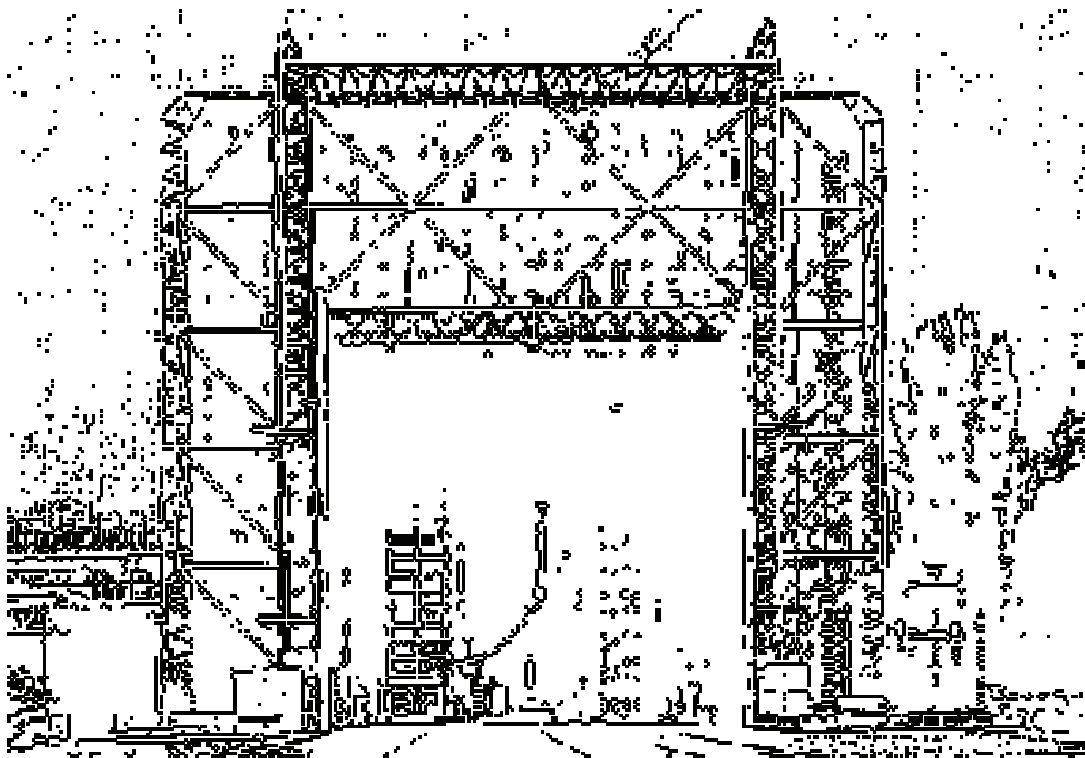


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

DIPLOMARBEIT



INSTITUT FÜR **H**OCHSPANNUNGSTECHNIK
UND **S**YSTEMMANAGEMENT

Auswirkungen erhöhter 1-Minuten Stehspannungsprüfungspegel auf die elektrische Lebensdauer des Isolationssystems rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen

Influences of raised One Minute Withstand Voltage Test Levels on the
Electrical Endurance of Insulation Systems of Rotating Electrical
Machines

Diplomarbeit
von
Michael Schüller
Graz, September 2009

Durchgeführt am
Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
der Technischen Universität Graz in Kooperation mit ISOVOLTA AG



Institutsvorstand
Begutachter
Betreuer

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr
O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sumereder
Dipl.-Ing. Florian Senn, ISOVOLTA AG

Kurzfassung

Die Wicklungsisolierung einer rotierenden elektrischen Hochspannungsmaschine ist nach wie vor der Hauptgrund für das Versagen von Generatoren und Motoren.

Um die Qualität des Isoliersystems zu überprüfen wird nach Fertigstellung der Maschine die 1-Minuten Stehspannungsprüfung durchgeführt. Ziel dieser Prüfung ist es etwaige Fehler in der Isolation zu finden. Laut IEC 60034-1 ist ein Prüfpegel von $2 U_n + 1 \text{ kV}$ für die 1-Minuten Stehspannungsprüfung bei neuen rotierenden elektrischen Maschinen anzuwenden.

Bei einigen Maschinenherstellern haben sich jedoch viel höhere Prüfpegel von bis zu $5 U_n$ in der Produktionsbegleitenden Qualitätssicherung etabliert.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage ob diese hohen Prüfpegel die elektrische Lebensdauer von Isoliersystemen für rotierende Hochspannungsmaschinen nicht schon drastisch verkürzen und eine Prüfung nach Norm sinnvoller wäre.

Im Zuge der Diplomarbeit wurden 70 Generatorstabmodelle gefertigt und mit drei verschiedenen hohen 1-Minuten Prüfspannungspegeln geprüft. Anschließend wurde die Lebensdauer der Stäbe durch beschleunigte Dauerspannungsversuche bestimmt.

Im speziellen wurde versucht eine Gesetzmäßigkeit zwischen der bei der Prüfung in Form von Teilentladungen auf das Isoliersystem einwirkenden Energie und der elektrischen Lebensdauer zu finden. Die umgesetzte Energie wurde aus den Daten der durchgeführten Teilentladungsmessung während der Stehspannungsprüfung berechnet. Zum Vergleich der Ergebnisse wurde auch vor und nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung eine TE Messung bei U_n durchgeführt.

Schlüsselwörter

- rotierende Hochspannungsmaschine
- Isoliersystem
- Lebensdauer
- Teilentladungsenergie
- Prüfspannung
- 1-Minuten Stehspannungsprüfung

Abstract

The mainwall insulation of rotating high voltage machines is responsible for outages of motors and generators very often. The One Minute Withstand Voltage Test is one of the first possibilities to find these possible errors before the machine is delivered. So very early failures because of not recognized problems during the production process can be found and fixed.

According to KEMA S-13 standard a voltage from $2 U_n + 1 \text{ kV}$ has to be used for the one minute withstand test for testing rotating electrical machines.

A few manufacturers of electrical machines use much higher voltages than the standardized acceptance level of $2 \cdot U_n + 1 \text{ kV}$. They use voltages up to $5 U_n$ and sometimes more for quality control during production.

The question worked out in this presented diploma theses is, if testing insulation systems of rotating high voltages machines with a 1 minute withstand acceptance level much higher than the standardized level already destroys the insulation system. And if this is the case how heavy will the insulation system be destroyed. So the question is if it would not be better testing with the standardized acceptance level.

To evaluate these questions 70 generator bar models were carefully produced under laboratory conditions. They were stressed with three different high One Minute Withstand Voltage Test levels and the rest lifetime has been found.

In special a law that connects partial discharge energy during the withstand test and electrical life time was tried to figure out. For this three Partial Discharge measurements were done. One before the One Minute Withstand Voltage Test at U_n . The second during and the third after the One Minute Withstand Voltage Test again at U_n . From these measurements the Partial Discharge energy could be calculated.

Keywords

- rotating high voltage machine
- insulation system
- electrical lifetime
- partial discharge energy
- acceptance level
- 1-Minute Withstand Voltage Test

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	5
1.1	Isoliersysteme elektrischer Maschinen	6
1.2	Geschichtliche Entwicklung der Isolierstoffe und Trägermaterialien	6
1.3	Aufbau eines Isolationssystemes für rotierende Hochspannungsmaschinen	7
2	Verlustfaktor Messung	9
2.1	Messprinzip	11
3	Teilentladungsmessung	14
3.1	Wirkungen von Teilentladungen	16
3.2	Elektrisches Messprinzip	17
3.3	Teilentladungs- Kenngrößen	19
3.4	Beurteilung und Interpretation der Messergebnisse	20
4	Elektrische Alterung	21
4.1	Durchschlagsmodell	22
4.2	Dauerspannungsversuche	23
4.3	Elektrische Alterungsmodelle.....	23
4.4	Darstellung der Lebensdauerzeiten mittels Weibullverteilung	25
5	Aktuelle Situation der Stehspannungsprüfung	27
5.1	Normen zur Abnahmestehspannungsprüfung.....	27
5.2	Herstellerspezifikationen der Prüfungen	27
6	Prüfstäbe	29
6.1	Auswahl repräsentativer Isoliersysteme und Stehspannungsprüfpegel.....	29
6.2	Einfluss des Stabprofils	29
6.2.1	Einfluss des Stabradius auf den elektrischen Feldverlauf	30
6.3	Prüfstabaufbau	33
6.4	Prüfstabherstellung	35
6.4.1	VPI Stäbe.....	35
6.4.2	Resin Rich Stäbe	37
6.4.3	Fertigungsprobleme RR auf Kupfer	39
6.5	Messablauf	42
7	Dauerspannungsversuche und Referenz-Lebensdauer kennlinie	44
8	Praktische Verlustfaktor Messung	48
8.1	Messaufbau	48
8.2	Änderung des Verlustfaktors während der Stabproduktion	49
8.3	Abhängigkeit des Verlustfaktors von den geometrischen Dimensionen und der Isolationsdicke	51

9	Praktische Teilentladungsmessung	53
9.1	Messaufbau	53
9.2	Messergebnisse	54
9.3	Betrachtung der Teilentladungsenergie.....	57
9.4	Zusammenhang umgesetzte Teilentladungsenergie und elektrische Lebensdauer	60
9.5	Teilentladungsmessung am Ende der zu erwartenden Lebensdauer	63
10	Diskussion der Ergebnisse	65
10.1	Diskussion ausgewählter TE Ergebnisse	66
10.1.1	Äußere Teilentladungen auf Grund einer scharfen Kante	66
10.1.2	Messung ohne Endenglimmschutz.....	66
11	Ausblick und weiterführende Untersuchungen	68
12	Zusammenfassung	69
13	Literaturverzeichnis	70

1 EINLEITUNG

Die Wicklungsisolierung einer rotierenden elektrischen Hochspannungsmaschine ist oft für das Versagen von Generatoren und Motoren verantwortlich. [1]

Um die Qualität des Isoliersystems zu überprüfen, wird nach Fertigstellung der Maschine die 1-Minuten Stehspannungsprüfung durchgeführt. Ziel dieser Prüfung ist es etwaige Fehler in der Isolierung zu finden. Laut IEC 60034-1 ist ein Prüfpegel von $2 U_n + 1 \text{ kV}$ für die 1-Minuten Stehspannungsprüfung bei neuen rotierenden elektrischen Maschinen anzuwenden.

Viele Kunden von Maschinenherstellern fordern aber produktionsprozessbegleitende Prüfungen, die um ein Vielfaches härter sind als die in der Norm festgelegte Prüfmethode. Hintergrund dafür ist die Qualitätssicherung der Isolierung da, oft angenommen wird, dass viele Fehler durch die Prüfung nach Norm nicht gefunden werden könnten.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob hohe Belastungen bei der Prüfung das Isoliersystem eventuell schon schädigen und so die maximal mögliche Lebensdauer herabsetzen.

Am Beginn der Arbeit wird kurz auf die geschichtliche Entwicklung und auf den Aufbau einer Hochspannungsisolierung eingegangen. In den folgenden beiden Kapiteln werden die zwei verwendeten Messungen, Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung, physikalisch erklärt.

Die für diese Arbeit auch sehr wichtigen Hintergründe zur elektrischen Alterung und aktuellen Situation der angewandten Stehspannungsprüfungen werden in den Kapiteln 4 und 5 erläutert.

Im praktischen Teil der vorliegenden Diplomarbeit wurden 70 Generatorstabmodelle gefertigt. Diese wurden im Lauf des Produktionsprozesses drei Mal einer Verlustfaktormessung unterzogen. So konnten schlechte Isolierungen rechtzeitig erkannt und aus dem Prozess genommen werden. Im weiteren wurden die gefertigten Versuchsstäbe mit drei verschiedenen hohen 1-Minuten Prüfspannungspegeln geprüft. Anschließend wurde die Lebensdauer der Stäbe durch beschleunigte Dauerspannungsversuche bestimmt.

Im speziellen wurde versucht eine Gesetzmäßigkeit zwischen der angewandten Prüfspannung der 1-Minuten Stehspannungsprüfung und der elektrischen Lebensdauer zu finden. Weiters wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen der bei der Prüfung in Form von Teilentladungen auf das Isoliersystem einwirkenden Energie und der elektrischen Lebensdauer ableiten zu können. Die umgesetzte Energie wurde aus den Daten der durchgeführten Teilentladungsmessung während der Stehspannungsprüfung berechnet. Zum Vergleich der Ergebnisse wurde auch vor und nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung eine TE Messung bei U_n durchgeführt.

1.1 Isoliersysteme elektrischer Maschinen

Elektrische Synchron- und Asynchronmaschinen werden als Generatoren und auch als Motoren eingesetzt. Sie bestehen aus dem sogenannten Läufer (Rotor) und dem Ständer (Stator).

Durch Drehen des Läufers wird ein umlaufendes Magnetfeld B erzeugt, das im feststehenden Stator Spannungen induziert.

Der Ständer besteht aus einem zylindrischen Blechpaket mit einer konzentrischen Öffnung für den Läufer. Die gleichmäßig über den Umfang verteilten Ständerwindungen befinden sich in axialen Nuten auf der Innenseite des Blechpaketes.

Die Aufgabe des Isolationssystems ist es, die Leiter untereinander und auch gegen die Eisenbleche des Ständers, zu isolieren.

Die Leiter, sogenannte Spulen oder Stabwicklungen, treten aus den axialen Nuten an den Stirnseiten des Blechpaketes aus und werden in den Wickelköpfen verschaltet. Die Ausführung der Isolierung ist je nach Größe und Alter der Maschine sehr unterschiedlich. [2]

1.2 Geschichtliche Entwicklung der Isolierstoffe und Trägermaterialien

Mit einer Anordnung, die heute als Transformator bezeichnet wird, entdeckte Michael Faraday 1831 das Prinzip der elektrischen Induktion. Zusammen mit der Entdeckung des Elektromagnetismus von Christian Oersted, 11 Jahre zuvor, begann zu dieser Zeit das Zeitalter der elektrischen Maschinen. [3]

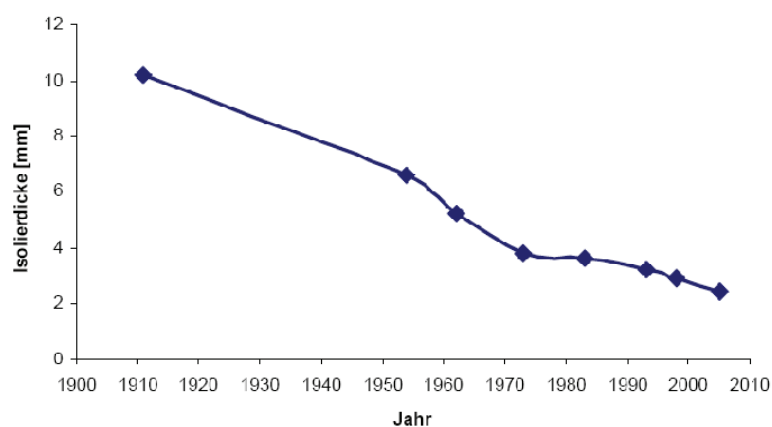


Abb. 1 Entwicklung der Isolationsdicke für $U_n = 10\text{kV}$ [2]

Anfangs wurde die Dicke der elektrischen Isolierungen von Spulen und Stäben rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen durch Versuche empirisch ermittelt. Holz, Kautschuk, Glas und verschiedene Textilien kamen vor allem als Isolationsmittel zum Einsatz. Ab 1858 wurde die Isolierung auch in Bitumen und Asphalt eingebettet. Wegen der experimentellen Isolationsdicke-Ermittlung wurden die Isolationen so stark überdimensioniert, dass ein Maschinenausfall wegen eines Isolationsfehlers eigentlich ausgeschlossen war. Daher sind auch heute noch alte Maschinen anzutreffen, die seit 1900 in Betrieb sind. Heute werden Isolierungen genau berechnet und kaum überdimensioniert. Diese Entwicklung ist in Abb. 1 ersichtlich.

1892 kam erstmals Glimmer als Isolierung zum Einsatz. Eine weitere Verbesserung der Isoliersysteme von Hochspannungsspulen brachte die Entwicklung einer Presse durch die Firma Haefely im Jahre 1910. Ab dieser Zeit wurde Glimmer in Verbindung mit Schellak als Isolierung eingesetzt.

Zur Zeit des 1. Weltkrieges bestanden die Isolationen aus Bitumen und Spaltglimmer auf einem dünnen Zellulosepapier welches als Träger fungierte und beidseitig mit Glimmer beschichtet war. Ab 1940 wurde das Micafolium Isoliersystem eingesetzt. Dies ist eine Kombination aus Spaltglimmer und einem natürlichem Lack. Als Träger diente das sogenannte „Kraft Papier“, ein aus Schellack hergestelltes und verstärktes Papier. Das Vakuum Druck Imprägnier Verfahren (VPI) wurde eingeführt.

Ab 1950 kamen vermehrt verschiedene Glasgewebe wie Glasmatten und auch Polyesterfolien als Trägermaterialien für den Glimmer zum Einsatz. Zu dieser Zeit wurden nur harzreiche Bänder (Resin Rich Systeme) mit Glasgewebe ausgestattet. Heute werden Isolierbänder für alle Herstellverfahren von Hauptisolationen für rotierende elektrische Maschinen mit Glasgeweben als Trägermaterial erzeugt. [4]

Anforderungen die heute an eine Maschinenisolation gestellt werden sind:

- das Standhalten einer elektrische Feldstärke bis zu 3 kV/mm
- eine hohe thermische Belastbarkeit
- eine hohe Durchschlagspannung
- eine Lebensdauer von mindestens 30 Jahren
- ein geringer Verlustfaktor
- eine hohe Resistenz gegen Teilentladungen
- gute Verarbeitbarkeit bei einer hohen mechanischen Festigkeit
- Verwendung umweltfreundlicher Materialien
- Keine Gesundheitsgefährdung
- günstige Kosten

1.3 Aufbau eines Isolationssystems für rotierende Hochspannungsmaschinen

Der prinzipielle Aufbau einer Hochspannungsisolierung einer rotierenden Maschine ist in *Abb. 2* dargestellt.

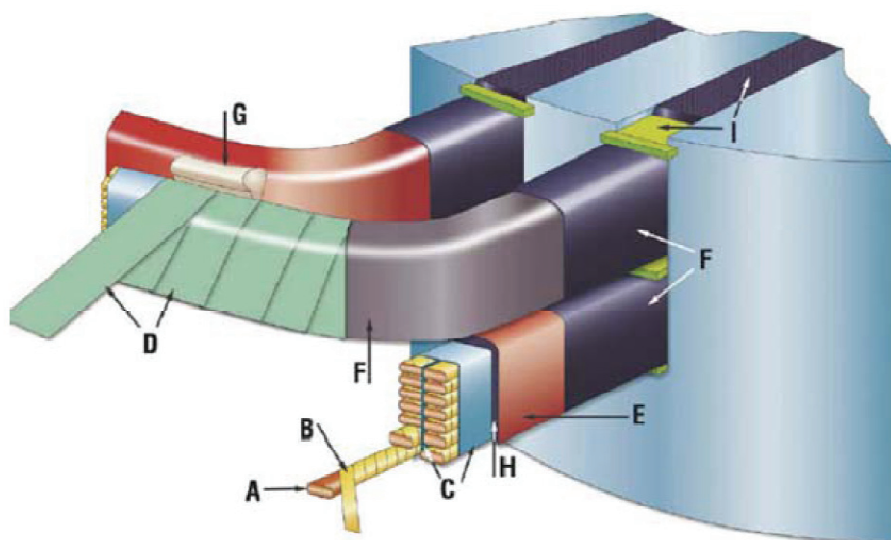


Abb. 2 Aufbau einer Hochspannungsisolierung [3]

Eine Wicklung besteht aus einzelnen Teilleitern (*Abb. 2 „A“*) aus blankem oder lackiertem Kupfer, diese werden mit einer Teilleiterisolierung (*Abb. 2 „B“*) umwickelt. Anschließend kann eine Windungsisolierung (*Abb. 2 „C“*) aufgebracht werden. Diese Isolierung wird nicht von allen Generator- oder Motorherstellern aufgebracht und hat die Aufgabe Windungsschlüsse zu vermeiden.

Die in dieser Arbeit untersuchte Hauptisolierung (*Abb. 2 „H“*) besteht aus einem porösen (bei der VPI Herstellung) oder harzreichen (bei der RR Herstellung) Isolationsband. Bestandteile der Bänder für die Hauptisolierung sind Glimmer als Isoliermedium, verschiedenartige Trägermaterialien, wie Glas-PET-Folien oder Vliese, und Harz zur Verbindung und Hohlraumfüllung. Die Lagenanzahl der Hauptisolierung richtet sich nach der Betriebsfeldstärke der Maschine. Die Hauptaufgabe der Hauptisolierung ist Kurzschlüsse zwischen Leiter und Blechpaket zu verhindern.

Zur Verhinderung von Teilentladungen in möglichen Hohlräumen zwischen Hauptisolierung und Blechpaket werden im Nutteil der Maschine leitfähige Bänder (*Abb. 2 „F- schwarz“*) als letzte Lage auf den Stab aufgewickelt. Dadurch wird Blechpaket und Isolieroberfläche auf dasselbe Potential gebracht und somit werden alle Hohlräume kurzgeschlossen und Nutentladungen werden vermieden. Für Betriebsspannungen über 6 kV, wird zusätzlich ein halbleitendes Band (*Abb. 2 „F- grau“*) vom Nutausgang in Richtung Wickelkopf aufgebracht. Dieser sogenannte Endenglimmschutz dient zur Spannungssteuerung am Nutausgang.

Am Wickelkopf wird zum Schutz gegen diverse Umwelteinflüsse, wie beispielsweise Staub, Luftfeuchte, Öl ein Schutzband (*Abb. 2 „E“*) aufgewickelt. Dieses schrumpft in der Regel während des Aushärtens des Stators und bildet so eine versiegelte Oberfläche.

Zur Befestigung der Stäbe im Stator werden zusätzlich werden noch diverse Hilfsmaterialien wie Nutverschlusskeile (*Abb. 2 „I“*) und verschiedene andere Keile (*Abb. 2 „G“*) benötigt. Schäden durch Scheuern auf Grund von Vibrationen im Betrieb, sowie Schäden durch die großen mechanischen Kräfte im Kurzschlussfall, können so vermieden werden.

2 VERLUSTFAKTOR MESSUNG

Mit der Messung und Kenntnis des Verlustfaktors $\tan \delta$ eines Isolationssystems einer rotierenden Hochspannungsmaschine ist eine gute Fertigungskontrolle der Isolation möglich. Es kann so auf den Imprägnierungsgrad der Isolierung geschlossen werden wie auch auf Delaminierungen, Hohlräume und Ablösungen der Glimmerbänder vom Kupferstab. Umso kleiner der Anfangswert der Verlustfaktormessung ist, umso besser ist das Isoliersystem ausgehärtet. Eine gute Isolierung weist einen geringen Verlustfaktoranstieg auf. Es ist jedoch nicht möglich über den Verlustfaktoranstieg im Betrieb einen Rückschluss auf die Restlebensdauer der Isolation zu ziehen. [5]

Das Isoliersystem einer rotierenden Hochspannungsmaschine kann vereinfacht als eine Verlustbehaftete Kapazität betrachtet werden. Das würde heißen, dass der Strom I der Spannung U bei Betrieb mit Wechselstrom um 90° voraus eilen müsste. Das ist aber real nicht zu beobachten weil neben dem kapazitiven Ladestrom auch noch ein Wirkstrom fließt. Daher weicht der Phasenwinkel ϕ um den sogenannten Verlustwinkel δ vom idealen Phasenwinkel (90°) ab.

Dieser Wirkstrom I_δ ist mit der Spannung U in Phase und stellt die im Dielektrikum umgesetzte Wirkleistung dar. Daraus ergibt sich die dielektrische Verlustleistung P_δ . Die Ursachen für den Strom I_δ in der Isolierung sind:

- Polarisationsverluste
- Leitfähigkeitsverluste
- Verluste wegen Teilentladungen (Ionisationsverluste)

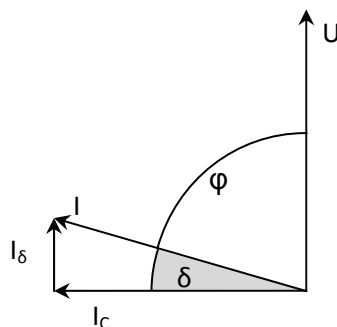


Abb. 3 Komplexes Strom- Spannungs- Zeigerdiagramm

Aus Abb. 3 ist folgender Zusammenhang ersichtlich:

$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_c}$$

Formel 1 Verlustfaktor

Setzt man die Zusammenhänge für die Verlustleistung im Dielektrikum $P_\delta = U \cdot I_\delta$ und der kapazitiven Blindleistung im Dielektrikum $Q_c = U \cdot I_c$ in Formel 1 ein, dann ergibt sich:

$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_c} = \frac{\frac{P_\delta}{U}}{\frac{Q_c}{U}} = \frac{P_\delta}{Q_c}$$

Formel 2 Verlustfaktor ausgedrückt über die Leistungen

Der Verlustfaktor $\tan\delta$ gibt also nicht nur das Verhältnis von Wirkstrom zu Blindstrom in einem Dielektrikum an, sondern auch das Verhältnis von der dielektrischen Verlustleistung P_δ zur kapazitiven Blindleistung Q_C .

Der Verlustfaktor ist eine Materialgröße und wird von den Polarisationsverlusten, den Leitfähigkeitsverlusten und den Ionisationsverlusten (TE) bestimmt.

Der dielektrische Verlustfaktor enthält also 3 Komponenten:

$$\tan\delta = \tan\delta_L + \tan\delta_p + \tan\delta_{TE}$$

Formel 3 Verlustfaktor ausgedrückt durch seine 3 Komponenten

wobei $\tan\delta_L$ die Leitfähigkeitsverluste, $\tan\delta_p$ die Polarisationsverluste und $\tan\delta_{TE}$ die Ionisationsverluste auf Grund von Teilentladungen beschreibt. Ionisationsverluste können also nur bei Existenz von Teilentladungen auftreten.

Für das Isolationssystem einer rotierenden elektrischen Maschine können folgende Kenngrößen aus der Verlustfaktormessung gewonnen werden:

- *Verlustfaktor $\tan\delta$*
Der Verlustfaktor selbst gibt Aufschluss über die in der Isolierung auftretenden Verluste wird aber auch verwendet, um alterungsbedingte Veränderungen im Isoliersystem quantifizieren zu können.
- *Verlustfaktoranzangswert $\tan\delta_{0,2}$*
Das ist der erste bei der Verlustfaktormessung aufgenommene Wert bei $0,2 U_N$. Der $\tan\delta_{0,2}$ Wert wird hauptsächlich vom Durchgangswiderstand der Isolierung bestimmt. Für den $\tan\delta_{0,2}$ Wert können Maximalwerte definiert werden. Ein häufiger angewandter Wert liegt bei $10,0 \text{ ‰}$.
- *Verlustfaktoranstieg $\Delta\tan\delta/0,2 U_n$*
Der Anstieg des Verlustfaktors bei höheren Spannungen wird durch einsetzende Teilentladungen verursacht, die in Luft oder Gasblasen innerhalb der Isolierung auftreten können. Auch für den $\Delta\tan\delta$ Wert können Grenzwerte festgelegt werden.

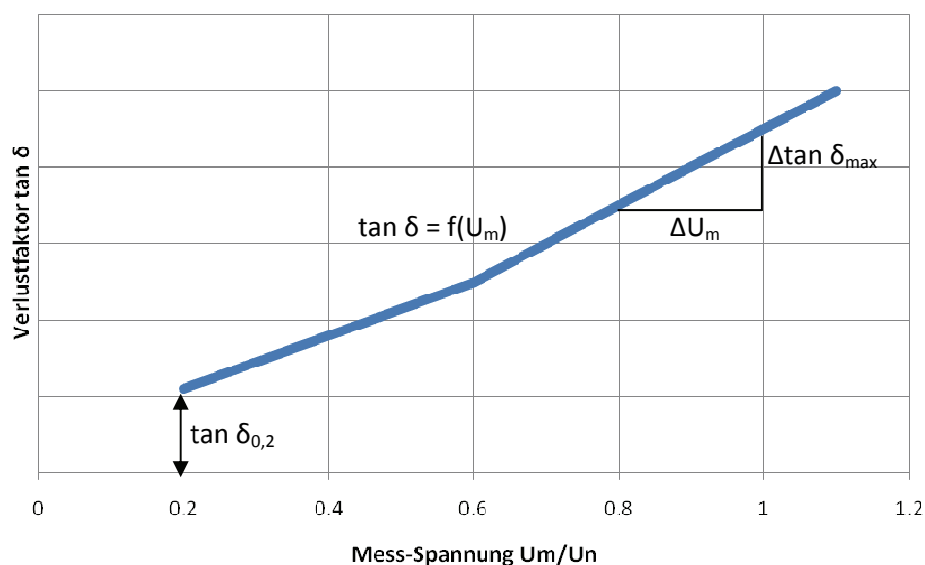


Abb. 4 Verlustfaktorkenngrößen in Abhängigkeit von der Messspannung

Laut Norm DIN EN 50209 sind die in *Tabelle 1* [6] dargestellten Grenzwerte für Verlustfaktormessung zulässig:

Tabelle 1 Höchstzulässige Werte der Verlustfaktormessung nach DIN EN 50209 [6]

	$\tan \delta_{0,2}$	$\frac{1}{2} (\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2})$		$\tan \delta$ je Messintervall ($0,2 U_N$)	
Anzahl der Prüflinge	Alle Prüflinge	95 %	restliche 5 %	95 %	restliche 5 %
		der Prüflinge		der Prüflinge	
max. Anstieg	30 ‰	2,5 ‰	3 ‰	5 ‰	6 ‰

Da besonders sorgfältig unter Laborbedingungen gefertigt wurde, war es möglich bei der vorliegend Arbeit viel niedrigere Qualitätsgrenzen zu erreichen. Der Grund für die viel niedriger angesetzten Grenzen war das Ziel möglichst gleichmäßige und gute Ausgangsbedingungen für die gesamte Testreihe zu schaffen.

2.1 Messprinzip

Die Messung des Verlustfaktors erfolgte mit einer $\tan \delta$ Messbrücke nach Schering, der sogenannten Schering-Brücke. Vorteil dieser Brücke ist, dass der Generatorstab auf Hochspannungspotential liegt, also real beansprucht wird. Die Ionisationsverluste können also erfasst werden. Die Abgleichinstrumente der Brücke liegen auf Niederspannung.

