

Jahresbericht 2015



**Institut für Elektrische Energiesysteme
Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset
Management
Schering-Institut**

Inhalt

1	Vorwort	2
2	Personelle Besetzung des Institutes	4
3	Lehre	5
4	Promotionen	8
5	Forschungsarbeiten	18
6	Veröffentlichungen	97
7	Mitarbeit in Fachgremien, Teilnahme an Konferenzen	99
8	Technische Ausstattung	101
9	Lageplan	102

1 Vorwort

Liebe Freunde des Schering-Instituts,

der vorliegende Jahresbericht soll Ihnen einen Überblick über aktuelle Tätigkeiten in Lehre und Forschung geben und Sie über organisatorische Veränderungen und Neuigkeiten aus dem letzten Jahr informieren.

Sicher haben Sie auf der Titelseite dieses Jahresberichtes unser neues Logo gesehen, welches infolge einer neuen Denomination des Instituts entstanden ist. Aus dem Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEH) ist das Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) hervorgegangen, welches nunmehr drei Fachgebiete umfasst, sodass neben den traditionellen Fachgebieten für Elektrische Energieversorgung, vertreten durch Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann, und dem Schering-Institut als Fachgebiet für Hochspannungstechnik und Asset Management, vertreten durch Prof. Dr.-Ing. Peter Werle, das Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme hinzugekommen ist, welches von Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach geleitet wird. Diese neue Konstellation mit drei Fachgebieten ermöglicht eine intensive und insbesondere ganzheitliche Bearbeitung von aktuellen Themen der Energiewende, verbunden mit den Schlagworten Smart Grids, regenerative Energiequellen und Speichersysteme, nachhaltige und zuverlässige Energieversorgung, effiziente Energienutzung und intelligentes Asset Management der in den Versorgungs- und Verteilungsnetzen vorhandenen Hochspannungskomponenten.

Durch die Aktualität der Energiewende in Deutschland, aber mittlerweile auch in vielen anderen westlichen Ländern der Welt, hat die Energietechnik auch bei den Studierenden an Attraktivität zugenommen, sodass viele Studierende in diesem Bereich zu verzeichnen sind, die durch Bachelor- und Masterarbeiten die diversen Forschungsprojekte am Institut unterstützen. Als Beispiel sei erwähnt, dass für die im aktuellen Wintersemester angebotene Vorlesung Hochspannungstechnik I insgesamt über 90 Studentinnen und Studenten angemeldet sind. Infolge dieser zunehmenden Nachfrage an Hochspannungsthemen werden derzeit neue, zusätzliche Vorlesungen vorbereitet, sodass im SS 2016 erstmals die Vorlesung Hochspannungsgeräte II und im darauf folgenden Wintersemester 2016/17 eine Vorlesung Zustandsdiagnose und Asset Management angeboten werden sollen.

In der Forschung liegt der Schwerpunkt weiterhin auf der Entwicklung neuer und der Optimierung herkömmlicher Isolierstoffe, mit einem Fokus auf feste und flüssige Isoliermedien, wenngleich mittlerweile auch Ersatzgase für SF₆-isolierte Anlagen existieren, weshalb auch dieser Bereich zukünftig näher betrachtet werden soll. Ferner sind natürlich auch Hochspannungsgleichstrom-(HVDC)-Übertragungssysteme sowie Diagnose- und Monitoringmethoden und das darauf aufbauende Asset Management von besonderer Bedeutung, wobei auch die Hochspannungsmess- und Prüftechnik weiterhin Forschungsgegenstand am Schering-Institut bleibt. Aus den aktuellen Forschungsvorhaben resultierten in 2015 mehr als 15 nationale

und internationale Veröffentlichungen, wobei es besonders erfreulich war, dass Herr M.Sc. Hassan Saadati für seinen Beitrag „Partial Discharge Analysis under Hybrid AC/DC Field Stress“ auf dem 19ten International Symposium on High Voltage Engineering, der ISH 2015 in Pilsen, Tschechien, einen Young Researcher Award erhielt.

Um weiterhin die Vielzahl der genannten Forschungsthemen und Kooperationsprojekte abdecken zu können, wurden 2015 die folgenden drei neuen wissenschaftlichen Mitarbeiter eingestellt und zudem konnte ein weiterer Gastwissenschaftler begrüßt werden:

- Herr M.Sc. Mohammed Imani, der sich mit Nanofluids beschäftigt, also Isolierflüssigkeiten, welche durch Hinzugabe von Nanopartikeln besondere Eigenschaften erhalten,
- Herr Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegovic, der nach alternativen Polymerwerkstoffen für Gleichspannungskabel forscht,
- Herr Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey, der auf dem Gebiet der Zustandsdiagnose und des Asset Managements von Transformatorenflotten arbeitet und
- Herr M.Sc. Hamid Jahangir, der als Gastwissenschaftler in Kooperation mit dem Schering-Institut eine neue UHF-TE Messtechnik entwickelt.

Eine Internationalisierung der Kontakte und Forschungsaktivitäten soll neben einer engen Zusammenarbeit mit Gastwissenschaftlern auch durch strategische Kooperationen mit Hochspannungsfachgebieten anderer Universitäten und Hochschulen gefördert werden, weshalb im letzten Jahr Allianzen mit der K. N. Toosi University of Technology in Teheran, Iran, der Norwegian University of Science and Technology, NTNU in Trondheim, Norwegen, der Technischen Universität Graz, Österreich, sowie der Hochschule in Bremen begonnen wurden.

Renovierung und Umgestaltung des Gebäudes des Schering-Instituts werden in den nächsten Monaten beendet, sodass dann ein Rückumzug in eine modernisierte Umgebung erfolgen kann, was insbesondere auch für die messtechnische Ausstattung des Instituts gilt, wengleich die Ersetzung bzw. Überholung einiger Großgeräte aus der Hochspannungshalle sicher bis Ende 2016 andauern wird.

Abschließend möchten wir uns bei unseren Industriepartnern, der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. - Projekt GmbH, der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Deutschen Akademischen Auslandsdienst (DAAD) und der Alexander von Humboldt Stiftung (AvD) sehr herzlich für die gute Zusammenarbeit, Förderung und Unterstützung bedanken und freuen uns auf eine Fortführung der Kooperationen in 2016.

Hannover, im Januar 2016



Prof. Dr.-Ing. Peter Werle

2 Personelle Besetzung des Institutes

Institutsleiter:	Prof. Dr.-Ing. Peter WERLE
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Ernst GOCKENBACH Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein BORSI
Lehrbeauftragte:	Prof. Dr.-Ing. Monika STURM Dr.-Ing. Stephan PÖHLER Dr.-Ing. Jürgen GÄRTNER
Geschäftszimmer:	Frau Vera VORTMANN
Akademischer Oberrat:	Dr.-Ing. Claus-Dieter RITSCHHEL
Wissenschaftliche Mitarbeiter und Doktoranden:	Dipl.-Ing. Mirnes AGANBEGOVIĆ Dipl.-Ing. Christian EICHLER Dr.-Ing. Mohsen FARAHANI Dipl.-Ing. Markus FISCHER Dipl.-Ing. Olaf GRATZ M.Sc. Mohammad Taghi IMANI M.Sc. Hamid JAHANGIR M.Sc. Tobias KINKELDEY M.Sc. Moritz KUHNKE M.Sc. Seyed Amir Mahmood NAJAFI M.Sc. Mahdi RAHIMBAKHSI M.Sc. Hassan SAADATI Dr.-Ing. Xiang ZHANG M.Sc. Xin ZHOU
Gastwissenschaftler:	Dr.-Ing. Asghar AKBARI AZIRANI
Werkstatt:	Claus-Dieter HASSELBERG Erich SEMKE

3 Lehre

Prof. Dr.-Ing. P. Werle

Hochspannungstechnik I (Vorlesung)

2 SWS

Aufgaben und Zukunft der Hochspannungstechnik; Erzeugung hoher Spannungen (Wechsel-, Gleich- und Stoßspannungen für die Energieversorgung sowie für Prüf- und Versuchsfelder); Hochspannungsmesstechnik, spezielle Verfahren und Schaltungen zur Messung hoher Wechsel-, Gleich- und Stoßspannungen; elektrostatisches Feld, Messungen, Berechnungen und Ersatzanordnungen; elektrische Festigkeitslehre, Durchschlag von Gasen.

Hochspannungstechnik I (Übung)

1 SWS

Kaskadenschaltung zur Erzeugung hoher Wechselspannungen; Gleichrichterschaltungen zur Spannungsvervielfachung; Stoßspannungsschaltungen; Messung hoher Wechselspannungen; Feldberechnung von verschiedenen geometrischen Anordnungen

Hochspannungstechnik II (Vorlesung)

2 SWS

Durchschlag flüssiger Isolierstoffe; elektrischer Durchschlag, Wärmedurchschlag und Erosionsdurchschlag fester Isolierstoffe; Einflussgrößen auf die Durchschlagspannung; dielektrisches Verhalten flüssiger und fester Isolierstoffe; dielektrische Messungen; Teilentladungsmessungen

Hochspannungstechnik II (Übung)

1 SWS

Durchschlag flüssiger Isolierstoffe in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur; Teilentladungsmessung; Lebensdauer kennlinie; Wärmedurchschlag; Schering-Brücke

Hochspannungsgeräte (Vorlesung)

2 SWS

Ein- und Ausschaltvorgänge in Netzen, Betrachtung der dabei auftretenden Überbeanspruchungen; Funktionsweise und Bauform verschiedener Hochspannungsschalter; SF₆-Anlagen; Strom- und Spannungswandler und ihr Verhalten bei Wanderwellen; Hochspannungskabel; Spannungsdurchführungen und -ausleitungen; Konstruktion, Dimensionierung und Betriebsverhalten von Hochspannungs-Leistungskondensatoren; Ableiter

Hochspannungsgeräte (Übung)**1 SWS**

Berechnung und Darstellung von Schaltvorgängen in linearen Stromkreisen; Berechnung statischer und dynamischer Lichtbogenkennlinien; Abschaltung von Stromkreisen unter Berücksichtigung der Vorgänge im Schalter ; Dimensionierung von SF6-isolierten Anordnungen unter Berücksichtigung festigkeitsmindernder Einflüsse; Dimensionierung von Spannungswandlern und Durchführungen; Berechnung der Feldverteilung in Kondensatordielektrika

Isolierstoffe der Elektrotechnik (Vorlesung)**2 SWS**

Physikalische Grundlagen; elektrisches und dielektrisches Verhalten von Isolierstoffen und Isolierstoffsystemen wie z.B. Epoxidharzen, Polyesterharzen, Papier, Isolierölen, chlorierten Biphenylen (PCB), Ersatzflüssigkeiten für PCB, Papier-Öl-Dielektrika, hochpolymeren Kunststoffen und Isoliergasen

Hochspannungslaboratorium I**(Experimentelle Übung, mit Assistenten)****4 SWS**

Erzeugung und Messung hoher Gleichspannungen; Messung hoher Wechselspannungen; Erzeugung von Stoßspannungen und Aufnahme von Stoßkennlinien; elektrischer Durchschlag in Gasen; Bestimmung der Durchschlagspannung von festen Isolierstoffen; Verlustfaktormessungen an verschiedenen Isolierstoffen bei 50 Hz; Ausmessung von elektrischen Feldern; Bestimmung der Durchschlagspannung von Mineralöl

Prof. Dr.-Ing. habil. L. Hofmann / Prof. Dr.-Ing. P. Werle**Labor Energieversorgung/Hochspannungstechnik****(Experimentelle Übung, mit Assistenten)****4 SWS**

