich geringe Ablätterungen des AGS im Nutbereich waren zu erkennen. Auch auf der anderen Seite der Fehlerstelle zeichnete sich eine besondere Beanspruchung der Isolierung im Nutaustrittsbereich ab, da hier verkohlte Stellen zu erkennen waren.

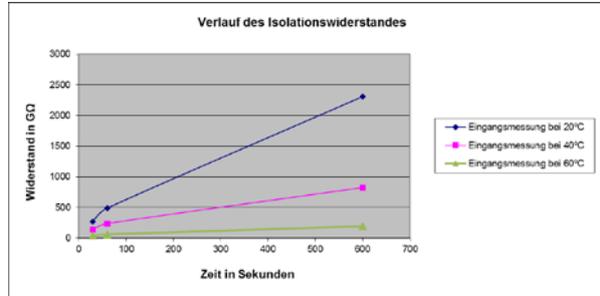
Stab: R4

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 0 Std.

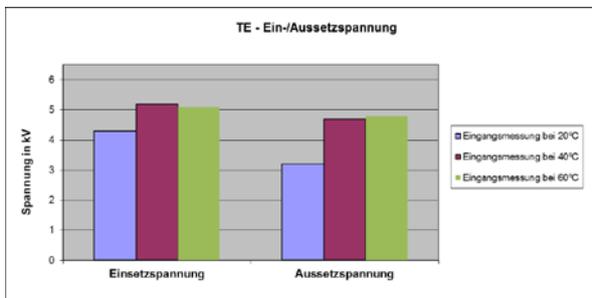
Verlustfaktormessungen:



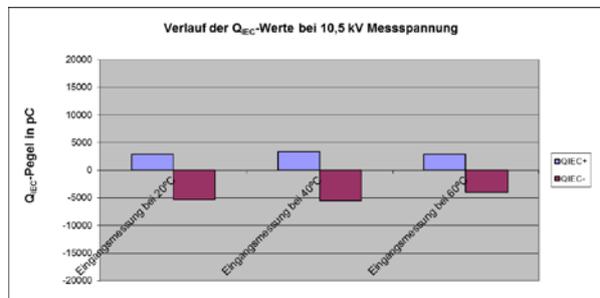
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:				Eingangsmessung 40°C:				Eingangsmessung 60°C:				1. Zwischenmessung:				2. Zwischenmessung:										
T _{Umgebung}	21,3	°C	rel. Luftfeuchte	31,8	%	T _{Umgebung}	39,2	°C	rel. Luftfeuchte	14,2	%	T _{Umgebung}	57	°C	rel. Luftfeuchte	10,1	%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%			
Luftdruck	977,7	hPa	T _{Kupfer}	20,4	°C	Luftdruck	971,8	hPa	T _{Kupfer}	37,2	°C	Luftdruck	963	hPa	T _{Kupfer}	52	°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	T _{Kupfer}	52	°C	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz			
3. Zwischenmessung:				4. Zwischenmessung:				5. Zwischenmessung:				6. Zwischenmessung:				7. Zwischenmessung:										
T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%			
Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C			
Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz			

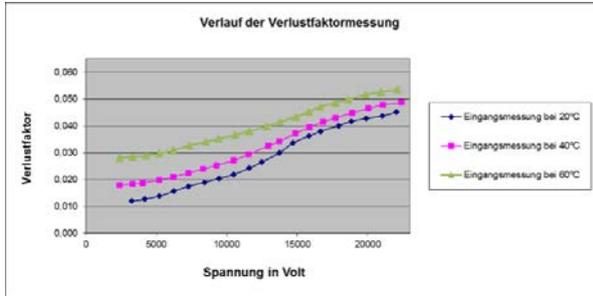
Visuelle Untersuchungen:

Der Versuchsstab ist nie in den Dauerversuchskreis eingespannt worden, da er vorher für die DSC und STA- Untersuchungen der UWB zersägt wurde.

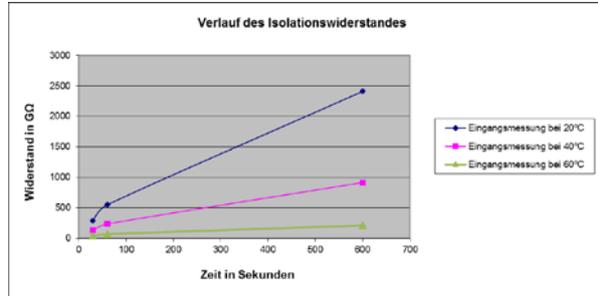
Stab:R5

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 0 Std.

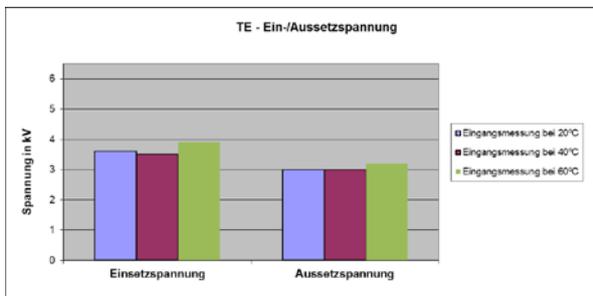
Verlustfaktormessungen:



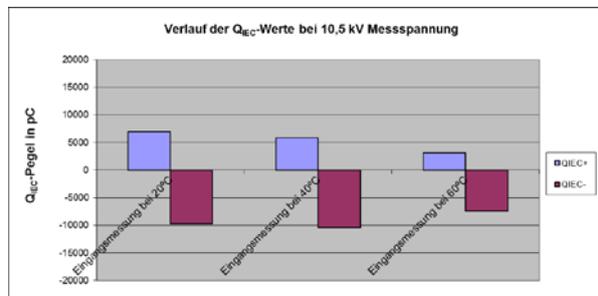
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21,8 °C rel. Luftfeuchte 33 % Luftdruck 982,6 hPa T _{Kupfer} 21,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz

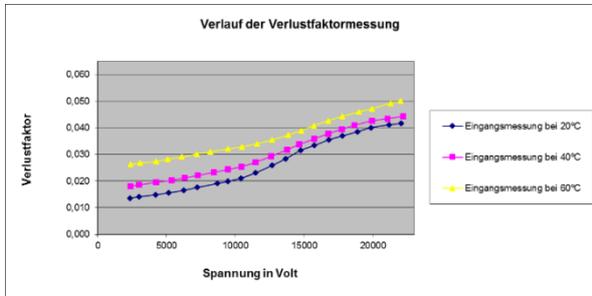
Visuelle Untersuchungen:

Isolationsversagen im mittleren Nutbereich nach dem Hochfahren der Spannung. Bei ca. 28kV Spannungsbelastung hat die Hauptisolation an der Kante der Schmal- zur Breitseite hin durchgeschlagen. Es sind an diesem Stab keine Fehler im Vorfeld erkannt worden, sodass der Durchschlag sehr überraschend gekommen ist. Im Bereich des Nutaustrittsbereiches ist neuer EGS aufgetragen worden.

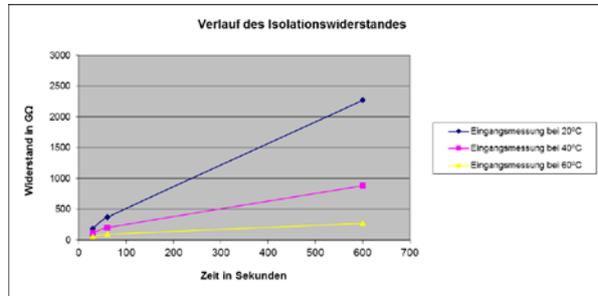
Stab: R6

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 0,2 Std.