Die Messung des Verlustfaktors erfolgte in $0,2 U_N$ Schritten von $0,2 U_N$ bis $1,2 U_N$ bei Raumtemperatur. Der Prüfstab wurde über den Hochspannungstransformator mit Spannung versorgt.

Der Effekt der Oberflächenströme wurde mit Hilfe einer Schutzringanordnung, [7] welche die Oberflächenströme gegen Masse ableiteten, minimiert. Für den Normalkondensator C_N ist eine möglichst verlustarme genau bekannte Kapazität einzusetzen.

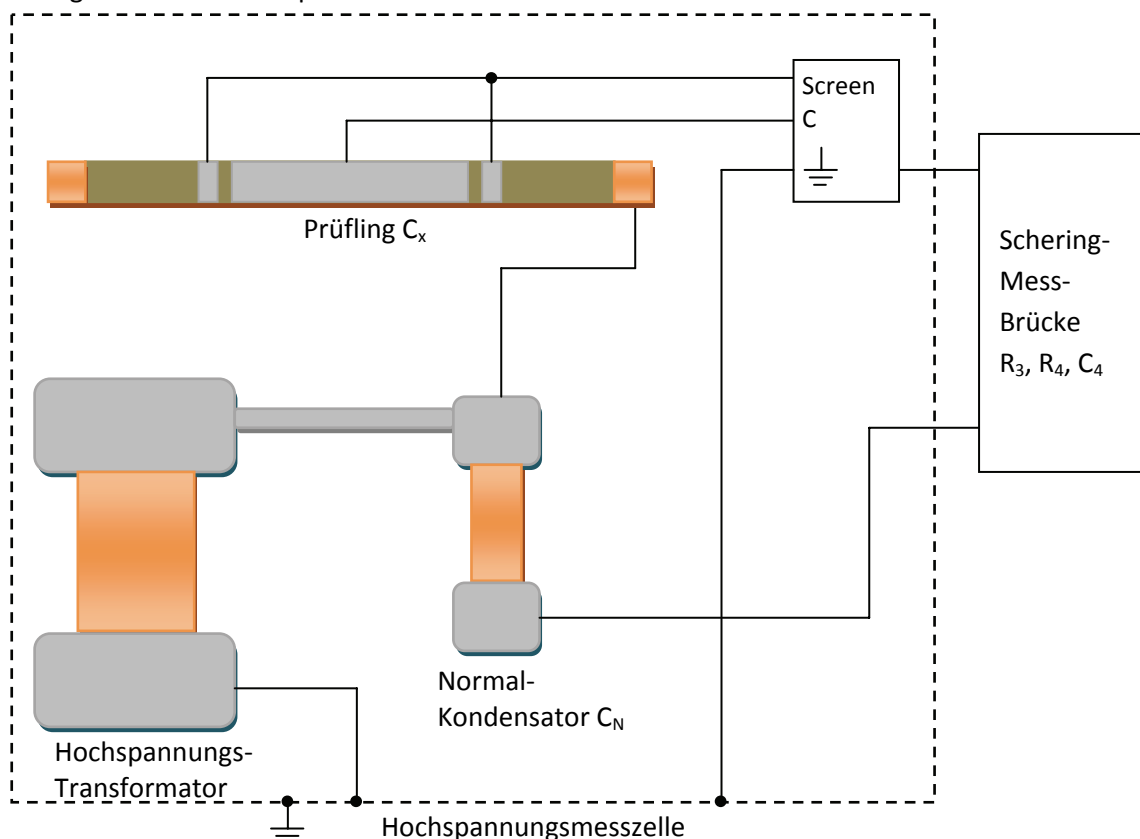


Abb. 5 Schematischer Aufbau der $\tan \delta$ Messung mit Schering Brücke

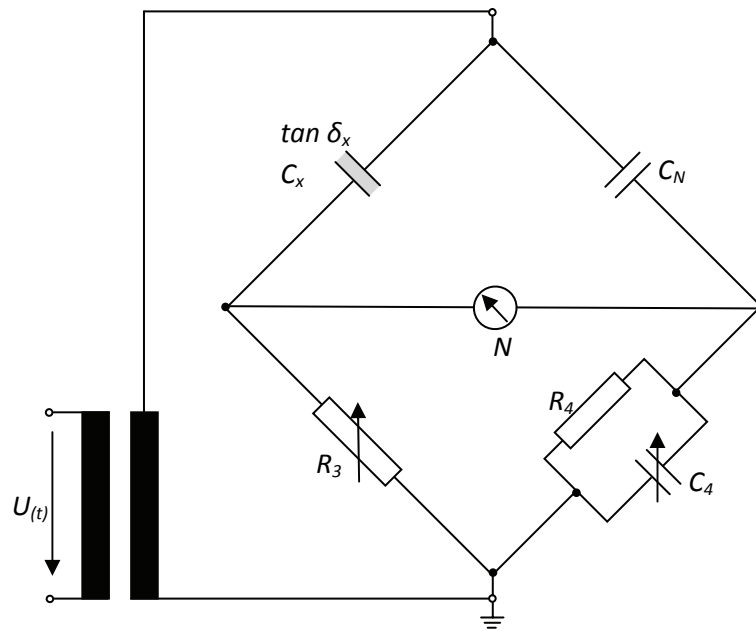


Abb. 6 Schaltung der Schering- Brücke [4]

Das Nullinstrument N zeigt keine Spannung an wenn der Abgleich der Schering- Brücke gegeben ist:

$$\frac{Z_X}{Z_3} = \frac{Z_N}{Z_4}$$

Formel 4

Setzt man in die Abgleichbedingung die Impedanzen aus dem Reihenersatzschaltbild in Abb. 6 Schaltung der Schering- Brücke ein, so erhält man:

$$\frac{R_X + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_X}}{R_3} = \frac{j \cdot \omega \cdot C_N}{1 + j \cdot \omega \cdot C_4 \cdot R_4}$$

Nach der Aufspaltung in Real und Imaginärteil ergibt sich für den Realteil:

$$R_X = \frac{R_3 \cdot C_4}{C_N}$$

und für den Imaginärteil:

$$C_X = \frac{C_N \cdot R_4}{R_3}$$

Das heißt der Verlustfaktor lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\tan \delta = \frac{R_x}{\frac{1}{\omega \cdot C_x}} = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot C_4 \cdot R_4$$

Der Verlustfaktor konnte auf Grund der Verschaltung der Schering- Brücke nach dem Abgleich direkt abgelesen werden.

3 TEILENTLADUNGSMESSUNG

Eine Teilentladung (TE) ist eine elektrische Entladung, die das Isoliermedium nur teilweise überbrückt und nicht sofort zum Durchschlag führt. Teilentladungen beeinträchtigen die kurzzeitige elektrische Festigkeit nicht, können aber Erosionen hervorrufen, die die elektrische Lebenszeit eines Isolationsystems verkürzen. Nur an Stellen wo inhomogene Feldverläufe auftreten, beispielsweise an den Kanten der Generatorstäbe (Mehr dazu siehe Kapitel 6.2.1 *Einfluss des Stabradius auf den elektrischen Feldverlauf*) ist mit Teilentladungen zu rechnen. Das Teilentladungsverhalten ist daher ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung der Isolationsqualität eines Isoliersystems. Die Intensität der Teilentladungen und andere mit TE's zusammenhängende Größen werden in der Regel bei der 1-Minuten Stehspannungsprüfung ermittelt. Daher wurden die Teilentladungen der gefertigten Generatorstäbe bei der hier dokumentierten Arbeit auch während der Stehspannungsprüfung gemessen. Mehr dazu siehe Kapitel 9 *Praktische Teilentladungsmessung*.

Es wird zwischen mehreren Arten von Teilentladungen unterschieden:

- Äußere Teilentladungen:

Als äußere Teilentladungen werden Entladungen an Oberflächen von freien Elektroden in den umgebenden Raum bezeichnet. Sie treten stets im Bereich des Spannungsmaximums auf, wenn die angelegte Spannung höher als die TE Einsetzspannung ist.

Die TE Entladungen sind eine dichte Folge von Stromimpulsen die in der Entladungsstrecke eine Teilkapazität entladen und als Stromimpulse im äußeren geschlossenen Stromkreis auf treten. Die Entladungen treten in relativ regelmäßigen Abständen auf, weil nach einer erfolgten Entladung die gebildeten Raumladungen erst wegdriften müssen, um einen neuerlichen Entladeimpuls zu ermöglichen. Man spricht von sogenannten Trichel Impulsen. [2]

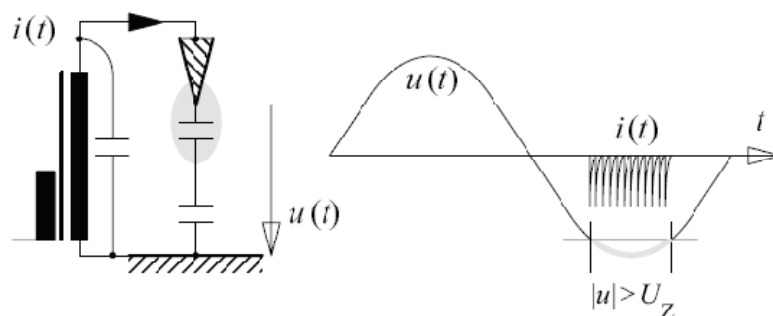


Abb. 7 Äußere Teilentladung in einer gasisolierten Anordnung [2]

- Innere Teilentladungen:

Teilentladungen innerhalb des Isoliermediums werden als innere Teilentladungen bezeichnet. Sie entstehen durch Inhomogenitäten hervorgerufen durch Fehlstellen innerhalb des Isoliermediums, beispielsweise Lufteinschlüsse innerhalb eines festen Isoliermittels wie Harz. Im Bereich der „Luftblase“ ist die elektrische Festigkeit viel kleiner als im umgebenden Medium. Im Fall von Luft und Harz wäre das Isoliervermögen vom Harz circa das 10-fache von dem von Luft. Im Weiteren wird die Hohlstelle auch noch durch die Feldverdrängung zusätzlich stärker belastet. Hat eine Glimmerisolation ungefähr ein $\epsilon_r = 4$ bis 5 liegt das ϵ_r von Luft bei eins. So wird das Feld im Verhältnis 4 bis 5-mal stärker in die Luftblase gedrängt. Wird das Isoliervermögen der Fehlstelle überschritten kommt es innerhalb dieser Fehlstelle zu einem Durchschlag, einem sogenannten inneren Teilentladungsimpuls.

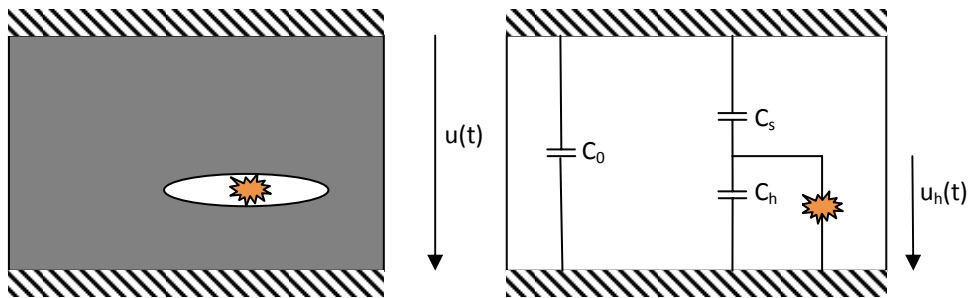


Abb. 8 links: Isolierstoff mit Hohlraum und Teilentladung
rechts: Ersatzschaltbild der Isolation mit Hauptkapazität C_0 , Serienskapazität C_s und Hohlraumkapazität C_h

Innere Teilentladungen setzen ab einem gewissen Level, bei dem die Isolationsfestigkeit der Fehlerstelle überschritten wird, der sogenannten Zündspannung, ein. Der Lichtbogen in der Fehlerstelle brennt bis die Löschespannung erreicht ist. Steigt die äußere Spannung $u(t)$ weiter wird die Zündspannung aufs Neue erreicht und es kommt wieder zu einer Teilentladung. Dieser Vorgang wiederholt sich etwa bis zum Spannungsmaximum der äußeren Spannung und beginnt beim nächsten Nulldurchgang wieder von vorne.

Innere Teilentladungen treten also vermehrt im Spannungsnulldurchgang der äußeren Spannung auf.

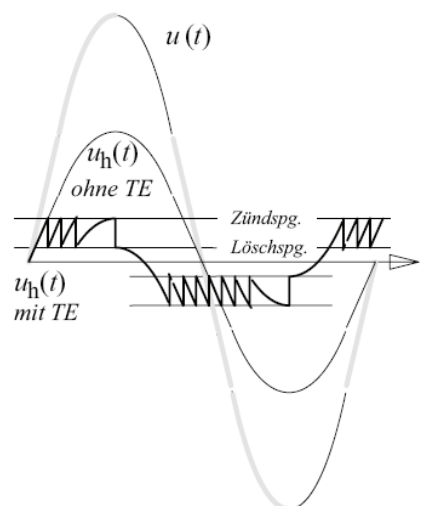


Abb. 9 Spannungsverläufe bei Inneren- und Oberflächen- Teilentladungen [8]

○ Oberflächenentladungen:

Teilentladungen an der Grenzschicht zwischen zwei aneinander liegenden Isoliermedien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften nennt man Oberflächen- oder auch Gleitentladungen. Diese können auch mit dem Ersatzschaltbild für innere Teilentladungen beschrieben werden. Sie treten vor allem in der negativen Halbwellen auf.

Bei erhöhter Spannung können Oberflächenentladungen durch die Bildung von so genannten Streamern große Längen überbrücken. [8]

3.1 Wirkungen von Teilentladungen

Teilentladungen können nur im inhomogenen Feld auftreten. Im homogenen Feld kommt es im Normalfall sofort zum vollkommenen Durchschlag. Die Inhomogenitäten sind in festen Isoliersystemen, also zum Beispiel einer Maschinenisolierung, fast immer Hohlräumen im Dielektrikum oder andere (scharf)-kantige Stellen auf Grund von mechanischer Abnutzung oder anderen Beanspruchungen. Auch Falten die beim Wickeln entstehen können stellen Inhomogenitäten dar.

Auf Grund des Herstellungsprozesses und der makroskopischen Struktur des Isoliersystems sind Hohlräume und Inhomogenitäten nie vollständig auszuschließen und es ergeben sich daher schon geringe Teilentladungspegel bei neuen Isolierungen.

Die Auswirkungen der eingepprägten Energie der einzelnen Teilentladungen sind vielfältig und können für das Isoliermedium schädigend sein. In den meisten Fällen führen Teilentladungen zur Verschlechterung der Isolation und somit zu einer Verringerung der elektrischen Festigkeit. Diese Schädigungsmechanismen führen oft frühzeitig zu einer elektrisch und/oder thermisch bedingten Alterung. Trotz des geringen Energieumsatzes der einzelnen Entladungen verursachen Teilentladungen je nach Isoliermaterial Veränderungen der Werkstoffeigenschaften, die Auswirkungen auf die Lebensdauer haben.

Die Auswirkungen von Teilentladungen sind: [9]

- Erwärmung
- Druckerhöhung in den Entladestellen führt zu erhöhter mechanischer Spannung die zu Spalten führen können, aber auch das Isoliersystem mechanisch zerstören kann
- Chemische Veränderungen durch Zersetzung des Isoliermediums und mögliche Entstehung aggressiver Verbindungen wie Ozon
- Strahlung im sichtbaren- und im UV Bereich
- Erzeugung hochfrequenter Störungen
- Stromimpulse in der Zuleitung
- Raumladungen können auf Grund von TE's im Isoliersystem entstehen und einen Durchschlag begünstigen
- chemische Bindungen von Polymeren können durch die Ionisationsenergie der Teilentladungen aufgebrochen werden [10]

Zu Beachten ist, dass unterschiedliche Werk- und Isolierstoffe auch unterschiedlich stark anfällig für Teilentladungen sind. Das Isoliersystem rotierender elektrischer Maschinen besteht aus mehreren Komponenten. Während der Glimmer und das Glas praktisch teilentladungsresistent sind, wird das in der Isolation enthaltene Harz durch Teilentladungen stark in Mitleidenschaft gezogen.

Der oben letzte Punkt der Auswirkungen von Teilentladungen kann für die Zersetzung des Isolationsmaterials entscheidend sein. Die durch die Teilentladungen freiwerdende Energie kann 10 bis 20 eV erreichen. Abhängig vom Bindungstyp des verwendeten Polymeres reichen ungefähr 5 eV zur Aufspaltung der langen Polymerketten. [10]

Der Isolierstoff wird so also durch die Energie der Teilentladungen zersetzt.

Eine weitere für die Messung von Teilentladungen nicht uninteressante Wirkung der TE's ist die Bildung von Kohlenstoffbrücken in Hohlstellen. So kann es vorkommen dass bei einer neuerlichen Messung nach einer Spannungsbelastung der TE Pegel niedriger ist als vorher. Die bei der vorigen Messung eventuell entstandenen leitfähigen Kohlenstoffbrücken haben den Hohlraum überbrückt und somit kurzgeschlossen. Wird der Stab wieder geprüft tritt also an dieser beschriebenen Stelle keine Teilentladung mehr auf und der gemessene Pegel erscheint so im Gesamten kleiner.

Wie oben angeführt ist eine mögliche Wirkung von Teilentladungen die Druckerhöhung innerhalb der Hohlstellen die für innere Teilentladungen verantwortlich sind. Das hat mehrere Auswirkungen die mit dem Gesetz von Paschen erklärbar sind.

Das Paschengesetz besagt, dass die Durchschlagsfestigkeit von Gasen mit höherem Druck steigt weil laut Paschen die Durchschlagsspannung eine Funktion des Produktes aus Druck und Elektrodenabstand ist. Wie bereits erwähnt ist es durch eine Teilentladung möglich, dass sich der Druck in einer Hohlstelle innerhalb der Isolation erhöht. Somit erhöht sich nach Paschen auch die Durchschlagsfestigkeit dieses Hohlraumes.

Dies kann zu mehreren Phänomenen führen wenn Stäbe öfter gemessen werden.

So ist es möglich dass die TE Einsatzspannung bei aufeinander folgenden Prüfungen durch diesen Effekt steigt. Die bei der Ersten TE Messung festgestellte TE Einsatzspannung reicht bei der folgenden auf Grund der Erhöhung der Durchschlagsspannung durch die Druckerhöhung in der Hohlstelle nicht mehr aus damit TE's zünden können. Der Einsatz erfolgt also erst bei einer etwas höheren Spannung. Dieses Phänomen wurde im Zuge dieser Arbeit auch beobachtet und ist in Kapitel 9.2 dargestellt.

Die Erhöhung der Spannungsfestigkeit in den Hohlstellen durch die stattfindenden Teilentladungen kann auch noch zu einem zweiten Effekt führen.

Wird ein Stab geprüft und hochgefahren kann die TE Einsatzspannung ermittelt werden. Wird nach der Teilentladungsmessung die zum Beispiel eine Minute gedauert hat die Prüfspannung wieder herunter gefahren kann man dabei die TE Aussetzspannung bestimmen.

Hat der Prüfling hauptsächlich innere Teilentladungen kann die Aussetzspannung höher sein als die Einsatzspannung der Teilentladungen. Die Erklärung dafür ist auch im Paschengesetz zu suchen. Während der Prüfung steigt auf Grund der Druckerhöhung in den Hohlstellen die Spannungsfestigkeit. Das bedeutet dass beim Senken der Prüfspannung die Teilentladungen bei einer höheren Spannung verlöschen als sie beim Hochregeln eingesetzt haben. Die Aussetzspannung ist so dann höher als die Einsatzspannung vorher war.

3.2 Elektrisches Messprinzip

Die elektrische Teilentladungsmessung ist die einzige kalibrierbare Messmöglichkeit mit der die gemessenen Teilentladungen auch quantifiziert werden können.

Der Messaufbau zum elektrischen Erfassen der sehr schnellen und steilflankigen Teilentladungsimpulse besteht aus einer Prüftransformator, dem Prüfling C_p , einem Koppelkondensator C_k , einem Koppelvierpol sowie einem geeignetem Messsystem.

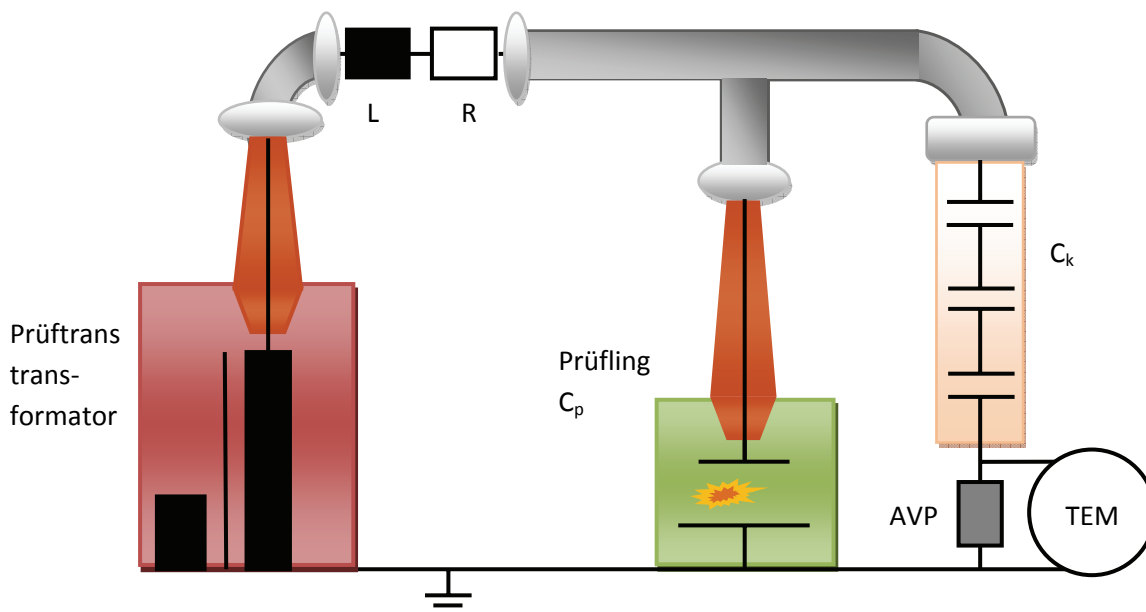


Abb. 10 Schematischer Aufbau eines Teilentladungsmesssystems; nach [2]

Zur Erzielung eines guten Ergebnisses soll der Prüfaufbau möglichst TE- frei sein, scharfe Kanten und kleine Querschnitte der Leitungen sind zu vermeiden. Gegebenenfalls muss in einem geschirmten Labor gemessen werden.

Die TE Impulse weisen ein breites Frequenzspektrum auf. Die Auskopplung der Teilentladungsimpulse erfolgt über den Koppelkondensator C_k . Über einem Ankopplungsvierpol (Z_m) kann der TE-Stromimpuls als Spannungsimpuls erfasst werden.

Natürlich fließt nicht der gesamte Stromimpuls über den Koppelkondensator. Der Stromkreis schließt sich auch über die Umgebung, den Trafo und andere Wege. Das heißt der über C_k fließende Puls und somit auch die gemessene Ladung entspricht nicht der an der TE Stelle tatsächlich genau umgesetzten Ladungsmenge. Man spricht daher von der scheinbaren Ladung q , die mit dem Messsystem erfasst werden kann.

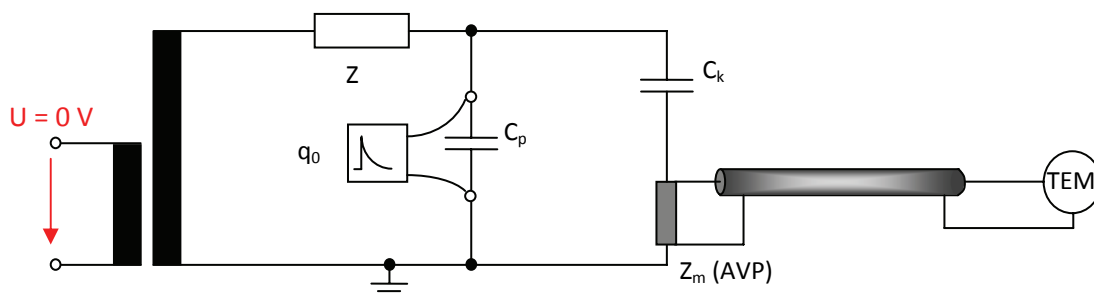


Abb. 11 Schaltung zur TE Messung mit Kalibrator zum Kalibrieren der Messung [8]

Um Messwerte in pC zu erhalten, muss der Messkreis vor der eigentlichen Messung mit einem Kalibrator kalibriert werden. Der Kalibrator wird dafür, wie in Abb. 11 ersichtlich, parallel zum Prüfling in den Messkreis geschaltet. Er erzeugt genau bekannte TE-Ladungsimpulse, q_0 , die mit dem Messsystem erfasst werden. Die gemessene Ladung entspricht nicht der Ladungsmenge q_0 , da wie oben erklärt nicht alle TE-Impulse über den Koppelkondensator fließen. Da die genaue Ladung des Kalibrators aber bekannt ist, kann das Messsystem kalibriert werden indem die gemessene scheinbare Ladung als die eingespeiste Ladungsmenge q_0 angenommen und das System dementsprechend kalibriert wird. Der Prüftrafo bleibt während der Kalibration eingeschaltet aber im spannungslosen Zustand. Sonst würde der empfindliche Kalibrator zerstört werden.

Es ist ersichtlich, dass die gemessene Ladung q immer etwas kleiner sein muss als die tatsächlich durch die Teilentladung herforderufene Ladung.

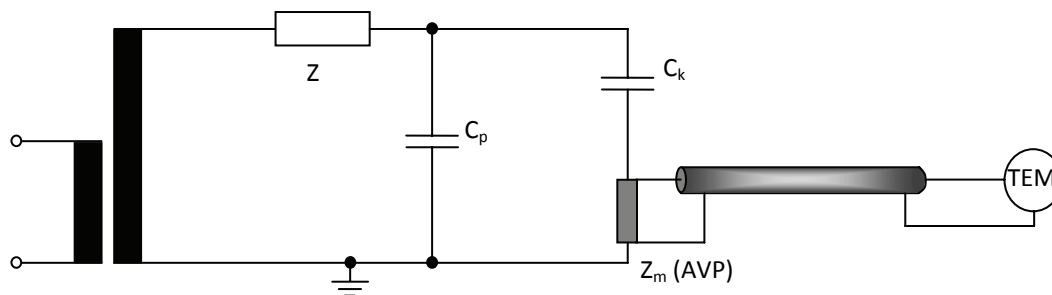


Abb. 12 Schaltung einer TE Messung [8]

In Abb. 12 ist die verwendete Schaltung nach IEC 60270 zur Teilentladungsmessung ersichtlich. Der Ankoppelvierpol Z_m könnte bei ungeerdeten Objekten auch in den Zweig mit dem Prüfling geschaltet werden. Diese Schaltung wäre sogar etwas genauer. Beim Versagen des Prüflings müsste aber mit einer Zerstörung von Z_m gerechnet werden, da in dieser Schaltungsvariante der Koppelvierpol den gesamten Fehlerstrom abbekommen würde. Auch wäre in diesem Fall dann Z_m und somit das Messsystem auf Hochspannungspotential.

Um die Ladung des gemessenen Impulses zu ermitteln, muss das Signal noch integriert werden.

3.3 Teilentladungs- Kenngrößen

Tabelle 2 Kenngrößen der TE Messung [11]

Grundgrößen	Symbol	Einheit
Scheinbare Ladung/ Ladungsintensität	q	pC oder nC
Phasenlage	ϕ	Grad
Impulshäufigkeit	n	Impulse / sec
Einsetzspannung	U_E	V
Aussetzspannung	U_A	V
Polarität	+, -	
Abgeleitete Größen		
Quadratische Ladungsgröße $D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n q_i^2$	D	$(nC)^2 / sec$
Mittelwert des Entladestroms $I = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n q_i $	I	μA
Entladeleistung $P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n q_i \cdot u_i$	P	mW
Kumulierte scheinbare Ladung	q_{KUM}	pC oder nC

- *Scheinbare Ladung bzw. Intensität q*
Stellt die wichtigste Kenngröße für die TE Messung dar. Die scheinbare Ladung ist wie schon erwähnt kleiner als der tatsächliche Ladungsumsatz. Sie ist aber die einzige Möglichkeit einer Quantifizierung, da direkt in der Fehlerstelle innerhalb der Isolation nicht gemessen werden kann. Der Zusammenhang mit der wahren Ladung in der Fehlerstelle ist völlig unbekannt, weil Art, Lage und Größe der Fehlerstelle nicht bekannt sind. Als Kenngröße für die Bewertung der TE- Intensität hat sich die scheinbare Ladung q trotzdem in der Praxis bewährt. [2]
- *Phasenlage φ*
Man kann Rückschlüsse ziehen, ob es sich um innere oder äußere Teilentladungen handelt, wenn die Phasenlage der Teilentladungen in Bezug zur anliegenden Spannung bekannt ist.
- *Impulshäufigkeit n*
Die auftretenden Impulse während einer bestimmten Zeit sind relativ leicht messbar und werden sehr oft zu Auswertungen herangezogen. Durch verschiedene 2 und auch 3 dimensionale Darstellungsmöglichkeiten werden Häufigkeitsverteilungen der Teilentladungen visualisiert. So ergibt die Häufigkeit n aufgetragen über die Phase die bekannten TE Fingerprints.
- *Einsetz und Aussetzspannung U_E, U_A*
Die Einsetzspannung ist jene Grenze aber der Teilentladungen auftreten. Ist U_E über der Nennspannung U_N des Betriebsmittels, ist im Betrieb mit keiner nennenswert hohen Teilentladungsbelastung zu rechnen. Die Aussetzspannung ist die untere Grenze bei deren Unterschreitung die Teilentladungen wieder aussetzen.
- *Kumulierte scheinbare Ladung q_{KUM}*
Kann als Kenngröße für den Fortschritt der Alterung gesehen werden da sich ein starker Anstieg der Kurve zum Lebensdauerende hin ergibt. [12]

3.4 Beurteilung und Interpretation der Messergebnisse

Je nach Ort der Teilentladungen sind charakteristische Größen unterschiedlich und lassen so Rückschlüsse auf Ort und Art der Teilentladung zu (siehe Seite 14).