Sternpunktbehandlung; Kurzschlussstromberechnung mit PC; Ausgleichvorgänge bei Erdschluss; Kippschwingungen; Messungen von Teilentladungen in der Reuse; oszillografische Untersuchung von Stoßspannungen; Hochspannungstransformator bei kapazitiver Belastung; Untersuchung des Modells einer langen Hochspannungsfreileitung

Prof. Dr.- Ing. habil. H. Borsi**Hochspannungs- und Hochleistungskabel 2 SWS**

Physikalische, werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen von Mittel-, Hoch- und Höchstspannungskabeln und deren Betriebseigenschaften; Garnituren (Endverschlüsse und Muffen), deren Aufgaben, Funktionsweise, Konstruktion und Fertigung; elektrische Prüfungen

Dr.- Ing. J. Gärtner**Hochspannungsmesstechnik 2 SWS**

Messwertverarbeitung und Messwertanzeige (analog/digital); elektromagnetische Verträglichkeit (EMV); Schirmung und Filterung; Prüfung von Hochspannungskabeln; 0,1Hz-Messtechnik; Messung elektrostatischer Aufladung; Teilentladungsmesstechnik; dielektrische Messungen; Messung hoher schnellveränderlicher Ströme; Messung hoher Stoßspannungen

Prof. Dr.-Ing. M. Sturm**Systeme zur zukünftigen Energieoptimierung und -vermarktung 2 SWS**

Marktanforderungen; energiewirtschaftliches Umfeld; Strukturen, Prozesse, Modelle, Zielsetzungen; dezentrale/regenerative Systeme; optimierte Energienutzung; Querverbundoptimierung; Zusammenspiel EVU - Industrie; Smart Grid; Kommunikation/verteilte Intelligenz; Smart Metering; Elektromobilität

Dr.-Ing. S. Pöhler**Komponenten der Hochspannungsübertragung 2 SWS**

Energiewirtschaftliche Einführung; Hochspannungsschalttechnik; Hochspannungsübertragungstechnik; Fernübertragung elektrischer Energie; Ursachen und Auswirkungen von Instabilitäten im Übertragungsnetz; flexible AC Transmission Systems (FACTS); Hochspannungsgleichstrom-Übertragung; Übertragungssysteme für Off-shore und On-shore Anwendungen

4 Promotionen

Mechanisms of Electrical Ageing of Oil impregnated Paper due to Partial Discharges

Mohamad Ghaffarian Niasar

Doctoral thesis in Electrical Systems, Division of Electromagnetic Engineering,
KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden

Opponent to the PhD thesis defense: Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach

Transformers are one of the main components of any distribution and transmission electric power system. They are large and expensive and therefore replacing old units with new ones with the purpose of increasing the reliability of the power system might not be economically justified. It is therefore strongly desired that old units stay in operation for longer time.

However, the risk of failure increases with the age of the transformer and therefore keeping the old transformers in service is associated with a high risk. The cost of unexpected failure of a power transformer might be up to several times the initial cost of that transformer. There is not only replacement cost but also possible cost related to cleaning, deterioration of power quality and loss of revenue due to power shut down. Therefore, in order to keep the units in service while limiting the risk of failure, diagnostic measurements can be used. Diagnostic measurements can be performed on-line or off-line during the maintenance period.

Available diagnostic methods can address electrical, thermal and mechanical conditions of a transformer. Partial discharge measurements can detect an incipient fault in the insulation system. Thermal assessments can be used to analyze the remaining lifetime of the insulation system. Mechanical methods such as frequency response analyses (FRA) can be used to identify deformation in windings, shorted turns etc.. There is no diagnostic method that can certainly predict the time to failure of the insulation system. However, the probability of detecting an important problem can be increased by combining the predictions and results of different diagnostic methods. Monitoring a change in the transformer can be performed through a number of diagnostic methods such as: dissolved gas in oil analysis (DGA), degree of polymerization (DP), infrared thermography analysis, FRA, partial discharge (PD) measurements, dielectric spectroscopy (DS) and polarization/depolarization current analysis (PDC), loss factor measurement at power frequency, winding resistance etc..

A study of transformer failures carried out on transformers rated at 25 MVA or above for the period 1997 till 2001 shows that the insulation breakdown is the leading cause of transformer failure. **Table 1** shows the number of failures and the cost of repair reported by that study. Insulation failure in that study includes insulation degradation, defective insulation and short circuits, but excludes line surges and line faults. Another study reports that the responsible failure mechanism is related to tap changer (41%), winding (19%), tank leakage (13%), bushing (12%), core (3%) and other (12%).

Table 1: Cause of failures

Cause of failure	Number	Total Paid [Mio USD]
Insulation Failure	24	150
Design/Material/Workmanship	22	65
Unknown	15	30
Oil contamination	4	12
Overloading	5	8.6
Fire/Explosion	3	8
Line Surge	4	5
Improper Maintenance/Operation	5	3.5
Flood	2	2.3
Loose connection	6	2.2
Lightning	3	0.66
Moisture	1	0.18
Total	94	287.44

The majority of power transformers in service are oil filled. Oil and oil-impregnated paper (OIP) are the main insulation in the oil filled transformers and in the connected OIP bushings. Oil is the main element of the transformer cooling system, and it also provides good electrical insulation when combined with the cellulosebased insulation. Remarkable electrical and mechanical properties, availability and low cost, and experience of reliable and safe operation are the main reasons that OIP has been used in transformer and bushing manufacturing for nearly a century.

Partial discharge measurement is a non-destructive diagnostic method that can detect the existence of external corona or internal insulation defects. It is performed as a routine test by transformer factories on newly built transformers before final delivery. A correlation of PD with insulation lifetime has been recognized for a long time, yet still there is not a general model that can accurately correlate the PD activity with the lifetime of insulation. PD deteriorates insulation material through mainly three mechanisms, i.e. the impact of high energy electrons or ions with the insulation, formation of chemical byproducts, and Ultra-Violet (UV) rays or soft X-rays.

Dielectric Frequency Response (DFR) is another common method that is used in power transformers for evaluation of the insulation condition. Parameters such as

moisture content, temperature, thermal ageing, oil acidity etc. can affect the DFR measurements. It is therefore possible to evaluate the insulation ageing status or moisture content of the paper by using DFR together with suitable mathematical modeling. However, other parameters such as PD activity and electrode material can also affect the DFR measurement results. The effect of PD on DFR was first introduced by the high voltage group of KTH. In this thesis a more detailed study is made of the influence of PD on DFR. A thorough investigation about the effect of various parameters on DFR of OIP and oil is performed and compared with the effect of PD.

The PhD work was divided into two parts. The objective of the first part was to design the laboratory models that can simulate the real defects in a transformer, and to investigate the PD patterns and waveform corresponding to each defect. The models were: corona in air, corona in oil, surface discharge in air, surface discharge in oil, cavity discharges, discharge due to floating metal object in oil, discharges due to floating particles in oil and discharges due to moving and stationary bubbles in oil. PD pattern and waveform from each PD source was investigated. The influence of temperature was investigated on corona in oil, floating metal object in oil, air bubble adjacent to pressboard and surface discharge in oil. The influence of moisture content was only investigated on corona in oil. The possibility of PD classification based on PD pulse waveform and the phase of occurrence must be evaluated. The objective of the second part of the thesis is to analyze the ageing phenomenon of oil and OIP due to exposure to PD. The study must reveal the behavior of PD parameters over time when the insulation is exposed to PD. The effect of PD on insulation parameters such as conductivity, dielectric loss and breakdown strength are investigated.

In most of the experiments in this work, a 100 kV transformer was used as the voltage source. The transformer input was controlled by a variable transformer in the control unit. For some experiments where higher accuracy for voltage control was needed, a 30 kV voltage amplifier was used as the voltage source. In order to track any change in PD waveform due to ageing, a high bandwidth detection system was also used to capture the PD waveform with high resolution. A 50 ohm resistor was placed in series with the test object. A 1 GHz oscilloscope (Tektronix DPO 4102B) with 5 GSamples/s was used to detect the PD waveform. **Figure 1** shows the schematic of the PD measurement system with a high voltage transformer as the power supply.

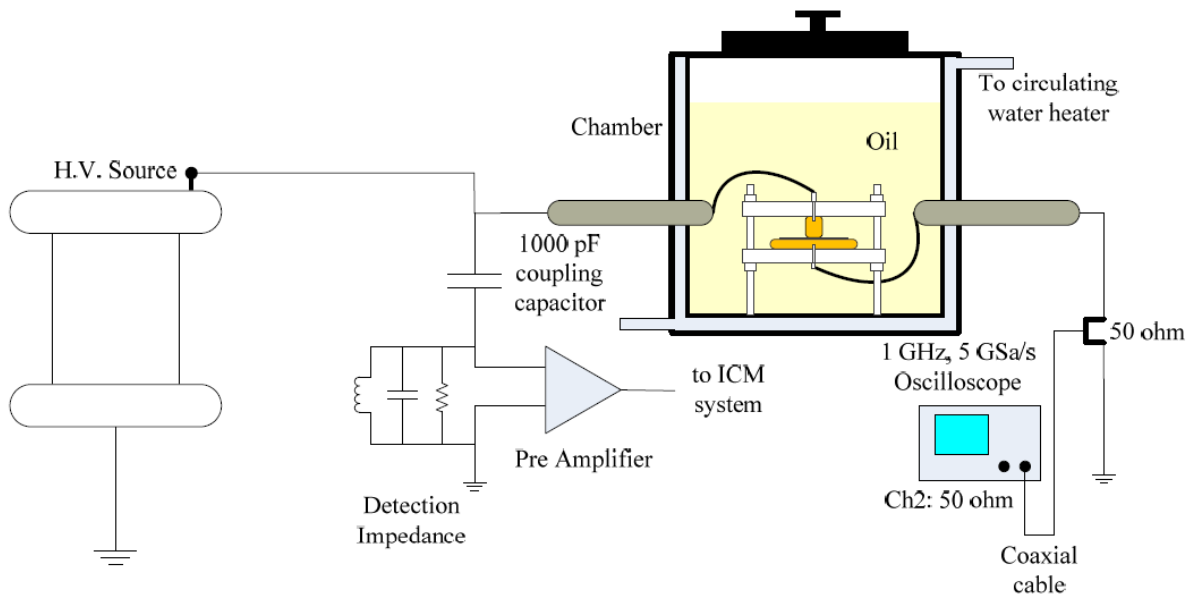


Figure 1: A schematic of the PD measurement system with a high voltage transformer as the power supply

In order to investigate the effect of different parameters on dielectric response of OIP, DFR measurements were performed. The complex permittivity was measured by an IDAX 300 dielectric spectroscopy analyzer. This instrument has a built-in voltage source that can apply sinusoidal voltages up to 200 V peak amplitude. The instrument can measure DFR over a range of frequencies from 10 kHz down to 0.1 mHz. If the measurement has to be performed at voltages above 200 V, an external voltage amplifier can be used as the voltage source, supplied from a 10 V source inside the IDAX 300. The external voltage source used in some experiments was a TREK 30/30 high voltage amplifier which has maximum output of 30 kV.

A drawing of the test cell that was used for DFR measurement of OIP is shown in **Figure 2**. The electrodes of this test cell are made of stainless steel. The measure electrode (L_0) is separated by a 1 mm air gap from the guard electrode of 2 mm thickness. The measure electrode is loaded by a spring which makes the pressure equal for all measurements.