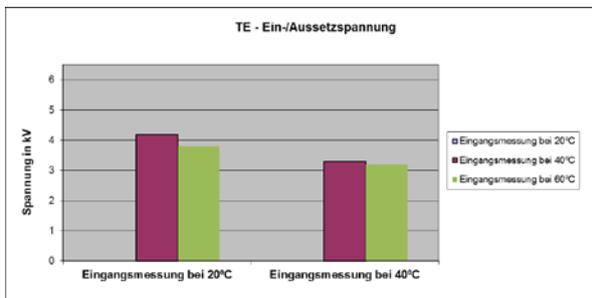
Verlustfaktormessungen:



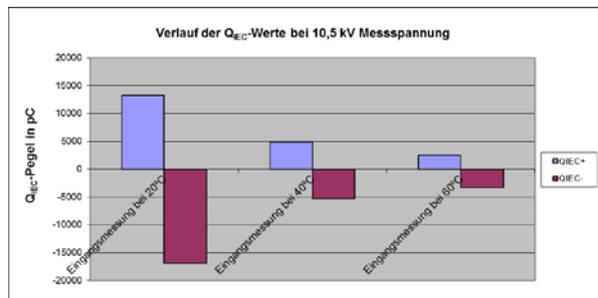
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



$Q_{IEC} + / Q_{IEC} -$ bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
TUmgebung	21,8 °C	TUmgebung	39,1 °C	TUmgebung	57 °C	TUmgebung		TUmgebung	
rel. Luftfeuchte	33 %	rel. Luftfeuchte	44,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck	982,6 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck		Luftdruck	
TKupfer	21,2 °C	TKupfer	37,2 °C	TKupfer	52 °C	TKupfer		TKupfer	
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz		Messfrequenz	
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
TUmgebung		TUmgebung		TUmgebung		TUmgebung		TUmgebung	
rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck	
TKupfer		TKupfer		TKupfer		TKupfer		TKupfer	
Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz	

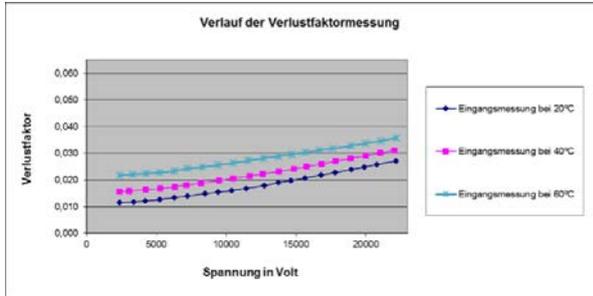
Visuelle Untersuchungen:

Ausfall des Reservestabes nach nur 0,2 Std. Dauerbelastung. Die Durchschlagstelle befindet sich im EGS-Bereich. Der AGS und EGS sind optisch in einem einwandfreien Zustand. Im Vergleich der Reservestäbe lag der Stab R6 bei den Eingangsuntersuchungen im Mittelfeld. Die PDIV/PDEV – Werte für die 20°C Messung konnten leider nicht ermittelt werden.

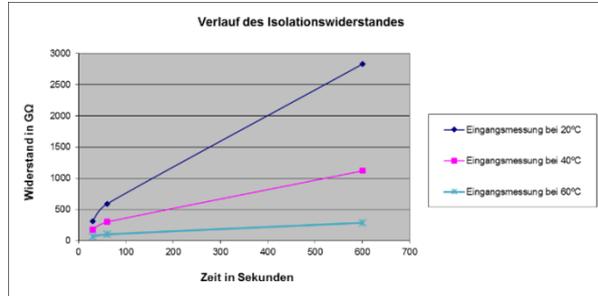
Stab: RWu4_139(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 142,12Std.

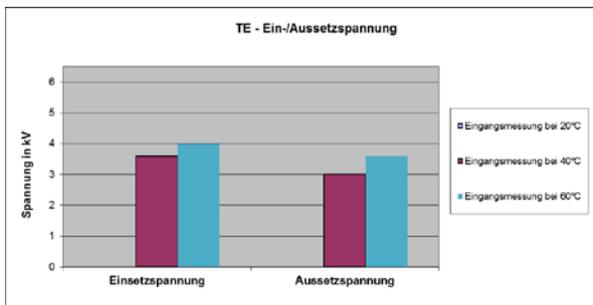
Verlustfaktormessungen:



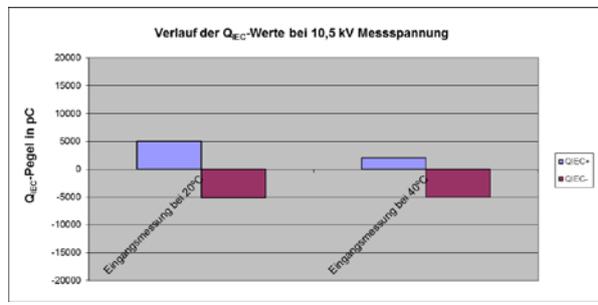
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21,8 °C rel. Luftfeuchte 33 % Luftdruck 982,6 hPa T _{Kupfer} 21,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa T _{Kupfer} 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa T _{Kupfer} 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa T _{Kupfer} °C Messfrequenz Hz

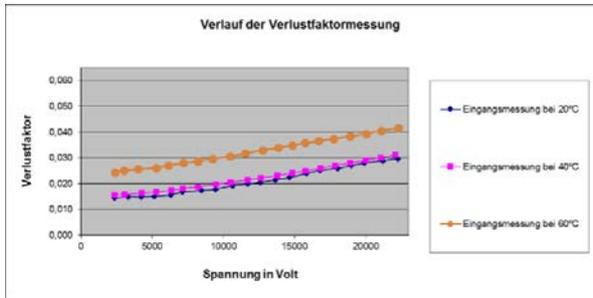
Visuelle Untersuchungen:

Dieser Stab dient zur Festlegung der Spannungshöhe für den Dauerversuch. Es sind starke Erosion des AGS im Nutbereich und relativ viele offensichtliche Schwachstellen gesichtet worden. Jedoch erfolgte der Durchschlag im Wickelkopfbereich. Dieser Bereich ist auch im Vorfeld mit neuem EGS, zur besseren Standhaltung der Dauerbelastung, angestrichen worden.

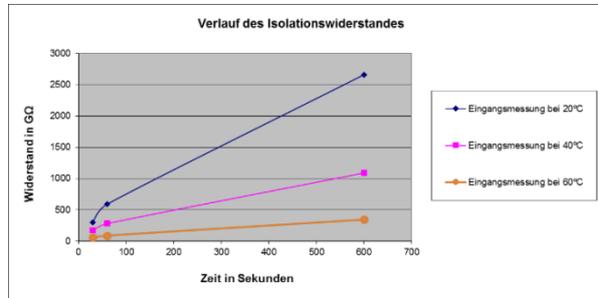
Stab: RWu4_27(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 115,49 Std.

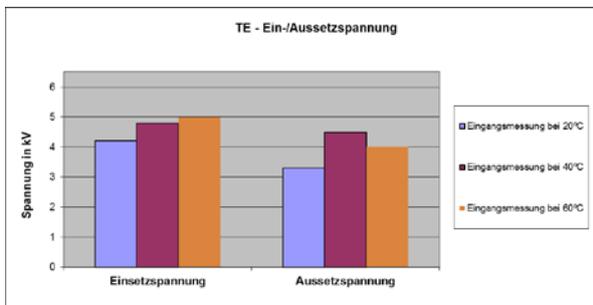
Verlustfaktormessungen:



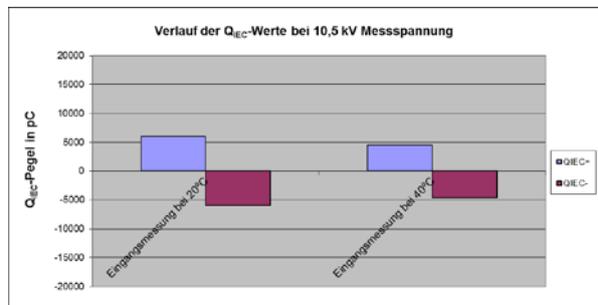
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21,8 °C rel. Luftfeuchte 33 % Luftdruck 982,6 hPa Tkupfer 21,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa Tkupfer 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa Tkupfer 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz

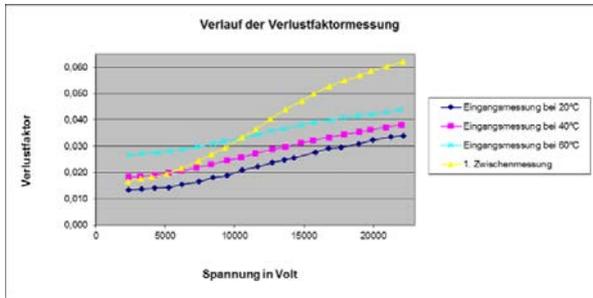
Visuelle Untersuchungen:

Dieser Stab dient zur Festlegung der Spannungshöhe für den Dauerversuch. Der Durchschlag erfolgte im Nutbereich an einer Stelle, welche bereits im Vorfeld als Schwachstelle markiert worden ist, da hier starke AGS-Erosionen vorhanden waren. Der AGS ist, wie bei den anderen Wu4-Stäben stark erodiert und schmierig. Es ist neuer EGS-Lack im Krümmungsbereich aufgetragen worden.