Der TE Pegel steigt auch mit zunehmendem Alter erheblich an, da durch die lange elektrische Beanspruchung immer mehr Fehler im Isolationssystem entstehen. Um diesen Anstieg quantifizierbar zu machen, muss der Teilentladungspegel in regelmäßigen Abständen immer wieder gemessen werden, um so Trendanalysen zu ermöglichen. Es ist dabei darauf zu achten, dass die einzelnen Messungen immer exakt unter denselben Bedingungen durchgeführt werden, damit ein Vergleich der Messergebnisse zulässig ist. Vermehrt kommen daher auch online Monitoringsysteme zum Einsatz. Sie messen permanent unter denselben Bedingungen und lassen gute Trendanalysen zu.

In der vorliegenden Arbeit wurde vor allem versucht über die durch die einzelnen Teilentladungsimpulse umgesetzte Ladung q und im weiteren die auf Grund von Teilentladungen in der Isolation umgesetzte Energie bzw. Leistung Rückschlüsse auf den Zustand, die Schädigung und die weitere Entwicklung der Isolation zu erhalten.

4 ELEKTRISCHE ALTERUNG

Alterung ist ein irreversibler Prozess, der die Eigenschaften eines Isoliermediums dauerhaft verändert. Neben thermischer, mechanischer und Beanspruchung verursacht durch die Umgebung ist auch die elektrische Belastung von Betriebsmitteln maßgeblich für eine Abnahme der Isolationsfestigkeit mit der Zeit verantwortlich.

Dies geschieht unterschiedlich schnell und hängt vom Isoliermedium selbst und von der Art und Höhe der elektrischen Beanspruchung ab. Vor allem Teilentladungen schädigen das Isoliermittel mit der Zeit massiv.

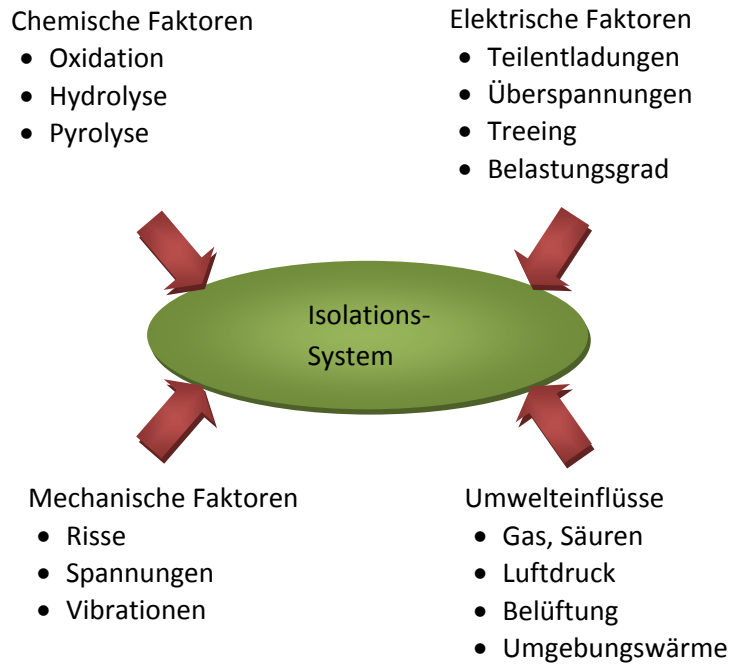


Abb. 13 Alterungsfaktoren nach IEC 60505 [13]

Die elektrische Alterung wird durch elektrische Felder, deren Feldstärke im Isoliersystem Wechselwirkungen hervorrufen kann, verursacht.

Durch die Felder kommt es zu:

- Kriechstrombildung
- Treebildung
- Teilentladungen
- erhöhte Temperaturen
- Raumladungen

Die Geschwindigkeit und Stärke der elektrischen Alterung ist unter anderem von der Art des elektrischen Feldes im Isoliersystem abhängig. Dieses kann ein Gleich-, Wechsel- oder impulsförmiges Feld sowie deren Kombination sein.

Teilentladungen spielen eine wesentliche Rolle, da sie sowohl Ursache aber auch Folge von elektrischer Alterung sind. [16]

Elektrische Alterung ist ein langwieriger Vorgang, der über Jahrzehnte andauert und die Betriebsmittel langsam an ihr Lebensende heranführt.

4.1 Durchschlagsmodell

Die Wicklungsisolation von rotierenden Hochspannungsmaschinen besteht aus mehreren Komponenten. Während der eigentliche Isolierstoff Glimmer und das Trägermaterial Glas sehr gute elektrische Langzeiteigenschaften aufweisen und nahezu teilentladungsresistent sind, ist das organische Bindematerial Harz das schwächste Glied im System. Aufgrund von Feldüberhöhungen beginnt sich ein „electrical tree“ zu bilden und fortzuwachsen. Sind die Glimmerbänder der Isolation in Takt wächst der electrical tree um den Glimmer herum. Man bezeichnet den Glimmer daher auch als „Barrierematerial“. Daher werden Hochspannungsisolierbänder für rotierende elektrische Maschinen meistens halbüberlappt gewickelt, um einen möglichst langen Treeing- Weg zu schaffen.

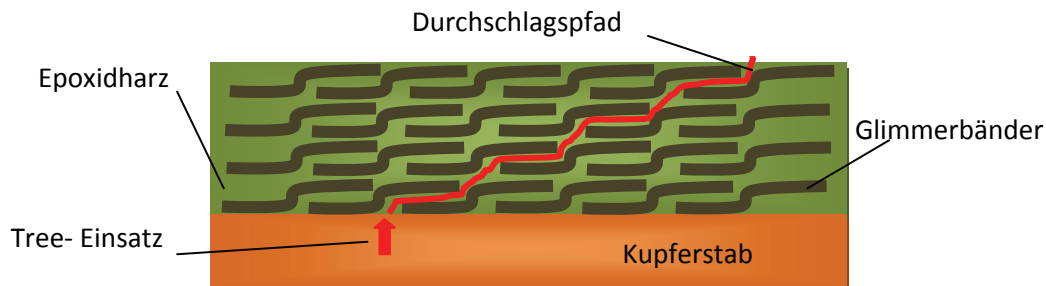


Abb. 14 Detailansicht Generatorstab und 4 Lagen halbüberlappter Isolation mit möglichem „electrical tree“

Der elektrische Durchschlag in der Isolation wird vom „electrical treeing“ bestimmt [12]. Der Prozess des electrical treeings wird in 4 verschiedene Stufen eingeteilt. [12]

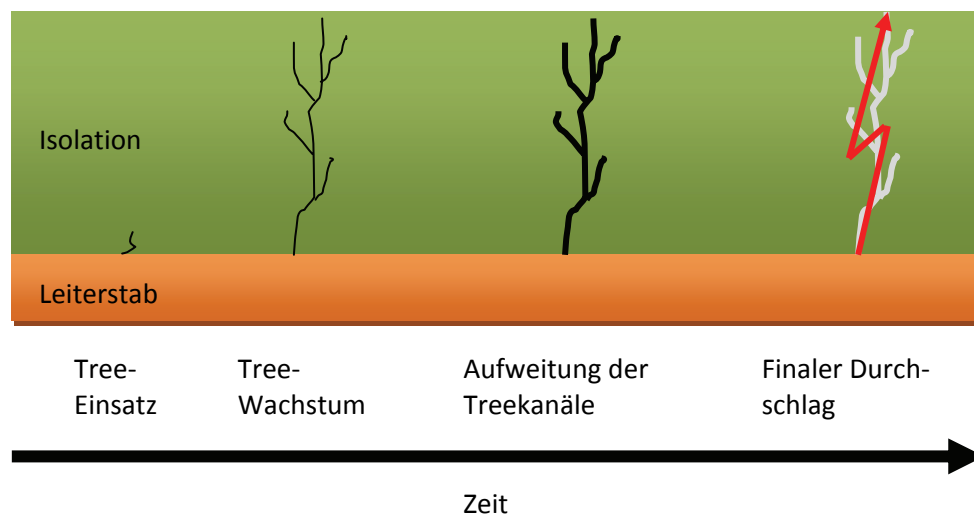


Abb. 15 Entwicklung des electrical treeings im Detail [12]

Auf Grund einer Inhomogenität kommt es zu einer Feldüberhöhung und vermehrten Teilentladungen. Der Fußpunkt des Electrical Trees entsteht. Im weiteren Betrieb wächst der electrical tree weiter in Richtung des Erdpotentials. Die gebildeten kleinen Kanäle weiten sich schließlich aus bis es zum finalen Durchschlag und somit zu Zerstörung der Isolation kommt. [12]

Die geweiteten Kanäle im dritten Schritt führen auch zu größeren Hohlstellen und somit einer höheren Teilentladungsaktivität im Isoliermedium. Diese Steigerung im TE Pegel lässt sich messtechnisch erfassen. Als Beispiel dazu sei auf Kapitel 9.5 verwiesen.

4.2 Dauerspannungsversuche

Um die langwierigen Alterungserscheinungen zu beschleunigen wird das zu untersuchende Betriebsmittel stark höher beansprucht als das im Nennbetrieb wäre. Durch die so stark beschleunigte elektrische Alterung können Alterungsmechanismen in diesen sogenannten Dauerspannungsversuchen modellhaft untersucht werden ohne dass das Betriebsmittel über Jahrzehnte in Betrieb sein muss. Lebensdauerkenlinien können so durch Extrapolation, in gewissen Grenzen, gewonnen werden.

In verschiedenen Normschriften sind die Dauerspannungsversuche genau beschrieben. Wichtigste Parameter dabei sind der Erhöhungsfaktor der elektrischen Beanspruchung des Betriebsmittels und die dabei zu erreichende Betriebsstundenzahl. Es ergeben sich unterschiedlich harte Prüfkriterien.

So sind laut IEEE 1553 mit einem Dauerspannungspegel von 2,17 U_n 400 Stunden Betrieb zu erreichen, um die Prüfung zu bestehen. Bei dem in dieser Arbeit meistens verwendeten Dauerspannungspegel von 2,53 U_n war die Grenze für das Bestehen der Prüfung eine Betriebsdauer von 250 Stunden mit der erhöhten Beanspruchung. [14] Ein weiterer verwendeter Pegel stammt aus der KEMA Normreihe. Bei dieser Prüfung ist mit 3-facher Nennspannung eine Betriebsstundenzahl von 10 Stunden zu erreichen. Die Norm wird gegenwärtig überarbeitet. Im Zuge der Überarbeitung wird diskutiert die zu erreichende Lebensdauergerade für diesen Pegel auf 50 Stunden Betrieb zu erhöhen. Diese mögliche neue Grenze von 50 Stunden wurde den Versuchen dieser Arbeit bereits zu Grunde gelegt. Eine weitere Dauerspannungsprüfung nach KEMA wäre das Erreichen von 1000 Betriebsstunden bei einer elektrischen Beanspruchung von 2 U_n des Betriebsmittels. [14], [15]

4.3 Elektrische Alterungsmodelle

Als Grundlage für beschleunigte Alterungsversuche dienen elektrische Alterungsmodelle.

Zur Beschreibung der elektrischen Alterung bei einer elektrischen Beanspruchung der Betriebsmittel von über 1000 V und Vorhandensein von Teilentladungen [16] sind zwei Modelle gebräuchlich. [17] Die Formeln sind empirisch gefunden und stimmen mit dem realen Verhalten sehr gut überein. Es handelt sich dabei um das Inverse Power Model:

$$L = k \cdot E^{-n}$$

Formel 5 Inverse Power Model

und das für Maschinenisolationen nicht so oft verwendete Exponential Model:

$$L = a \cdot e^{-b \cdot E}$$

Formel 6 Exponential Model

E ist dabei die elektrische Feldstärke und L die elektrische Lebensdauer, also die Zeit bis zum Durchschlag, bei der elektrischen Feldstärke E. Die Konstanten k, n, a, und b müssen dabei experimentell gefunden werden.

Die beiden Alterungsmodelle beschreiben die elektrische Alterung in jedem beliebigen Isoliersystem welches einem elektrischen Feld ausgesetzt ist. Die genau stattfindenden physikalischen und chemischen Prozesse innerhalb der Isolation müssen dabei nicht im Detail bekannt sein.

Mit dem Inverse Power Modell lassen sich Daten die auf einem log-log Papier linear dargestellt sind gut beschreiben. Erhöht sich die elektrische Beanspruchung dann sinkt die Lebensdauer.

Die Steigung der Lebensdauerkennlinie auf log-log Papier dargestellt ergibt dann die Konstante n des in *Formel 5* dargestellten Modells.

Linearisiert man das inverse power model zur Form:

$$\log L = \log k - n \cdot \log E$$

Formel 7 linearisierte Form des Inverse Power Models

kann man dies als Geradengleichungen der Form $y = m \cdot x + b$ auffassen. Wobei die einzelnen Komponenten wie folgt gegeben sind: [18]

$$y = \log L$$

$$x = \log E$$

$$m = -n$$

$$b = \log k$$

Über diese einfache Geradengleichung kann nun die elektrische Lebensdauer auf Grund von elektrischer Alterung bestimmt werden.

Elektrische Lebensdauer der Referenzstäbe

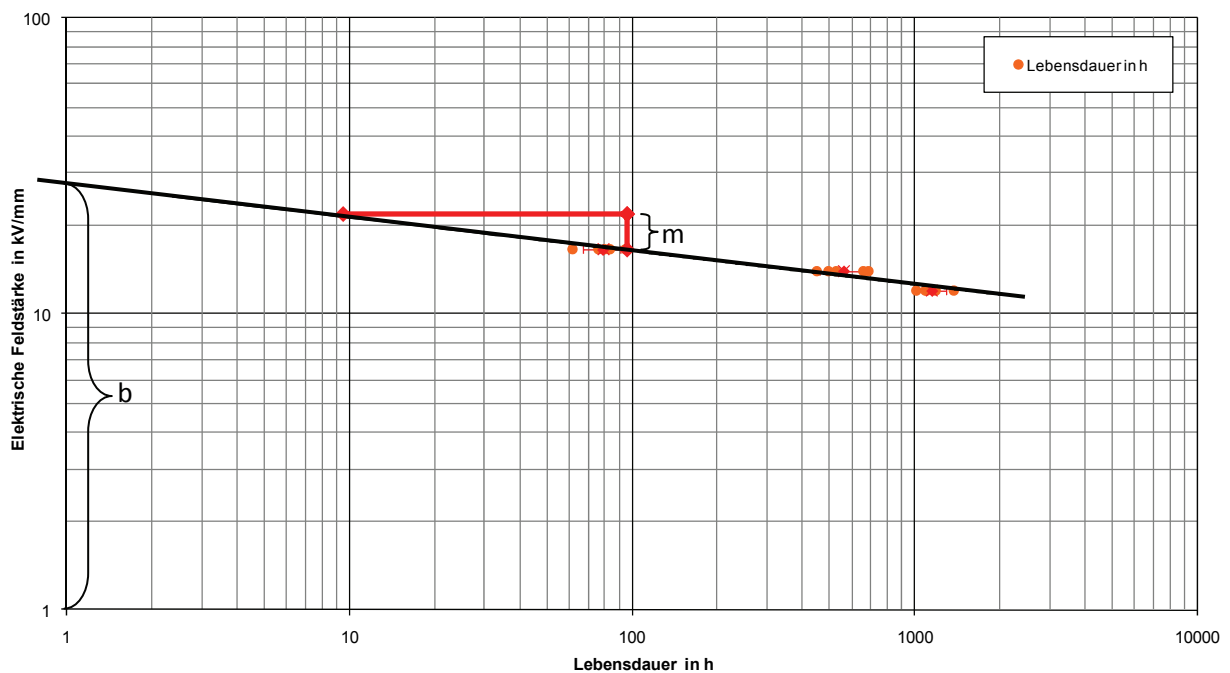


Abb. 16 Lebensdauerkennlinie gewonnen aus Dauerspannungsversuchen mit angewendetem Inverse Power Model

In *Abb. 16* sind die Lebensdauern von 3 verschiedenen Dauerspannungspegeln auf log-log-Papier dargestellt. Die aus den Messwerten extrapolierte Lebensdauerlinie folgt nach dem inverse power model dem in *Formel 7* dargestellten Zusammenhang. Die Konstanten b und m können wie dargestellt aus dem Diagramm entnommen werden. Setzt man für $\log E$ die elektrische Feldstärke ein bei deren Beanspruchung die Lebensdauer des Betriebsmittels berechnet werden soll, ist es nun möglich die nach dem Modell zu erwartende Lebensdauer zu bestimmen, da nun alle Größen aus *Formel 7* bekannt sind.

4.4 Darstellung der Lebensdauerzeiten mittels Weibullverteilung

Die Weibull-Verteilung ist eine nach unten beschränkte Extremwertverteilung und kommt im Kapitel 9.4 zum Einsatz. Sie eignet sich besonders für die Beschreibung von Durchschlagvorgängen, für die eine minimale Durchschlagspannung als unterer Extremwert x_0 bzw. als auch Stehspannung angenommen werden kann. [2]

Aus der Vorstellung, dass das betrachtete Ereignis (z.B. Durchschlag einer Anordnung) als Extremwert aller möglichen Ereignisse eintritt, ergibt sich folgender Ausdruck für die Verteilungsfunktion:

$$F(t; \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left\{\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\}}$$

Formel 8 Verteilfunktion der Weibullverteilung [19]

t ist die gemessene Variable, meistens die Zeit bis zum Durchschlag oder auch die Durchschlagsspannung

$F(t)$ Fehlerwahrscheinlichkeit bei einer gewissen Spannung oder Betriebsdauer

α, β Weibullparameter

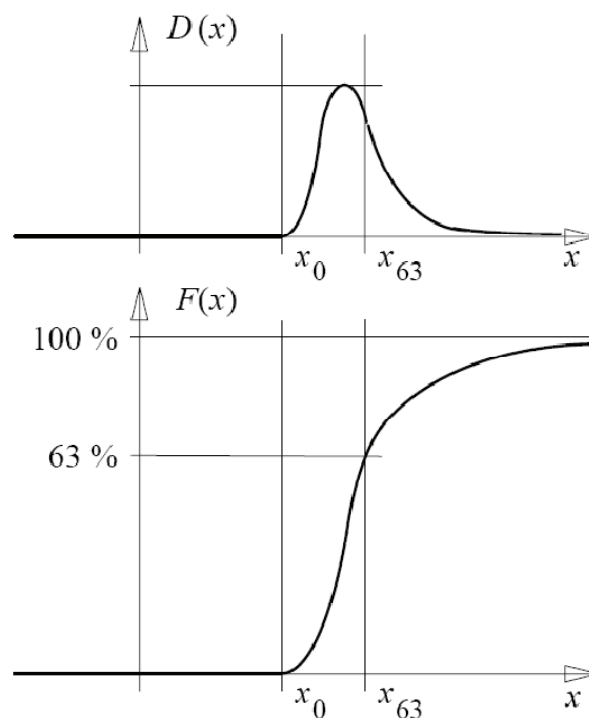


Abb. 17 Weibull-Verteilung mit Dichtefunktion $D(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ [2]

Der Weibullparameter α repräsentiert die Zeit oder auch die Spannung, bei der die Fehlerwahrscheinlichkeit bei 0,623 liegt. Bei diesem sogenannten 63 % Quantil hat die Dichtefunktion ihr Maximum. Es stellt den Mittelwert der Weibullverteilung der Versuchsreihe dar.

Der Parameter β ist ein Maß für die Streuung. Je größer dieser Wert ist, umso kleiner ist die Streuung der Versuchsreihe.

Die Weibull-Verteilung kann durch die drei Parameter Anfangswert x_0 , 63 %-Wert x_{63} und dem Weibull-Exponenten β an das Summenhäufigkeitspolygon einer Messreihe angepasst werden. So ist eine bessere Anpassung an die empirische Verteilungsfunktion möglich, als mit der Normalverteilung.

Ein Schätzwert für den 63 %-Wert kann direkt aus dem Summenhäufigkeitspolygon entnommen werden. Auch derer Anfangswert x_0 kann aus dem Summenhäufigkeitspolygon abgelesen werden. Allerdings besteht, besonders bei kleinem Stichprobenumfang, eine große Unsicherheit bezüglich dieser Festlegung. Um Fehlschlüsse zu vermeiden, muss für den Anfangswert x_0 ein kleinerer Wert gewählt werden. Oft wird daher $x_0 = 0$ gesetzt und man kommt damit zur zweiparametrischen Weibull-Verteilung. Der Weibull-Exponent β kann als Geradensteigung in einer doppelt logarithmischen Darstellung abgeschätzt werden.

Die Darstellung der Weibullverteilung erfolgt in einem Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmisch geteilten Achsen. Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Programm xsel10. [20]

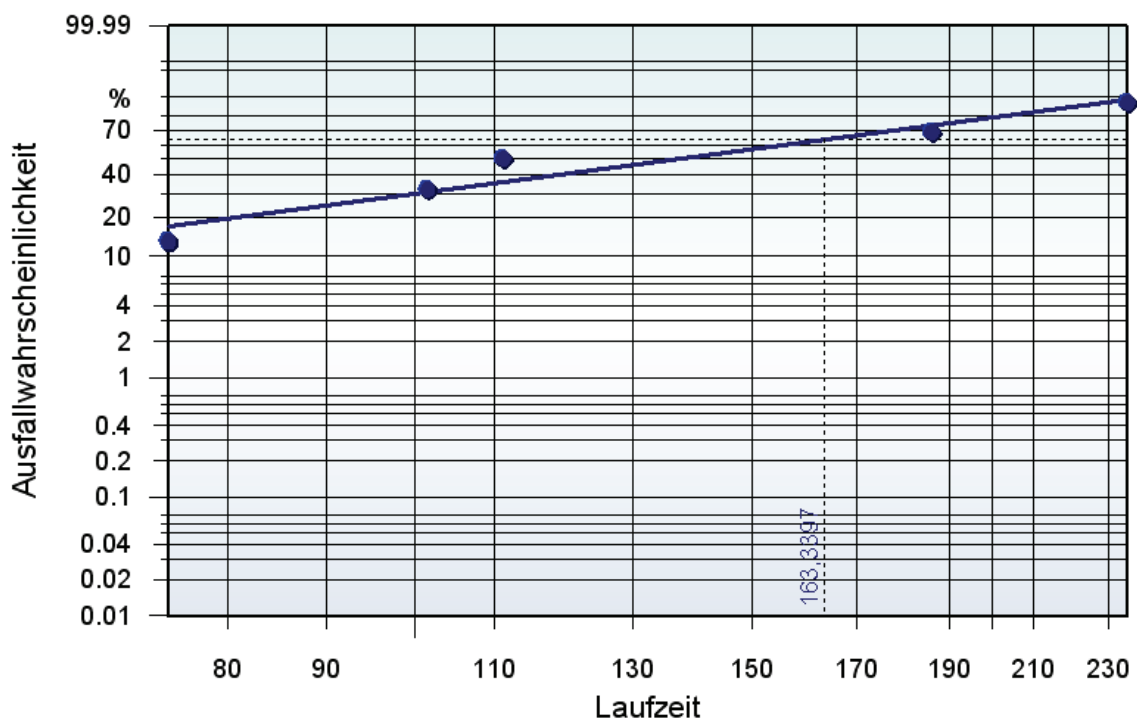


Abb. 18 Wahrscheinlichkeitsnetz mit Weibullverteilung einer Versuchsreihe und 63 % Quartil

5 AKTUELLE SITUATION DER STEHSPANNUNGSPRÜFUNG

Die Prüfungen mit einer von außen angelegten Stehwechselfspannung sollen die Wechselfspannungsfestigkeit der geprüften Isolierung gegen Erde und gegen benachbarte Wicklungen nachweisen. Geprüft wird für 60 Sekunden mit der Betriebsfrequenz, also 50 Hz. Die Stehspannungsprüfung dient zum Nachweis, dass die Isolation des Betriebsmittels mit der Bemessungsspannung übereinstimmt.

Die Stehspannungsprüfung wird an Komponenten während der Fertigung und an der gesamten Maschine nach Fertigstellung aber auch nach erfolgter Reparatur durchgeführt und ist eine bedingt zerstörungsfreie JA/NEIN Prüfung. Das heißt die geprüfte Komponente besteht die Prüfung oder sie versagt und ist somit zerstört und muss repariert bzw. ausgetauscht werden. Es ist also keine diagnostische Information in der Prüfung enthalten.

5.1 Normen zur Abnahmestehspannungsprüfung

Einige angewandte Richtlinien stammen von der KEMA. Das sind die Prüfvorschriften einer niederländischen Prüfinstitutes. Diese Richtlinien sind nicht international gültig, werden aber vielfach als interne Prüfvorschriften von verschiedensten Firmen übernommen.

Laut KEMA S-13 sind die fertig isolierten Generatorstäbe vor dem Einbau in den Stator einer Stehspannungsprüfung von $3 U_n$ für mindestens 10 Sekunden zu unterziehen. Weiters sind die fertigen Generatorstäbe nach dem Einbau in die Maschine noch vor dem Löten der Stabenden sofort auf etwaige Isolationsfehler zu prüfen. Dafür wird eine Spannung von 110 V zwischen 2 benachbarten Leitern im Röhelstab angelegt. Nach Fertigstellung des Stators ist die gesamte Statorwicklung einer Stehspannungsprüfung von $2 U_n + 1 \text{ kV}$ für die Dauer von 1 Minute zu unterziehen. Dazu wird jeweils eine Phase auf Hochspannung und die beiden anderen auf Erde gelegt.

Für die Isolierung der Rotorwicklungen gilt dasselbe wie für die Statorisolation. [15]

Die international gültige IEC 60034 schreibt bei Maschinen mit einer Nennspannung größer 1000 V eine abschließende Stehspannungsprüfung von $2 U_n + 1 \text{ kV}$ für eine Minute vor. Für die Windungsprüfung zur Sicherstellung der Isolationsfestigkeit zwischen 2 benachbarten Windungen ist laut Norm eine geeignete („appropriate“) Spannung zu wählen. Für die Überprüfung der fertigen Generatorstäbe vor dem Einbau ist hier keine Prüfung definiert wie es beispielsweise in der KEMA der Fall ist. [21]

Für die Prüfung des Wickelkopfes der Maschine schreibt eine KEMA Richtlinie aus dem Jahr 1987 eine Prüfung mit 2-facher Nennspannung für 30 Minuten vor. [22]

5.2 Herstellerspezifikationen der Prüfungen

Zur Qualitätssicherung der Isolierung fordern einige Kunden von Maschinenherstellern sehr harte, Prüfungen während der Produktion, die über die Anforderungen der Normen weit hinausgehen. Auch die abschließende Stehspannungsprüfung wird manchmal verschärft durchgeführt. Fehlerhafte Isolierungen sollen so mit einer größeren Wahrscheinlichkeit gefunden werden.

Es ist zwar wahrscheinlicher, dass Stäbe, die nicht einwandfrei sind, durch die Prüfung eher gefunden werden. Nur ist es auch fraglich, ob diese durch die harte Prüfung gefundenen Fehler bei normgerechter Prüfung überhaupt die elektrische Lebensdauer verkürzt hätten. Auch ist es möglich, dass an sich gute Stäbe die hohen Prüfpegel bestehen und verbaut werden. Durch die unnötig hohe Spannung bei der Prüfung sind jedoch andere Fehlerquellen entstanden, die dann zu einem verfrühtem Ausfall führen können.

Für die Prüfung der Isolation der Maschinenwicklungen während dem Produktionsprozess gibt es keine internationalen Standards. Einzig die KEMA empfiehlt die fertiggestellten Stäbe vor dem Einbau mit $3 U_n$ für mindestens zehn Sekunden zu Prüfen. Daher weisen viele Kundenforderungen technisch fragliche Anforderungen auf.

Es gibt Maschinenhersteller, insbesondere von Hochspannungsmotoren, die nach dem Wickeln der Hauptisulationsbänder die nicht imprägnierte oder gepresste Isolation mit teilweise sehr hohen Stehspannungen, bis zu $2,5 U_n$, prüfen. Das ist eine gewaltige und wirklich unnötige Belastung für die Isolierung. Die vielen noch umgefüllten Hohlräume in der Isolation führen bei so hohen Spannungen zu einem sehr hohen Teilentladungspegel. Die Aussagekraft so einer Prüfung ist sehr fraglich. Isolierstoffhersteller warnen ausdrücklich vor Prüfungen der trockenen Isolation. [23] Sollte sie dennoch zur Prüfung der Wickelqualität bei VPI Wicklungen vor einer Ganztränkung angewandt werden, sollte sie auf keinen Fall mit mehr als U_n durchgeführt werden, um die noch nicht einmal fertig gestellte Isolation nicht zu schädigen. [23]

Im weiteren Verlauf der Produktion werden oft erhöhte Spannungsprüfungen nach jedem Produktionsschritt durchgeführt. So gibt es Kundenanforderungen in Ausschreibungen für elektrische Maschinen mit folgender Spezifikation für den Herstellungsprozess: Nach dem Wickeln ist die trockene Isolation mit $2,5 U_n$ zu prüfen. Dann ist eine Prüfung nach dem Pressen bzw. Imprägnieren der Stäbe mit 5-facher Nennspannung durchzuführen. Im weiteren Verlauf noch nach dem Nuteinbau und nach dem Verschalten. Hier werden ebenfalls sehr hohe Prüfpegel gefordert. Ist die Maschine fertig gestellt soll die abschließende Stehspannungsprüfung mit 3-facher Nennspannung durchgeführt werden.

Diese Prüfprozedur ist eine gewaltige Belastung für das Isoliersystem. Ob dadurch das Isolationssystem schon vor eigentlicher Inbetriebnahme geschädigt wird, soll diese Arbeit klären.

6 PRÜFSTÄBE

6.1 Auswahl repräsentativer Isoliersysteme und Stehspannungsprüfpegel

Da es mit den gefertigten Stäben das Ziel war die Lebensdauer zu bestimmen, war es notwendig und wichtig, Isolationssysteme mit geringer Streuung zu verwenden. Wären die Lebensdauerzeiten der einzelnen zusammenhörigen Gruppen zu weit auseinander gelegen, hätte aus diesen Werten keine brauchbare Lebensdauerkenlinie des Isolationssystems gewonnen werden können.

Die Entwicklung von neuen Isolierstoffen ist in den letzten Jahren auf Grund von neuen Technologien rasant fortgeschritten. Um starke Streuung auf Grund nicht vorhersehbarer Effekte der neu entwickelten hoch technisierten Isolierbänder auszuschließen, wurde für das aktuelle Standardmaterial der jeweiligen Herstellungsvariante gewählt.