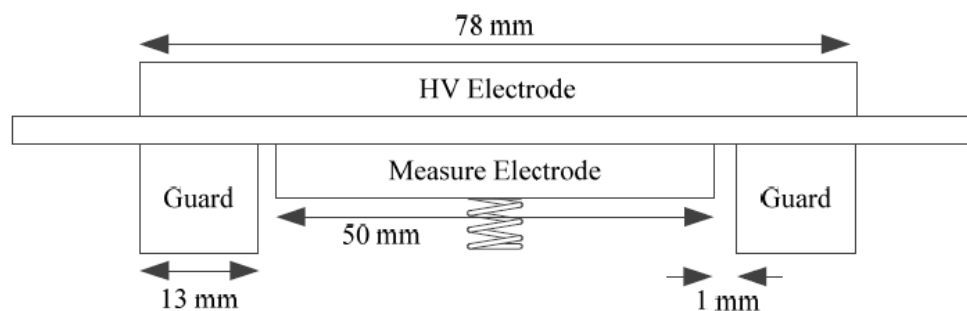


Figure 2: Test cell for measuring dielectric spectroscopy

All electrical connections were made according to **Figure 3**.

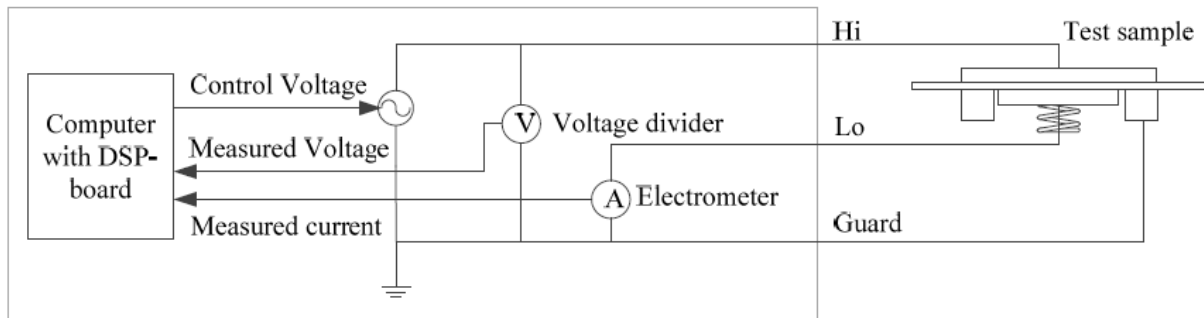


Figure 3: Measurement circuit for measuring dielectric spectroscopy

The oil used in most of the experiments was NYTRO 10XN which is a common oil in transformers. The paper was Munksjö Thermo 70 which has a thickness of 0.1 mm. All the paper samples used in the experiments were impregnated inside a Heraeus VT 5042 EK-GM vacuum oven equipped with a Trivac pump from Leybold.

Layers of paper were impregnated with oil by the following procedure:

- 1 - Layers of paper were vacuum (~5 mbar) dried at 120 °C and for 24 hours
- 2 - The temperature of the oven was lowered to 60 °C. The oven chamber was first filled with dry air and then oil that was already pre-heated up to 60 °C was put into the vacuum oven. Both oil and layers of paper were vacuum dried for 24 hour at 60 °C.
- 3 - The vacuum chamber was filled with dry air. The layers of paper were immersed in the oil, and were left to impregnate for 1 day under vacuum at 60 °C.
- 4 - The heater was turned off and layers of OIP were left inside the oil for 24 hours to cool down.

In order to minimize moisture ingress from the environment, the layers of paper were stored under oil in a sealed desiccator. Samples of OIP were taken from the desiccator whenever they were needed. No used sample was ever put back into desiccator.

Continuous PD activity a cavity embedded inside dielectric or on the surface of a solid dielectric can deteriorate the insulation and may lead to a puncture breakdown or sustained surface flashover. During the PD occurrence, high energy particles may break the chemical bonds of the insulation and initiate dielectric deterioration, while discharge byproducts such as ozone or nitric acid can enhance the process. The consequence of deterioration is a reduction of the breakdown strength of solid insulation.

From the many experiments performed on different OIP samples i.e. unaged, thermally aged and higher moisture content OIP samples, in combination with

different cavity geometries, it was found that for this particular defect in OIP the behavior of PD number and maximum magnitude follows a specific trend which can be divided into three main stages. In stage one, immediately after applying the voltage, discharges with large magnitude occur. This stage lasts for a very short time; depending on the cavity geometry it can be a few seconds to a few minutes. In the second stage, both the number and maximum magnitude of PD increase with time. These parameters grow until they reach to a maximum peak at which the next stage begins. In the third stage both the number and maximum magnitude of PD decrease with time, and finally puncture breakdown occurs in the sample. A magnified picture of a cavity surface immediately after the breakdown is shown in **Figure 4**.

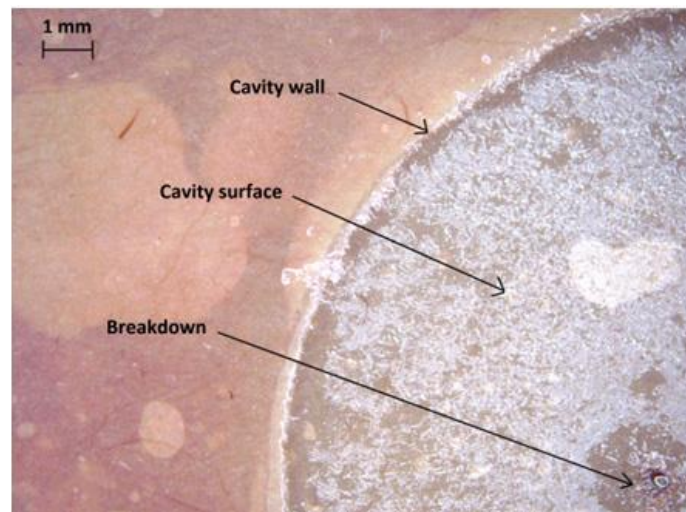


Figure 4: Change of cavity surface due to PD activity

A typical sample of 8 layers was made by introducing a cavity of 8 mm in the center of 4 middle OIP layers. When these punched layers are placed together and the good OIP layers cover them, the thickness of the cavity may not be exactly 0.4 mm (the thickness of four OIP layers). This is due to the oil layer which may enter into the cavity and change the cavity thickness. In the extreme case when the cavity is completely filled with oil, the PD will not be initiated unless the oil is being pressed out. Therefore, time to breakdown varies even for supposedly similar experimental conditions. **Figure 5** shows the number and maximum magnitude of PDs for three similar samples.

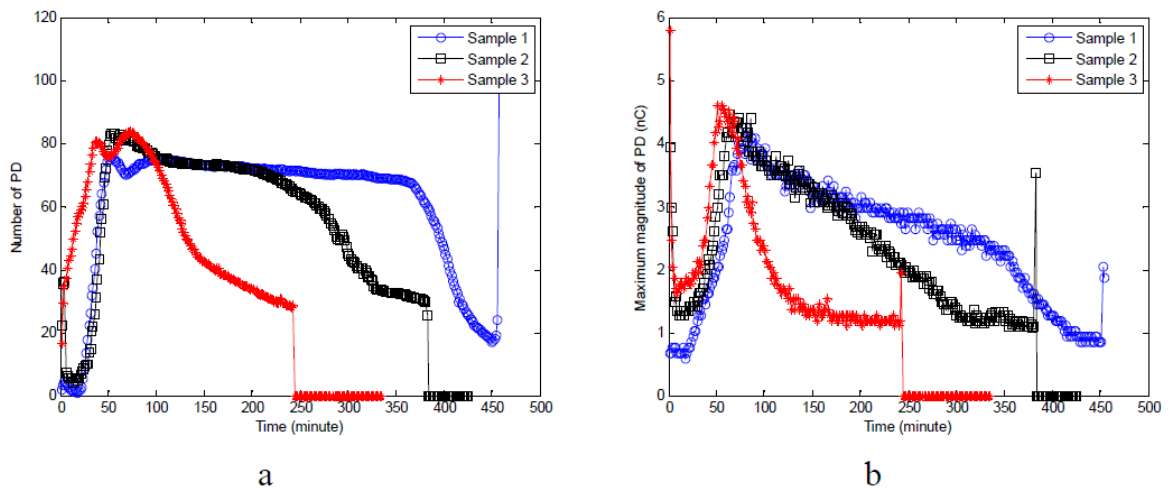


Figure 5: Variation of PD parameters with time for three similar samples.
 a) Number of PD (per positive half cycle and only PDs larger than 545 pC, i.e. 10% of the maximum detection scale)
 b) Maximum magnitude of PD (around phase zero degree)

Figure 6 shows the variation of number of PD with time for samples with different cavity height.

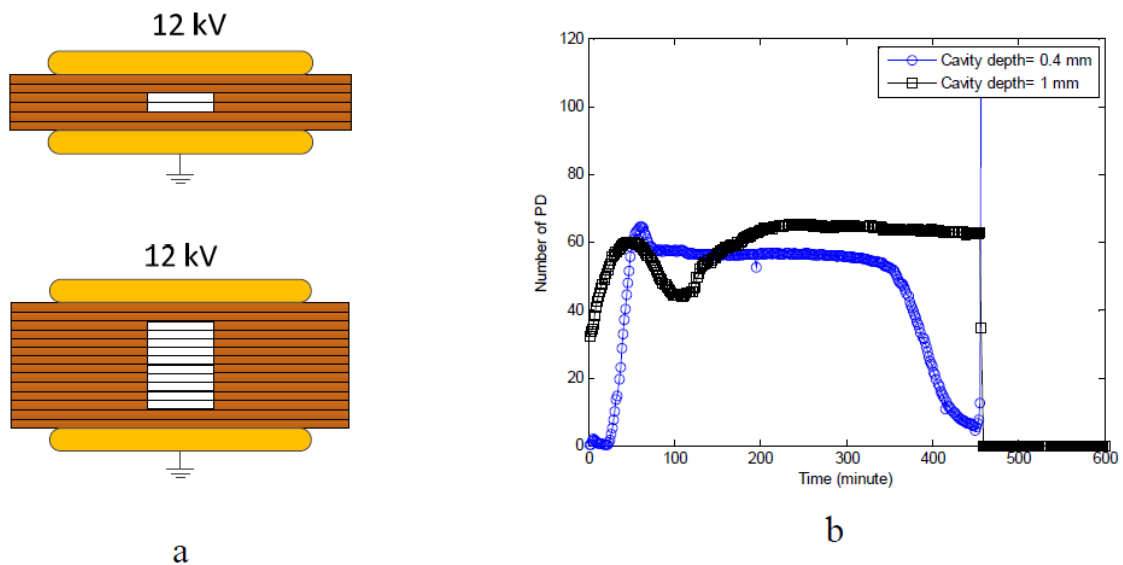


Figure 6: PD behavior with time for cavities with different height
 a) Cross section of the test sample,
 b) Number of PD (per positive half cycle and only PDs larger than 545 pC) for a cavity of 0.4 mm and 1 mm deep with diameter of 8 mm. Applied voltage is 12 kV (peak value)

Time to breakdown is measured for an OIP sample consisting of a cavity with 8 mm diameter and 0.4 mm height together with two layers of OIP on each side of the cavity. Time to breakdown was measured for different magnitudes of applied voltage.