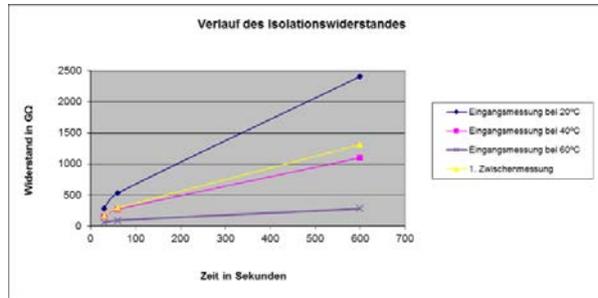
Stab: WU4_15(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 144,24 Std.

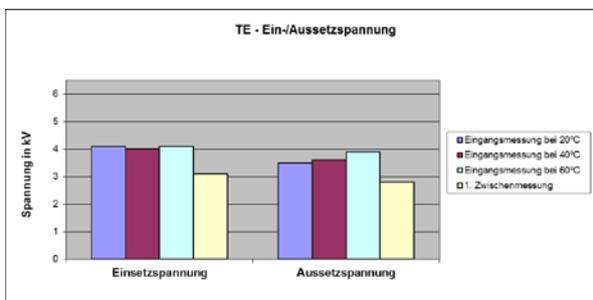
Verlustfaktormessungen:



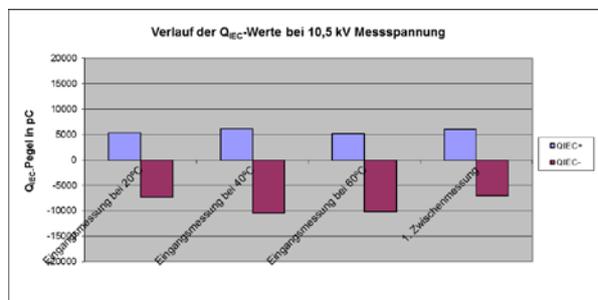
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:			Eingangsmessung 40°C:			Eingangsmessung 60°C:			1. Zwischenmessung:			2. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	21,3	°C	T _{Umgebung}	39,1	°C	T _{Umgebung}	57	°C	T _{Umgebung}	27,2	°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte	31,8	%	rel. Luftfeuchte	14,2	%	rel. Luftfeuchte	10,1	%	rel. Luftfeuchte	24	%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck	977,7	hPa	Luftdruck	971,8	hPa	Luftdruck	963	hPa	Luftdruck	964,5	hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}	20,4	°C	T _{Kupfer}	37,2	°C	T _{Kupfer}	52	°C	T _{Kupfer}	27,8	°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz		Hz
3. Zwischenmessung:			4. Zwischenmessung:			5. Zwischenmessung:			6. Zwischenmessung:			7. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz

Visuelle Untersuchungen:

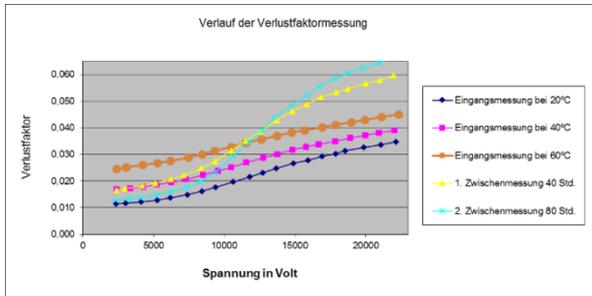
Die Fehlerstelle liegt im hinteren Bereich des Stabes am Rand der Breitseite zur Schmalseite. Der Durchschlag ist im Vorfeld nicht explizit als Fehlerstelle gekennzeichnet oder markiert worden. Die Nachuntersuchung ergibt, dass der AGS-Lack viele Schwachstellen, vor allem im vorderen Bereich des Stabes an den Kanten aufweist. Es sind auch relativ viele und große Glimmstellen im Nutbereich erkannt worden.

Der Wickelkopf ist vom Nutaustrittsbereich etwa 20cm den Wickelkopf hinauf mit neuem EGS-Lack bestrichen worden.

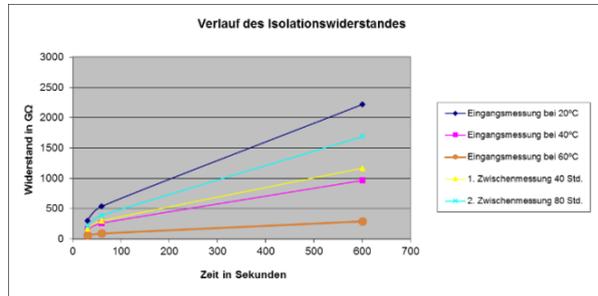
Stab: Wu4_16(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 90,63 Std.

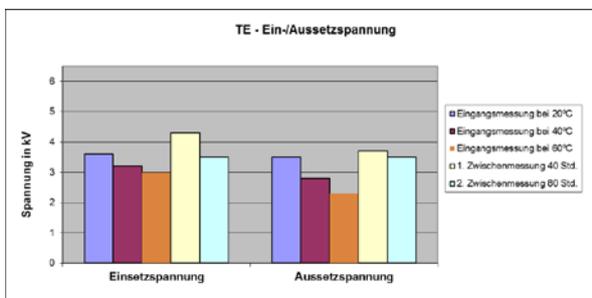
Verlustfaktormessungen:



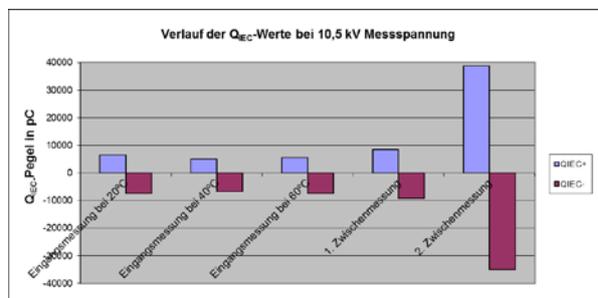
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21,8 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	26,9 °C	T _{Umgebung}	26,9 °C
rel. Luftfeuchte	33 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	36,6 %	rel. Luftfeuchte	42,3 %
Luftdruck	982,6 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	979,1 hPa	Luftdruck	976,5 hPa
T _{Kupfer}	21,2 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	26,9 °C	T _{Kupfer}	26,2 °C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C	T _{Umgebung}	°C
rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa
T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C	T _{Kupfer}	°C
Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz

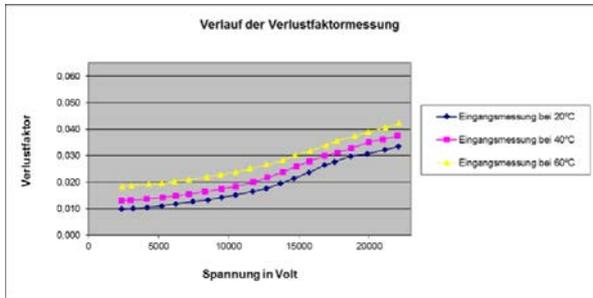
Visuelle Untersuchungen:

Isolationsversagen im mittleren Nutbereich des Stabes an der Kante zur Schmalseite. Der AGS ist stark abgenutzt und nur mehr teilweise vorhanden. Der Durchschlag ist an einer Stelle geschehen, welche nicht explizit markiert wurde, jedoch ist an dieser Stelle der AGS auch nur mehr im geringen Masse vorhanden. Der Wickelkopfbereich ist in Ordnung, jedoch ist auch neuer EGS-Lack aufgetragen worden. Während der Dauerbelastung ist auch hier ein EGS-Band zur Feldsteuerung im Wickelkopfbereich eingesetzt worden, welches vor den Zwischenmessungen entfernt worden ist.

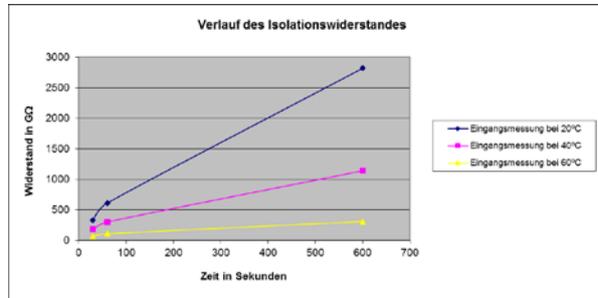
Stab: Wu4_29(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 0 Std.