Für das Vakuum Druck Imprägnierverfahren kam das Produkt Poroband® ME 2599 und für die Resin Rich Herstellungsmethode das Produkt Calmicaglas® 0409 zum Einsatz. Als Endenglimmschutz wurde jeweils das Selbe Produkt, EGSB® 2907 verwendet. Genaue Daten dazu sind im *Kapitel 6.4* zu finden.

Da definierte Kantenverläufe der Prüfstäbe mit einem Radius von mindestens 1 mm unverzichtbar waren um an den sonst scharfen Kanten starke Inhomogenitäten zu vermeiden, wurden die zu fertigenden Stäbe auf Vollkupferstäben mit einem homogenen Kantenradius gefertigt. Siehe *Kapitel 6.2*

Die Höhe der verwendeten Spannungspegel für die 1-Minuten Stehspannungsprüfung richteten sich nach Prüfphilosophien einiger Kunden. Eine Abstufung von $4,5 U_n$, $4,25 U_n$, $4,0 U_n$ und $3,5 U_n$ wurde für die Pegel der Versuchsreihe für die vorliegende Arbeit getroffen. Ziel war es so einen eventuell bestehenden Grenzpegel der Prüfung fest zu stellen ab dem die Lebensdauer, auf Grund der erhöhten Prüfung, rasant abnimmt

6.2 Einfluss des Stabprofiles

Der leitende Teil eines typischen Generatorstabes hat eine rechteckige Form. Auf dem Kupferprofil wird die Isolation mit Isolationsbändern aufgebracht. Um den Einfluss des Skineffekts zu minimieren wird der Stab normalerweise in Teilleiter aufgeteilt (siehe *Abb. 2*). Um die dadurch entstehende einseitige Stromverdrängung in den Griff zu bekommen wird der Stab noch „verröbelt“ und man spricht von einem sogenannten Röbelstab.

Die für die Versuche gefertigten Stäbe hatten jedoch einen Vollkupferkern.

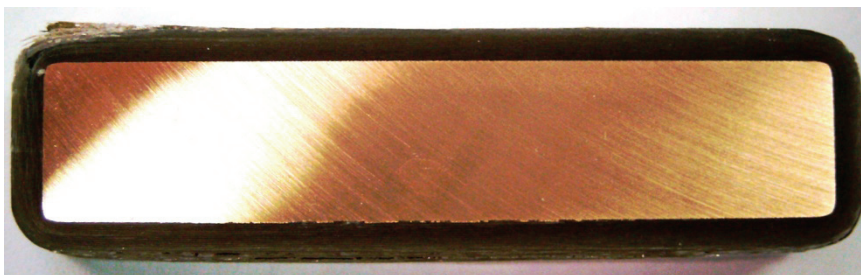


Abb. 19 Schnitt durch einen verwendeten Versuchsgeneratorstab im Aktivteil

An den Schmal- und Breitseiten der Generatorstäbe kann der Feldverlauf des elektrischen Feldes als homogen angesehen werden und so durch das homogene Feld eines einfachen Plattenkondensators dargestellt werden.

Problematisch ist der Feldverlauf jedoch an den Ecken des Kupferstabes. Die Kanten sorgen für einen inhomogenen Feldverlauf und daher für eine nicht unwesentliche Feldstärkeerhöhung. So hängt der Feldverlauf also sehr stark vom Radius der Kanten des Leiterstabes ab. Auch die Dicke der Isolation und das Seitenverhältnis des Generatorstabes beeinflussen die Kapazität und den elektrischen Feldverlauf und somit die elektrische Beanspruchung der Isolation.

6.2.1 Einfluss des Stabradius auf den elektrischen Feldverlauf

Meyer betrachtet die Inhomogenitätsstellen an den Kanten als eine Zylinderkondensatoranordnung und berechnet die Felderhöhung an den Kanten wie folgt: [24]

$$\frac{E_{\max}}{E_0} = \left(\frac{r_2}{r_1} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Formel 9

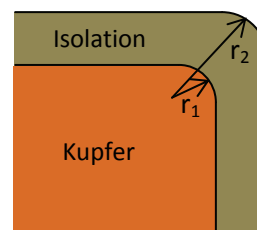


Abb. 20 Kupferkern und Isolation mit zugehörigen Radien

- E_{\max} ... Kantenfeldstärke
- E_0 ... mittlere Feldstärke im homogen beanspruchten Teil
- r_1 ... Kantenradius des Generatorstabes
- r_2 ... Außenradius der Isolation

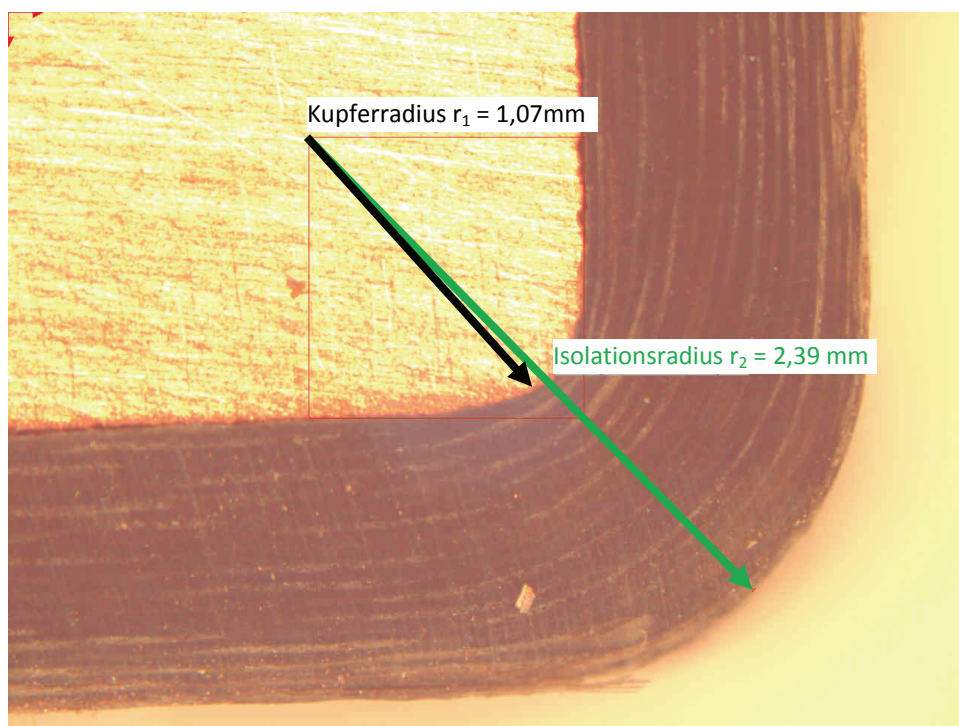


Abb. 21 Mikroskop-Aufnahme vom Schnitt durch den Kupferkern und Isolation an einer Kante des Stabes mit der Nr. R6

Mit einem mittleren Stabkantenradius von 1,07 mm und einem mittleren Radius der Isolation an den kanten von 2,39 mm ergibt sich: $\frac{E_{\max}}{E_0} = 1,54$

Das bedeutet, dass bei einer homogenen Feldstärke an den Längsseiten des Stabes von 2,89 kV/mm an den Kanten ein Feld von 4,45 kV/mm herrscht.

Vogelsang betrachtet die Ecken der Generatorstäbe als 2 konzentrische Kugelelektroden und berechnet die Feldüberhöhung daher wie folgt: [25]

$$\frac{E_{\max}}{E_0} = \frac{d_{iso}}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{d_{iso} + r_1}{r_1}\right)}$$

Formel 10

E_{\max} ...	Kantenfeldstärke
E_0 ...	mittlere Feldstärke im homogen beanspruchten Teil
r_1 ...	Kantenradius des Generatorstabes
d_{iso} ...	Dicke der Isolation

Bei einem mittleren Stabkantenradius von 1,07 mm und einer mittleren Isolationsdicke von 2 mm ergibt sich: $\frac{E_{\max}}{E_0} = 1,77$

Das würde einer Kantenfeldstärke von 5,11 kV/mm statt den homogenen 2,89 kV/mm entsprechen.

Aus *Formel 9* und *Formel 10* geht deutlich hervor, dass kleine Kantenradien für eine noch höhere Feldüberhöhung und somit eine höhere Isolationsbeanspruchung sorgen. Die niedrigste Feldüberhöhung und somit niedrigste Belastung der Isolation an den Kanten ergibt sich durch Verwendung des Borda-Profiles wo der Radius einer logarithmischen Funktion folgt. [26]

Ursprünglich hätte die für diese Diplomarbeit gemachte Versuchsreihe auf Eisenprofilen durchgeführt werden sollen. Doch die scharfen Kanten mit Kantenradien unter 0,2 mm hätten eine Feldüberhöhung von $\frac{E_{\max}}{E_0} = 4,2$ und mehr verursacht.

So wurde als Kupferkern für die zu fertigenden 1 m langen Generatorstäbe ein 5x1 cm Vollkupferprofil verwendet. Die Kupferstäbe zeichneten sich durch eine sehr homogene Oberfläche und einen definierten Kantenradius von 1,07 mm aus. Um Inhomogenitäten aufgrund von Unebenheiten und scharfe Kanten ausschließen zu können, und auch zur Verbesserung der Haftung zwischen Kupferstab und Isolation, wurden alle verwendeten Stäbe zusätzlich noch sandgestrahlt.

Mit dem am Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik der Technischen Universität Graz entwickelten Programm Elefant 2D wurde der Feldverlauf in den Generatorstäben simuliert und berechnet.

Auf Grund von Einschränkungen durch die Software wurde nur der innere Radius der Isolation und der Kupferstab simuliert und berechnet.

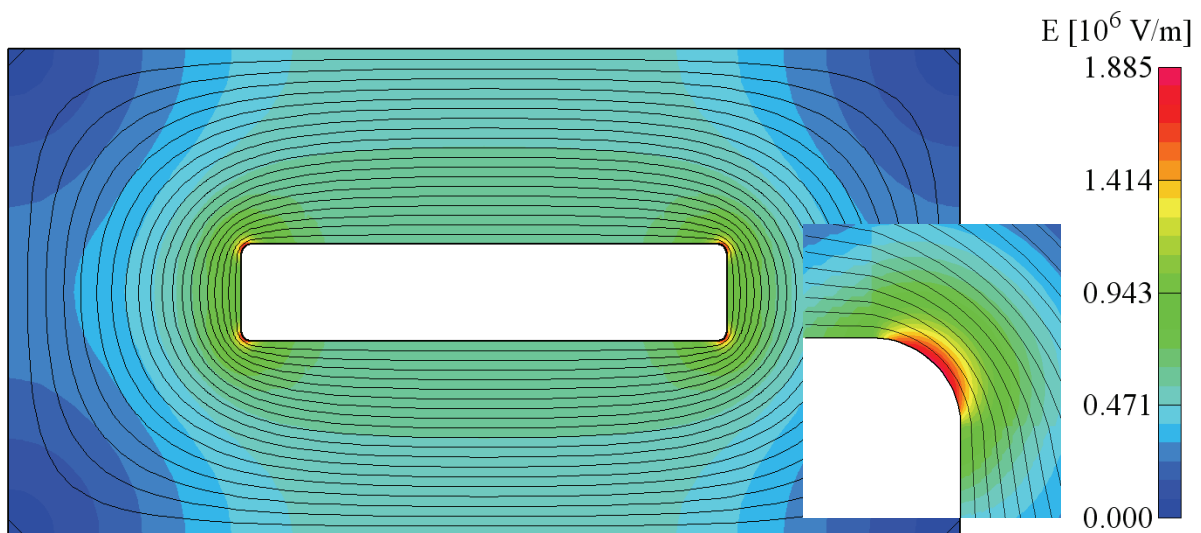


Abb. 22 Simulierter Feldverlauf über den Stabquerschnitt und an einer Kante im Detail eines Eisenprofils mit Kantenradius von $r = 1,07 \text{ mm}$

Wie in Formel 9 ersichtlich beträgt die Feldüberhöhung an den Kanten im Verhältnis zu der homogenen Beanspruchung an den Längsseiten:

$$\frac{E_{\max}}{E_0} = \frac{7,03 \text{ kv/mm}}{3,22 \text{ kv/mm}} = 2,18$$

Die nach Vogelsang berechnete Feldüberhöhung von 1,77 stimmt laut Simulation besser.

Auch der Feldverlauf bei Verwendung von scharfkantigen Eisenprofilen wurde mit Elefant 2D berechnet.

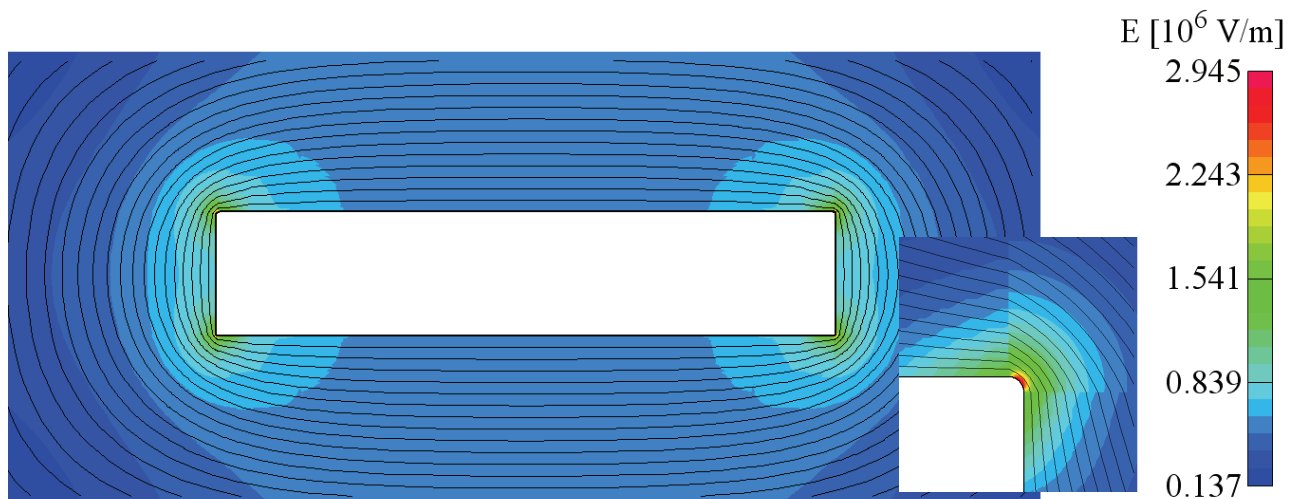


Abb. 23 Simulierter Feldverlauf über den Stabquerschnitt und an einer Kante im Detail eines Eisenprofils mit Kantenradius von $r = 0,2 \text{ mm}$

Die laut Vogelsang berechnete Feldüberhöhung von 4,2 stimmt auch hier mit der Simulation sehr gut überein. Laut Elefant 2D wäre mit einer 4,1 fachen Feldüberhöhung an den Kanten der Stäbe zu

rechnen: $\frac{E_{\max}}{E_0} = \frac{13,22 \text{ kV/mm}}{3,22 \text{ kV/mm}} = 4,1$

6.3 Prüfstabaufbau

Die Stäbe wurden für eine Nennspannung von $U_N = 10 \text{ kV}$ gefertigt. Das bedeutet eine Leiter – Erdespannung von $10 \text{ kV}/\sqrt{3} = 5,77 \text{ kV}$. Nach *Formel 11* ergibt sich bei einer zulässigen Feldstärke von $2,9 \text{ kV/mm}$ eine Isolationsdicke von 2 mm .

$$D_{iso} = \frac{U_N}{E} = \frac{10 \text{ kV}}{2,9 \text{ kV/mm}} = 1,99 \text{ mm}$$

D_{iso} ... Isolationsdicke in mm
 U_N ... Nennspannung in kV
 E ... Elektrische Feldstärke in kV/mm

Formel 11

Für die Resin Rich Stäbe kam das Produkt, CALMICAGLAS® 0409 zum Einsatz. Das Isolationsband besteht aus kalziniertem Muskovit-Glimmerpapier und thermohärtendem Epoxy-Novolack. Als Trägermaterial für das Glimmerpapier dient ein Glasgewebe. Das Isolationsband ist 25 mm breit und hat eine Dicke von $0,18 \text{ mm}$.

Nach *Formel 12* benötigt man für die gewünschte Isolationsdicke von 2 mm 16 Lagen des Isolationsbandes. Zur Verkürzung des Kriechweges wurden die Isolationslagen halbüberlappt gewickelt. Um so auf die 16 benötigten Lagen zu kommen waren daher nur 8 halbüberlappte Lagen notwendig.

$$N_L = \frac{D_{iso}}{d_{Band} \cdot c} = \frac{1,99 \text{ mm}}{0,18 \text{ mm} \cdot 0,7} = 15,79$$

N_L ... Lagenanzahl
 D_{iso} ... Isolationsdicke in mm
 d_{Band} ... Dicke des Isolierbandes
 c ... Kompressionsfaktor des Bandes auf Grund des Harzverlustes beim Pressen

Formel 12

Aufbau der Resin Rich Stäbe:

Aktiver Leitbereich: 400 mm (inkl. Schutzspalte und Schutzringe)
 Schutzspaltbreite: $2\text{-}3 \text{ mm}$
 Schutzringbreite: 20 mm (davon 10 mm mit EGSB überlappt)
 EGSB-Länge: 210 mm (davon 10 mm mit Schutzring überlappt)

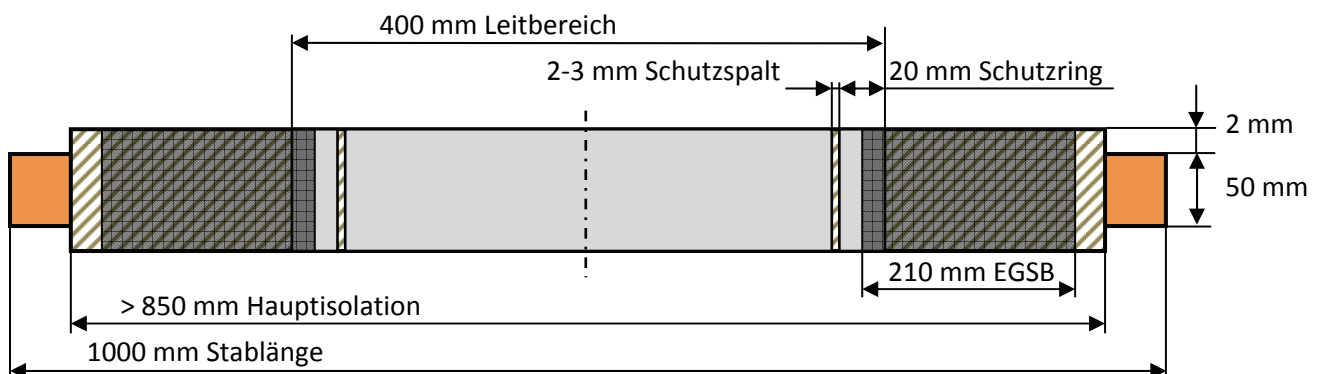


Abb. 24 Aufbau und Abmessungen der sowohl mit Resin Rich aber auch dem VPI Verfahren hergestellten Prüfstäbe

Für die mit dem Vakuum Druck Imprägnier Verfahren (kurz VPI) gefertigten Prüfstäbe kam das POROBAND® ME 2599 zum Einsatz. Das Isolierband besteht aus einer sehr saugfähigen Feinglimmerpapier aus unkalziniertem Muskovit, welche einseitig mit einem Glasgewebe verstärkt ist. Als Bindemittel dient ein Epoxidharz auf Basis von Bisphenol-A. Weiters enthält das POROBAND ME 2599 einen für Epoxid/Säureanhydridsysteme geeigneten Beschleuniger auf Basis eines metallischen Salzes. (Zinknaphthenat).

Das Band ist 25 mm breit und hat eine Dicke von 0,14 mm. Nach *Formel 13* ergibt sich auch hier wieder eine Lagenzahl von 16. Das Band ist zwar etwas dünner, aber da es nicht so harzreich ist, ist der Kompressionsfaktor auch höher. Daher ergibt sich das gleiche Ergebnis für die Lagenanzahl. Es wurden wieder 8 halbüberlappte Lagen gewickelt.

$$N_L = \frac{D_{iso}}{d_{Band} \cdot c} = \frac{1.99 \text{ mm}}{0.14 \text{ mm} \cdot 0.9} = 15.79$$

Formel 13

N_L ... Lagenanzahl
 D_{iso} ... Isolationsdicke in mm
 d_{Band} ... Dicke des Isolierbandes
 c ... Kompressionsfaktor des Bandes durch aufschweißen der Nutimitation

Aufbau der VPI Stäbe:

Nutimitationslänge:	410 mm
Aktiver Leitbereich:	400 mm (inkl. Schutzspalte und Schutzringe)
Schutzspaltbreite:	2-3 mm (im gepressten Nutbereich)
Schutzringbreite:	20 mm (davon 10 mm mit EGSB überlappt)
EGSB-Länge:	210 mm (davon 10 mm mit Schutzring überlappt)

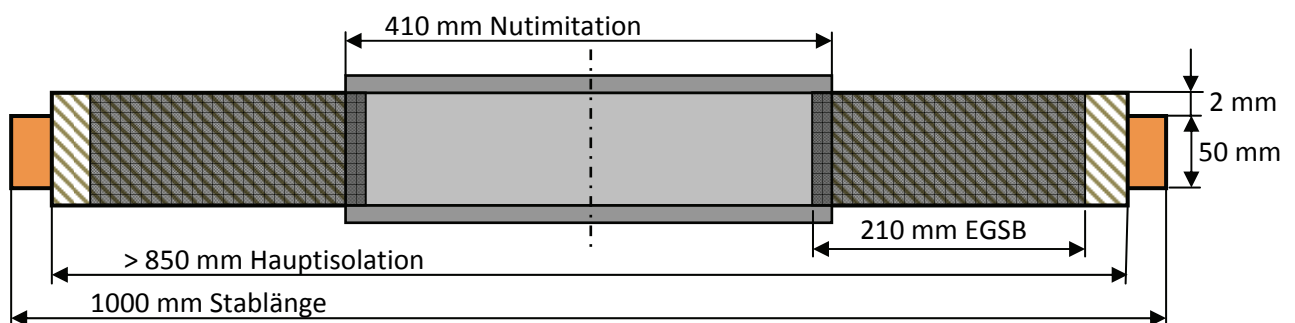


Abb. 25 VPI Stab mit aufgeschweißter Nutimitation

Für den Endenglimmschutz kam bei beiden Herstellungsvarianten der Isoliersysteme das Endenglimmschutzband EGSB® 2709 zur Anwendung. Das Band ist 0,24 mm dick und 25 mm breit und wurde halb überlappt gewickelt. Es besteht aus einer Siliciumcarbid Harz Mischung, wobei ein Polyestergewebe als Träger dient. Das Produkt zeichnet sich durch einen definierten spannungsabhängigen Widerstand aus.

6.4 Prüfstabherstellung

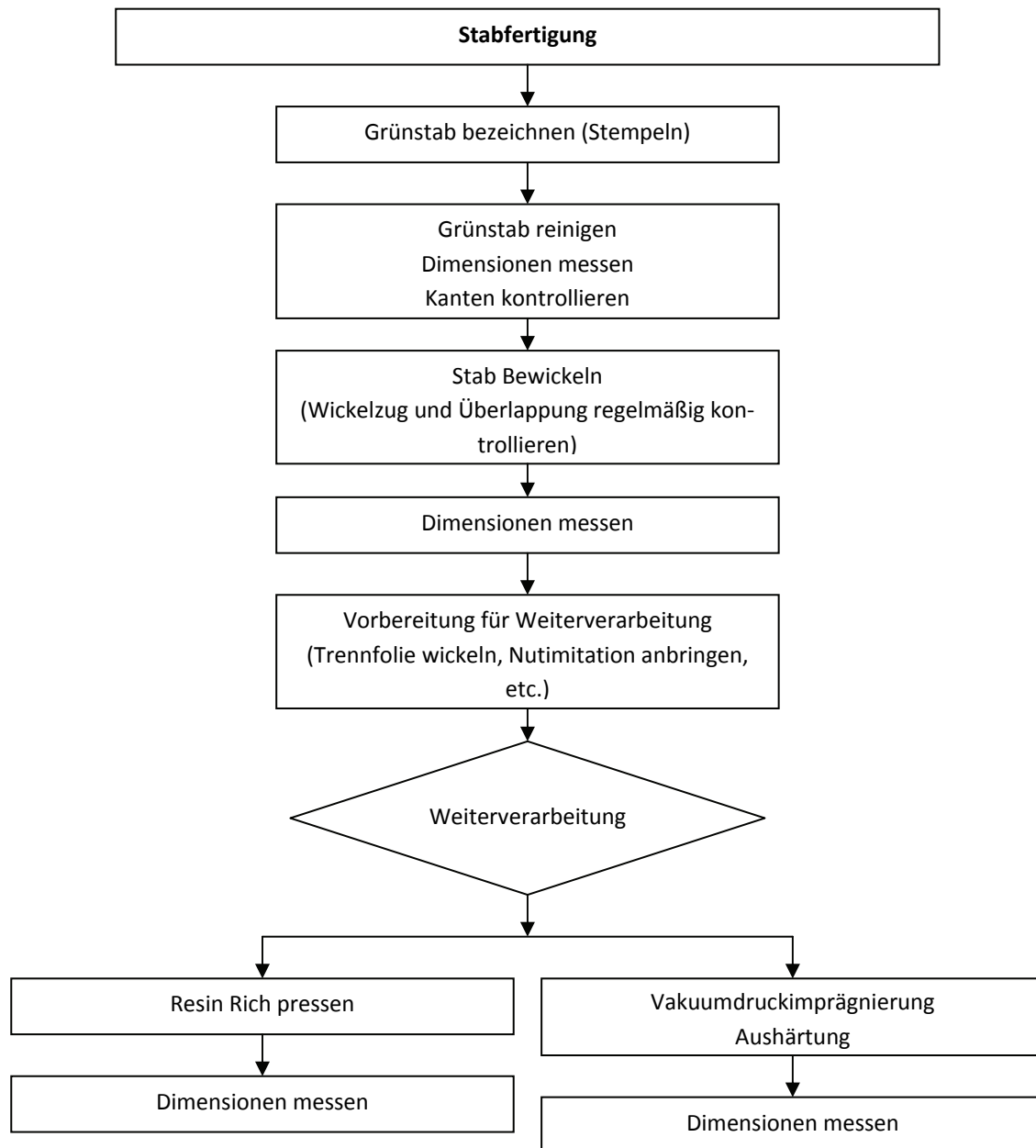


Abb. 26 Überblick über die Stabherstellung im Flussdiagramm

6.4.1 VPI Stäbe

Für die gewünschte Isolationsdicke von 2 mm wurden wie in Kapitel 6.3 beschrieben 16 Lagen Isolation benötigt. Da um den Kriechweg maximal zu machen halbüberlappt gewickelt wurde, waren 8 Lagen zu wickeln.

Als Erstes wurden die 1 m langen Kupferprofile auf scharfe Kanten und Krater untersucht. Gegeben falls mussten die Profile noch einmal sandgestrahlt werden, um Feldüberhöhungen auf Grund von Unebenheiten ausschließen zu können. Vor dem Wickeln der Isolation wurden die Stäbe mit Aceton gereinigt. Auch die Dimension der Stäbe wurde mit einer Schiebelehre kontrolliert.

Die einzelnen Isolationslagen sind mit Hilfe einer Wickelmaschine aufgebracht worden. Der Wickelzug wurde dabei immer zwischen 5 kg und 6 kg gehalten. So konnten Faltenbildung und somit in spä-

terer Folge dann Hohlräume, also Quellen für Teilentladungen, in der Isolation minimiert werden. Da die VPI Stäbe vor dem Imprägnieren in einer Nutimitation eingeschweißt wurden, um im Aktivteil auf richtiger Dimension zu sein, musste vor dem Einschweißen noch eine Trennfolie gewickelt werden, um ein Verkleben der Nutimitation mit der Hauptisolation zu verhindern. Damit das Imprägnierharz trotzdem ungehindert in die Isolation eindringen konnte war diese Trennfolie mit Löchern ausgestattet.

Der eigentliche VPI Prozess beginnt mit dem Imprägnieren der Stäbe. Die fertig mit der Hauptisolation und der perforierten Trennfolie bewickelten und in der Nutimitation eingeschweißten Generatorstäbe wurden in geeigneten Wannen in den Imprägnierkessel gelegt. Der nun folgende Imprägniervorgang besteht aus 3 Phasen, der Vakuumphase, der Nassvakuumphase und der Druckphase.

In der Vakuumphase wurde der Kessel auf 60 °C geheizt und mit Vakuum beaufschlagt, um Luft und eventuelle Feuchtigkeit aus der Isolation ab zu saugen. Bei dieser Phase wird in Abhängigkeit der Isolationsdicke eine Mindestdauer von 4 Stunden empfohlen, bei den für diese Arbeit imprägnierten Stäben wurde die Vakuumphase auf 21,25 Stunden Trocknung ausgedehnt, um eventuelle Feuchtigkeit sicher ausschließen zu können.



Abb. 27 Offener Imprägnierkessel mit in der Nutimitation eingeschweißten Generatorstäben

Der nächste Schritt ist die sogenannte Nassvakuumphase. Dabei wird der immer noch bei 60 °C unter Vakuum stehende Kessel mit dem Imprägnierharz geflutet und einige Minuten in diesem Zustand belassen. Diese Phase dient zum Absaugen der Luft aus dem Imprägnierharz und dauerte 10 Minuten. Das für die Imprägnierungen verwendete Harz war das Produkt VOTASTAT® 2110 von ISOVOLTA. Es handelt sich dabei um ein Bisphenol-A Epoxidharz in Kombination mit einem flüssigen Säure-Anhydrid Härter im Verhältnis 100/90.

Als letzter Schritt im Imprägnierungsvorgang folgt die Druckphase. Dabei wird der Imprägnierkessel bei einer Temperatur von 60 °C mit ungefähr 4 bar Überdruck beaufschlagt. So wird das Imprägnierharz in alle Hohlstellen innerhalb der Isolation gepresst.

Der Fortschritt des Imprägniervorganges konnte mit einer Kapazitätsmessung (siehe *Abb. 28*) beobachtet und kontrolliert werden. Die an sechs Stäben angeschlossene Kapazitätsmessung ist in *Abb. 27* zu sehen.