For each voltage level the experiments were repeated few times to get better statistics. **Figure 7** shows the correlation between applied electric field and time to breakdown of the sample. The average PD inception voltage for this particular sample was 4.1 kV (peak value) and the instantaneous AC breakdown voltage was 26,1 kV. It is possible to fit the well-known empirical inverse power law to the measured data. When doing extrapolation, care has to be taken into account since the mechanism of ageing may change when the applied stress is low compared to these accelerated ageing cases.

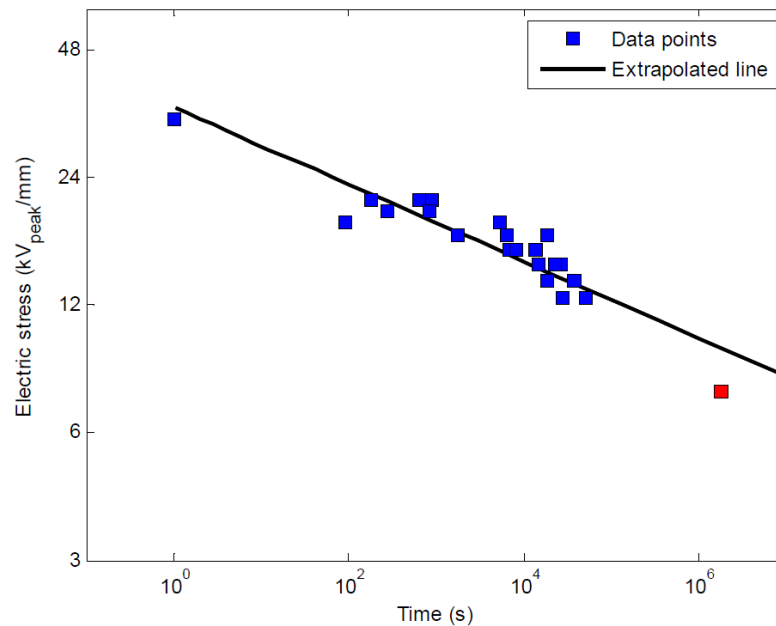


Figure 7: Relation of time to breakdown and electric stress for unaged samples. The samples consist of 8 layers, with a cavity of 8 mm diameter punched in the 4 middle layers. The red point is a sample that did not breakdown up to that time. The solid black line is extrapolation.

In order to further investigate the influence of PD on DFR of OIP, another experiment was performed. A sample consisting of 14 layers of OIP with a cavity of 8 mm diameter punched on the 4 middle layers was used in this experiment. An applied voltage of 10 kV (peak value) equivalent to 5 kV/mm (rms value) was used for this experiment. It was found that if the sample is aged for more than a few hours, the responses of all layers become very similar and the dielectric loss on all layers increases slowly with ageing time. However if the PD exposure is short (1-2 hours), the DFR of the OIP layers in the sample had significant qualitative difference and follow a specific trend. As shown in **Figure 8**, the paper layers close to the electrodes and paper layers close to the cavity wall have the highest change in the dielectric loss.

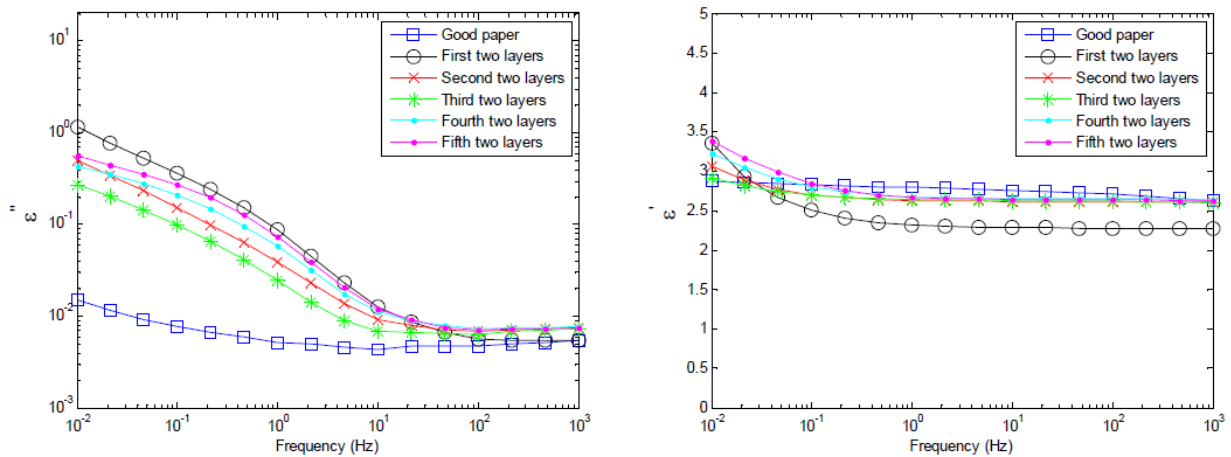


Figure 8: Effect of PD on layers of an OIP sample (complex permittivity $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)

Figure 9 shows the impulse breakdown strength of a stack of paper with a cavity in the middle of the sample, before and after ageing with PD. OIP samples were aged with PD at 10 kV/mm (peak value) for 6 hours. The impulse was then applied immediately after disconnecting the AC voltage. From **Figure 9** it is clear that PD activity lowers the breakdown strength of oil-impregnated paper more than 40%.

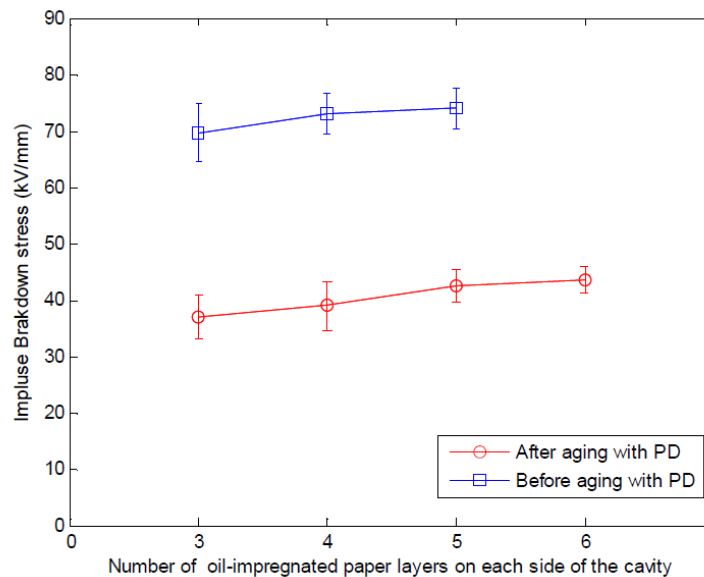


Figure 9: Impulse breakdown strength of oil-impregnated paper before and after exposure to PD

It was found that time to breakdown is shorter if the cavity diameter is larger and cavities with higher depth produce larger PDs. In general, it is found that the number and the maximum magnitude of PD follows a similar trend versus ageing time. During the very beginning of the experiment large discharges occur and they disappear after

a short ageing time. Number and maximum magnitude of PD increase with time until reaching a peak value. Finally both parameters decrease with time and puncture breakdown occurs in the sample. Even though PD activity in thermally aged OIP is higher compared to the unaged OIP samples, the time to breakdown for new and thermally aged OIP samples is similar.

The influence of different parameters and in particular the influence of PD on dielectric frequency response (DFR) of OIP is investigated. It is demonstrated that PD activity permanently change the DFR of OIP and the change mostly occurs in the frequency range between 1 mHz – 1 Hz. The change of DFR due to PD activity is very similar to the change occurring due to thermal ageing and at lower frequencies. Breakdown strength of OIP samples is measured before and after ageing with PDs. It is found that the breakdown strength of OIP samples decreases by around 40% after the sample is exposed to accelerated electrical ageing. Furthermore a thermal model was developed to investigate the possible transition of breakdown mechanism from erosion to thermal breakdown in OIP dielectrics. It was found that PD activity can lower the thermal breakdown voltage of OIP up to four times.

5 Forschungsarbeiten

Einflüsse elektrischer und mechanischer Beanspruchungen auf das Dielektrikum von VPE-Kabeln

M.Sc. Moritz Kuhnke, Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović, B.Sc. Negar Sayrafy-Nejad

Um eine möglichst verlustarme und damit auch günstige Übertragung großer elektrischer Leistungen über weite Strecken vom Erzeuger zum Verbraucher sicherzustellen, wird diese mit hohen Spannungen übertragen. Bei einer Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) sind dabei aufwendige Gleich- und Wechselrichterstationen notwendig, dafür entfallen jedoch Verluste durch Blindströme und die ebenfalls aufwendige Blindleistungskompensation wie bei einer Wechselspannungsübertragung. Während die Energieübertragung mit hoher Gleichspannung über Freileitungen mit geringfügigen Änderungen des Systems möglich ist, müssen die Hochspannungskabel speziell für dieses Einsatzgebiet neu konstruiert werden, da Kabel mit Isolierungen aus vernetztem Polyethylen (VPE) bei Gleichspannungsbeanspruchungen zur Bildung von Raumladungen im Dielektrikum neigen. Diese Raumladungen bewirken bei der Polaritätsumkehr Feldüberhöhungen in der Isolierung, die zur Zerstörung des Kabels und somit zum Ausfall dieses Betriebsmittels führen können. Da diese Raumladungsbildung vor allem feldstärkeabhängig ist, könnte diese theoretisch auch bei Kabelprüfungen mit hohen Spannungsamplituden auftreten. Auch beim Verlegen oder beim Aufwickeln auf die Kabeltrommel können die dielektrischen Eigenschaften des Kabels verändert werden, so dass beispielsweise durch zu geringe Biegeradien möglicherweise irreparable Schäden im Kabel entstehen können. Insbesondere für die Übertragungsnetzbetreiber ist es daher von großem Interesse zu wissen, wie sich sowohl elektrische Kabelprüfungen im Werk und nach der Verlegung als auch mechanische Beanspruchungen bei der Lagerung, Transport und Verlegung auf das Dielektrikum und damit auch auf die Lebensdauer der Kabel auswirken.