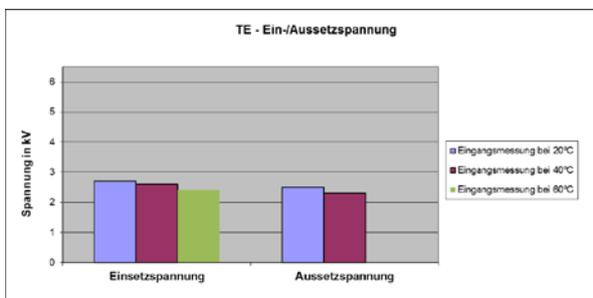
Verlustfaktormessungen:



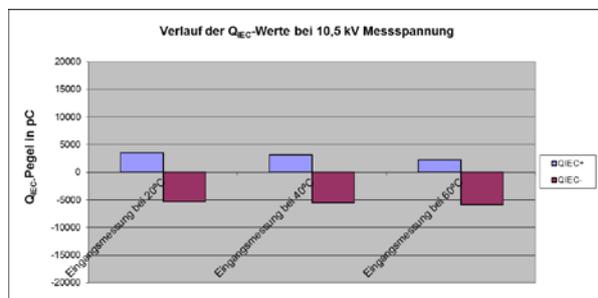
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: T _{Umgebung} 21,8 °C rel. Luftfeuchte 33 % Luftdruck 982,6 hPa Tkupfer 21,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 40°C: T _{Umgebung} 39,1 °C rel. Luftfeuchte 14,2 % Luftdruck 971,8 hPa Tkupfer 37,2 °C Messfrequenz 50 Hz	Eingangsmessung 60°C: T _{Umgebung} 57 °C rel. Luftfeuchte 10,1 % Luftdruck 963 hPa Tkupfer 52 °C Messfrequenz 50 Hz	1. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	2. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz
3. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	4. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	5. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	6. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz	7. Zwischenmessung: T _{Umgebung} °C rel. Luftfeuchte % Luftdruck hPa Tkupfer °C Messfrequenz Hz

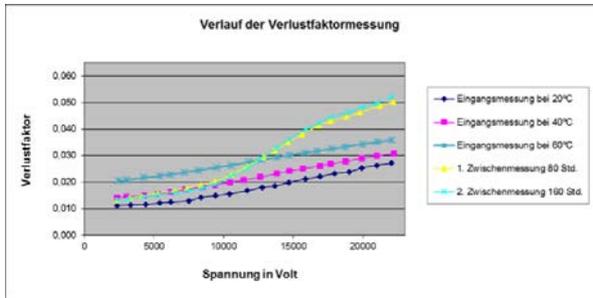
Visuelle Untersuchungen:

Sofortiger Ausfall des Stabes bei Erreichen der Prüfspannung von 32 kV. Der AGS ist zwar allgemein in Ordnung, jedoch ist ein Stück der Nutisolierung herausgebrochen. Vermutlich entstand diese Fehlerstelle während des Ausbaus des Stabes. Der Fehlerort ist somit im Vorfeld als Schwachstelle markiert worden.

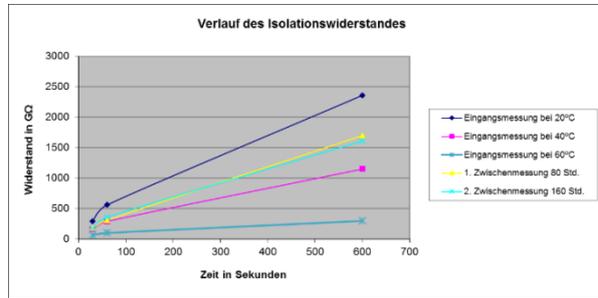
Stab: Wu4_28(U)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 199,46 Std.

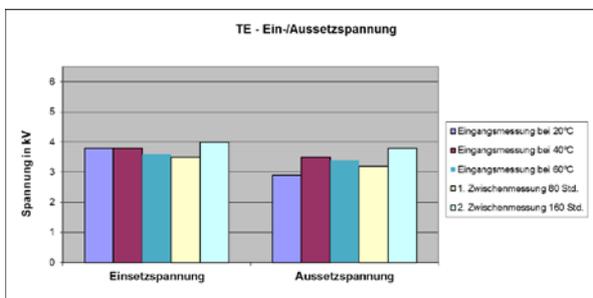
Verlustfaktormessungen:



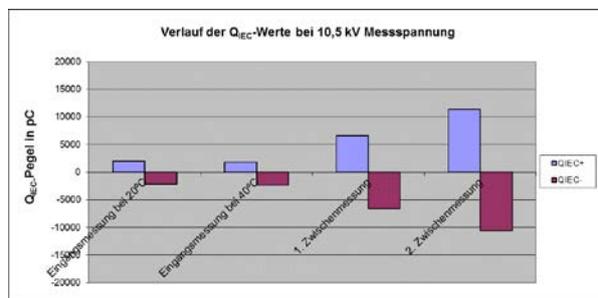
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}	21,8 °C	T _{Umgebung}	39,1 °C	T _{Umgebung}	57 °C	T _{Umgebung}	27,5 °C	T _{Umgebung}	28,6 °C
rel. Luftfeuchte	33 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	20,8 %	rel. Luftfeuchte	23 %
Luftdruck	982,6 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	968,6 hPa	Luftdruck	967,5 hPa
T _{Kupfer}	21,2 °C	T _{Kupfer}	37,2 °C	T _{Kupfer}	52 °C	T _{Kupfer}	28,4 °C	T _{Kupfer}	28,7 °C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}		T _{Umgebung}	
rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte		rel. Luftfeuchte	
Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck		Luftdruck	
T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}		T _{Kupfer}	
Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz		Messfrequenz	

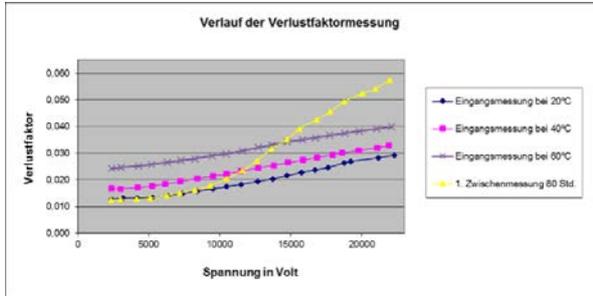
Visuelle Untersuchungen:

Der Fehlerort an diesem Stab befindet sich wieder im Bereich der Kante, mittig im Nutbereich des Stabes. An der Seite, wo der Fehler auftrat gibt es nur geringe Erosionen am AGS-Lack. Die Fehlerstelle ist im Vorfeld nicht als Schwachstelle markiert. Weiteres enthält der Stab relativ viele Schwachstellen, sowohl im Nutaustrittsbereich, als auch an der unteren Breitseite des Stabes. Hier sind starke Erosionen des AGS auffällig. Der EGS-Lack wurde teilweise ausgebessert.

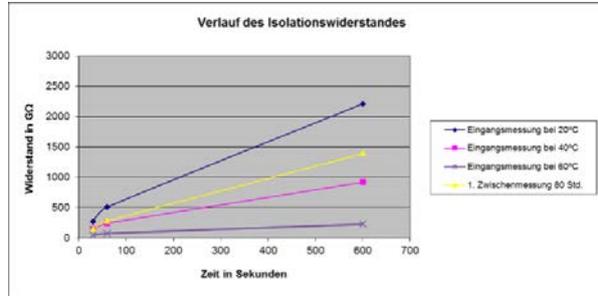
Stab: Wu4_127(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 95,46 Std.

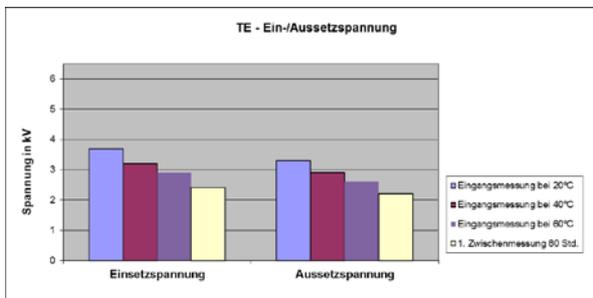
Verlustfaktormessungen:



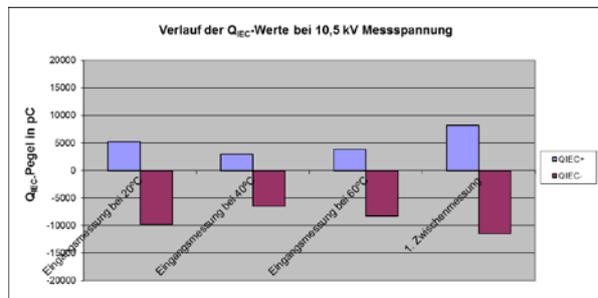
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



$Q_{IEC} + / Q_{IEC} -$ bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
TUmgebung	21,8 °C	TUmgebung	39,1 °C	TUmgebung	57 °C	TUmgebung	28,8 °C	TUmgebung	°C
rel. Luftfeuchte	83 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	23 %	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	982,6 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	967,5 hPa	Luftdruck	hPa
Tkupfer	21,2 °C	Tkupfer	37,2 °C	Tkupfer	52 °C	Tkupfer	28,7 °C	Tkupfer	°C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
TUmgebung	°C	TUmgebung	°C	TUmgebung	°C	TUmgebung	°C	TUmgebung	°C
rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa
Tkupfer	°C	Tkupfer	°C	Tkupfer	°C	Tkupfer	°C	Tkupfer	°C
Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz

Visuelle Untersuchungen:

Ausfall nach Isolationsversagen im Nutbereich an der Breitseite zur Kante hin. Der Durchschlag befindet sich im oberen Bereich (Nutaustrittsbereich) des Stabes. Die Durchschlagstelle ist bei den Voruntersuchungen als Schwachstelle markiert worden.