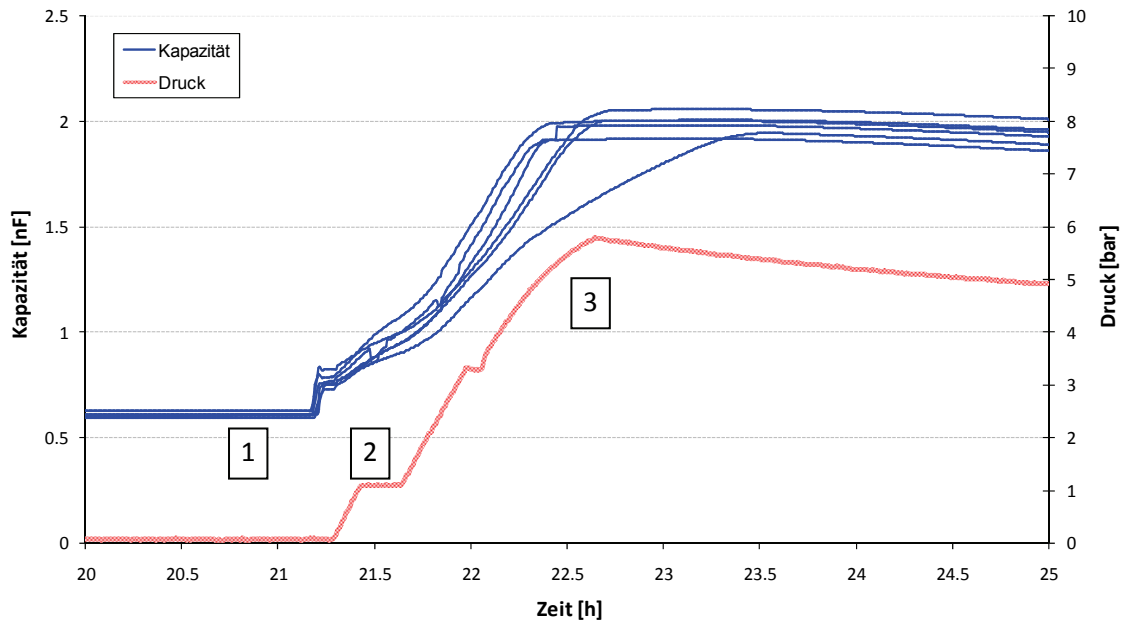


Abb. 28 Druck und Kapazitätsverlauf, gemessen an 6 Stäben, bei einer Imprägnierung

In Abb. 28 sind die einzelnen Phasen des Imprägniervorganges ersichtlich:

- 1: Vakuumphase: Dauer 21,25 Stunden (verkürzt dargestellt)
- 2: Nassvakuumphase: man sieht, dass die Kapazität der Isolierung bereits steigt das heißt, dass Harz in den Kessel strömt
- 3: Druckphase

Steigt die Kapazität der Isolierung nicht mehr an, sind alle Hohlräume mit Harz gefüllt und die Isolierung ist fertig imprägniert. Ist dies feststellbar, werden die Stäbe aus dem Vakuumkessel entnommen und in einem Ofen nahe der Klassentemperatur über mehrere Stunden ausgehärtet, das heißt das Harz polymerisiert fertig aus.

War der Imprägniervorgang abgeschlossen, wurden die Stäbe noch wie in 6.3 *Prüfstabaufbau* beschrieben mit Leitsilber als Messbelag und Schirmring bepinselt. Der Endglimmschutz wurde ebenfalls aufgewickelt und dann bei 160 °C zwei Stunden im Ofen ausgehärtet.

6.4.2 Resin Rich Stäbe

Konnten mit der VPI Methode immer mehrere mit der Hauptisolation bewickelte Stäbe gleichzeitig imprägniert werden, ist das bei den mit harzreichen Bändern gefertigten Resin Rich Stäben nicht möglich. Hier wird immer ein Stab nach dem anderen gepresst. Das heißt die Eigenschaften der einzelnen Stäbe unterliegen schon allein fertigungstechnisch einer viel größeren Streuung als beim VPI Verfahren, wo ja die fünfzehn gleichzeitig imprägnierten Stäbe nahezu identische Eigenschaften aufweisen.

Bei der Fertigung wurde zuerst die Dimension der Kupferstäbe gemessen und kontrolliert und die Stäbe wurden auf Unebenheiten und scharfe Kanten als auch Kratzer untersucht und gegebenenfalls nachbearbeitet.

Zwei Millimeter bzw. 8 halbüberlappte Lagen Isolation (siehe 6.3 Prüfstabaufbau) des Isolationsbandes wurden mit einer Wickelmaschine mit ca. 7 bis 8 kg Wickelzug auf den Kupferstab gewickelt. Auch hier musste wieder auf konstanten Wickelzug zur Verhinderung von Inhomogenitäten in der Isolation geachtet werden.



Abb. 29 Verwendete Wickelmaschine beim Aufbringen der Hauptisolation

Nach dem Bewickeln der Generatorstäbe begann der eigentliche Pressvorgang. Dieser besteht aus mehreren Phasen.

Die fertig bewickelten Stäbe werden in so genannten Pressleisten eingelegt und nicht direkt in die Presse gegeben. Die Pressleisten haben genau die gewünschte Größe des fertigen Generatorstabes und gewährleisten so dass der gepresste Stab die gewünschte Dimension erhält. Da sich während des Pressvorgangs das im Band enthaltene Harz verflüssigt, wird auch hier zur Verhinderung des Verklebens der Isolation mit den Pressleisten eine Trennfolie gewickelt. Diese Folie hat auch noch eine zweite Aufgabe. Die inneren Kanten der Pressleiste sind eckig. So würde durch das Pressen die Isolation am Rand ebenfalls Ecken bekommen, was ein inhomogeneres Feld und Feldüberhöhungen zur Folge hätte. Um das zu verhindern ist der benützte Trennfilm schrumpfend. Das heißt, er zieht sich unter Wärmeeinwirkung zusammen und drückt so während des Pressens die Isolation an die Runden Kanten des Kupferstabes.

In der ersten Phase des Presszyklus wird die heiße Presse nur auf Kontakt geschlossen damit die Pressleisten nicht verrutschen und der Stab wieder herausfällt. Diese Phase dient nur zum verflüssigen des im Band befindlichen Harzes.

Nach den sieben Minuten Anwärmphase ohne Druck werden danach 100 bar auf den Stab gegeben. Das flüssige Harz wird jetzt in jeden Hohlraum gepresst und kann ihn füllen. Auch wird das für die Isolation überschüssige Harz herausgepresst.

Nach 50 Minuten Druckphase wurden die Stäbe aus der Presse genommen und abgekühlt. Nach dem Überprüfen der erreichten Abmessungen der Isolation wurden die Stäbe wie in Kapitel 6.3 Prüfstabaufbau beschrieben mit Leitsilber als Messbelag und Schutzring bepinselt. Das Endenglimmschutzband wurde aufgebracht und bei 140 °C 8 Stunden im Ofen ausgehärtet.

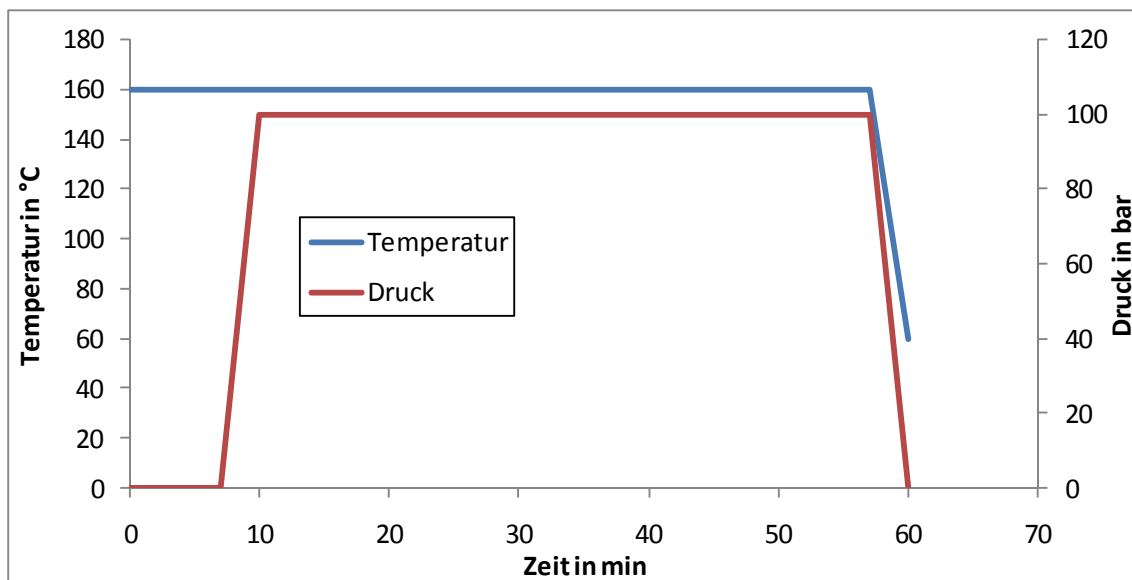


Abb. 30 Temperatur und Druckverlauf des verwendeten Presszyklus beim Spulenpressverfahren

Durch die hohe Temperatur wird das Harz zuerst flüssig und beginnt dann auszugelieren, also es wird zähflüssig. Im weitem beginnt es dann zu polymerisieren, also hart zu werden. Das heißt schon in der Presse wird das Harz mit der Zeit immer zähflüssiger und schließlich ganz fest. Das lässt bereits das größte Problem beim RR Verfahren erkennen. Wärmt man die Isolation ohne Druck zu lange an, geliert das Harz bereits und das nun schon zu zähflüssige Harz verhindert, dass der Generatorstab auf Dimension geht. Umgekehrt kann auch zu kurz vorgewärmt werden. Das im Band enthaltene Harz ist dann, wenn zu früh Druck gegeben wird, noch nicht flüssig wodurch die Isolation ebenfalls nicht auf Dimension gehen kann und an den Stellen wo das Harz nicht flüssig war Hohlstellen aufweisen wird. Hier den richtigen Presszyklus zu finden ist mitunter sehr schwer und langwierig und erfordert viel Erfahrung.

6.4.3 Fertigungsprobleme RR auf Kupfer

Wie in Kapitel 6.1 *Auswahl repräsentativer Isoliertsysteme und Stehspannungsprüfpegel* erläutert war die Wahl der Profile und im Weiteren des Materials der als Generatorstäbe gut überlegt und berechnet. Die definierten Kantenradien der Kupferstäbe waren im Endeffekt mit ausschlaggebend für die Wahl dieser Kupfer-Roh-Stäbe. Im Prüflabor von ISOVOLTA werden Stäbe für Prüf- und Forschungszwecke normal auf Eisenprofilen gefertigt. Die vorliegende Arbeit war dort die erste wo im großen Maßstab Kupferstäbe zum Einsatz kamen.

Während die Fertigung der Stäbe mit dem VPI Verfahren auf Kupfer keinerlei Probleme verursachte, konnte die gewünschte Qualität des Isolationssystems mit dem Spulenpressverfahren nach einiger Zeit nicht mehr erreicht werden.

Die Resin Rich Stäbe wurden mit dem Produkt Calmicaglas® 0409 gefertigt. Für die ersten 10 Stäbe wurde ein Band, produziert am 13.5.2008, verwendet, während für die restlichen geplanten Stäbe eine Produktionscharge vom 19.11.2008 zum Einsatz kam.

Die erste Möglichkeit der elektrischen Qualitätskontrolle der gefertigten Isolation war eine $\tan \delta$ Messung nach dem Pressen der Stäbe. Wurde hier der als Qualitätskriterium gesetzte maximale $\tan \delta$ Anstieg von 1,8 ‰ überschritten, wurde der Stab verworfen.

War bei den ersten 10 gefertigten Stäben lediglich ein Ausreißer mit einem Anstieg von 1,9 ‰ dabei, war bei den Stäben gefertigt mit den Bändern der Produktionscharge vom November 2008 ein

durchschnittlicher $\tan \delta$ Anstieg von 2,16 ‰ fest zu stellen, wobei auch Anstiege von über 6 ‰ gemessen wurden. Einen Thermozyklus später, also nach dem Aushärten des Endglimmschutzes für 8 Stunden bei 140 °C, waren $\tan \delta$ Anstiege von über 7 ‰ keine Seltenheit.

Der erste naheliegende Gedanke war, dass der verwendete Muskovit Glimmer für die Produktion der Bänder vom November von einem anderen Lieferanten kam als der Glimmer welcher in der Produktionscharge vom Mai verwendet wurde. Nach einigen werksinternen Recherchen konnte diese mögliche Fehlerursache ausgeschlossen werden, da der verwendete Glimmer beider Produktionen aus derselben Quelle stammte.

Beim Abklopfen der fehlerhaften Stäbe waren großflächige Delaminationen und Ablösungen der Isolation vom Kupfer hörbar. Dies konnte durch aufschneiden und mikroskopische Untersuchung der Stäbe auch bestätigt werden.

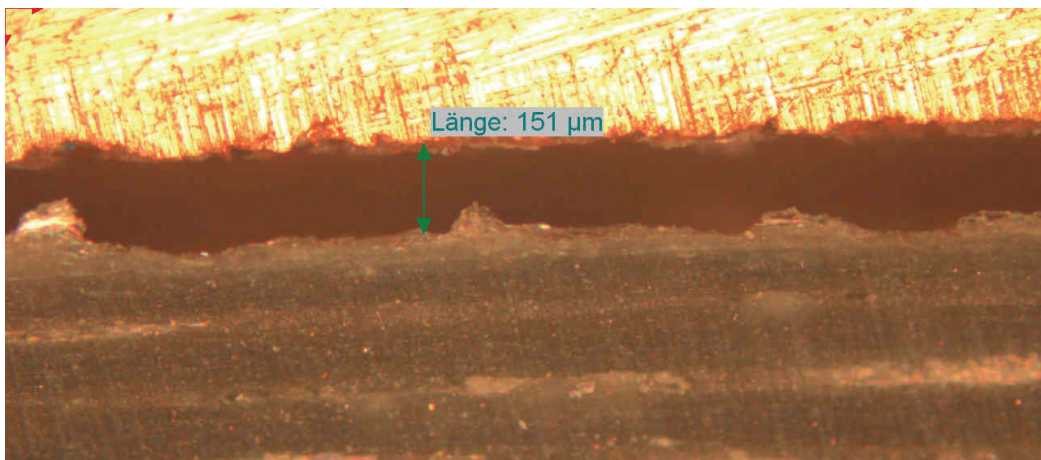


Abb. 31 Ablösung der Isolation vom Kupferstab von 151 µm

So wurden einige Versuche gestartet, um die Haftung zwischen Isolation und dem Kupferstab zu erhöhen. Die erste versuchte Möglichkeit war ein nochmaliges Sandstrahlen der Stäbe. Leider konnte dadurch keiner Verbesserung in der Haftung erreicht werden.

Es wurde auch versucht durch Unterwickeln eines harzreichen Bandes unter die eigentliche Isolation die Haftung zwischen Kupferstab und Isolationsband zu erhöhen. Zum Einsatz kam das Band VOTAFIX® E 2102. Es besteht aus mit Epoxidharz vorimprägnierten Glasgewebe. Das Ergebnis war zufriedenstellend und die $\tan \delta$ Anstiegswerte in den geforderten Toleranzen.

Die einige Zeit vorher produzierten Generatorstäbe, die die geforderten Qualitätskriterien erfüllten, waren aber bereits seit einigen 100 Stunden in den Dauerspannungszellen zur Lebensdauer Bestimmung. Da die Stäbe mit dem zusätzlichen harzreichen Band VOTAFIX® nicht wirklich mit denen ohne vergleichbar gewesen wären hätten die bereits fertigen Stäbe verworfen werden müssen. Da die Kapazitäten in den Dauerspannungszellen beschränkt waren, einigte man sich die Lebensdaueruntersuchungen nach verschiedenen Stehspannungsprüfungen, die ja Ziel dieser Arbeit waren, lediglich auf die mit dem VPI Verfahren gefertigten Stäbe zu beschränken, da bei diesem Produktionsverfahren keine Probleme mit den Kupferstäben auftraten.

Auffällig war, dass der jeweils 1. produzierte RR Stab am Tag den geforderten Qualitätskriterien entsprach. Der einzige Unterschied zu den folgenden Stäben war, dass die Pressleisten, in welchen der Stab in die heiße Presse gegeben wurde, nicht vom vorher gepressten Stab heiß waren, also circa Presstemperatur um die 160 °C sondern Raumtemperatur hatten.

Da die produzierten Prüfstäbe länger waren als die sonst im Prüflabor von ISOVOLTA gefertigten, war nur ein Satz Pressleisten vorhanden. Daher war es nicht möglich die verwendeten Pressleisten abwechselnd einzusetzen, um so die jeweils vorher verwendete abkühlen zu lassen.

Ein Grund für die Fertigungsprobleme ist daher in den heißen Pressleisten zu suchen. Auch wenn ungefähr nur eine Minute vergeht bis der zu pressende Stab nach dem Einlegen in die Presseleiste in die Presse und unter Druck kommt scheint diese kurze Zeit zu reichen dass gewisse ungewünschte Prozesse starten. Das Harz verflüssigt sich wegen der heißen Pressleisten bereits und beginnt zu fließen. Da der Druck der Presse aber noch fehlt, ist dieser Vorgang eher zufällig und nicht zielführend. Dass einige Stäbe nicht auf die gewünscht Dimension gepresst werden konnten hängt auch mit diesen Vorgängen während des Einlegens zusammen, denn das Harz beginnt auch schon zu polymerisieren, also hart zu werden, und das ohne angelegten Druck. Die Isolation kann sich dann nicht mehr auf die vorgegebenen Abmessungen schließen.

Der Hauptgrund für das Nichterreichen der Qualitätsgrenzen bestimmt über den Verlustfaktor liegt in den massiven Ablösungen der Isolation vom Kupferstab. In den so gebildeten Hohlräumen ist eine große Teilentladungsaktivität zu erwarten, was auch die unerwartet kurzen Referenzlebensdauern der RR Stäbe erklären würde. (siehe *Formel 3*)

Der Grund für diese starken, auf Eisen nicht beobachteten Ablösungen dürfte in den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Eisen zu finden sein. So dehnt sich Kupfer unter Hitzeeinwirkung viel stärker aus als Eisen. Ist der Presszyklus beendet ist die Isolation schon hart und ihre Abmessungen und Form ist daher nicht mehr veränderbar. Wird der Stab jetzt aus der Presse genommen und abgekühlt zieht sich das Kupfer wieder zusammen. Die im heißen Zustand satt aufsitzende Isolation kann ihre Form wie gerade beschrieben nicht mehr verändern und bleibt wie sie ist und es kommt zu den beschriebenen Ablösungen.

Dieses Problem ist nur durch Anpassen des Presszyklus in den Griff zu bekommen. Diese Arbeit ist jedoch extrem zeitaufwendig und komplex und war im Rahmen des Projektes für diese Diplomarbeit nicht möglich.

Daher wurden wie vorher erwähnt nur die 15 Referenzstäbe für die elektrische Lebensdauer der Isolation, aber keine Prüflinge für die Stehspannungsprüfung mit dem Spulenpressverfahren gefertigt.

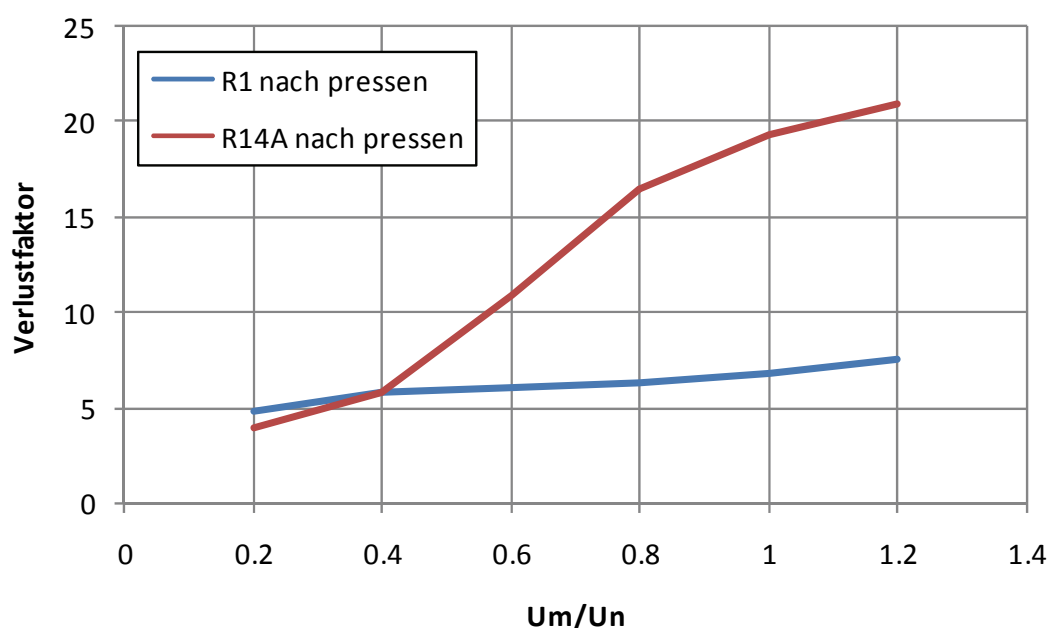


Abb. 32 $\tan \delta$ Anstieg bei intakter (R1) und fehlerhafter (R14A) Isolation direkt nach dem Pressen

6.5 Messablauf

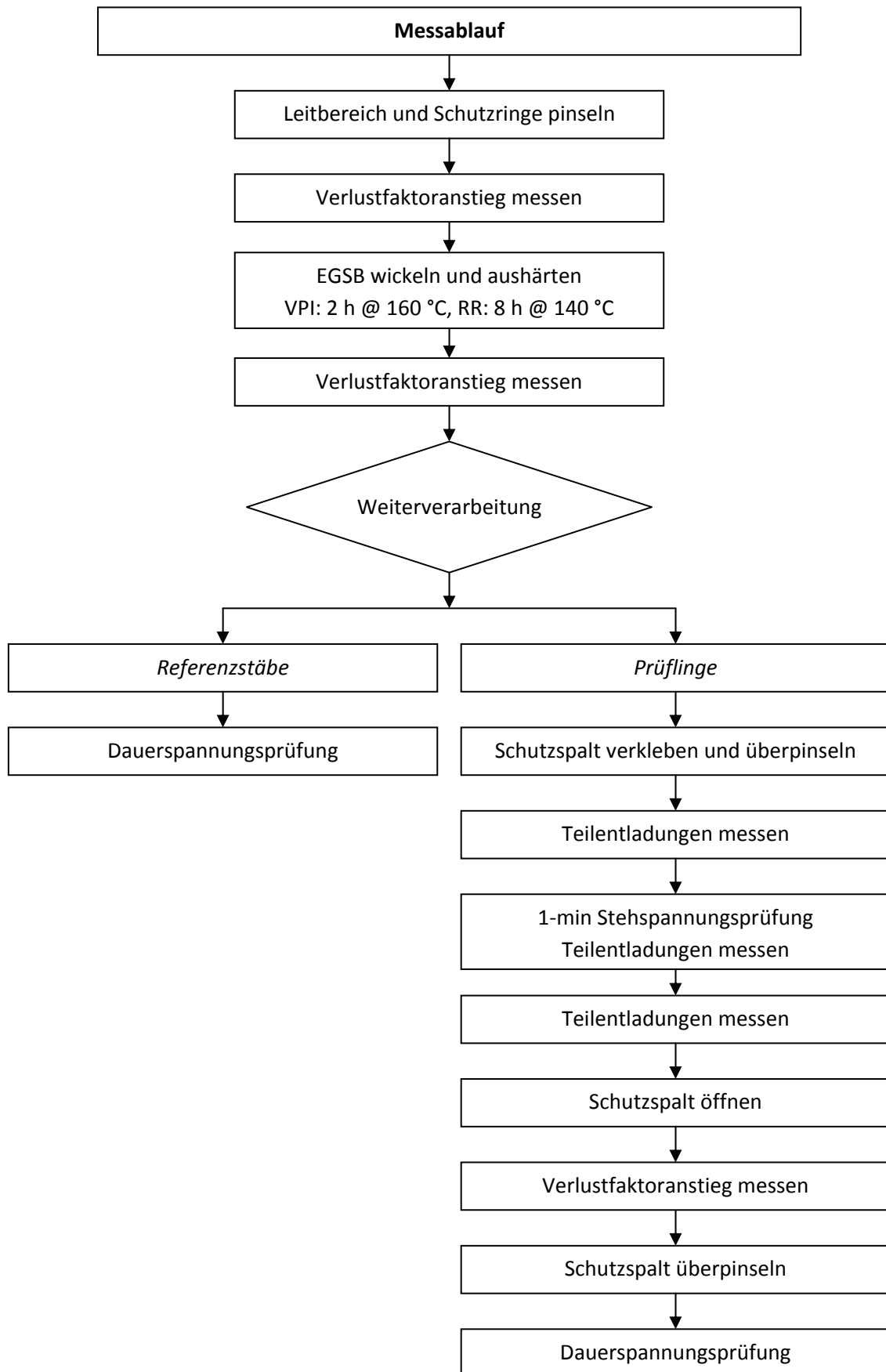


Abb. 33 Flussdiagramm vom Messablauf der einzelnen Stäbe

Um für die Lebensdauertests wirklich annähernd gleiche Ausgangsbedingungen zu haben, wurden alle Stäbe, wie in *Abb. 33* ersichtlich, laufend kontrolliert und gemessen. Vor allem durch die Verlustfaktormessung nach jedem Thermozyklus und der Stehspannungsprüfung war es möglich Stäbe, die fertigungsbedingt Schwachstellen in der Isolation hatten, noch vor der Dauerspannungsprüfung aus dem Prozess zu nehmen und so mögliche Ausreißer in der Lebensdauer zu verhindern.

Die Referenzstäbe wurden ohne vorherige Stehspannungsprüfung sofort nach dem Fertigstellen und der kontrollierenden $\tan \delta$ Messung in die Dauerspannungszellen für die Lebensdauertests gegeben. So konnte die ungeprüfte, also theoretisch maximale elektrische Lebensdauer der Stäbe, bestimmt werden.

Bei den zu prüfenden Stäben wurden zusätzlich noch Teilentladungsmessungen durchgeführt. So wurde der TE Pegel vor der 1-Minuten Stehspannungsprüfung bei U_n bestimmt. Während der Stehspannungsprüfung wurden ebenfalls die Teilentladungen gemessen und nach der Stehspannungsprüfung wurde wieder der TE Pegel bei U_n bestimmt.

Für die Stehspannungsprüfung musste der Schutzspalt der für die $\tan \delta$ Messung benötigt wurde geschlossen werden. Der 2 mm breite Spalt wäre sonst bei den hohen Spannungen immer überschlagen worden.

Nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung und den TE Messungen wurde der Schutzspalt wieder geöffnet und nochmal der $\tan \delta$ Anstieg gemessen.

Anschließend kamen auch die geprüften Stäbe in die Dauerspannungszellen zur Lebensdauerbestimmung.

7 DAUERSPANNUNGSVERSUCHE UND REFERENZ-LEBENSDAUERKENNLINIE

Elektrische Alterung ist ein komplexer über lange Zeit fortschreitender Vorgang. Wie in Kapitel 4 erläutert gibt es viele Einflussfaktoren.

Da die elektrische Lebensdauer von Hochspannungskomponenten in der Größenordnung von mehreren Jahrzehnten liegt, wäre es nur unter großer Zeitbeanspruchung möglich, Aussagen über mögliche Lebensdauern der Betriebsmittel zu treffen.

Durch Dauerspannungsversuche mit erhöhter Spannung können trotzdem Ergebnisse gewonnen werden, da sich die zu erwartende Lebensdauer modellhaft auf kürzere Zeiträume wie Wochen abbilden lässt. Grundlage dafür bilden die in Kapitel 4 angeführten Modelle laut IEEE 930-1987, das Inverse Power Model und das Exponential Power Model. [18]

Um die restliche Lebensdauer der einzelnen geprüften und ungeprüften Generatorstäbe zu gewinnen, wurde diese daher in erhöhten Dauerspannungsversuchen ermittelt.

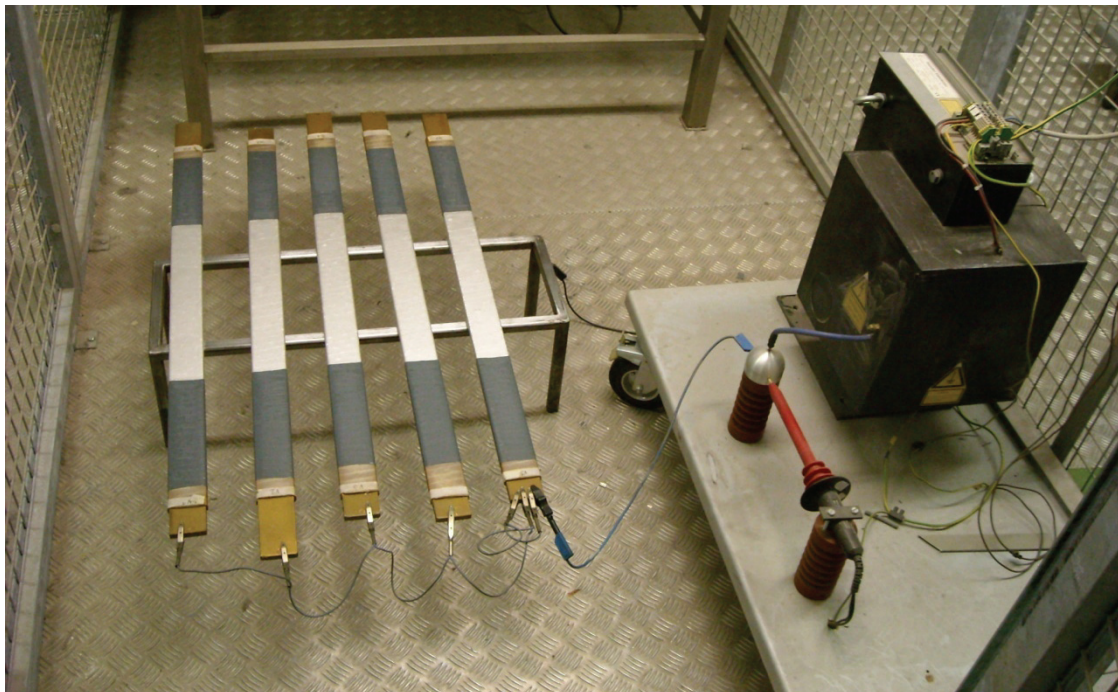


Abb. 34 Dauerspannungszelle mit 5 zu prüfenden Generatorstäben und Hochspannungstrafo

Die Lebensdauerreferenzkennlinie der verwendeten Isoliersysteme wurde über die elektrische Lebensdauer der Referenzstäbe bestimmt. Für die Bestimmung der Kennlinie wären nur 2 verschiedene Dauerspannungspegel notwendig gewesen. Die Verwendung des dritten Dauerspannungslevels diente zur genaueren Bestimmung der Referenzline und im weiteren zur besseren Vergleichbarkeit mit den geprüften Stäben, da diese nach dem dritten Pegel dauerspannungsgeprüft wurden.