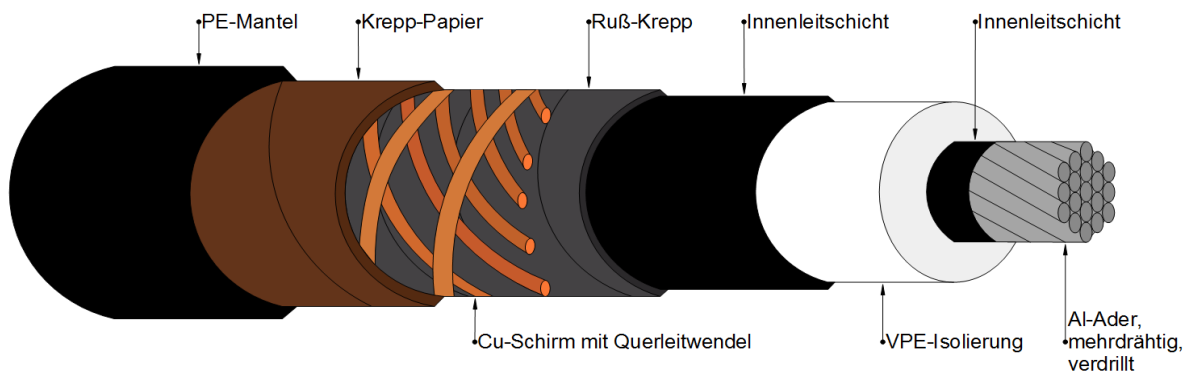


Bild 1: Aufbau des 20 kV-Kabels mit VPE-Isolierung

In dieser Untersuchung soll anhand von Messungen des dielektrischen Verlustfaktors

$\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Frequenz der anliegenden Spannung geprüft werden, inwieweit die elektrischen Kabelprüfungen vor der Verlegung des VPE-Kabels Raumladungsbildungen in dessen Isolierstoff hervorrufen können. Für diese Untersuchungen wurde ein einadriges marktübliches Mittelspannungskabel, wie in **Bild 1** dargestellt, verwendet. Aus diesem Kabel wurden Prüflinge von gleicher Länge hergestellt und entsprechend vorbereitet. Die Aufnahme des dielektrischen Verlustfaktors erfolgte mit Hilfe des Messsystems *Dirana* (siehe **Bild 2**)

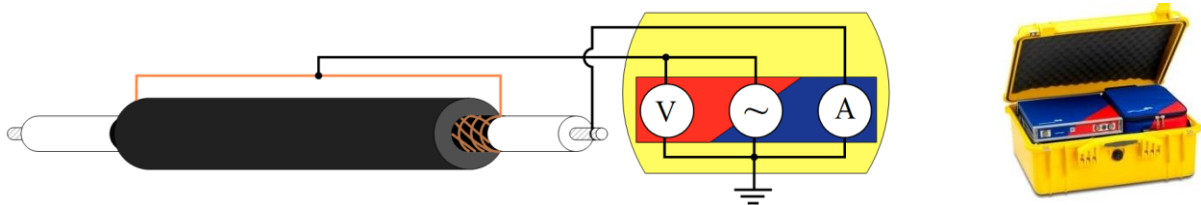


Bild 2: Messaufbau zur Ermittlung des dielektrischen Verlustfaktors von Kabeln

Um aussagekräftige Vergleiche erzielen zu können, wurden zunächst die Verlustfaktoren im Frequenzbereich von 1 kHz bis 100 μ Hz vor der jeweiligen Prüfungen aufgenommen. Um die Messzeit zu verkürzen wird bei hohen Frequenzen im Frequenzbereich gemessen (Frequency Domain Spectroscopy – FDS) und für niedrige Frequenzen der Polarisations- und Depolarisationsstrom aufgenommen (Polarisation and Depolarisation Currents – PDC) und daraus der Verlustfaktor im Frequenzbereich errechnet. Danach wurden die Kabelprüflinge mit Gleichspannung (\pm DC), mit Wechselspannung (AC) und mit Stoßspannung (\pm LI) beansprucht. Weiterhin wurden diese auch thermisch und mechanisch belastet. Anschließend wurden die $\tan \delta$ -Messungen wiederholt und mit denen gegenübergestellt, die vor der jeweiligen Prüfung durchgeführt wurden.

Bei der Beanspruchung des Kabels mit Wechselspannung wurde der Prüfling in Anlehnung an die Norm *DIN VDE 0276-620* mit einer Spannung, im Frequenzbereich von 45 Hz bis 65 Hz und einer Dauer von 60 Minuten, beansprucht. Der Prüfpegel wurde abweichend von der Norm auf $3,5 U_0$ erhöht, um eine möglichst starke

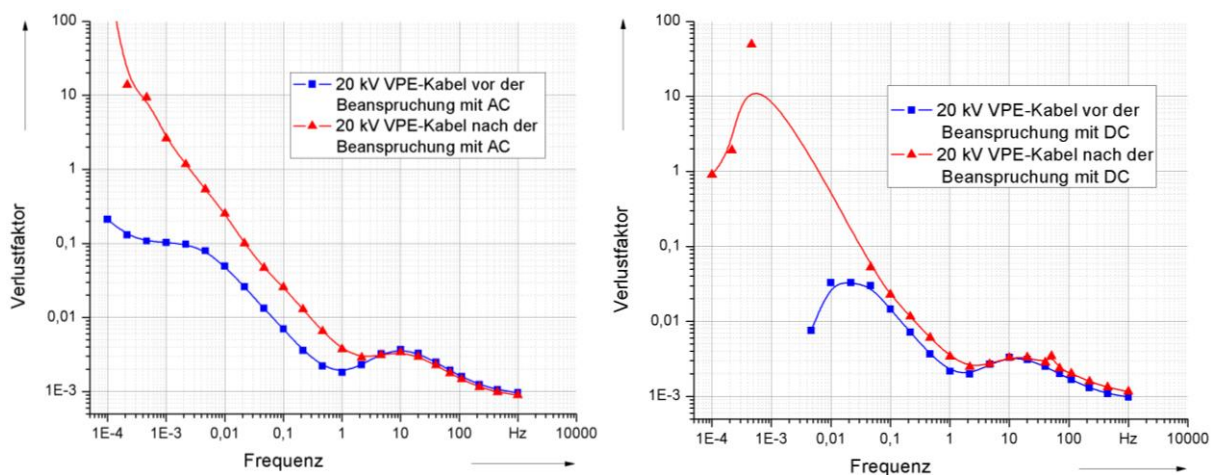


Bild 3: Darstellung der Verläufe des Verlustfaktors vor und nach der Beanspruchung mit Wechselspannung (links) und mit Gleichspannung (rechts)

Belastung des Isoliersystems zu erreichen. Der aufgenommene Verlustfaktor des Kabels in Abhängigkeit von der Frequenz vor und nach der elektrischen Beanspruchung kann aus dem Graphen in **Bild 3** (links) entnommen werden.

Damit der Einfluss der Prüfung mit Gleichspannungen auf das Kabel untersucht werden konnte, wurde der Prüfling 60 Minuten lang mit einer Gleichspannung in Höhe von $5 \cdot U_0$ belastet. Die dabei erzielten Messergebnisse des Verlustfaktors sind im rechten Graphen von **Bild 3** dargestellt.

Aus den Verläufen ist zu erkennen, dass sowohl die Beanspruchung mit Wechsel- als auch mit Gleichspannung die dielektrischen Eigenschaften der Kabelisolierung verändern. Im Frequenzbereich von ca. 5 Hz bis 1 kHz sind keine Unterschiede bemerkbar, jedoch steigt der Verlustfaktor bei geringen Frequenzen stark an.

Für die elektrische Stoßspannungsprüfung des VPE-Kabels wurden zwei Prüflinge mit 20 positiven Stoßspannungsimpulsen und zwei mit 20 negativen Stoßspannungsimpulsen belastet. Die Höhe der impulsförmigen Prüfspannung betrug $5 \cdot U_0$. Die dabei gemessenen Verläufe des Verlustfaktors im Neuzustand und im so gealterten Zustand des Kabels sind in **Bild 4** abgebildet.

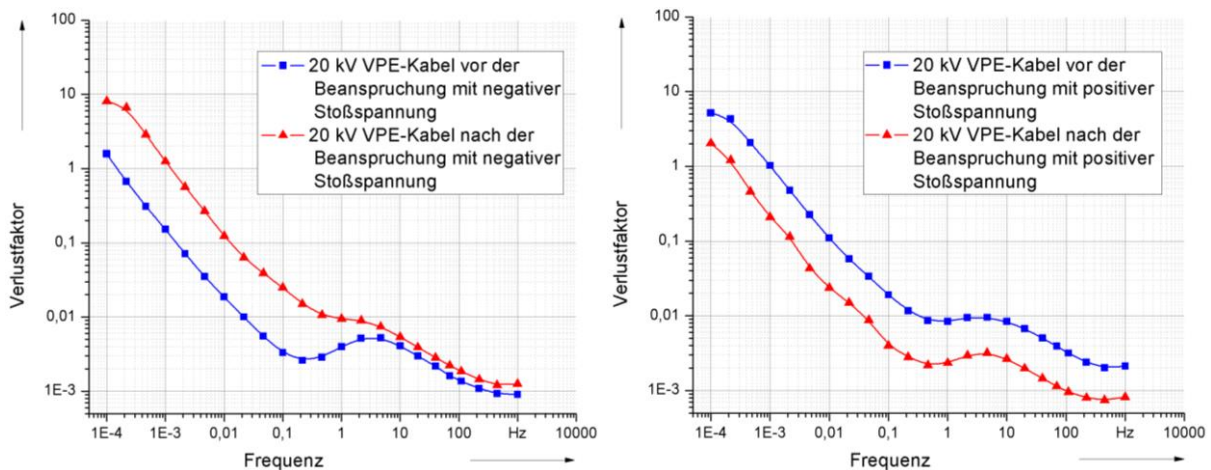


Bild 4: Darstellung der Verläufe des Verlustfaktors vor und nach der Beanspruchung mit negativer (links) und mit positiver Stoßspannung (rechts)

Aus den Verläufen des Verlustfaktors geht hervor, dass die Beanspruchung mit Stoßspannungen ebenfalls die dielektrischen Eigenschaften von Kabeln verändern. Negative Impulse haben den Verlustfaktor angehoben, was auch hier unter einer Frequenz von etwa 5 Hz deutlich wird. Die Prüfung mit positiven Stoßspannungen hingegen verschob den Verlauf des $\tan \delta$ zu niedrigeren Beträgen.

Um zu untersuchen, inwieweit thermische Einwirkungen die Veränderung der Isolationseigenschaften von Kabeln bei Gleichspannungsbelastungen beschleunigen, wurden Kabelprüflinge im Wärmeschrank bei einer Temperatur von ca. 80°C etwa 90 Minuten lang erhitzt. Unmittelbar nach der thermischen Belastung wurden einige der warmen Kabel jeweils für 60 Minuten mit positiver Gleichspannung in

Höhe von $5 \cdot U_0$ beansprucht und kühlen unter Spannung ab. Die restlichen Prüflinge wurden ohne weitere Beanspruchung langsam auf Raumtemperatur abgekühlt. Anschließend wurden die dielektrischen Verlustfaktoren der auf diesen Wegen beanspruchten Kabel aufgenommen und in **Bild 5** graphisch dargestellt.

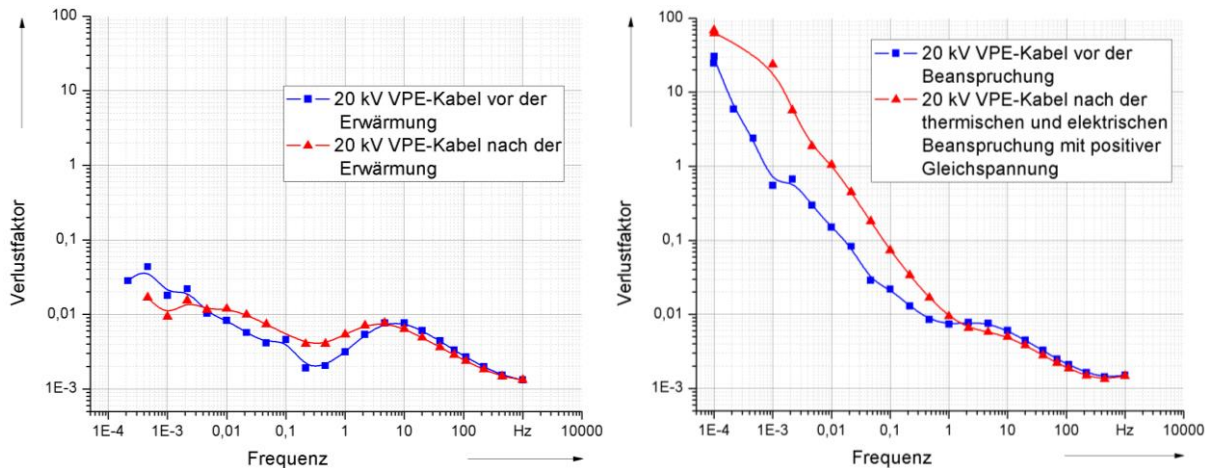


Bild 5: Darstellung der Verläufe des Verlustfaktors vor und nach der thermischen (links) und zugleich elektrischen (rechts) Beanspruchung

Aus den Verläufen im linken Graphen geht hervor, dass allein die thermische Beanspruchung des Kabels keine wesentlichen Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften seiner Isolierung verursacht. Der $\tan \delta$ -Verlauf ist nach der kombinierten elektrischen und thermischen Beanspruchung bei niedrigen Frequenzen angestiegen, jedoch ist kein wesentlicher Unterschied zur DC-Prüfung von kalten Kabeln erkennbar.