Stab: Wu4_128(V)

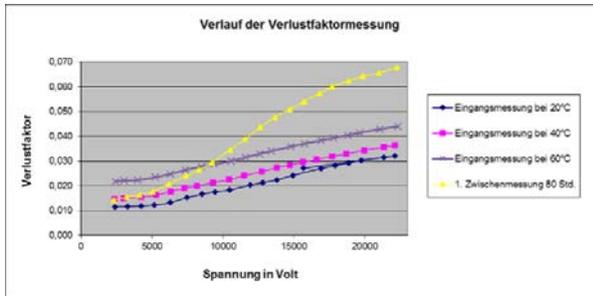
Restlaufzeit während des Dauerversuches: 0 Std.

<p>Verlustfaktormessungen:</p> <p>Keine Messung vorhanden.</p>	<p>Isolationswiderstandsmessungen:</p> <p>Keine Messung vorhanden.</p>																																																																																																																								
<p>PDIV/PDEV:</p> <p>Keine Messung vorhanden.</p>	<p>$Q_{IEC} +/ Q_{IEC} -$ bei 10,5 kV:</p> <p>Keine Messung vorhanden.</p>																																																																																																																								
<p>Klimadaten der aktuellen Messungen:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 8px;"> <tr> <td style="width: 16.6%;">Eingangsmessung 20°C:</td> <td style="width: 16.6%;">Eingangsmessung 40°C:</td> <td style="width: 16.6%;">Eingangsmessung 60°C:</td> <td style="width: 16.6%;">1. Zwischenmessung:</td> <td style="width: 16.6%;">2. Zwischenmessung:</td> </tr> <tr> <td><table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table></td> </tr> <tr> <td>3. Zwischenmessung:</td> <td>4. Zwischenmessung:</td> <td>5. Zwischenmessung:</td> <td>6. Zwischenmessung:</td> <td>7. Zwischenmessung:</td> </tr> <tr> <td><table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table></td> </tr> </table>		Eingangsmessung 20°C:	Eingangsmessung 40°C:	Eingangsmessung 60°C:	1. Zwischenmessung:	2. Zwischenmessung:	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	3. Zwischenmessung:	4. Zwischenmessung:	5. Zwischenmessung:	6. Zwischenmessung:	7. Zwischenmessung:	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz
Eingangsmessung 20°C:	Eingangsmessung 40°C:	Eingangsmessung 60°C:	1. Zwischenmessung:	2. Zwischenmessung:																																																																																																																					
<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz																																																																			
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
3. Zwischenmessung:	4. Zwischenmessung:	5. Zwischenmessung:	6. Zwischenmessung:	7. Zwischenmessung:																																																																																																																					
<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz	<table border="1" style="width: 100%;"><tr><td>TUmgebung</td><td>°C</td></tr><tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>%</td></tr><tr><td>Luftdruck</td><td>hPa</td></tr><tr><td>TKupfer</td><td>°C</td></tr><tr><td>Messfrequenz</td><td>Hz</td></tr></table>	TUmgebung	°C	rel. Luftfeuchte	%	Luftdruck	hPa	TKupfer	°C	Messfrequenz	Hz																																																																			
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
TUmgebung	°C																																																																																																																								
rel. Luftfeuchte	%																																																																																																																								
Luftdruck	hPa																																																																																																																								
TKupfer	°C																																																																																																																								
Messfrequenz	Hz																																																																																																																								
<p>Visuelle Untersuchungen:</p> <p>Ausfall während der TE-Messung bei ca. 5kV. Beschädigung an den Kanten sind erkennbar. Leider wurde zu diesem Zeitpunkt noch keine Verlustfaktormessung durchgeführt. Lediglich die Isolationsstrommessung und die optische Voruntersuchung sind vorhanden. Vermutlich ist dieser frühe Defekt auf eine Beschädigung des Stabes während des Ausbaus zurückzuführen. Der Nutbereich des Stabes wies einen relativ maroden Zustand mit vielen Fehlerstellen auf. Der Fehler befindet an der Kante im unteren Drittel des Nutbereiches, hier sind auch starke Abnutzungen der Hauptisolierung festgestellt worden.</p>																																																																																																																									

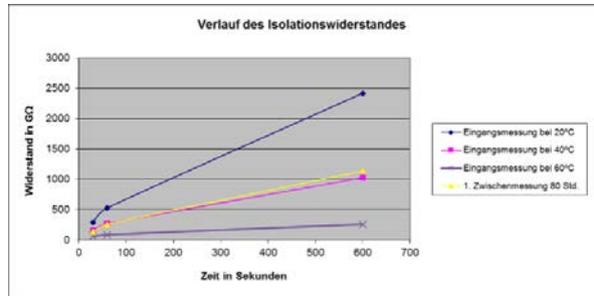
Stab: Wu4_141(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 116,55 Std.

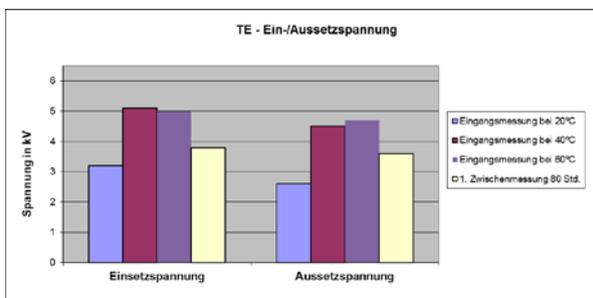
Verlustfaktormessungen:



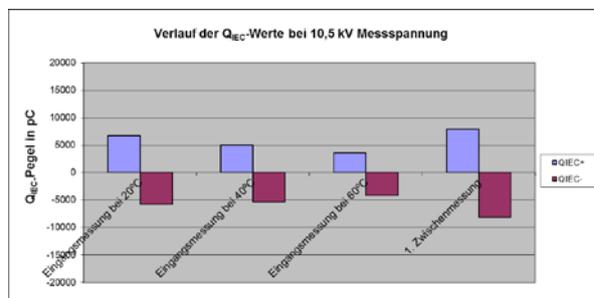
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:				Eingangsmessung 40°C:				Eingangsmessung 60°C:				1. Zwischenmessung:				2. Zwischenmessung:													
T _{Umgebung}	21,8	°C	rel. Luftfeuchte	33	%	T _{Umgebung}	39,1	°C	rel. Luftfeuchte	14,2	%	T _{Umgebung}	57	°C	rel. Luftfeuchte	10,1	%	T _{Umgebung}	27,2	°C	rel. Luftfeuchte	24	%						
Luftdruck	982,6	hPa	T _{Kupfer}	21,2	°C	Luftdruck	971,8	hPa	T _{Kupfer}	37,2	°C	Luftdruck	963	hPa	T _{Kupfer}	52	°C	Luftdruck	964,5	hPa	T _{Kupfer}	27,8	°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz	50	Hz				Messfrequenz	50	Hz				Messfrequenz	50	Hz				Messfrequenz	50	Hz									
3. Zwischenmessung:				4. Zwischenmessung:				5. Zwischenmessung:				6. Zwischenmessung:				7. Zwischenmessung:													
T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%	T _{Umgebung}		°C	rel. Luftfeuchte		%						
Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C	Luftdruck		hPa	T _{Kupfer}		°C						
Messfrequenz		Hz				Messfrequenz		Hz				Messfrequenz		Hz				Messfrequenz		Hz									

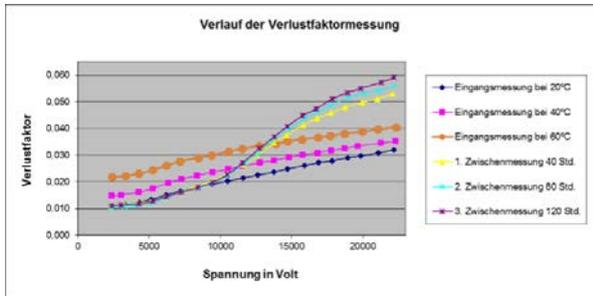
Visuelle Untersuchungen:

Die Fehlerstelle liegt ziemlich mittig im Nutbereich des Generatorstabes, am Rande der Breitseite. Der Durchschlagsbereich des Stabes ist im Vorfeld nicht explizit als grobe Fehlerstelle gekennzeichnet worden, jedoch hat der Nutbereich des Stabes schon im Vorfeld starke Beschädigungen aufgewiesen. Von den offensichtlichen Fehlstellen sind 17 markiert und festgehalten worden. Es sind auch Bereiche eruiert worden, wo sich im Laufe des Dauerversuches Glimmstellen gebildet hatten. Diese sind im Bereich zwischen AGS- und EGS gesichtet worden. Am Wickelkopf ist aufgrund des Zustandes neuer EGS-Lack aufgetragen worden.