Die eingesetzten Dauerspannungspegel richteten sich nach folgenden Normvorschriften: nach IEEE 1553 wurde ein Dauerspannungspegel von $2,17 U_n$ und ein weiterer von $2,53 U_n$ verwendet. Ein weiterer verwendeter Prüflevel stammt aus der KEMA Normreihe, die eine Prüfung mit $3 U_n$ vorschlägt.

Um die Prüfung zu bestehen, musste bei einem Pegel von $2,17 U_n$ eine Zeit von 400 Stunden erreicht werden. Bei $2,53 U_n$ waren 250 Stunden [14] und bei $3 U_n$ 10 Stunden Betrieb zu erreichen. [15]

Die KEMA S-13 wird gegenwärtig überarbeitet. Im Zuge dieser Überarbeitung wird ein Anheben der zu erreichenden Stunden von 10 auf 50 diskutiert. Für diese Arbeit wurde schon die mögliche neue Grenze von 50 Stunden zu erreichendem Betrieb verwendet.

Bei den Versuchen mit den ungeprüften Generatorstäben, hergestellt mit dem VPI Verfahren, wurden alle Prüfkriterien bestanden und somit obere Bedingungen immer erfüllt.

Die in Kapitel 6.4.3 *Fertigungsprobleme RR auf Kupfer* erläuterten Herstellungsprobleme der Isolation mit dem Resin Rich Verfahren sind in der *Abb. 35* ersichtlich. Man erkennt in Tabelle 2 die enorme Streuung der Werte der Lebensdauer von bis zu 85,2 %. Es ist unter diesen Umständen unmöglich stichfeste Aussagen über Lebensdauern zu treffen. Ein weiterer Punkt ist, dass mit dem im RR Verfahren hergestellten Stäben die geforderten Lebensdauerzeiten laut Norm nicht erreicht werden konnten.

Daher wurde die Arbeit im Bezug auf die Resin Rich Stäbe auf die Gewinnung der in *Abb. 35* dargestellten Referenzlinie für die elektrische Lebensdauer beschränkt.

Je Dauerspannungsstufe wurden fünf baugleiche Stäbe verwendet und geprüft.

Tabelle 3 Ergebnisse der Dauerspannungsversuche der Resin Rich Prüfstäbe

Stabname	Dauerspannungsfeldstärke in kV/mm	erreichte Lebensdauer in Stunden:Minuten: Sekunden
R1	11,95	235:15:17
R2	11,95	186:07:09
R3	11,95	101:56:08
R4	11,95	74:48:57
R5	11,95	111:23:27
R6	13,95	68:31:52
R7	13,95	59:00:24
R8	13,95	34:16:30
R9	13,95	33:18:00
R10	13,95	191:49:36
R11	16,5	10:43:02
R12	16,5	04:48:03
R13	16,5	30:36:15
R14	16,5	13:45:22
R15	16,5	06:44:11

Tabelle 4 Ergebnisse der Dauerspannungsversuche der VPI Prüfstäbe

Stabname	Dauerspannungsfeldstärke in kV/mm	erreichte Lebensdauer in Stunden:Minuten:Sekunden
V1	11,95	1179:44:13
V2	11,95	1097:16:17
V3	11,95	1011:19:17
V4	11,95	1086:53:27
V5	11,95	1373:20:03
V6	13,95	449:40:49
V7	13,95	492:29:29
V8	13,95	685:05:11
V9	13,95	525:34:26
V10	13,95	654:27:17
V11	16,5	83:42:38
V12	16,5	80:18:10
V13	16,5	61:24:29
V14	16,5	75:55:28
V15	16,5	94:29:15

Trägt man nun die verwendete Feldstärke über die erreichte Lebensdauer doppelt logarithmisch auf, lässt sich daraus eine lineare Kennlinie ableiten.

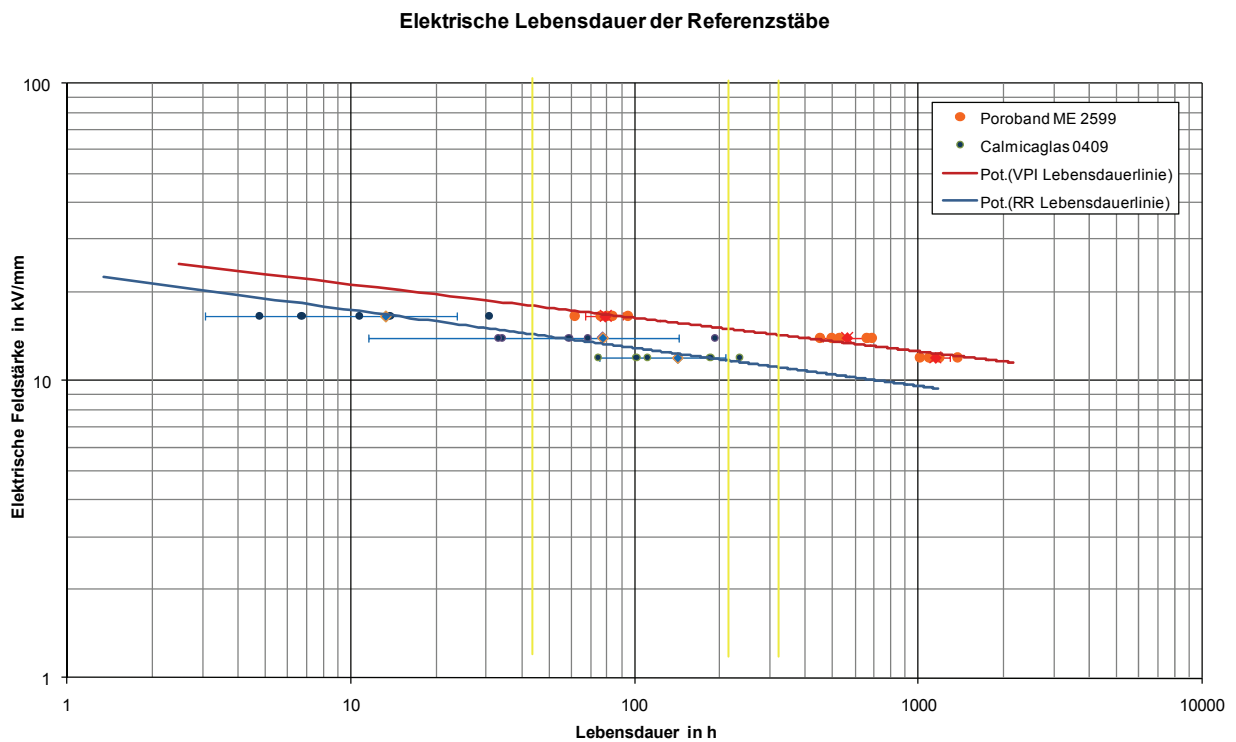


Abb. 35 Lebensdauerreferenzlinien blau für RR und orange für VPI Stäbe. Die laut Norm zu erreichenden Lebensdauerzeiten von 50 (noch inoffizielle Grenze), 250 und 400 Stunden sind gelb markiert

Die so ermittelte Referenzlinie wurde nun für die folgenden, unterschiedlich hoch mit der 1-Minuten Stehspannungsprüfung beanspruchten weiteren VPI Stäbe, als Grundlage zur Lebensdauerbetrachtungen verwendet.

Als Dauerspannungspegel zur Lebensdauerbestimmung diene wieder eine Prüfspannung von $2,53 U_n$ laut IEEE 1553. [14]

Die für diese Arbeit gefertigten Generatorstäbe sind für einen Nennspannung von $U_n = 10 \text{ kV}$ dimensioniert und ausgelegt. Bei einer Isolationsdicke von 2 mm würde das eine beanspruchenden elektri-

schen Feldstärke von $\frac{10 \text{ kV}}{\frac{\sqrt{3}}{2 \text{ mm}}} = 2,89 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ im Nennbetrieb entsprechen.

Das heißt, der eine laut IEEE 1553 Norm zu verwendende Dauerspannungspegel wäre $2,53 \cdot 10 \text{ kV} = 25,3 \text{ kV}$. Mit dieser Beanspruchung müsste der Stab dann mindestens 250 Stunden halten. Er wäre dabei einer Beanspruchung von $12,65 \text{ kV/mm}$ ausgesetzt gewesen.

Da die vorhandenen Dauerspannungszellen auch durch andere Projekte benötigt wurden ist man dazu über gegangen die Dauerspannungsversuche der geprüften Stäbe mit einer noch etwas höheren Feldstärke zu fahren, um die erwarteten Lebensdauern kürzer zu halten. So wurde statt der auf die ursprünglich dimensionierte Nennspannung von 10 kV eine Nennspannung $U_n = 11 \text{ kV}$ für die Dauerspannungsversuche verwendet. Das ist weiter kein Problem da die gewonnene Lebensdauer kennlinie linear extrapoliert über den betrachteten Bereich Gültigkeit besitzt.

So entsprach der Pegel von $2,17 U_n$ einer Spannung von $23,9 \text{ kV}$ und somit einer Feldstärke von $11,95 \text{ kV/mm}$ in der Isolierung. Der zweite Dauerspannungspegel nach IEEE 1553 von $2,53 U_n$ wurde auch zur Lebensdauerbestimmung der Stehspannungs- geprüften Stäbe verwendet. Er entsprach bei der verwendeten Nennspannung von 11 kV einem Dauerspannungslevel von $27,9 \text{ kV}$, und somit einer Feldstärke von $13,95 \text{ kV/mm}$. Der Pegel laut KEMA von $3 U_n$ betrug dann somit 33 kV , das entspricht einer Feldstärke von $16,5 \text{ kV/mm}$.

Die in *Abb. 35* abgebildeten Lebensdauer kennlinien haben folgende Geradengleichungen:

Für die VPI Stäbe: $y = -1,61 \ln(x) + 23,69$ *Formel 14*

Für die RR Stäbe: $y = -1,81 \ln(x) + 21,33$ *Formel 15*

Nach den in Kapitel 4.1 vorgestellten Inverse Power Model und obigen Formeln kann auch eine elektrische Lebensdauer bei anderen Feldbeanspruchung berechnet werden. Wenn man die bei niedrigen Feldstärken mögliche Thresholdspannung außer acht lässt. Diese Berechnung gilt auch für den realen Betriebsfall mit einer angenommenen Beanspruchung von 3 kV/mm .

Das verwendete VPI Isolationssystem hätte somit nach *Formel 7* eine elektrische Lebensdauer von ungefähr 43,5 Jahren.

Es ist dabei sehr bemerkenswert, dass die mit dem VPI Verfahren hergestellten Stäbe trotz der oben beschriebenen verschärften Dauerspannungspegel alle Normkriterien erfüllen konnten und jede Prüfung bestanden haben.

Die elektrische Lebensdauer des Isolationssystems gefertigt mit dem Spulenpressverfahren würde nach *Formel 7* circa 2,86 Jahre betragen. Dieses Ergebnis ist aber aus schon erläuterten Delaminationen auf Grund der Fertigungsprobleme auf Kupfer eher anzuzweifeln.

8 PRAKTISCHE VERLUSTFAKTOR MESSUNG

8.1 Messaufbau

Wie in Kapitel 2 erläutert sind mit der und Kenntnis des Verlustfaktors eines Isolationssystems einer rotierenden Hochspannungsmaschine Aussagen über den Imprägnierungsgrad und Ablösungen Kupferstab möglich. Aus *Abb. 33* kann man entnehmen, dass die Messung des Verlustfaktors zur laufenden Kontrolle der Isolation im Herstellungsprozess verwendet wurde.

Zur Bestimmung des Verlustfaktors wurde eine Messung nach Schering, die in *Kapitel 2.1* näher erläutert wurde, verwendet.

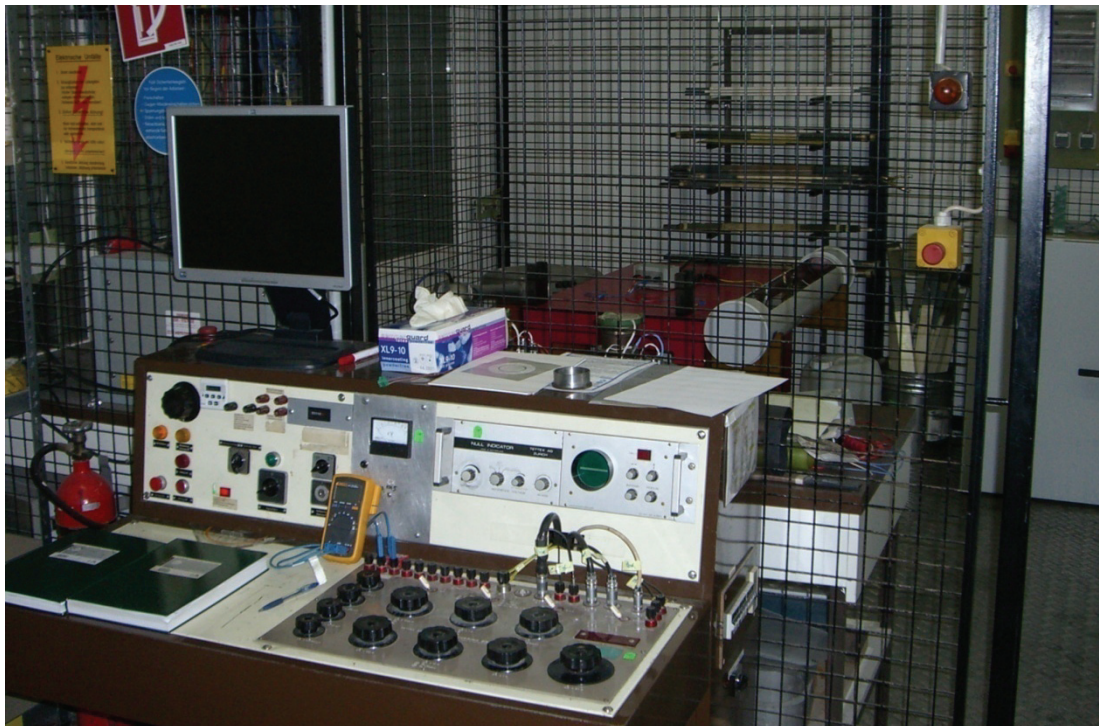


Abb. 36 Hochspannungsmesszelle mit Schering-Brücke im Vordergrund

Die verwendete Scheringbrücke „2801“ der Firma Tettex war so verschaltet, dass nach dem Abgleich nach Betrag und Phase der Verlustfaktor direkt abgelesen werden konnte.

Gemessen wurde in 2 kV Schritten bis zur 1,2-fachen Nennspannung, also 12 kV. Bei einigen Stäben konnte der letzte Wert auf Grund von einsetzenden Oberflächenentladungen nicht einwandfrei bestimmt werden.

Der $\tan \delta$ Anstieg wurde durch Differenzbildung des folgenden mit dem vorigem Messwertes bestimmt. War der maximale Anstieg über 2 ‰ wurde der gefertigte Generatorstab verworfen. Auch ein Startwert von unter 10 ‰ war Bedingung für die Weiterverwendung des gefertigten Stabes.

Bei einigen Generatorstäben konnte bei der $\tan \delta$ Messung ein Sinken der oberen Werte beobachtet werden. Dies lässt sich mittels des Gesetzes von Paschen und Teilentladungen erklären. Siehe dazu Kapitel 3.1. Zünden beispielsweise bei 10 kV TE's in Hohlräumen kommt es zu einer Druckerhöhung in den Hohlstellen. Somit steigt die Spannungsfestigkeit und bei einer weiteren $\tan \delta$ Messung bei 12 kV kommt es zu keiner Teilentladung und somit zu einem geringeren Verlustfaktor.

8.2 Änderung des Verlustfaktors während der Stabproduktion

Der Verlustfaktor wurde im Lauf des Produktionsprozesses drei Mal gemessen und diente zur Kontrolle der Qualität der Fertigung des Isolationssystems. Als Qualitätskriterium wurde am Ende des Produktionsprozesses ein $\tan \delta$ Anstieg $\leq 2 \text{ ‰}$ beim komplett fertigen Stab gefordert.

Die erste Verlustfaktormessung direkt nach der Fertigstellung der Hauptisolation, war die erste mögliche messtechnisch quantifizierbare Qualitätskontrolle der Isolation. In dieser Prozessstufe wurde ein maximaler $\tan \delta$ Anstieg von $1,8 \text{ ‰}$ pro 2 kV Spannungssteigerung gefordert, weil durch den folgenden Thermozyklus beim EGSB- Aushärten noch ein kleiner Anstieg des Verlustfaktors zu erwarten war. So konnte am Ende des Herstellungsprozesses ein maximaler $\tan \delta$ Anstieg $< 2 \text{ ‰}$ pro 2 kV sicher erreicht werden.

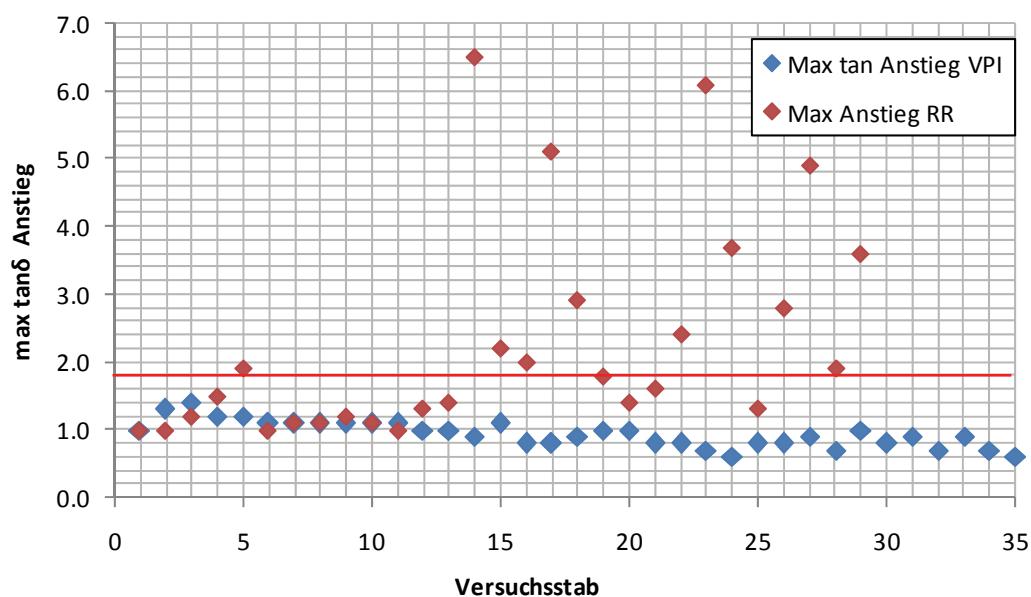


Abb. 37 Maximaler $\tan \delta$ Anstieg zum Zeitpunkt der ersten möglichen Messung direkt nach dem Pressen bzw. Imprägnieren. Rot dargestellt die zu erfüllende Qualitätsgrenze der ersten $\tan \delta$ Messung von $1,8 \text{ ‰}$ Anstieg pro $2 \text{ kV } U_m$ Erhöhung

In Abb. 37 ist der maximale $\tan \delta$ Anstieg der einzelnen Generatorstäbe dargestellt. Die mit dem Vakuumdruck Verfahren gefertigten Stäbe (in blau dargestellt) erfüllen alle die für die erste $\tan \delta$ Messung geforderte Qualitätsgrenze von einem Anstieg kleiner $1,8 \text{ ‰}$ pro 2 kV Spannungssteigerung.

Die in Kapitel 6.4.3 beschriebenen Fertigungsprobleme mit dem Resin Rich Verfahren auf Kupfer sind in Abb. 37 ebenfalls ersichtlich. Waren die ersten 10 RR Stäbe (in rot dargestellt) bis auf einen alle innerhalb der Qualitätsgrenze, konnte mit den in der Folge gefertigten Stäbe das Qualitätskriterium oft nicht erreicht werden. So wurde, wie schon beschrieben, einfach weiter gefertigt bis 15 für die Referenzlebensdauer kennlinie brauchbare Stäbe vorhanden waren.

Der nächste Schritt im Produktionsprozess der Generatorstäbe war das Aufbringen des Endenglimmschutzes. Dieser musste danach für mehrere Stunden bei einer Temperatur von 160 °C ausgehärtet werden.

Da die Aushärtetemperatur von 160 °C weit über der üblichen Betriebstemperatur der Stäbe liegt, stellt diese hohe Temperatur eine große thermische Belastung für das Isoliersystem dar. Um Schäden aufgrund des Thermozyklus ausschließen zu können, wurde nach dem Aushärten des Endenglimmschutzes eine weitere $\tan \delta$ Messung zur Qualitätskontrolle durchgeführt. Bei dieser Messung wurde, wie nach der dritten $\tan \delta$ Messung auch, ein maximaler $\tan \delta$ Anstieg von 2,0 ‰ pro 2 kV als zu erfüllendes Qualitätskriterium gefordert.

In *Abb. 38* ist die Änderung des Verlustfaktors durch den Thermozyklus des EGSB Aushärtens sichtbar. Bei Stäben, die die vorher geforderte Qualität erfüllten, war nur ein minimaler Anstieg zu verzeichnen. Bei den Resin Rich Stäben wo schon bei der ersten $\tan \delta$ Messung die Qualitätsgrenze nicht oder nur knapp erreicht wurde, ist oft ein gewaltiges Wegbrechen des $\tan \delta$ Anstiegs zu erkennen. Dass diese Stäbe aus den Dauerversuchen auszuschließen waren zeigt diese Entwicklung noch einmal deutlich.

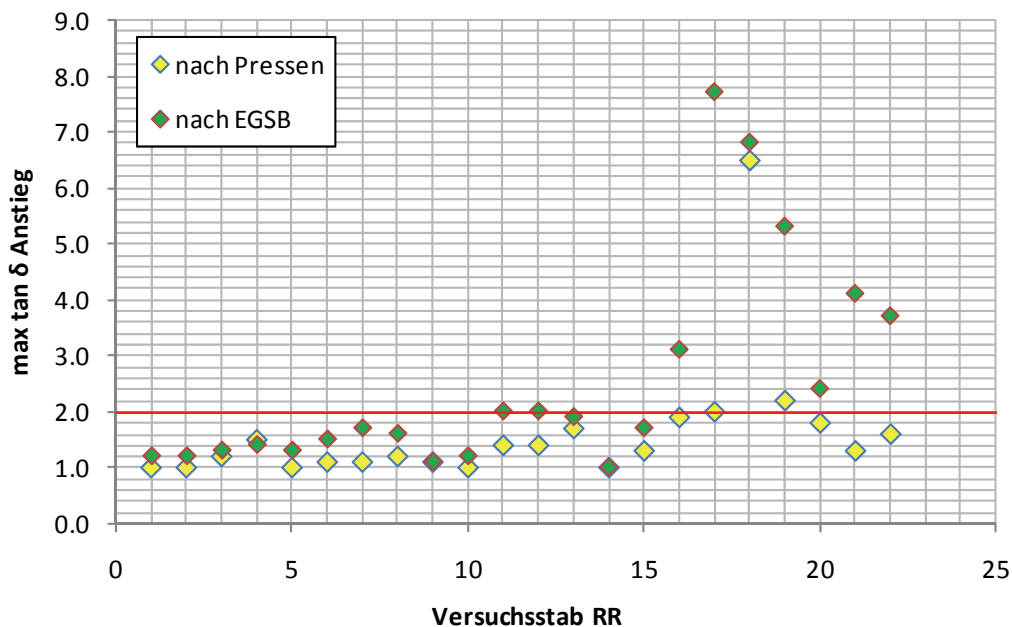


Abb. 38 Verlustfaktor beim RR Verfahren im Vergleich: Direkt nach dem Pressen in gelb und nach dem EGSB Aushärten in grün. In rot die zu erreichende Qualitätsgrenze

Zum dritten und letzten Mal wurde der $\tan \delta$ Anstieg der Versuchsstäbe nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung gemessen. Ziel war es so nach der Lebensdauerbestimmung eventuelle Zusammenhänge zwischen elektrischer Lebensdauer, emittierter Energie während der Stehspannungsprüfung und dem $\tan \delta$ feststellen zu können.

Auffällig war bei dieser Messung, dargestellt in *Abb. 39*, dass der Anstieg des $\tan \delta$ nach der Stehspannungsprüfung den kleinsten Wert aller 3 Messungen aufwies. Nur bei zwei Stäben zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Es ist anzunehmen dass die meisten Hohlräume in der Isolation durch die Stehspannungsprüfung und vermehrte Teilentladungen in den Hohlstellen beispielsweise durch Kohlenstofffaserbrücken kurzgeschlossen waren oder Aufgrund von Druckanstieg in den Hohlstellen nicht zünden und daher nicht detektiert werden konnten. Siehe Kapitel 3.1.

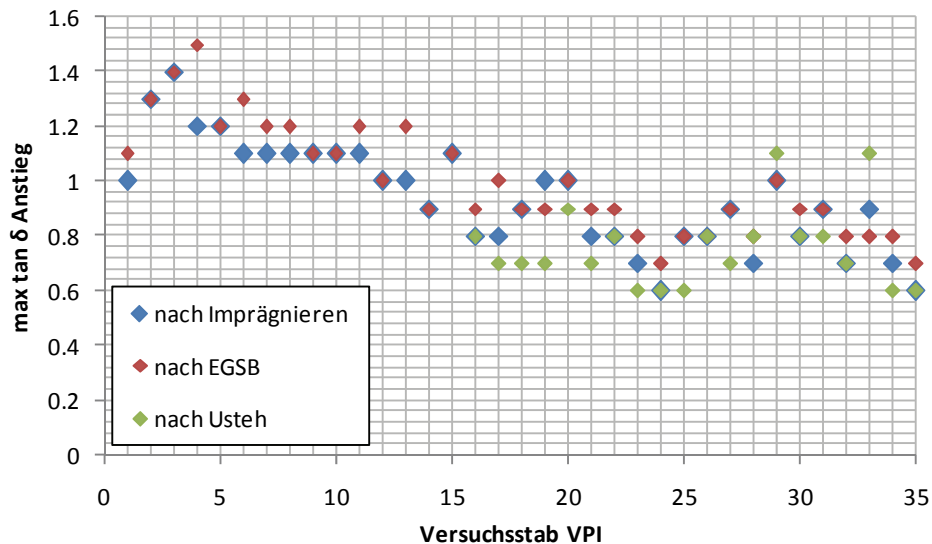


Abb. 39 $\tan \delta$ Entwicklung bei den VPI Stäben; durch die 1 min Stehspannungsprüfung ist ein Sinken des maximalen $\tan \delta$ Anstieges zu erkennen

Der große Energieeintrag durch die Stehspannungsprüfung und die damit stark verkürzte Lebensdauer der Isoliersysteme ist im $\tan \delta$ nicht sichtbar.

Dass kein direkter Zusammenhang zwischen $\tan \delta$ und Restlebensdauer besteht wird in der Literatur schon öfter beschrieben [5], [27], [29] und konnte so aufs Neue gezeigt werden.

8.3 Abhängigkeit des Verlustfaktors von den geometrischen Dimensionen und der Isolationsdicke

Der Verlustfaktor wurde als Qualitätskriterium bei der Herstellung der Prüfstäbe verwendet. Stäbe mit schlechten Isolierungen konnten so erkannt werden. Mehr dazu siehe *Kapitel 6.4.3*.

Die Gründe für einen schlechten Verlustfaktor sind vor allem Hohlräume und Ablösungen in der Isolation. Ein anderer möglicher Grund beim VPI Verfahren ist, dass die Isolation nicht ganz durch imprägniert ist. Wurden die Stäbe mittels Resin Rich Verfahren hergestellt, kann auch ein Problem im Presszyklus zu inhomogenen Stellen, beispielsweise auf Grund von nicht flüssig gewordenem Harz, und somit zu Hohlräumen und Teilentladungen, führen.

Es ist also möglich, dass ein direkter Zusammenhang zwischen dem $\tan \delta$ und der exakten Abmessung der Isolation bestehen muss. Nimmt man an dass auf Grund der entstandenen Hohlstellen die Isolation nicht genau die gewünschte Dimension erreichen kann. Die Isolation weist dann eine andere Kapazität auf. Die Dimensionen der gefertigten Generatorstäbe wurden daher auch mehrmals kontrolliert und dokumentiert.

Die gewünschte Dimension der Generatorstäbe mit fertiger Isolation war 14,0 x 54,0 mm. Nach dem Wickeln betrug die Stärke zwischen 14,8 und 14,9 mm. Durch das Pressen beim RR Verfahren in der Presse und beim VPI Verfahren durch die vor dem Imprägnieren angebrachten Nutimitationen konnte die gewünschte Dimension bis auf kleine Abweichungen von ungefähr einem Zehntel Millimeter erreicht werden.

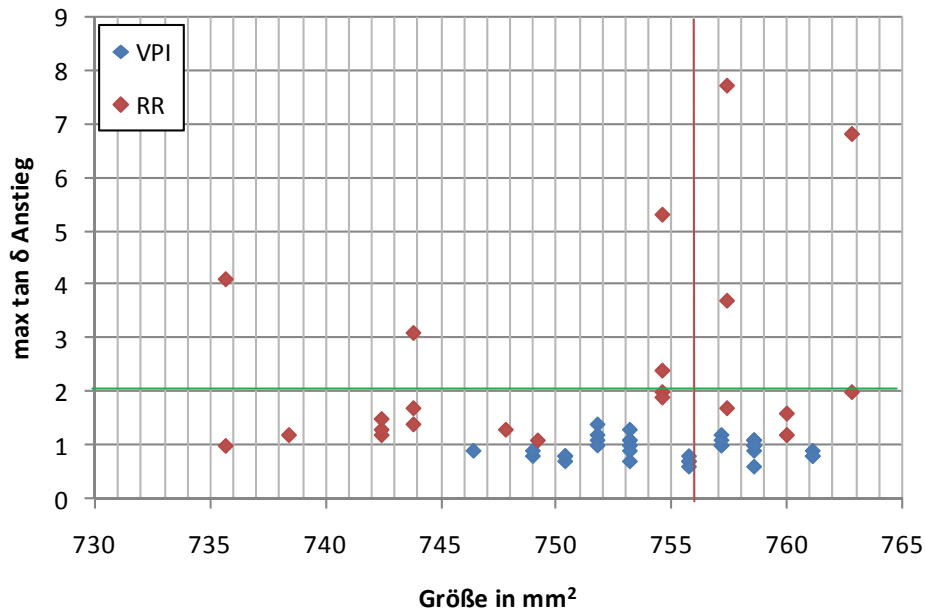


Abb. 40 Größe der Teststäbe und der $\tan \delta$ Anstieg; rot ist die theoretisch richtige Größe und grün der Qualitätsgrenzwert von 2 ‰ $\tan \delta$ Anstieg

In Abb. 40 ist der Zusammenhang zwischen der Größe des Stabes und des $\tan \delta$ Anstieges ersichtlich. Zur einfacheren Darstellung ist auf der x-Achse die Größe als Fläche aufgetragen. Das bedeutet die gewünschte Größe von 54,0 x 14,0 mm entspricht durch Multiplikation einer Fläche von 756 mm².