Nun wurden einige Prüflinge mechanisch beansprucht, indem das Kabel auf einen Radius von ca. 20 cm gebogen und anschließend wieder begradigt wurde. Sowohl vor als auch nach der Verformung wurden die Verläufe des Verlustfaktors im Frequenzbereich von 5 kHz bis 50 μ Hz aufgenommen. Anschließend wurde ein zuvor gebogener Kabelprüfling für ca. 24 Stunden bei etwa 50 °C thermisch konditioniert und auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Änderungen der Verläufe sind in **Bild 6** abgebildet.

Aus dem Biegeversuch ist festzuhalten, dass sich die dielektrischen Eigenschaften des Kabels deutlich verändern. Der $\tan \delta$ -Verlauf von gebogenem Kabel neigt zur Bildung eines „Buckels“ im Frequenzbereich unter 0,1 Hz. Nach der thermischen Konditionierung verblieb der Verlauf des Verlustfaktors unverändert, jedoch hat sich die Kurve nach rechts verschoben, was darauf hindeutet, dass das Kabel nicht ganz auf die Ausgangstemperatur abgekühlt war. Demnach wurde die Geometrie des Kabels unwiderruflich verändert. Generell könnten also mit Hilfe von dielektrischen Untersuchungen Aussagen getroffen werden, ob das Kabel durch zu geringe Biegeradien beschädigt wurde.

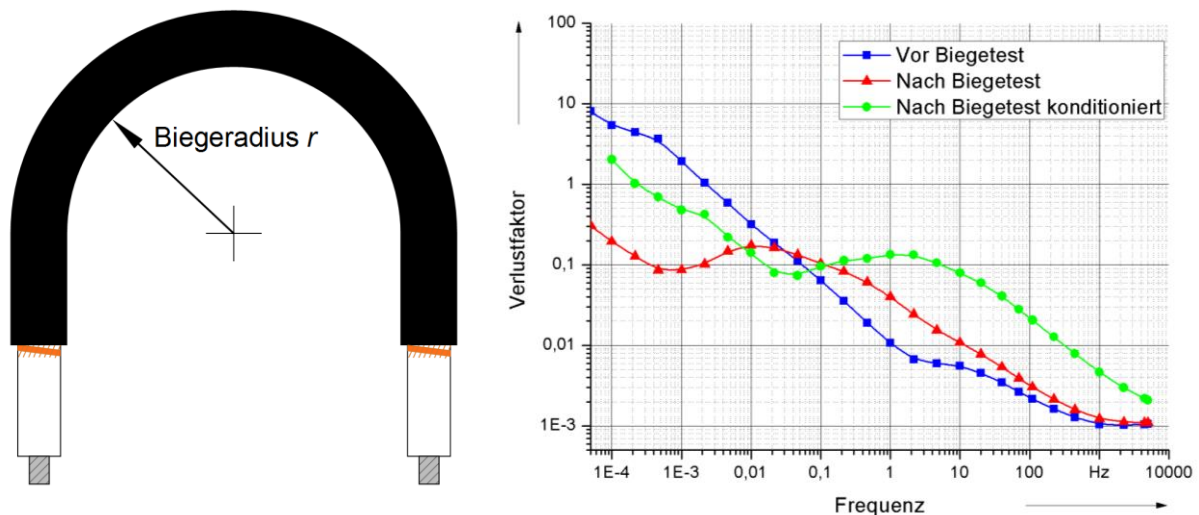


Bild 6: Darstellung der Verläufe des Verlustfaktors vor und nach der Biegeprüfung

Zuletzt folgte eine Untersuchung des verwendeten Messsystems, da das verwendete *Omicron Dirana* standardmäßig zunächst hochfrequent misst und dabei möglicherweise ein Teil der Raumladungen reduziert wird. Dazu wurde der Verlustfaktor eines Kabelprüflings zum einen regulär im Bereich von 5 kHz bis 50 μ Hz (Modus: FDS dann PDC) gemessen und zum anderen erfolgte die Messung in vier Teilbereichen, beginnend im Bereich der kleinsten Frequenzen (PDC dann FDS). Hierbei wurde für beide Messungen ein und derselbe Prüfling verwendet, der vor beiden Versuchen unter den gleichen Bedingungen thermisch konditioniert wurde. Die dabei entstandenen Verläufe sind in **Bild 7** graphisch dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass sich die Messwerte des dielektrischen Verlustfaktors gemessen in Teilbereichen von denen, die regulär von 5 kHz bis 50 μ Hz gemessen wurden unterhalb einer Frequenz von 0,1 Hz deutlich unterscheiden. Zurückzuführen ist dieser Effekt darauf, dass bereits während der Messung mit FDS Ladungsträger abgebaut werden und so von der Messung mit PDC nicht mehr erfasst werden. Ab einer Frequenz von 0,1 Hz sind die Verläufe deckungsgleich. Daher sollte in Zukunft zunächst mittels PDC und anschließend mittels FDS gemessen werden.

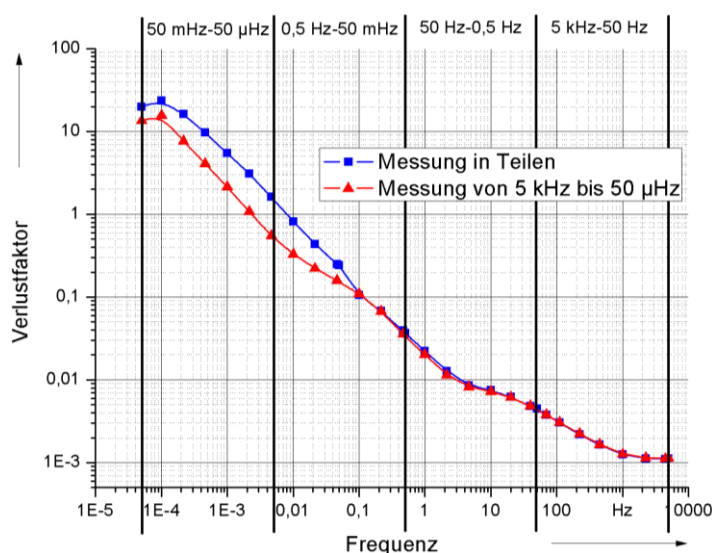


Bild 7: Messung von $\tan \delta$ in Teilbereichen

Einfluss einer Gleichspannungsbeanspruchung auf die Spannungsfestigkeit von VPE-Kabeln

Dr.-Ing. Mohsen Farahani

Die Bildung von Raumladungen in VPE-Isolierungen ist für den Betrieb von VPE-Kabeln von großer Bedeutung, da nach einem Polaritätswechsel die noch vorhandenen Raumladungen zu einer starken Feldüberhöhung führen können. Die meisten Defekte in VPE-Kabeln wurden daher auf das Entstehen von Raumladung innerhalb der Kabelisolierung zurückgeführt. In den letzten Jahren hat die Forschung in diesem Bereich an Bedeutung zugenommen.

Um den Einfluss von verschiedenen Beanspruchungen bezüglich der Bildung von Raumladungen in VPE-Isolierungen zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit einige elektrische und thermische Beanspruchungen, die ein reales Kabel in seiner Lebenszeit erfahren kann, an Modellkabeln nachgebildet, um den Einfluss auf die Wechsellspannungsfestigkeit der Isolierung zu untersuchen.

Bild 1 zeigt die für die Versuche in Rahmen dieser Arbeit benutzten VPE-Modellkabel. Die Modellkabel sind bezüglich des Aufbaus mit realen Kabeln vergleichbar, so dass eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse möglich ist. Das Modellkabel besteht aus einem verzinnnten Kupferleiter, einer inneren Leitschicht, der VPE-Isolierung und einer äußeren Leitschicht. Die Isolationswanddicke beträgt 1,5 mm.

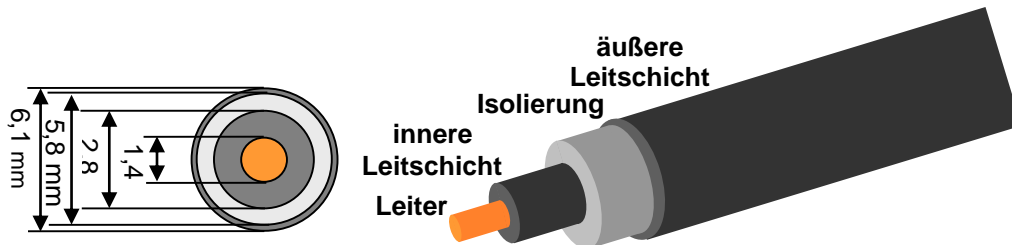


Bild 1: Querschnitt der zu untersuchenden Modellkabel

Vor den Versuchen wurde ein Teil der äußeren Leitschicht an beiden Kabelenden entfernt und das elektrische Feld in diesem Bereich so gesteuert, dass Feldüberhöhungen in diesem Bereich vermieden werden, die einen unerwünschten Endverschlussdurchschlag auslösen. Um die Feldüberhöhungen an der Kante der Erdelektrode zu verhindern und eine nahezu lineare Feldverteilung zwischen Hochspannung und Erdelektrode auf der Oberfläche des Kabels zu erreichen, wurde das elektrische Feld resistiv mit dem Einsatz von Wasserendverschlüssen gesteuert (**Bild 2**). Zur Vorbereitung des demineralisierten Wassers, Einstellung seiner Leitfähigkeit und Abfuhr der Verlustwärme des Prüflings durch das laufende Wasser wurde eine separate Anlage entwickelt (**Bild 2**). Um die Ergebnisse statistisch

abzusichern, wurden für jeden Versuch 10 Modellkabel getestet. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Durchschlagfestigkeitsprüfungen wurden dabei ermittelt.