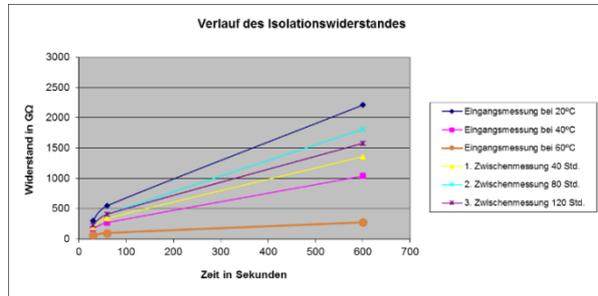
Stab: Wu4_140(V)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 143,58 Std.

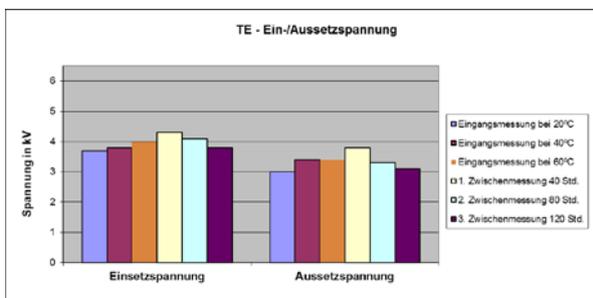
Verlustfaktormessungen:



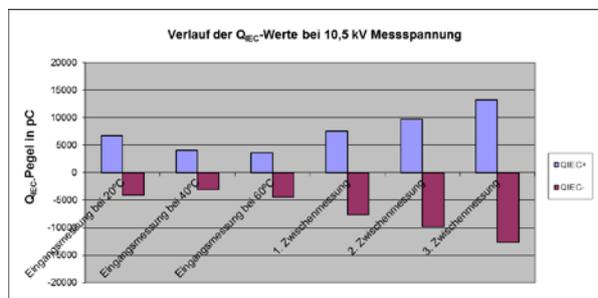
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:			Eingangsmessung 40°C:			Eingangsmessung 60°C:			1. Zwischenmessung:			2. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	21,8	°C	T _{Umgebung}	39,1	°C	T _{Umgebung}	57	°C	T _{Umgebung}	26,9	°C	T _{Umgebung}	26,9	°C
rel. Luftfeuchte	33	%	rel. Luftfeuchte	14,2	%	rel. Luftfeuchte	10,1	%	rel. Luftfeuchte	36,6	%	rel. Luftfeuchte	42,3	%
Luftdruck	982,6	hPa	Luftdruck	971,8	hPa	Luftdruck	963	hPa	Luftdruck	979,1	hPa	Luftdruck	976,5	hPa
T _{Kupfer}	21,2	°C	T _{Kupfer}	37,2	°C	T _{Kupfer}	52	°C	T _{Kupfer}	26,9	°C	T _{Kupfer}	26,2	°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz
3. Zwischenmessung:			4. Zwischenmessung:			5. Zwischenmessung:			6. Zwischenmessung:			7. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	25,1	°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte	50,9	%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck	978,2	hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}	24,4	°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz

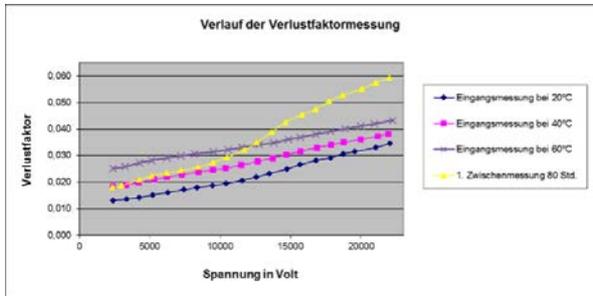
Visuelle Untersuchungen:

Der Fehler ist im mittleren Nutbereich des Stabes aufgetreten und ist im Vorfeld nicht als Schwachstelle gekennzeichnet worden. Im Allgemeinen ist die AGS-Schicht in Ordnung, jedoch wie bei allen WU4-Stäben relativ schmierig. Im Krümmungsbereich des Stabes sind starke Ablätterungen des EGS vorhanden, welche mit neuem EGS überdeckt wurden. Es sind zum Teil deutliche Entladungsspuren im Nutaustrittsbereich zu sehen.

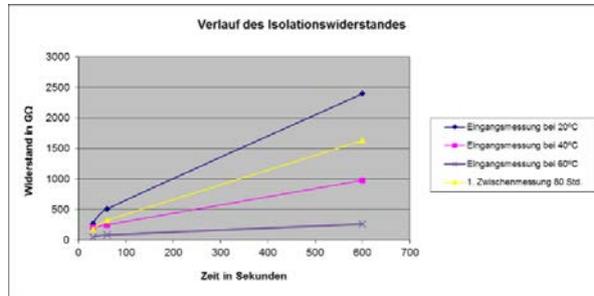
Stab: Wu4_143(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 103,64 Std.

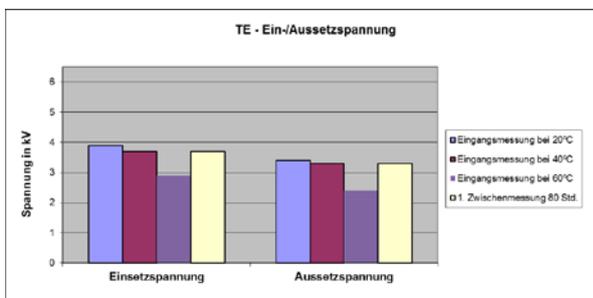
Verlustfaktormessungen:



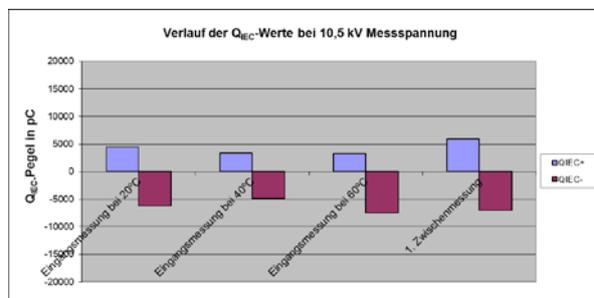
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



$Q_{IEC} + / Q_{IEC} -$ bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:		Eingangsmessung 40°C:		Eingangsmessung 60°C:		1. Zwischenmessung:		2. Zwischenmessung:	
TUmgebung	21,8 °C	TUmgebung	39,1 °C	TUmgebung	57 °C	TUmgebung	28,8 °C	TUmgebung	°C
rel. Luftfeuchte	33 %	rel. Luftfeuchte	14,2 %	rel. Luftfeuchte	10,1 %	rel. Luftfeuchte	23 %	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	982,6 hPa	Luftdruck	971,8 hPa	Luftdruck	963 hPa	Luftdruck	967,5 hPa	Luftdruck	hPa
Tkupfer	21,2 °C	Tkupfer	37,2 °C	Tkupfer	52 °C	Tkupfer	28,7 °C	Tkupfer	°C
Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	50 Hz	Messfrequenz	Hz
3. Zwischenmessung:		4. Zwischenmessung:		5. Zwischenmessung:		6. Zwischenmessung:		7. Zwischenmessung:	
TUmgebung	°C	TUmgebung	°C	TUmgebung	°C	TUmgebung	°C	TUmgebung	°C
rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%	rel. Luftfeuchte	%
Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa	Luftdruck	hPa
Tkupfer	°C	Tkupfer	°C	Tkupfer	°C	Tkupfer	°C	Tkupfer	°C
Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz	Messfrequenz	Hz