Ein Zusammenhang zwischen Größe der Isolation und dem Verlustfaktor kann also wie in der Abb. 40 ersichtlich ist nicht festgestellt werden.

Die VPI Stäbe streuen allgemein weniger in der Größe und weisen einen guten Verlustfaktoranstieg von unter 1 ‰ nicht nur bei den gewünschten Isolationsabmessungen auf.

Produktionsprozessbedingt ist beim Resin Rich Herstellungsverfahren die Streuung der Abmessungen viel größer. Doch auch hier ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen einem großen Verlustfaktoranstieg und einer großen Abweichungen in den Abmessungen erkennbar. Wie in Abb. 40 ersichtlich sind Stäbe nahe an der gewünschten Größe sowohl relativ gut mit einem Anstieg von unter 2 ‰ aber auch unverwendbar mit $\tan \delta$ Anstiegen von bis zu 7,6 ‰.

9 PRAKTISCHE TEILENTLADUNGSMESSUNG

9.1 Messaufbau

Die Teilentladungsmessung wurde im hauseigenen Hochspannungsprüflabor der Firma ISOVOLTA durchgeführt. Als Prüftransformator kam ein 150 kV 30 kVA Trafo der Firma Phenix zum Einsatz. Das verwendete Teilentladungsmesssystem LDS6 von LDIC erfüllt die IEC 60270. Mit einer Messfrequenz zwischen 100 kHz und 1000 kHz handelt es sich um ein begrenzt breitbandiges Messsystem mit einem Empfindlichkeitsbereich zwischen 1 pC und 100 000 pC.

Das Teilentladungsmesssystem von LDIC und die dazugehörige Software ermöglicht umfassende Auswertemöglichkeiten. Es ist möglich sich die Ladung über die Phase, über die Zeit oder über die Spannung anzeigen zu lassen. Weiters kann man zwischen bipolarer und unipolarer Darstellung wählen sowie mit einem Erkennungstool die mögliche Fehlerart beschreiben lassen.



Abb. 41 Teilentladungsmessung im Labor mit Prüftrafo, Koppelkondensator und Generatorstab als Prüfling

Der Aufbau der Messungen erfolgte so teilentladungsarm wie möglich. Dafür wurden Messleitungen sehr großen Querschnitts verwendet, um Teilentladungen von sprühenden dünnen Kabeln zu vermeiden.

Spitze Gegenstände, wie Späne etc. wurden gewissenhaft aus der Messzelle entfernt. Auf Grund des hohen elektrischen Feldes während der Prüfung wären sonst sicher Teilentladungen auf Grund dieser Inhomogenitäten aufgetreten, die die Messungen verfälscht hätten.

Es wurde weiters auf die Vermeidung von sämtlichen Kanten und scharfen Stellen geachtet. Der Prüftrafo hat hierfür runde und großflächige Anschlüsse.

Um Teilentladungen im Bereich der Kanten an den Stabenden der Generatorstäbe zu verhindern, wurden runde Aluprofile auf die Enden der Stäbe geschraubt.

Die im Haus befindliche Lüftung und Klimaanlage ist pulswechselumrichter-gesteuert und erzeugt daher massive Teilentladungen aufgrund des Schaltens der GTO's. Ungünstiger Weise befindet sich die Schaltzentrale der Anlage im Hochspannungsprüflabor. Da diese Teilentladungen auf die Messung einen starken Einfluss gehabt hätten wurde die Anlage während der TE Messungen außer Betrieb genommen. Siehe *Abb. 42*. Der Grundstörpegel konnte so von 22 pC auf 8 pC, gemessen mit hoher Sensitivity und ohne RIV Reduction, massiv gedrückt werden. Es wurden TE-Pegel >4000 pC erwartet, sodass dieser Grundstörpegel akzeptabel war und das Resultat nicht beeinflusste.

Wie in Kapitel 3.2 *Elektrisches Messprinzip* beschrieben, muss der Messkreis als erstes kalibriert werden. Da bei der 1-Minuten Stehspannungsprüfung TE Pegel zwischen 4000 pC und 5000 pC auftraten wurde der Messkreis immer auf 5000 pC kalibriert, um die einzelnen Messungen vergleichen zu können.

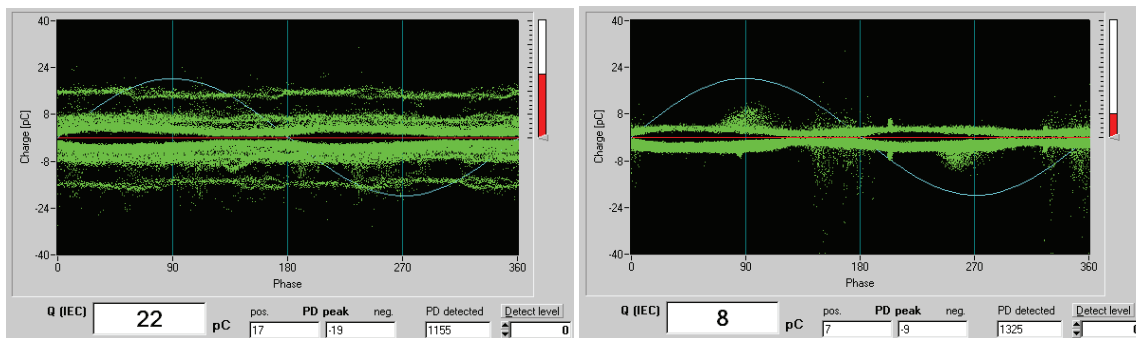


Abb. 42 Grundstörpegel bei eingeschalteter Lüftung (links) und bei ausgeschalteter Lüftung (rechts)

Pro Prüfstab wurden drei Teilentladungsmessungen durchgeführt. Die erste Messung erfolgte vor der Stehspannungsprüfung bei U_n .

Danach wurde der zu prüfende Stab 1 Minute lang der Stehspannungsprüfung unterzogen. Die verwendeten Pegel variierten dabei zwischen $3,5 U_n$ und $4,25 U_n$ wie in Kapitel 6.1 beschrieben.

Während der Stehspannungsprüfung wurde ebenfalls eine Teilentladungsmessung gemacht. Die während der Prüfung in Form von TE's umgesetzte Leistung konnte mit diesen Messwerten berechnet werden.

Um eine eventuelle Schädigung der Stäbe durch die Stehspannungsprüfung im Teilentladungspegel der Stäbe zu sehen, wurde nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung der Stab nochmal bei U_n teilentladungsgemessen.

9.2 Messergebnisse

Das Teilentladungsmesssystem von LDIC und die dazugehörige Software kann verschiedene TE Pattern darstellen. Es ist möglich sich die Ladung über die Phase, über die Zeit oder über die Spannung darstellen zu lassen. Weiters kann man zwischen bipolarer und unipolarer Darstellung wählen sowie mit einem Erkennungstool die mögliche Fehlerart beschreiben lassen.

Die Messdaten können auch in ein ASCII-File exportiert werden um so Berechnungen anstellen zu können.

Bei Nennspannung waren bei allen Stäben neben inneren Teilentladungen eigentlich fast ausschließlich Oberflächenentladungen fest zu stellen.

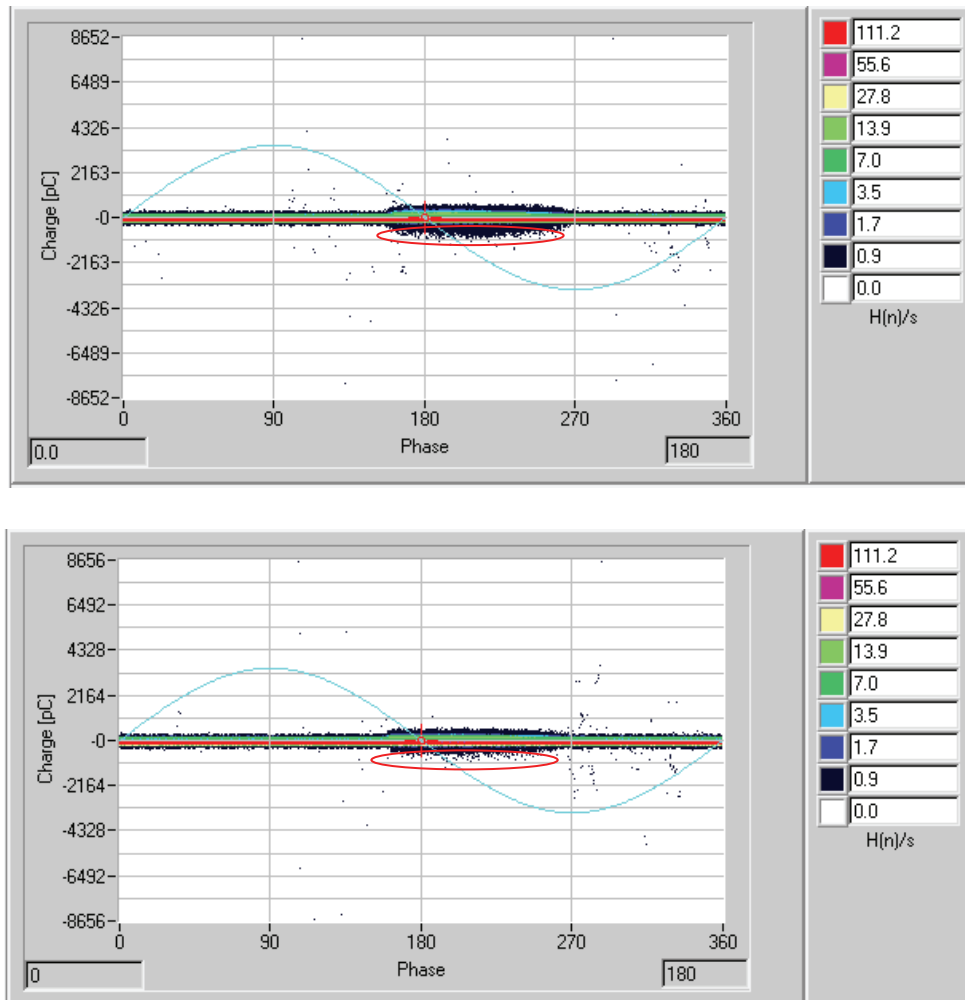


Abb. 43 Teilentladungen bei Nennspannung, oben vor und unten nach der Stehspannungsprüfung, es ist eine kleine Abnahme der TE's zu erkennen (rote Markierung)

In Abb. 43 ist eine Minderung des Teilentladungspegels bei Nennspannung nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung zu sehen.

Die zwei für das Sinken verantwortlichen Mechanismen, Paschengesetz und mögliche Bildung von leitfähigen Kohlenstoffbrücken sind in Kapitel 3.1 genauer beschrieben.

Tabelle 5 TE Einsatzspannungen bei den 3 Teilentladungsmessungen

Stabname	TE Einsatz in [kV] bei U_n	TE Einsatz in [kV] bei $U_{steh}=U_n \cdot \text{Prüfpegel}$	TE Einsatz in [kV] bei U_n	Prüfpegel
V16	5,35	4,4	5,83	3,5
V17	4,03	4,2	5,64	3,5
V18	5,7	5	5,67	3,5
V19	3,59	4	4,41	3,5
V20	3,91	4,1	4,66	3,5
V21	4,35	4,6	4,25	4
V22	4,16	5	4,38	4
V23	4,13	3,9	5,1	4
V24	4,16	4	4,9	4
V25	4,26	4,2	5,13	4
V26	4,63	4	5,17	4,25
V27	3,5	3,7	4,82	4,25
V28	4,57	4,3	5,67	4,25
V29	4,03	4	4,6	4,25
V30	4,25	3,5	4,25	4,25
V36	4,14	4,35	5,19	4,5
V37	4,63	4,95	5,28	4,5
V38	4,25	4,67	5,95	4,5
V39	4,41	5,17	5,57	4,5
V40	5,98	6,3	5,8	4,5

Im Weiteren konnte auch ein Steigen der TE Einsatzspannung festgestellt werden. Nach der 1-Minuten Stehspannungsprüfung war der Einsatzpegel der Teilentladungen höher als vorher, siehe

Tabelle 5. Dieses Phänomen ist mit dem in Kapitel 3.1 erläuterten Paschengesetz erklärbar.

Im Zuge der Versuchsreihe konnte eine geringfügig höhere TE Einsatzspannung als Teilentladungseinsatzspannung beobachtet werden. Daraus lässt sich auch ableiten, dass vor allem innere Teilentladungen bei den Generatorstäben auftraten.

Eine mögliche Wirkung von TE's ist, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, die Druckerhöhung in Hohlstellen. Laut dem Gesetz von Paschen steigt mit höherem Druck die Spannungsfestigkeit von Gasen. So kann es sein, dass beim Absenken der Spannung die Festigkeitsgrenze der Fehlerstellen schon bei einem höheren Spannungswert erreicht wird und die Teilentladungen daher früher verlöschen als sie gezündet haben.

9.3 Betrachtung der Teilentladungsenergie

In der vorliegenden Arbeit wurde vor allem versucht die Abnahme der elektrischen Lebensdauer der Prüfstäbe mit der in der Isolation umgesetzten Energie in Zusammenhang zu bringen. Grundlage dafür ist die Überlegung, dass eine erhöhte Spannungsprüfung mehr Energie in der Isolation umsetzt. Dieses „Δmehr Energie“ aufgrund der erhöhten Prüfspannung schädigt das Isolationssystem dann stärker und setzt die elektrische Lebensdauer erheblich herab. [28]

Allgemein ergibt sich die elektrische Energie in Js durch Multiplikation von Spannung und Ladung. Die durch die Teilentladungen umgesetzte Energie ergibt sich durch die Summe der Multiplikation der Ladung mit der gerade anliegenden Spannung im Zeitpunkt der Teilentladung.

$$E = \sum_i q_i \cdot u_i$$

Formel 16 Teilentladungsenergie nach IEC 60270

Wie in *Tabelle 2* bereits gezeigt ergibt sich die umgesetzte Leistung der Teilentladungen nach IEC 60270 mit:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n q_i \cdot u_i$$

Formel 17 Teilentladungsleistung nach IEC 60270

Das verwendete Messsystem LDS6 hat viele schon beschriebene Funktionen. Die Möglichkeit der Darstellung der durch Teilentladungen umgesetzten Energie ist jedoch nicht implementiert. Um auf die durch Teilentladungen umgesetzte Energie zu kommen, mussten die Messergebnisse in eine ASCII Datei exportiert werden. In diesem File waren pro TE Impuls die Ladung q und die zur Zeit der gemessenen Ladung anliegende Spannung u enthalten. Durch Multiplikation und Summenbildung über den gewünschten Zeitraum von einer Minute konnte die Teilentladungsenergie wie in *Formel 16* dargestellt berechnet werden. Im Weiteren war es so auch möglich nach *Formel 17* die elektrische umgesetzte Leistung der Teilentladungen zu berechnen.

Jede Prüfspannungstufe wies einen charakteristischen Energiepegel auf. So war die durchschnittlich emittierte Leistung im Nennbetrieb bei $U = 10 \text{ kV}$ 95,67 mW bei einer sehr kleinen Streuung von lediglich 7,9 %. Dabei wurden beide TE Messungen zusammen betrachtet, die vor und auch die nach der erhöhten Stehspannungsprüfung.

Betrachtet man nur den Energiepegel der Stäbe bevor sie der harten Stehspannungsprüfung unterzogen wurden, war die durchschnittlich emittierte Teilentladungsleistung im Nennbetrieb 96,06 mW bei einer Streuung von 7,6 %

Nach der Stehspannungsprüfung betrachteten emittierten die Stäbe durchschnittlich 96,17 mW bei einer Streuung der Ergebnisse von 7,9 %.

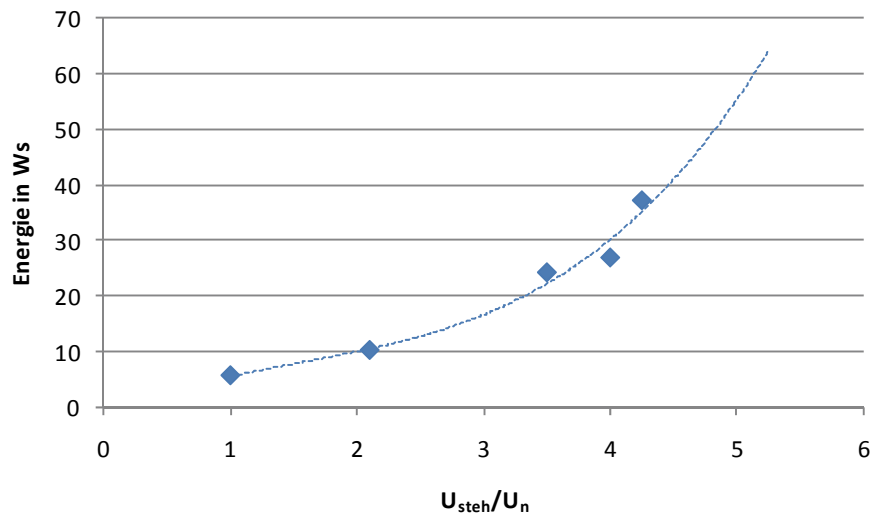


Abb. 44 Emittierte Teilentladungsenergie bei verschiedenen hohen Prüfpegeln der Steh Spannungsprüfung

Der etwas höhere Pegel nach der Stehspannungsprüfung kann als Zeichen für eine Schädigung des Isoliersystems durch die Prüfung betrachtet werden. Es ist anzunehmen dass beispielsweise Hohlräume, also Quellen für innere Teilentladungen, durch die in der Prüfung freigesetzte Energie ausgeweitet werden. Dieser erhöhte Energiebedarf kann dahingehend interpretiert werden, dass elektrisches Treeing einsetzt. Das würde bedeuten dass die Hohlräume größer werden und daher mehr Teilentladungen stattfinden können und somit im Weiteren mehr Energie umgesetzt wird.

Auch bei den drei unterschiedlichen Stehspannungsprüfpegeln war ein charakteristischer Energiewert bei kleiner Streuung beobachtbar. Bei einer Prüfung mit $3,5 U_n$ war die emittierte Leistung im Mittel $403,68 \text{ mW}$. Die Stehspannungspegel $4,0 U_n$ und $4,25 U_n$ wiesen eine Leistung von $447,98 \text{ mW}$, bzw. $619,05 \text{ mW}$ auf.

Man erkennt in Abb. 44 einen quadratischen Zusammenhang mit zwischen Prüfspannung und Teilentladungsleistung der mit $P = 0,431 \cdot U^2 - 0,729 \cdot U + 1,338$ bei einem R^2 von $0,97$ gegeben ist. Der allgemeine Zusammenhang:

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \cdot j\omega C$$

bestätigt sich auch hier, an dieser kapazitiven Anordnung einer Hochspannungsisolierung.

Setzt man die durch die Teilentladungen verursachten Energien ins Verhältnis zum Nennbetrieb wird bei einer Prüfung mit 3,5-facher Nennspannung das 4,21-fache an Energie emittiert. Bei einer Prüfung mit einer Prüfspannung von $U_p = 4,5 U_n$ ist es sogar das 6,47-fache.

Bei einer Prüfung nach Norm also einer Prüfspannung von $U_{\text{steh}} = 2 U_n + 1 \text{ kV}$, also 21 kV , wird durch die Teilentladungen nur das 1,79-fache der Energie im Nennbetrieb emittiert.

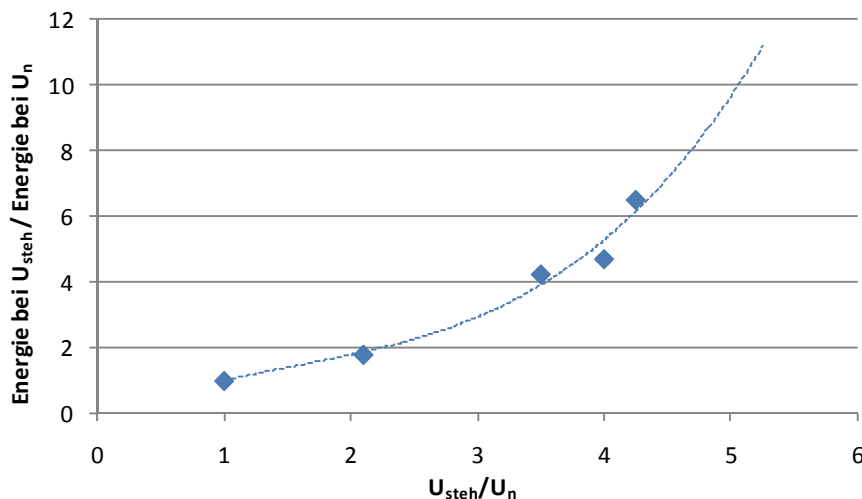


Abb. 45 Teilentladungsenergie im Verhältnis zur emittierten Energie im Nennbetrieb; gepunktet dargestellt eine berechnete Ausgleichskurve mit Prognose

Approximiert man eine Kurve durch die einzelnen Punkte, kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,971$ folgender Zusammenhang gefunden werden:

$$y = 0,139 \cdot \left(\frac{U_{\text{steh}}}{U_n} \right)^3 - 0,652 \cdot \left(\frac{U_{\text{steh}}}{U_n} \right)^2 + 1,771 \cdot \left(\frac{U_{\text{steh}}}{U_n} \right) - 0,274$$

Formel 18 Ausgleichskurve

Laut dem nach *Formel 18* gefundenen Zusammenhang würde das bei einer Prüfung mit einem Stehspannungspegel von $5 U_n$ das 9,66- fache an emittierter Energie bedeuten. Die gravierende Bedeutung der im Isoliermedium umgesetzten Energie bezogen auf die elektrische Lebensdauer der Generatorstäbe wird im folgenden Kapitel erläutert.

In Kapitel 3.1 wurden die Auswirkungen von elektrischen Teilentladungen erläutert. Diese waren vor allem:

- Erwärmung
- Druckerhöhung in den Entladestellen
- Chemische Veränderungen durch Zersetzung des Isoliermediums
- Strahlung im sichtbaren- und im UV Bereich
- Raumladungen können auf Grund von TE's im Isoliersystem entstehen und einen Durchschlag begünstigen

Da die Teilentladungsenergie die im Isoliermedium umgesetzt wird, durch die erhöhten Spannungsprüfungen grösser ist, sind die Auswirkungen der Teilentladungen stärker als sie es im Nennbetrieb wären. Das bedeutet beispielsweise, dass das Isoliermedium noch wärmer wird, was ein weiteres Ansteigen der Verluste bedeutet, wodurch noch mehr Energie in der Isolation umgesetzt wird und somit die elektrische Alterung noch schneller fortschreitet.

Auch andere Auswirkungen der Teilentladungen werden somit noch verstärkt.

Man kann also zusammenfassend vermuten, dass hohe Prüfspannungspegel und somit mehr umgesetzte Energie, die elektrische Lebensdauer des Isoliersystems verkürzt.

9.4 Zusammenhang umgesetzte Teilentladungsenergie und elektrische Lebensdauer

Um die Auswirkungen der verschiedenen 1-Minuten Stehspannungspegel auf die elektrische Lebensdauer feststellen zu können wurden die Stäbe nach den verschiedenen Prüfungen wie in Kapitel 7 erläutert mit Dauerspannungsversuchen die elektrische Lebensdauer bestimmt der Generatorstäbe bestimmt.

Da um, wie schon beschrieben, die Lebensdauerexperimente weiter zu beschleunigen eine Nennspannung von 11 kV statt 10 kV angenommen wurde, ergab sich eine Feldbelastung für die Dauerspannungsversuche von 13,95 kV/mm.

Trotz dieser viel höheren Belastung konnte die IEEE 1553 Norm von den VPI Stäben bei den Referenz Stäben immer und bei den geprüften Stäben bis auf 4 Mal erfüllt werden.

Die Ergebnisse sind in *Abb. 46* ersichtlich. Die blaue Kennlinie stellt die Referenz gewonnen aus den ungeprüften Referenzstäben dar. Laut IEEE 1553 ist bei einer Belastung mit $2,53 U_n$ mindestens eine Lebensdauer von 250 Stunden zu erreichen.

Alle folgenden Angaben über die Lebensdauer in Stunden der verschiedenen Generatorstäbe sind die Werte des Mittelwertes aus der Weibullverteilung aus den 5 Stäben pro Prüfspannung.

Es ist ersichtlich, dass die elektrische Lebensdauer der Generatorstäbe mit höherer 1-Minuten Prüfungsspannung abnimmt. Die Stäbe mit einem Prüfpegel von $4,25 U_n$ erreichten 326 Stunden, während die ungeprüften Referenzstäbe eine elektrische Lebensdauer 606,5 Stunden erreichen konnten.

	Emittierte Energie in Ws in 1 Minute	Emittierte Leistung in mW	Lebensdauer in Stunden aus Mittelwert der Weibullverteilung	erreichte Lebens- dauer in %
$1 \cdot U_n$	5,7401	95,67	606,5	100
$3.5 \cdot U_n$	24,2201	403,68	507,1	83,6
$4.0 \cdot U_n$	26,8786	447,98	393,5	64,9
$4.25 \cdot U_n$	37,1429	619,05	326,1	53,7

Tabelle 6 Emittierte Energie und Leistung während der 1-Minuten Stehspannungsprüfung sowie die erreichte Lebensdauer

Aus der Analyse nach IEEE 930 folgt auch, dass bei härterer Prüfung die Streuung der Lebensdauern abnimmt. Das ist in Kapitel 4.4 erklärt und in *Abb. 46* am steileren Anstieg der Geraden, beispielsweise bei der Linie für $4,25 U_n$ zu erkennen.

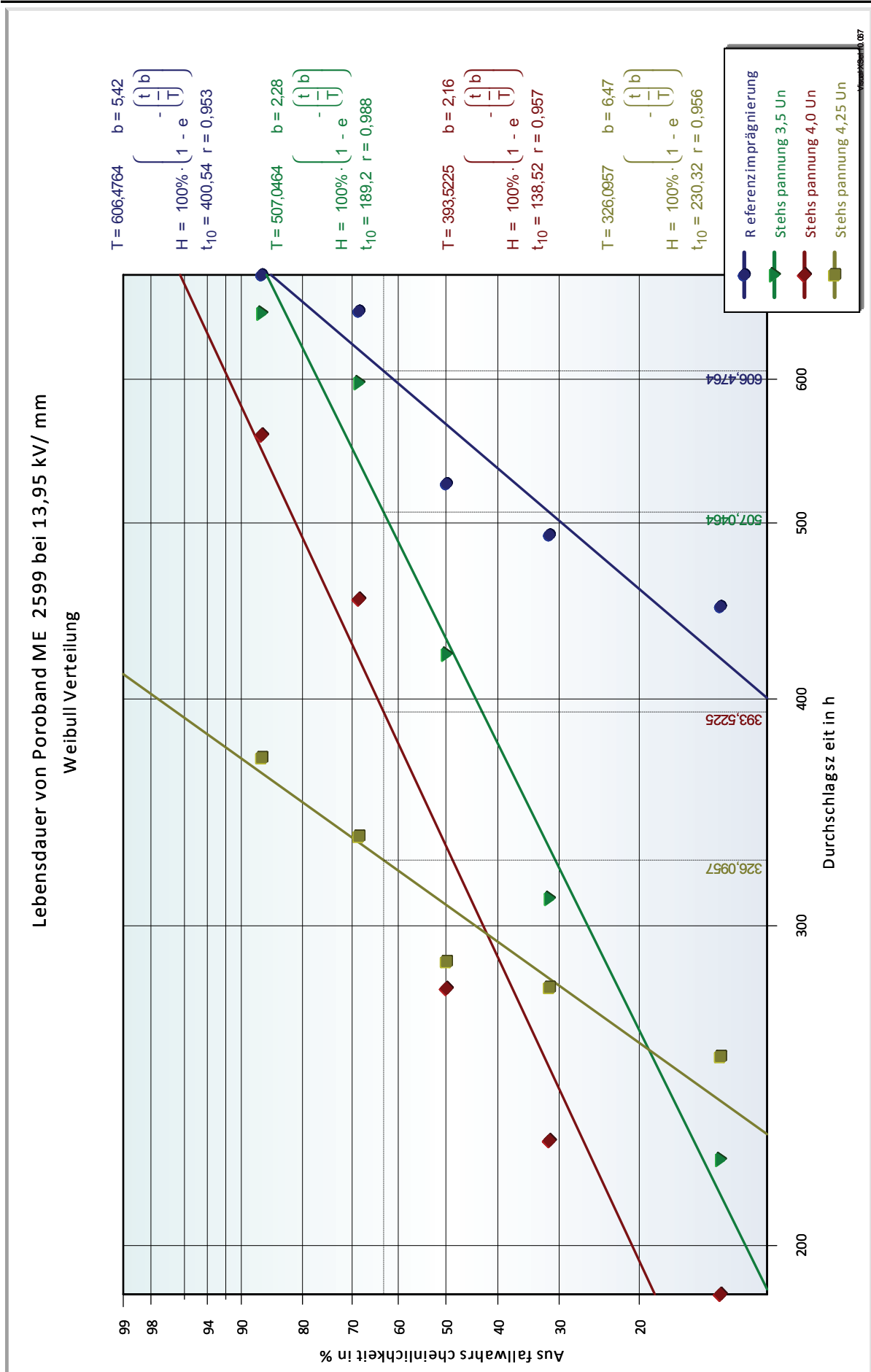


Abb. 46 Lebensdauerersuch von Poroband ME 2599 bei 13.95 kV/mm mit Weibull Parametern und Verteilung

In *Abb. 47* ist der Zusammenhang zwischen der erreichten elektrischen Lebensdauer und der angewendeten 1-Minuten Stehspannungsprüfung ersichtlich.