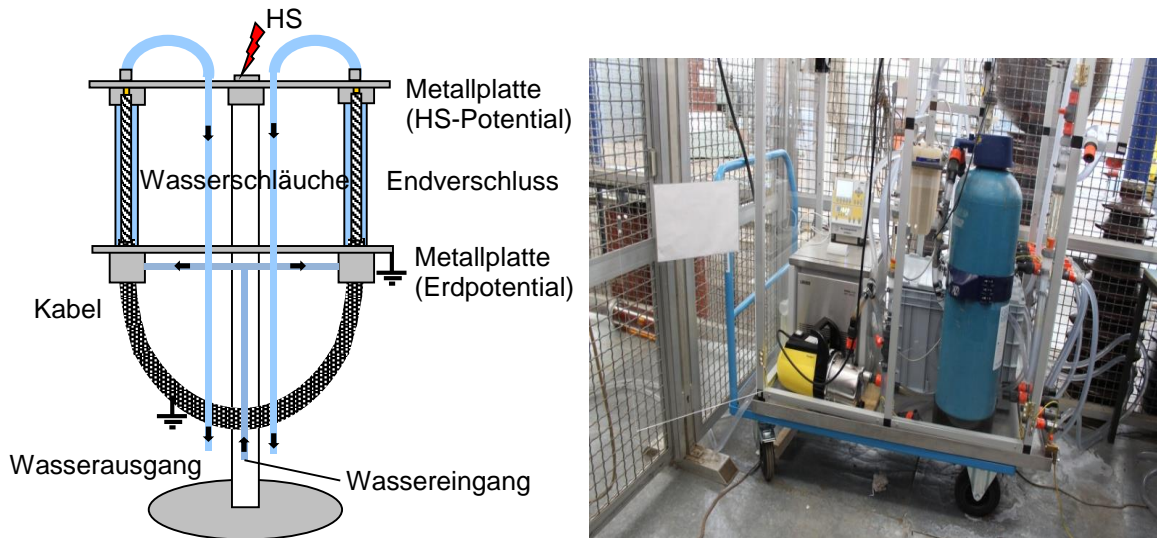


Bild 2: Wasserendverschluss (links) und entwickelte Wasseraufbereitungsanlage (rechts)

Elektrische Vorbeanspruchung mit Gleichspannung

Um die Bildung von Raumladungen innerhalb der VPE-Isolierung in relativ kurzen Zeiten zu realisieren, werden die Modellkabel für 10 h mit Gleichspannung von 45 kV ($E_{\max} \sim 44 \text{ kV/mm}$) beansprucht. Der Durchschlagspannungstest der Modellkabel wird mit Wechselspannung (50 Hz) unmittelbar nach der 10stündigen elektrischen Beanspruchung mit Gleichspannung durchgeführt. Die Spannungssteigerung erfolgt mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 kV/s bis zum Erreichen des Durchschlags.

Die Ergebnisse der Durchschlagspannungstest unter Wechselspannung an den vorbeanspruchten und nicht vorbeanspruchten Modellkabeln sind in **Tabelle 1** dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der Durchschlagspannung der mit Gleichspannung vorbeanspruchten und nicht vorbeanspruchten Modellkabel festgestellt werden konnten.

Tabelle 1: Ergebnisse des Durchschlagspannungstests an Modellkabeln (Charge A) mit und ohne Vorbeanspruchung

Zustand des Kabels	Mittelwert der Durchschlagspannung in kV	Standardabweichung in kV
ohne Vorbeanspruchung	102,83	4,90
mit Vorbeanspruchung	104,04	6,63

Elektrische Vorbeanspruchung mit Gleichspannung verschiedener Polarität

Es wurden zwei unterschiedliche Programme bezüglich des Einflusses von Polaritätswechseln der Gleichspannungsvorbeanspruchung auf die Spannungsfestigkeit unter Wechsellspannung untersucht. Im Programm I wurden die Modellkabel zunächst für 4 h mit positiver Spannung von +45 kV beansprucht. Unmittelbar danach wurde mit Hilfe eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schalters auf -45 kV gepolt. Nach einer Stunde unter negativer Spannung folgten nochmal 4 h auf positiver Spannung von +45 kV und abschließend wieder eine Stunde Beanspruchung mit der negativen Spannung. Bei Programm II wurde die Polarität der Spannung nach jeder Stunde gewechselt. Insgesamt haben beide Programme jeweils 10 h gedauert. Unmittelbar danach wurde an den Prüfobjekten der Spannungsfestigkeitstest unter Wechsellspannung durchgeführt.

Die Ergebnisse des Durchschlagspannungstests für die Polaritätswechselprogramme I und II sowie für die nicht vorbeanspruchten Modellkabel sind in **Tabelle 2** dargestellt. Die Ergebnisse zeigen keine großen Unterschiede zwischen der Durchschlagspannung der mit Gleichspannung vorbeanspruchten und nicht vorbeanspruchten Modellkabel im Fall des Programmes I, während eine Abnahme von ca. 5,4% des Mittelwerts der Durchschlagspannung im Fall des Programmes II zu sehen ist.

Tabelle 2: Ergebnisse des Durchschlagspannungstests an Modellkabeln (Charge B) mit und ohne Vorbeanspruchung

Zustand des Kabels	Mittelwert der Durchschlagspannung in kV	Standardabweichung in kV
ohne Vorbeanspruchung	97,5	10,6
mit Vorbeanspruchung - Programm I	98,9	8,2
mit Vorbeanspruchung - Programm II	92,2	10,6

Elektrische Vorbeanspruchung mit Polaritätswechsel und Temperaturgradient

Um den Einfluss von Temperaturgradienten innerhalb der Isolierung des Kabels auf seine Lebensdauer festzustellen, wurde das Programm II mit der Erwärmung der Modellkabel wiederholt. Die Erwärmung der Kabel wurde durch eine Stromheizung realisiert. Im Programm III wurden die Modellkabel für 10 h mit einer Gleichspannung von +45 kV beansprucht, bei dem Programm IV wurde die Polarität der Spannung über eine Gesamtdauer von 10 h alle Stunden einmal gewechselt. Unmittelbar nach der Vorbelastung wurde an den Prüfobjekten der Spannungsfestigkeitstest unter Wechsellspannung durchgeführt.

Tabelle 3 und **Tabelle 4** zeigen die Ergebnisse des Durchschlagspannungstests der unter den Programmen III und IV vorbeanspruchten sowie nicht vorbeanspruchten Modellkabel. Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung von ca. 10% des Mittelwertes der Durchschlagspannung bei beiden Programmen.

Tabelle 3: Ergebnisse des Durchschlagspannungstests an Modellkabeln (Charge A) mit und ohne Vorbeanspruchung (Programm III)

Zustand des Kabels	Mittelwert der Durchschlagspannung in kV	Standardabweichung in kV
ohne Vorbeanspruchung	102,83	4,90
mit Vorbeanspruchung - Programm III	92,75	12,05

Tabelle 4: Ergebnisse des Durchschlagspannungstests an Modellkabeln (Charge B) mit und ohne Vorbeanspruchung (Programm IV)

Zustand des Kabels	Mittelwert der Durchschlagspannung in kV	Standardabweichung in kV
ohne Vorbeanspruchung	97,55	10,63
mit Vorbeanspruchung - Programm IV	88,27	19,96

Wie die Ergebnisse zeigen, reduzieren häufige Gleichspannungspolaritätswechsel die Wechsellspannungsfestigkeit der untersuchten Modellkabel, jedoch ist der Einfluss auf die Wechsellspannungsfestigkeit geringer, als wenn die Kabel thermisch gealtert werden.

Untersuchungen an Grenzflächen zwischen Polymerwerkstoffen

Dr.-Ing. Mohsen Farahani

VPE-Kabel werden wegen ihrer guten Eigenschaften, ihrer Zuverlässigkeit, ihres geringen Wartungsbedarfs und ihrer Umweltfreundlichkeit zur Energieübertragung sowohl bei Wechsel- als auch Gleichspannung benutzt und sind eines der wichtigsten Betriebsmittel in Mittel- und Hochspannungsnetzen.

Zur Ausführung eines Kabelsystems sind neben den Kabeln auch die Garnituren unverzichtbar. Unter Garnituren sind Endverschlüsse und Muffen zu verstehen. Muffen werden dabei benutzt, um Kabelstücke miteinander zu verbinden, während Endverschlüsse erforderlich sind, um die Kabel mit anderen Geräten zu kontaktieren.

Die Aufgabe einer Garnitur ist die Beherrschung des elektrischen Feldes. Als Beispiel zeigt **Bild 1** ein Kabel mit aufgeschobenem Kabelendverschluss, in dem es zwei Strecken zwischen Hochspannung und Erde gibt, die eine höhere elektrische Beanspruchung aufweisen. Die eine ist die Grenzfläche zwischen Garnitur und Luft, deren Kriechweg durch das Rippenprofil verlängert wird, und die andere ist die Grenzfläche zwischen Garnitur und Kabel, wobei Garnitur (Silikon) und Kabel (VPE) als Polymerstoffe ausgeführt sind.

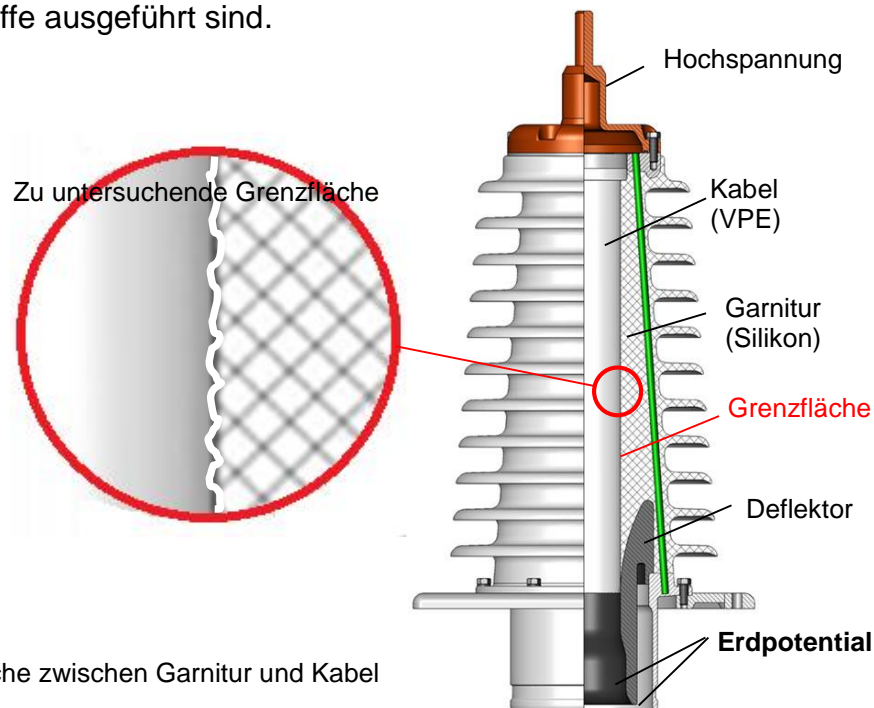


Bild 1: Grenzfläche zwischen Garnitur und Kabel

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf die elektrische Festigkeit der Grenzfläche zwischen Silikongarnitur und VPE-Kabel zu ermitteln und die Grenzsicht zu dimensionieren, um:

- eine vorhandene Konstruktion zu optimieren,
- den Einsatzbereich der Garnitur zu erweitern,

- neue Materialien zu entwickeln bzw. zu verwenden und
- die Abmessung zu reduzieren und damit die Kosten zu mindern.

Bei den durchgeführten Untersuchungen sollten die Auswirkungen von nachfolgenden unterschiedlichen Parametern ermittelt werden:

- Werkstoff,
- Fugendruck,
- Oberflächenrauigkeit,
- Eingesetztes Fett,
- Temperatur,
- Alterung und
- Spannungsart.

Da aus versuchstechnischen Gründen eine Grenzschichtuntersuchung an Garnituren in Originalgröße zu aufwendig ist, werden die Untersuchungen an Modellprobekörpern durchgeführt. Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit werden daher zylindrische Probekörper eingesetzt, die aus zwei Teilen bestehen: Einer Hohl­scheibe aus Silikon, welche die Garnitur nachbildet und einem VPE-Zylinder, der das Kabel nachbildet (**Bild 2**). Der VPE-Zylinder wird in die Silikonscheibe hineingedrückt und die Durchschlagspannung an der Grenzschicht mittels einer Rogowski-Elektroden-Konfiguration bestimmt. Der Druck an der Grenzschicht kann mit der Änderung des Durchmessers des Lochs in der Silikonscheibe beeinflusst werden.