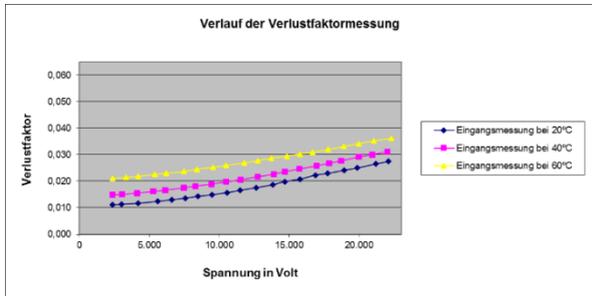
Visuelle Untersuchungen:

An einer Seite des Stabes war der AGS stark abgetragen und die Hauptisolierung lag blank. Diese Abnutzung muss sich schon während des Betriebes der Maschine stark ausgeprägt haben. Die andere Seite des Stabes ist optisch im Nutbereich in Ordnung und nur teilweise vom AGS-Erosionen betroffen. Der Fehler ereignete sich an der Kante der Breitseite zur Schmalseite im Bereich der starken Abnutzung. Jedoch ist am Durchschlagsort selbst AGS vorhanden. Die Fehlerstelle war somit vorher als Schwachstelle gekennzeichnet und befindet sich mittig im Nutbereich. EGS-Lack wurde im Nutaustrittsbereich erneuert.

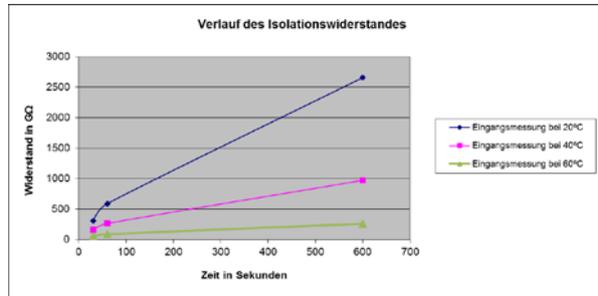
Stab: Wu4_144(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 48,02 Std.

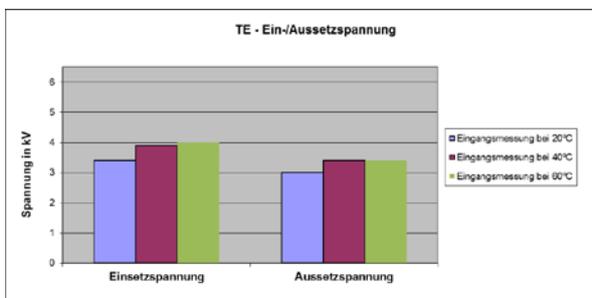
Verlustfaktormessungen:



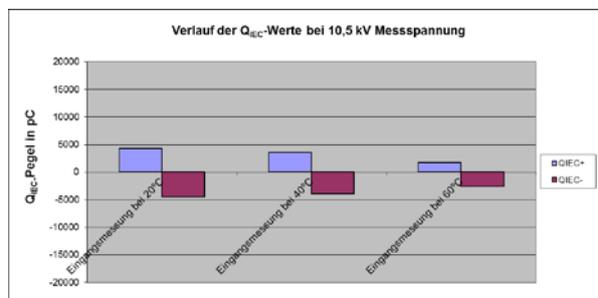
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:			Eingangsmessung 40°C:			Eingangsmessung 60°C:			1. Zwischenmessung:			2. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	21,8	°C	T _{Umgebung}	39,1	°C	T _{Umgebung}	57	°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte	33	%	rel. Luftfeuchte	14,2	%	rel. Luftfeuchte	10,1	%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck	982,6	hPa	Luftdruck	971,8	hPa	Luftdruck	963	hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}	21,2	°C	T _{Kupfer}	37,2	°C	T _{Kupfer}	52	°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz
3. Zwischenmessung:			4. Zwischenmessung:			5. Zwischenmessung:			6. Zwischenmessung:			7. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz

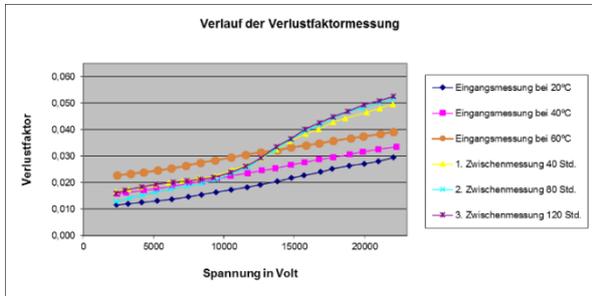
Visuelle Untersuchungen:

Der Fehler hat sich im oberen Drittel des Nutbereiches an der Kante der Breitseite ereignet. Obwohl einige Schwachstellen bezüglich AGS Beschädigungen und Glimmstellen im Vorfeld als Schwachstellen gekennzeichnet worden sind, hat die Fehlerstelle selbst im Vorfeld keine Merkmale einer Schwachstelle aufgewiesen. EGS-Lack wurde teilweise erneuert.

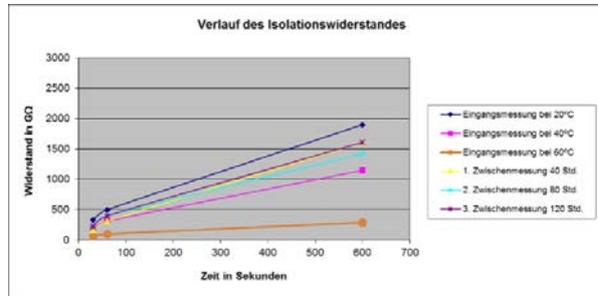
Stab: Wu4_14(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 125,51 Std.

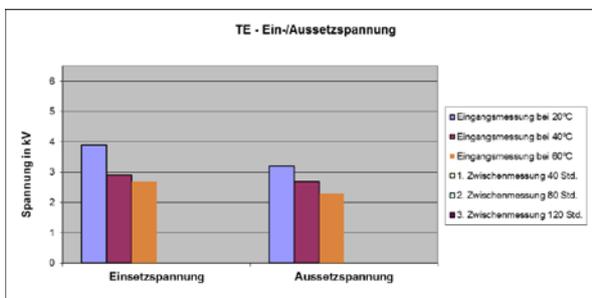
Verlustfaktormessungen:



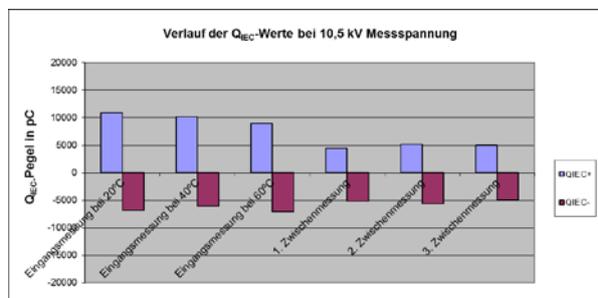
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td>21,8</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>33</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>982,6</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>21,2</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>50</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	21,8	°C	rel. Luftfeuchte	33	%	Luftdruck	982,6	hPa	TKupfer	21,2	°C	Messfrequenz	50	Hz	Eingangsmessung 40°C: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td>39,1</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>14,2</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>971,8</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>37,2</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>50</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	39,1	°C	rel. Luftfeuchte	14,2	%	Luftdruck	971,8	hPa	TKupfer	37,2	°C	Messfrequenz	50	Hz	Eingangsmessung 60°C: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td>57</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>10,1</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>963</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>52</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>50</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	57	°C	rel. Luftfeuchte	10,1	%	Luftdruck	963	hPa	TKupfer	52	°C	Messfrequenz	50	Hz	1. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td>26,9</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>35,6</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>973,1</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>26,9</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>50</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	26,9	°C	rel. Luftfeuchte	35,6	%	Luftdruck	973,1	hPa	TKupfer	26,9	°C	Messfrequenz	50	Hz	2. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td>26,9</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>42,3</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>976,5</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>26,2</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>50</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	26,9	°C	rel. Luftfeuchte	42,3	%	Luftdruck	976,5	hPa	TKupfer	26,2	°C	Messfrequenz	50	Hz
TUmgebung	21,8	°C																																																																													
rel. Luftfeuchte	33	%																																																																													
Luftdruck	982,6	hPa																																																																													
TKupfer	21,2	°C																																																																													
Messfrequenz	50	Hz																																																																													
TUmgebung	39,1	°C																																																																													
rel. Luftfeuchte	14,2	%																																																																													
Luftdruck	971,8	hPa																																																																													
TKupfer	37,2	°C																																																																													
Messfrequenz	50	Hz																																																																													
TUmgebung	57	°C																																																																													
rel. Luftfeuchte	10,1	%																																																																													
Luftdruck	963	hPa																																																																													
TKupfer	52	°C																																																																													
Messfrequenz	50	Hz																																																																													
TUmgebung	26,9	°C																																																																													
rel. Luftfeuchte	35,6	%																																																																													
Luftdruck	973,1	hPa																																																																													
TKupfer	26,9	°C																																																																													
Messfrequenz	50	Hz																																																																													
TUmgebung	26,9	°C																																																																													
rel. Luftfeuchte	42,3	%																																																																													
Luftdruck	976,5	hPa																																																																													
TKupfer	26,2	°C																																																																													
Messfrequenz	50	Hz																																																																													
3. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td>25,1</td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td>50,9</td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td>978,2</td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td>24,4</td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td>50</td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung	25,1	°C	rel. Luftfeuchte	50,9	%	Luftdruck	978,2	hPa	TKupfer	24,4	°C	Messfrequenz	50	Hz	4. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td></td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td></td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td></td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung		°C	rel. Luftfeuchte		%	Luftdruck		hPa	TKupfer		°C	Messfrequenz		Hz	5. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td></td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td></td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td></td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung		°C	rel. Luftfeuchte		%	Luftdruck		hPa	TKupfer		°C	Messfrequenz		Hz	6. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td></td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td></td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td></td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung		°C	rel. Luftfeuchte		%	Luftdruck		hPa	TKupfer		°C	Messfrequenz		Hz	7. Zwischenmessung: <table border="1"> <tr><td>TUmgebung</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>rel. Luftfeuchte</td><td></td><td>%</td></tr> <tr><td>Luftdruck</td><td></td><td>hPa</td></tr> <tr><td>TKupfer</td><td></td><td>°C</td></tr> <tr><td>Messfrequenz</td><td></td><td>Hz</td></tr> </table>	TUmgebung		°C	rel. Luftfeuchte		%	Luftdruck		hPa	TKupfer		°C	Messfrequenz		Hz
TUmgebung	25,1	°C																																																																													
rel. Luftfeuchte	50,9	%																																																																													
Luftdruck	978,2	hPa																																																																													
TKupfer	24,4	°C																																																																													
Messfrequenz	50	Hz																																																																													
TUmgebung		°C																																																																													
rel. Luftfeuchte		%																																																																													
Luftdruck		hPa																																																																													
TKupfer		°C																																																																													
Messfrequenz		Hz																																																																													
TUmgebung		°C																																																																													
rel. Luftfeuchte		%																																																																													
Luftdruck		hPa																																																																													
TKupfer		°C																																																																													
Messfrequenz		Hz																																																																													
TUmgebung		°C																																																																													
rel. Luftfeuchte		%																																																																													
Luftdruck		hPa																																																																													
TKupfer		°C																																																																													
Messfrequenz		Hz																																																																													
TUmgebung		°C																																																																													
rel. Luftfeuchte		%																																																																													
Luftdruck		hPa																																																																													
TKupfer		°C																																																																													
Messfrequenz		Hz																																																																													

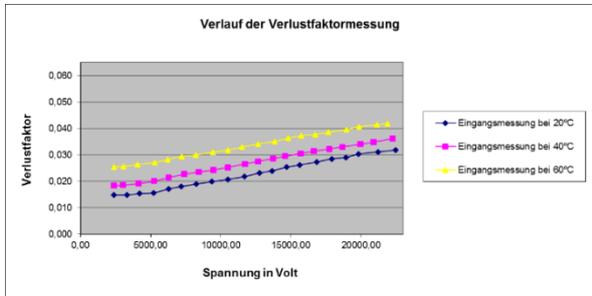
Visuelle Untersuchungen:

Der Nutbereich hatte aufgrund starker AGS-Erosion starke Mängel, welche schon im Vorfeld bemerkt worden sind. Der Durchschlag erfolgte jedoch völlig überraschend im mittleren Wickelkopfbereich obwohl neben einem neuen EGS-Anstrich auch ein EGS-Band am Stab angebracht war. Nach dem Durchschlag war am EGS-Band deutlich die Durchschlagstelle zu sehen, da das Band an dieser Stelle durchbrochen wurde und Verbrennungen in Richtung Nutbereich hin sichtbar sind.

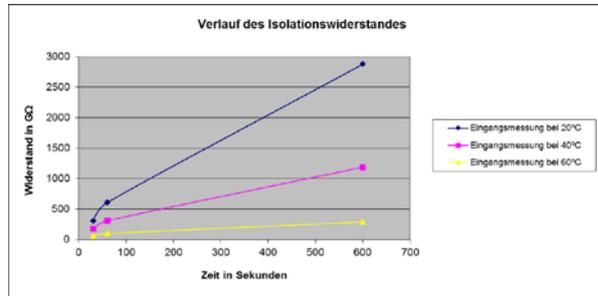
Stab: Wu4_13(W)

Restlaufzeit während des Dauerversuches: 13,69 Std.

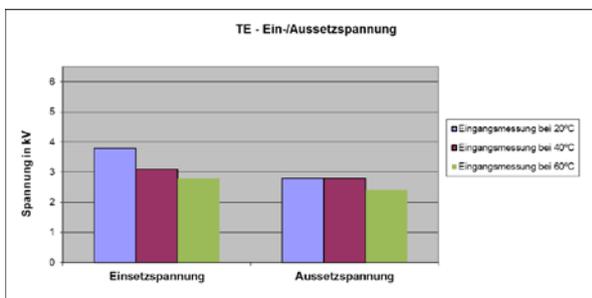
Verlustfaktormessungen:



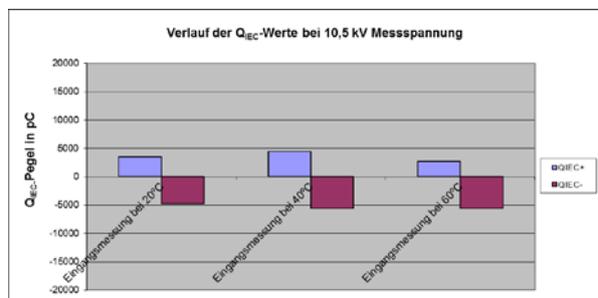
Isolationswiderstandsmessungen:



PDIV/PDEV:



Q_{IEC} +/ Q_{IEC} - bei 10,5 kV:



Klimadaten der aktuellen Messungen:

Eingangsmessung 20°C:			Eingangsmessung 40°C:			Eingangsmessung 60°C:			1. Zwischenmessung:			2. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	21,8	°C	T _{Umgebung}	39,1	°C	T _{Umgebung}	57	°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}	26,9	°C
rel. Luftfeuchte	33	%	rel. Luftfeuchte	14,2	%	rel. Luftfeuchte	10,1	%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte	42,3	%
Luftdruck	982,6	hPa	Luftdruck	971,8	hPa	Luftdruck	963	hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck	976,5	hPa
T _{Kupfer}	21,2	°C	T _{Kupfer}	37,2	°C	T _{Kupfer}	52	°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}	28,2	°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz	50	Hz
3. Zwischenmessung:			4. Zwischenmessung:			5. Zwischenmessung:			6. Zwischenmessung:			7. Zwischenmessung:		
T _{Umgebung}	25,1	°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C	T _{Umgebung}		°C
rel. Luftfeuchte	50,9	%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%	rel. Luftfeuchte		%
Luftdruck	978,2	hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa	Luftdruck		hPa
T _{Kupfer}	24,4	°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C	T _{Kupfer}		°C
Messfrequenz	50	Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz	Messfrequenz		Hz

Visuelle Untersuchungen:

Der Durchschlag des Stabes befindet sich im Nutbereich direkt an einer Kante. Zur Beschaffenheit des Stabes ist generell zu sagen, dass dieser nach den optischen Untersuchungen im Vorfeld bereits starke Abnutzungen am AGS und Ablätterungen der Hauptisolierung an der äußersten Isolierschicht aufgewiesen hatte. Es sind etliche optisch sichtbare Fehlstellen gekennzeichnet worden, jedoch hat sich der Durchschlag an einer Stelle ereignet, welche im Vorfeld nicht als offensichtliche Schwachstelle sichtbar war.