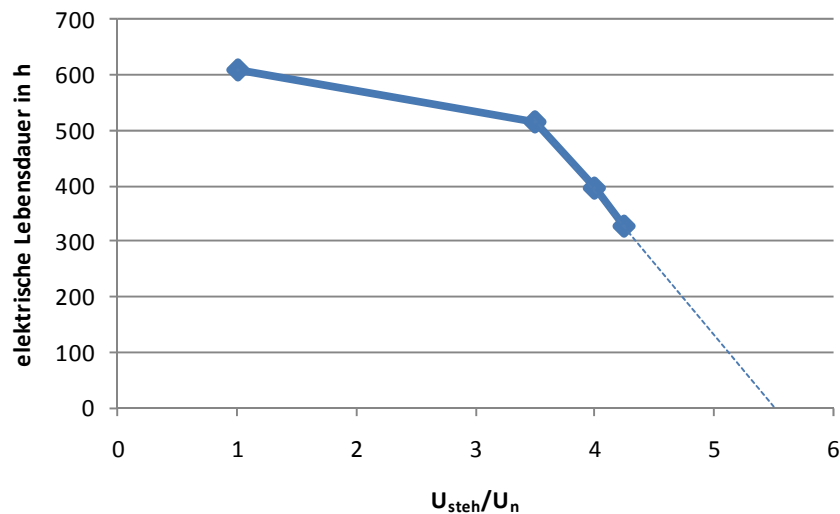


Abb. 47 Erreichte elektrische Lebensdauer in Abhängigkeit der 1 Minuten Stehspannungsprüfpegel

Man kann erkennen dass ab 3,5-facher Nennspannung ein massiver Rückgang der elektrischen Lebensdauer besteht. Mittels Approximation konnte für Prüfspannungen, größer der 3,5-fachen Nennspannung, folgender Zusammenhang gefunden werden:

$$L = -201,5 \cdot \left(\frac{U_{\text{steh}}}{U_n} \right) + 1202$$

Formel 19 Lebensdauer L in Abhängigkeit der Prüfspannung U_{steh}

Bei einer Stehspannungsprüfung mit der 5 fachen Nennspannung würde laut *Formel 18* das 9,66-fache der Teilentladungsenergie emittiert bei Nennspannung im Isoliermedium umgesetzt werden. Laut *Formel 19* wäre eine Lebensdauer von 194,5 Stunden zu erwarten was lediglich 29,5 % der Lebensdauer ungeprüfter Stäbe entspricht.

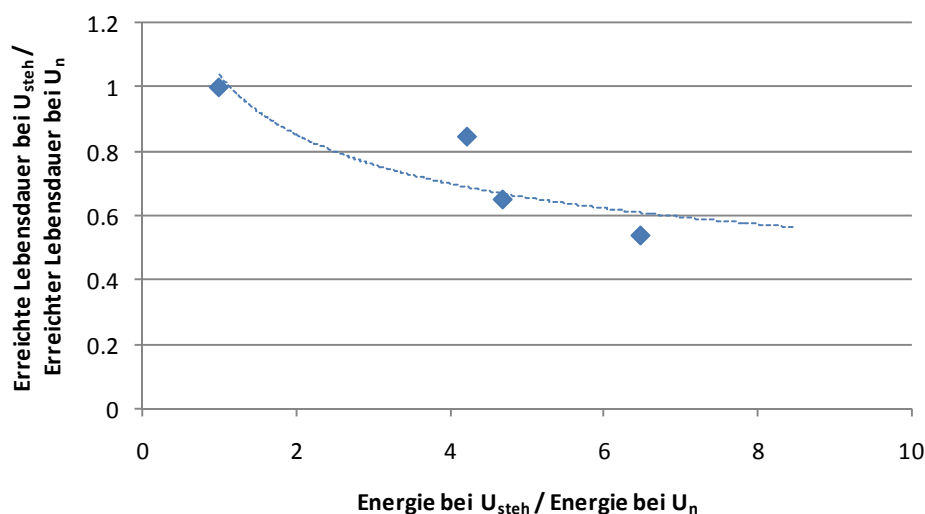


Abb. 48 Erreichte elektrische Lebensdauer bei in Abhängigkeit verschieden hoher Energiepegel in Bezug auf Betrieb bei Nennspannung U_n

Die in *Abb. 48* gepunktet dargestellte Kurve konnte durch Approximation gefunden werden und ergibt sich zu:

$$L_n = 3,09 \cdot \left(\frac{E_{\text{steh}}}{E_n} \right)^{-0,94}$$

Formel 20 Lebensdauer im Bezug zur Lebensdauer ungeprüfter Stäbe in Abhängigkeit der emittierten Energie

L_n steht für die erreichte Lebensdauer in bezug auf die Lebensdauer von ungeprüften Stäben. E_{steh} steht für die Energie in Watt die bei der Spannungsprüfung mit U_{steh} emittiert wurde. E_n für die Umgesetzte Energie im Nennbetrieb.

Die vorher gerade beschriebenen Zusammenhänge von *Formel 18* und *Formel 19* bestätigen sich auch in *Formel 20*. Setzt man die 9,66-fache Energie, die bei einer Prüfung mit 5 Un umgesetzt wird, in *Formel 20*, ein so erhält man eine Lebensdauer von 36 % der ungeprüften Stäbe. Das ist lediglich ein Unterschied von 6,5 % mit den Werten der zu erwartenden Lebensdauer.

Praktisch bedeutet dieser Zusammenhang bei den in der Energietechnik üblichen langen Lebensdauern von mehreren Jahrzehnten, dass ein Betriebsmittel bei falscher Abnahmeprüfung, beispielsweise mit dem 5-fachen Pegel, statt beispielsweise 50 Jahren Betrieb nur ungefähr 20 Jahre erreichen wird, bevor es zu einem Ausfall auf Grund von Isolationsversagens kommt. Voraussetzung für diese Zusammenhänge ist die Anwesenheit von TE bei der Abnahmeprüfung.

9.5 Teilentladungsmessung am Ende der zu erwartenden Lebensdauer

Zur Demonstration der in Kapitel 4 erläuterten Zunahme der Teilentladungsaktivität bei vorschreitender Alterung der Betriebsmittel wurde hier exemplarisch ein Generatorstab gegen Ende seiner Lebensdauer nochmal einer Teilentladungsmessung unterzogen. Es handelte sich dabei um den Stab mit der Kennzeichnung V25. Die neuerliche TE Messung wurde nach 277 Stunden Dauerspannungszelle nochmals bei $U_n = 10$ kV durchgeführt. Die verstrichene Betriebsdauer von 277 Stunden wurde zufällig gewählt.

Bei der Teilentladungsmessung im Zuge der 1-Minuten Stehspannungsprüfung hatte der Stab einen TE Pegel von 524 pC vor der erhöhten Stehspannungsprüfung und 476 pC nach der 1 Minutenprüfung, jeweils gemessen bei U_n .

Dieser geringe Unterschied von 48 pC ergibt sich durch das Kurzschließen von inneren Teilentladungsquellen durch die 1-Minuten Stehspannungsprüfung. Der Effekt wurde bereits in Kapitel 3.1 näher erläutert.

Der TE- Pegel nach 277 Stunden wies 838 pC auf. Es sind also schon massiv fortgeschrittene Alterungserscheinungen beobachtbar.

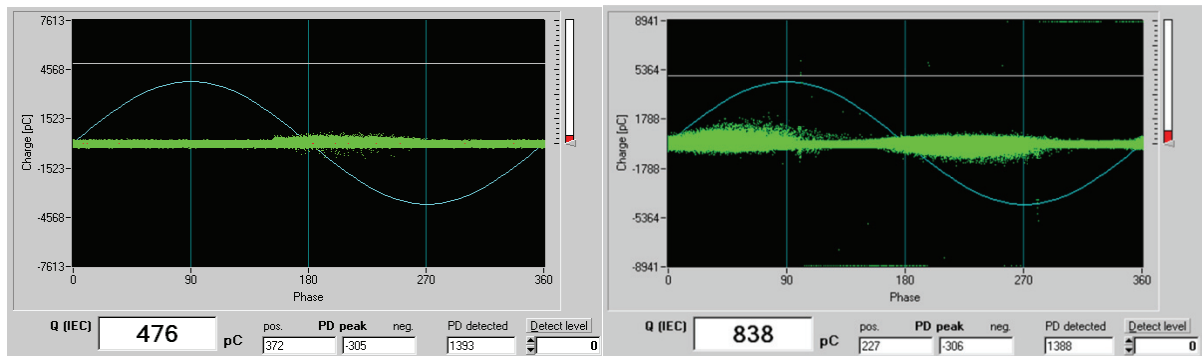


Abb. 49 Teilentladungspegel bei Herstellung (links) und nach 277 Stunden bei erhöhter Dauerspannung (rechts)

Beachtet man, dass der Generatorstab V25 insgesamt ungefähr 454 Stunden gelebt hat, erkennt man, dass sich der Stab schon auf sein Lebensdauerende zubewegt. Der stark erhöhte TE Pegel lässt darauf schließen, dass sich der Stab nach Kapitel 4.1 schon in der Phase der ausgeweiteten Treeingkanäle befinden muss.

Vogelsang beschreibt einen starken Anstieg der Teilentladungen durch das electrical treeing vor allem vor dem Ausfall durch einen elektrischen Durchschlag der Isolation. [12] Aus diesen Daten ist zu entnehmen, dass nach ungefähr einem Drittel der Lebensdauer der Pegel der Teilentladungen leicht ansteigt. Es treten ungefähr 25 % mehr Teilentladungen auf als im Neuzustand. Ab circa der Hälfte der Lebensdauer des Betriebsmittels ist ein starker Anstieg des Teilentladungspegels von ungefähren 60 % mehr Teilentladungen als im Neuzustand zu beobachten.

Bringt man diese Werte mit dem geprüften Stab in Verbindung, lassen sich die Ergebnisse von Vogelsang gut nachvollziehen und bestätigen. Ein Plus von 76 % an Teilentladungen wurde gemessen, wobei die 277 Betriebsstunden ungefähr 60 % der erreichten Lebensdauer entsprach. Das passt sehr gut mit den Erkenntnissen von Vogelsang zusammen.

Farahani hat sich in seiner Dissertation ebenfalls mit dem TE Verhalten von alternden Isolierungen beschäftigt. Er hat dabei die rein elektrische Alterung aber auch eine kombinierte thermo-elektrische Alterung untersucht.

Bei der kombinierten Alterung beschreibt auch er einen Anstieg der Teilentladungsaktivität über die Lebensdauer.

Bei der rein elektrischen Alterung kommt er aber zu einem konträren Ergebnis als es sich bei dieser Arbeit gezeigt hat. Bei seinen Untersuchungen sinkt der Pegel der Teilentladungen der Versuchsstäbe gegen Ende der Lebensdauer. [29]

10 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Ziel vorliegender Arbeit war es eine Abhängigkeit zwischen der Höhe des Prüfpegels der 1-Minuten Stehspannungsprüfung und der elektrischen Lebensdauer von Isoliersystemen rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen zu finden.

Diese Aufgabenstellung konnte erfüllt werden. In *Abb. 47* ist der Zusammenhang zwischen erreichter Lebensdauer und dem Stehspannungspegel ersichtlich. Ab einem Pegel von $3,5 U_n$ ist ein rapides Abnehmen der Lebensdauer ersichtlich. Dieser Prüfspannungspegel von $3,5 U_n$ kann also nach den Ergebnissen dieser Diplomarbeit als die gesuchte absolute Obergrenze für die 1-Minuten Stehspannungsprüfung angesehen werden.

Auch wenn die Ergebnisse der Lebensdauer in Zusammenhang mit der umgesetzten Teilentladungsenergie betrachtet werden ist der ungefähre Grenzbereich bei 3,5-facher Nennspannung zu finden. In diesem Bereich wird ungefähr das 4-fache an Teilentladungsenergie im Isoliersystem umgesetzt. Und wie in *Abb. 48* ersichtlich ist sinkt die elektrische Lebensdauer ab diesem Wert beträchtlich. Da ein quadratischer Zusammenhang zwischen Spannung und Leistung besteht ist bei noch höheren Prüfspannungen, auf Grund der massiven Mehrleistung die im Isoliermedium umgesetzt wird, eine noch stärkere Abnahme der Lebensdauer zu erwarten.

Allgemein ist anzumerken, dass nach den Ergebnissen dieser Arbeit eine Prüfung nach Norm unbedingt zu empfehlen ist. Die bei höheren Spannungen im Isoliersystem umgesetzte Leistung kann die Isolation massiv schädigen und die Lebensdauer sehr stark dezimieren.

Ruben Vogelsang empfiehlt in seiner Dissertation auf Seite 106 eine Abschließende 1-Minuten Stehspannungsprüfung von einer Dauer > 10 Minuten mit dreifacher Nennspannung. Er schreibt, dass so mangelhafte Isolationen aufgrund ihres sicheren Versagens bestimmt gefunden werden können. Intakte Isoliersysteme werden seiner Meinung nach durch diese lange Prüfung nicht beeinträchtigt. Es ist sicher richtig, dass die so beschriebene härtere Prüfung defekte Isolierstellen eher versagen lässt. Dass eine Isolation die die Prüfung die so mit $3 U_n$ für mindestens 10 Minuten durchgeführt wird keinen Schaden davon trägt, ist nach den Ergebnissen dieser Diplomarbeit nur zu bestätigen wenn die Maschinenisolierung zum Zeitpunkt der Prüfung teilentladungsfrei war. Somit würde das Isoliersystem während der Prüfung nicht aufgrund des Energieeintrages der Teilentladungen erodieren.

Die vorgeschlagene Prüfung mit $3 U_n$ ist zwar unter der gefundenen Grenzprüfspannung von $3,5 U_n$, doch durch die Länge der Prüfung von mindestens 10 Minuten kann viel Energie in Form von Teilentladungen im Isoliersystem umgesetzt werden.

Unter den in dieser Arbeit gegebenen Versuchsbedingungen konnte eine deutliche Reduktion der Lebensdauer festgestellt werden.

Zur statistischen Absicherung und für eine Verallgemeinerung dieser Ergebnisse sind jedoch weiterführende Untersuchungen durchzuführen.

Kein Zusammenhang konnte zwischen der Größe des Verlustfaktoranstieges und der Lebensdauer der Generatorstäbe gefunden werden.

Vor allem beim Spulenpressverfahren ist auch das auf „Dimensiongehen“ der Stäbe eine wesentliche Kontrollgröße. Erreicht der Stab nicht seine gewünschte Dimension ist anzunehmen dass die Isolierung Hohlräume aufweist und daher mangelhaft ist. Im Laufe der Untersuchungen konnte aber kein Zusammenhang zwischen den Dimensionen und dem Verlustfaktoranstieg der Versuchsstäbe gefunden werden. Das ist in *Abb. 40* ersichtlich.

10.1 Diskussion ausgewählter TE Ergebnisse

10.1.1 Äußere Teilentladungen auf Grund einer scharfen Kante

Bei einem Stab waren massive äußere Teilentladungen im TE Pattern erkennbar wie in *Abb. 50* zu sehen ist. Das Muster zeigt typische Koronaentladung die durch eine metallene Spitze auf Hochspannung in Luft entstehen. [2], [30]

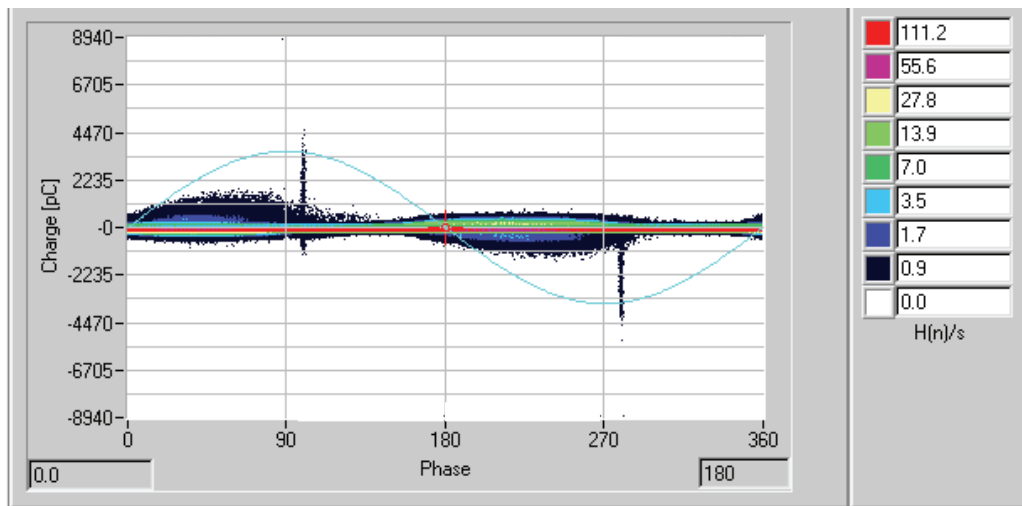


Abb. 50 Äußere Teilentladungen auf Grund einer Spitze

Solche TE Bilder sind typisch, wenn im Aufbau des TE Messkreises scharfe Kanten auftreten oder dünne Messkabel verwendet werden. Wegen dem hohen elektrischen Feld treten dann äußere Teilentladungen auf.

Im vorliegenden Fall wurde daher der Aufbau genau auf scharfe Kanten untersucht. Da keine zu finden waren und die Zuleitung, wie in *Abb. 41* zu sehen ist, wegen ihres großen Querschnittes ebenfalls als mögliche Fehlerquelle auszuschließen war, musste die Inhomogenitätsstelle auf dem Generatorstab selber sein. Bei genauerer Untersuchung des Stabes war nach der Hauptisolierung am blanken Stab kurz vor den runden Endensteuerungen eine scharfkantige Delle genau an der Kante des Stabes feststellbar. Da alle Stäbe vor der Produktion genau untersucht wurden, muss diese Inhomogenitätsstelle durch einen Sturz oder unachtsame Beförderung nach dem Wickeln oder Imprägnieren passiert sein.

10.1.2 Messung ohne Endenglimmschutz

Der Außenglimmschutz hat die Aufgabe in der Maschine eventuelle Hohlräume zwischen Nut, also dem geerdeten Ständerblechpaket und der Stabisolation, kurz zu schließen und so Teilentladungen zu vermeiden.

Die Funktion des Endenglimmschutzes ist die Potenzialsteuerung am Ende der Stäbe zur Vermeidung von Oberflächenentladungen und Streamern.

Um den Einfluss des Endenglimmschutzes auf Oberflächenteilentladungen quantifizieren zu können, wurde ein Stab zu Versuchszwecken ohne Endenglimmschutz gefertigt und geprüft.

Der Pegel der Teilentladungen wurde bei $U_n = 10$ kV zuerst in Luft gemessen und bestimmt. Er betrug bei dem auf Eisen gefertigten Resin Rich Stab 9822 pC.

Um Oberflächenentladungen auszuschließen und somit den Zustand des Stabes mit Endenglimmschutz simulieren und bestimmen zu können, wurde anschließend noch der Pegel des Teststabes unter Öl bei $U_n = 10$ kV gemessen. Er betrug lediglich 632 pC was nur 103 pC über dem Grundstörpegel lag.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, treten Oberflächenentladungen vor allem in der negativen Halbwelle auf. Die Wirkung des Endenglimmschutzes konnte so gezeigt werden und ist in *Abb. 51* ersichtlich.

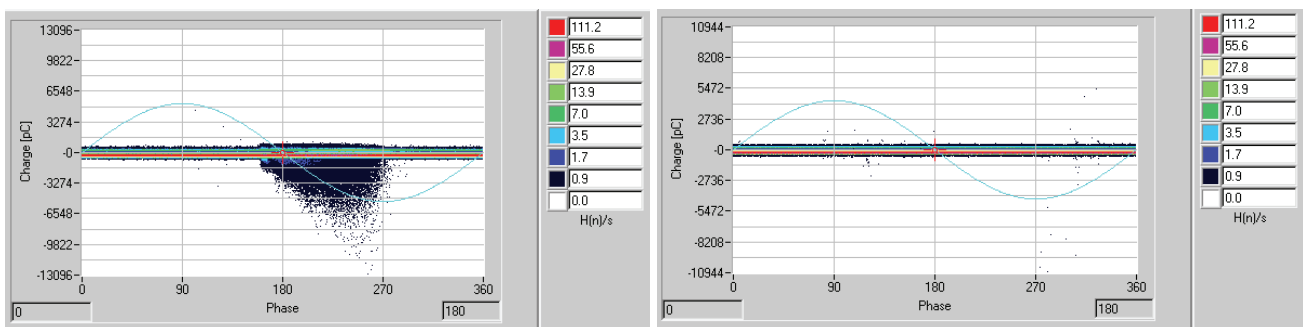


Abb. 51 Teilentladungsmessung am Teststab T4 ohne EGSB in Luft (links) und ohne EGSB unter Öl (rechts)

11 AUSBLICK UND WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN

Die verwendete Anzahl von 5 Prüflingen pro Spannung entspricht lediglich der absoluten Mindestzahl für statistische Auswertungen. Es ist daher unbedingt zu empfehlen, die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse in einer größer angelegten Versuchsreihe zu verifizieren.

Mit der vorliegenden Arbeit konnte ein Zusammenhang zwischen hohen Prüfspannungen und den dadurch entstehenden Teilentladungen und die damit verbundene Lebensdauerverkürzung durch die Teilentladungsenergie gezeigt werden.

Mit den gefundenen Zusammenhängen gibt es zwei mögliche Richtungen für weitere Forschungstätigkeit. Eine besteht in der Überarbeitung der Normen und eine weitere in der Forschung nach einer TE- reduzierten Maschinenisolierung, damit die hier gefundenen Zusammenhänge gar nicht in Erscheinung treten können.

Verfolgt man die erste Möglichkeit mit der Anpassung der Normen, müssten in diesem Zusammenhang die vielen verschiedenen Isoliersysteme genau untersucht werden, um ähnlich wie bei der hier vorliegenden Arbeit, einen Grenzwert für die Höhe der Stehspannungsprüfung ab dem die Lebensdauer der Isolierung stark abnimmt, zu finden und per Norm zu limitieren.

Bringt man wie hier die Lebensdauer mit der durch die Prüfung eingeprägte Energie in Zusammenhang, ergibt sich auch die Möglichkeit nicht die Prüfspannung, sondern die maximale Prüfenergie zu limitieren. Würde man diesen Weg weiter verfolgen, ist zu untersuchen, ob es sinnvoller ist die Abnahmeprüfungen zeitlich kurz dafür spannungsmäßig hoch zu machen, oder ob eine etwas längere Prüfungszeit mit nicht so hoher Spannung eher zu den gewünschten Ergebnis, Prüfung auf Zuverlässigkeit bei möglichst kleinem Lebensdauerverlust durch die Prüfung, führt.

Ein anderer Weg die durch die Diplomarbeit aufgezeigten Zusammenhänge in den Griff zu bekommen, wäre im Bau von teilentladungsarmer Isolierungen zu suchen. Wäre die Isolierung TE reduziert, dann könnte während der 1-Minuten Stehspannungsprüfung fast keine Energie im Dielektrikum umgesetzt werden. Somit würde die Isolierung während der Prüfung nicht erodieren und so keine Einbußen an elektrischer Lebensdauer durch die Prüfung davontragen.

Für die Herstellung teilentladungsarmer Isolierungen müsste man die Herstellungsprozesse weiter optimieren und noch besser verstehen. Die vielen verschiedenen sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren ergeben hier ein weites Forschungsfeld in vielen Bereichen.

Weiter müsste man dann auch die Normen für die Prüfung der Isoliersysteme rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen eventuell überarbeiten. Es wäre durchaus denkbar, dass Isolierungen solcher TE armer Maschinen mit hohen Prüfpegeln geprüft werden könnten, ohne das Dielektrikum dabei zu schädigen.

12 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der erhöhten 1-Minuten Stehspannungsprüfung und deren Auswirkung auf die elektrische Lebensdauer von Isoliersystemen rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen. Einige Hersteller führen diese abschließende Spannungsprüfung nicht nach Norm mit $2 U_n + 1 \text{ kV}$, sondern mit viel höheren Pegeln, bis hinauf zu $5 U_n$, durch. Die in dieser Arbeit zu untersuchende Frage war, ob diese hohen Prüfspannungen die Lebensdauer der Isolierung verkürzen.

Einleitend wird ein Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Isolierungen gegeben. Auch der Aufbau einer Maschinenisolierung wird genau erläutert. Dann werden die theoretischen Hintergründe zu den beiden verwendeten Messungen, Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung erklärt.

Ein weiterer wichtiger theoretischer Punkt der Arbeit ist die elektrische Alterung und ihre Einflussfaktoren und Mechanismen.

Im Zuge der Diplomarbeit wurden 70 Generatorstabmodelle gefertigt. Es kamen beide Fertigungsarten, Resin Rich (RR) und Vakuum Druck Verfahren (VPI) zum Einsatz.

Mit je 15 Stäben wurde die Lebensdauerreferenzkennlinie der beiden Herstellungsvarianten bestimmt. Diese Stäbe wurden vorher nicht einer 1-Minuten Stehspannungsprüfung unterzogen. Bei der Gewinnung der Kennlinie wurden zwei Dauerspannungspegel nach IEEE 1553 und einer nach KEMA S-13 gewählt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden die restlichen gefertigten Generatorstäbe unterschiedlich hohen 1-Minuten Stehspannungsprüfungen unterzogen. Im Anschluss wurde im erhöhten Dauerspannungsversuch die restliche Lebensdauer der Stäbe bestimmt.

Der Kernpunkt dieser Arbeit ist der Versuch die Lebensdauer mit der während der 1-Minuten Stehspannungsprüfung umgesetzten Energie in Zusammenhang zu bringen. Dafür wurden pro Versuchstab drei Teilentladungsmessungen durchgeführt. Zwei im Nennbetrieb, jeweils vor und nach der Stehspannungsprüfung. Eine weitere Messung wurde während der 1-Minuten Stehspannungsprüfung durchgeführt. Mit den daraus gewonnenen Ergebnissen konnte nach IEC 60270 die Energie der Teilentladungen berechnet werden.

In den Ergebnissen kann man deutlich eine Abnahme der elektrischen Lebensdauer des Isoliersystems bei erhöhter Energieeinwirkung während der 1-Minuten Stehspannungsprüfung erkennen. Eine Prüfung nach Norm ist nach den Erkenntnissen dieser Arbeit somit unbedingt zu empfehlen.

13 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Sumereder C.: Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis, IEEE Transaction, Volume 15, Issue 3, June 2008, Pages 678-685
- [2] Küchler A.: Hochspannungstechnik, Springer Verlag, 3. Auflage Berlin Heidelberg 2009
- [3] Marek P.: Neues Trägersystem für Hochspannungsisolierungen, Dissertation, TU-Graz, 2004
- [4] Stone G., Boulter E.: Historical development of Rotor and Stator Winding Insulation Materials and Systems, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 20, No 3, May/June 2004
- [5] Egger H.: Isolationsüberwachung elektrische Betriebsmittel, Vorlesungsskript 2006/2007, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement TU Graz, Graz 2006
- [6] DIN EN 50209 Prüfung der Isolierung von Stäben und Spulen von Hochspannungsmaschinen, November 1998
- [7] Muhr M.: Hochspannungstechnik 1, Vorlesungsskript 2007, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement TU Graz, Graz 2007
- [8] Schwarz R. Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik, Vorlesungsskript 2008, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement TU Graz, Graz 2008
- [9] Porzel R., Neudert E., Sturm M.: Diagnostik der Elektrischen Energietechnik, Expert Verlag, Renningen- Malsheim 1996
- [10] Gulski E., Muhr M, et al.: Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service, CIGRE TF 15.11/33.03.02, April 2003
- [11] IEC 60270 High-voltage test techniques –Partial discharge measurements, Dezember 2000, Genf
- [12] Vogelsang R., Haslimeier R., Fröhlich K.; Fruth B.: Teilentladungskennwerte der elektrischen Alterung in Isolationen von Hochspannungsgeneratoren und –motoren und deren Berücksichtigung in einem TE-Monitoringsystem, ETG-Fachbericht: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, März 2004, Köln
- [13] IEC 60505 Evaluation and qualification of electrical insulation systems, IEC International Standard 60505, Second Edition, 1999
- [14] IEEE Std 1553-2002 Trial-Use Standard for Voltage- Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, März 2003, New York
- [15] KEMA S-13, KEMA specification for air-cooled a.c. generators of 10 MVA and above, April 1987
- [16] Gjaerde A.: Multifaktor Ageing Models- Origin and Similarities, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 13, No 1, January/February 1997, Trondheim

-
- [17] Stone G., Boulter E., Culbert I., Dhirani H.: Electrical insulation for rotating machines, IEEE Press, W. John Wiley & Sons Inc., USA 2004
- [18] IEEE Std 930-1987, IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, New York, Juni 1986
- [19] IEEE Std 930-2004, IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, New York, März 2005
- [20] www.crgraph.de
- [21] IEC 60034 Rotating electrical machines, IEC International Standard 60034, Third Edition, 2009
- [22] KEMA S-14, KEMA regulations for hydrogen or liquid cooled a.c. generators, November 1987
- [23] Miller H., Alewine K.: Electric Testing of Uncured Resin Rich or Untreated VPI Coils, Tec Talk, Von Roll USA, 2007
- [24] Meyer H.: Die Isolierung großer elektrischer Maschinen, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962
- [25] Vogelsang R.: The relationship between microscopic properties and time to breakdown of high voltage winding insulations at various manufacturing qualities, temperatures and mechanical vibrations, Dissertation, ETH Zürich, 2004
- [26] Gruenewald P., Wichmann A.: Influence of dielectric stress concentration on voltage endurance of epoxy mica generator insulation, IEEE Trans. Electr, Insul, Vol EI-12 No 6, Dezember 1977
- [27] Weiers T.: Eine Methode zur aussagekräftigeren Bewertung von Maschinenisierungen, Dissertation, ETH Zürich, 2007
- [28] Wang L., Testa L., Cavallini A., Montanari Die-Limat G.: Relation between the Trend of Partial Discharges and Aging Models under AC Voltage, Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, IEEE Electrical Insulation Magazine, July 2009
- [29] Farahani M.: Zustandsbewertung eines Isoliersystems für rotierende Hochspannungsmaschinen mit elektrischen und dielektrischen Messverfahren, Dissertation, Universität Hannover, März 2005
- [30] Stone G.: Partial Discharge Course, Seminarunterlagen, Iris Power, Version 4.4, August 2006