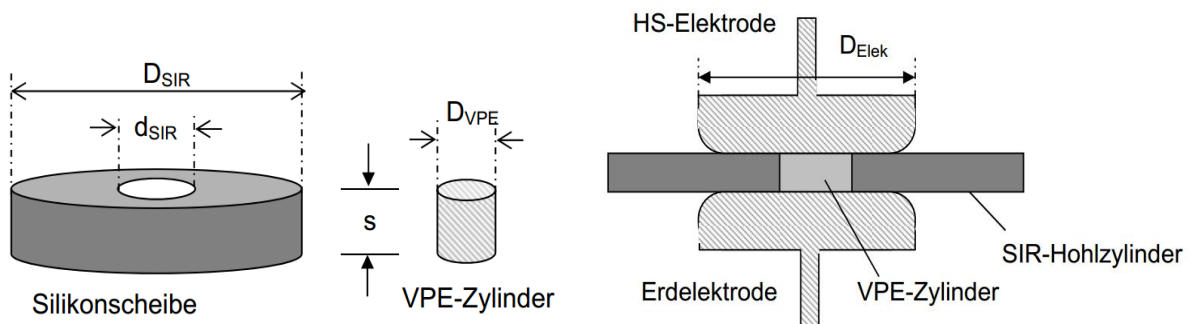


Bild 2: Prüfanordnung

Die Versuchsparameter des ersten Teils dieser Arbeit sind:

- **Werkstoffe:** PE als Kabelteil und 2 unterschiedliche Silikone (SIR) als Isolierteil,
- **Oberflächenrauigkeit:** 4 verschiedene Rauigkeiten,
- **Fugendruck:** 4 verschiedene Fugendrucke,
- **Fett:** Qualitative Untersuchung des Einflusses von Fett (ohne Fett, wenig Fett, viel Fett, unterschiedliche Fettarten),
- **Spannungsart bei der Durchschlagprüfung:** Wechselspannung und Stoßspannung.

Die Prüflinge werden vor der Untersuchung in montiertem Zustand für etwa eine Woche bei konstanten Umgebungsbedingungen (20 °C, 55% Luftfeuchtigkeit) gelagert. Dabei sollen die Umgebungsparameter festgehalten werden.

Der Durchschlagspannungsfestigkeitstest an Probekörpern wird bei Wechsel- und Stoßspannung durchgeführt. Bei Wechselspannung (50 Hz) wird die Spannung mit einer Spannungssteigerungsrate von 2% der zu erwartenden Durchschlagsspannung pro Sekunde bis zum Durchschlag gesteigert. **Bild 3** zeigt die ersten Ergebnisse bzgl. der Durchschlagsstrecke an der Grenzfläche der Prüflingsteile (VPE und SIR) bei der Prüfung mit Wechselspannung.

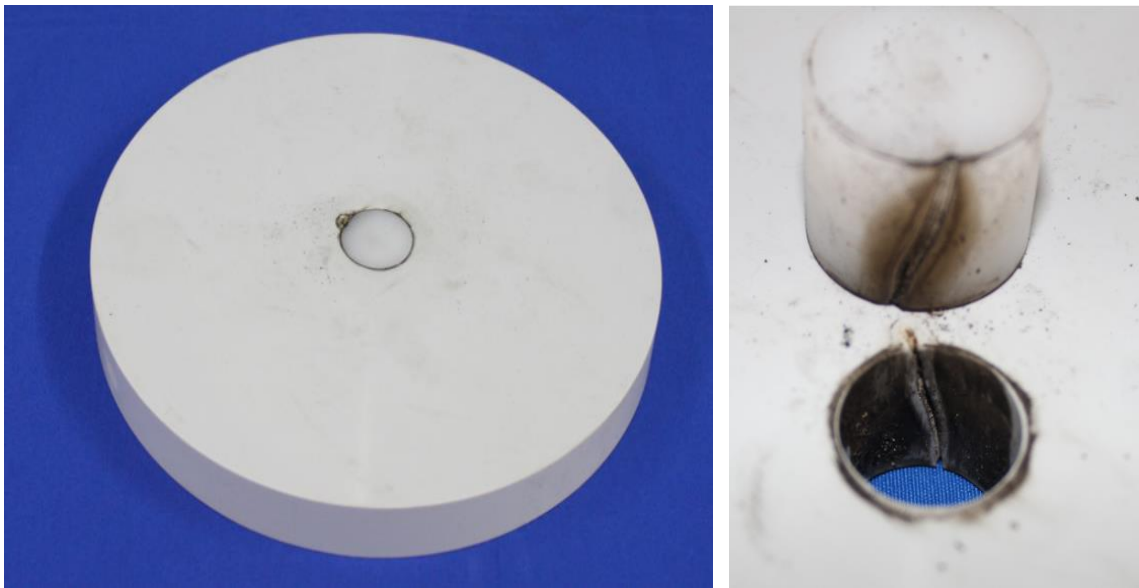


Bild 3: Durchschlagsstelle an der Grenzfläche der Prüflingsteile (VPE und SIR)

Wenn die Wechselspannungsversuche abgeschlossen sind, erfolgen Untersuchungen bei Stoßspannung, wobei pro Spannungsstufe drei Stöße erfolgen werden und wenn kein Durchschlag beobachtet wird, die Spannung entsprechend zu erhöhen ist. Die Spannungssteigerung pro Stufe soll dabei ca. 5% der zu erwartenden Durchschlagsspannung betragen.

Basierend auf den ersten Untersuchungen ist es nun möglich, zunächst die benötigten Proben in entsprechender Anzahl herzustellen, um dann die Auswirkungen der unterschiedlichen o.g. Parameter zu ermitteln.

Auslegung, Simulation und Konstruktion einer Durchführung zur Isolierung von bis zu 360 kV Gleichspannung

Dipl.-Ing. Olaf Gratz, Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović

Ein in der Hochspannungstechnik häufig auftretendes Problem ist die Durchleitung eines auf Hochspannungspotential befindlichen Leiters durch eine Öffnung in einer geerdeten Wand oder durch ein auf Massepotential befindliches Gehäuse. Die Aufgabe einer derartigen Durchführung besteht darin, die Spannungsfestigkeit an der kritischen Stelle so weit zu erhöhen, dass allen auftretenden elektrischen Beanspruchungen standgehalten werden kann. Bei Outdoor-Installationen muss zudem sichergestellt sein, dass die Durchführung selbst bei ungünstigsten Witterungseinflüssen nicht versagt. Eine hohe Festigkeit wird bei Durchführungen für Wechselspannungen vor allem dadurch erreicht, dass die Feldverteilung entlang des Isolators möglichst homogenisiert wird. Dies wird zumeist durch eine kapazitive Feldsteuerung realisiert, bei der sich durch zylindrische und gegeneinander abgestufte Steuerbeläge das Potential entlang der Durchführung gleichmäßig aufteilt. Bei Gleichspannungsanwendungen ist eine auf diesem Prinzip beruhende Potentialsteuerung nicht möglich. Zur Beeinflussung der an der Oberfläche sowie im Inneren der Durchführung auftretenden Feldstärken bietet sich hier die Möglichkeit der resistiven Steuerung an. Diese erfolgt durch die gezielte Variation der Leitfähigkeit in den elektrisch beanspruchten Bereichen des Isoliermediums. Ist eine derartige Steuerung nicht möglich, muss die geometrische Auslegung der Durchführung dahingehend optimiert werden, dass die auftretenden Feldstärken unterhalb kritischer Belastungswerte liegen.

Zur Versorgung einer Röntgenquelle wurde im Rahmen eines Kooperationsprojektes eine hochspannungsfeste Durchführung entwickelt, welche es erlaubt, die von einer Kaskade erzeugte Hochspannung von bis zu -360 kV durch zwei geerdete Metallgehäuse zu führen. Weiterhin soll eine Versorgungsspannung von etwa 5 V, welche sich ebenfalls auf einem Potential von ca. 360 kV befindet, übertragen werden. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass die eine Gehäusesseite mit einem Isolieröl gefüllt ist, wohingegen sich im anderen Gehäuse ein Vakuum mit einem Druck von etwa 10^{-7} bar befindet. Die Durchführung muss demnach eine hohe Gleichspannung gegenüber den Gehäusen isolieren und gleichzeitig die unterschiedlichen Medien gegen einander abdichten können. Darüber hinaus sollte die Durchführung räumlich sehr kompakt ausfallen, um die Abmessungen der Gesamtanlage gering zu halten.

Zunächst wurden verschiedene in Frage kommende Materialien hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz als Isolations- und Trennmedium verglichen. Da zunächst nur die Fertigung eines Prototypen geplant war, sollten alle Komponenten der Durchführung durch spanende Bearbeitung gefertigt werden können. Aufgrund der beschriebenen Einsatz- und Verarbeitungsbedingungen kommen als Isolierstoff nur polymere Kunststoffverbindungen in Betracht. Aus der großen Menge an heute verfügbaren Polymeren wurden fünf Materialien ausgesucht, die hinsichtlich ihrer

elektrischen und mechanischen Eigenschaften besonders geeignet erschienen. Bei diesen Kunststoffen handelt es sich um Polypropylen (PP), Polyethylen hoher Dichte (PE300), Polyetheretherketon (PEEK), Polyoxymethylen (POM) und Polytetrafluorethylen (PTFE). Aufgrund der angestrebten räumlichen Kompaktheit der Durchführung wurde bei der Bestimmung der maximal erreichbaren Feldstärken besonderes Augenmerk auf die Grenzfläche zwischen dem Feststoff und dem Öl gelegt. Viele Beispiele aus der Praxis haben gezeigt, dass bei längsgeschichteten Anordnungen, bei denen das elektrische Feld tangential zur Grenzfläche verläuft, die Gesamtfestigkeit schlechter ist als die elektrische Festigkeit der beiden angrenzenden Stoffe. Vor diesem Hintergrund wurde eine Prüfanordnung entwickelt, mit der zylindrische Kunststoff-Prüflinge mit einem Durchmesser von 10 mm bei unterschiedlichen Schlagweiten in einem mit Isolieröl gefüllten Prüfgefäß zwischen zwei Rogowski-Elektroden untersucht werden können. Mit dieser Anordnung wurde die elektrische Festigkeit der Grenzfläche sowohl durch eine Kurzzeitprüfung, bei der nach etwa 20 s der Durchschlag auftritt, als auch durch eine Stehspannungsprüfung ermittelt. Bei der Kurzzeitprüfung wurde der Betrag der anliegenden Spannung mit einer Geschwindigkeit von 10 kV/s solange gesteigert, bis es zum Überschlag entlang der Feststoff-Öl-Grenzfläche kam (**Bild 1**). Pro Kunststoff wurden Messreihen mit Schlagweiten von 10 mm, 20 mm und 30 mm durchgeführt. Zur statistischen Absicherung, aber auch um einen Eindruck zu gewinnen, inwieweit die elektrische Festigkeit der Kunststoffoberfläche durch einen vorangegangenen Überschlag beeinträchtigt wird, wurden die Prüfungen jeweils fünf Mal wiederholt. Die dabei erzielten Resultate können beispielhaft den folgenden Diagrammen entnommen werden. **Bild 2** zeigt die Ergebnisse der Prüfungen von Kunststoffprobestücken mit einer Schlagweite von 10 mm.

Dem Balkendiagramm ist zu entnehmen, dass das POM und das PTFE eine hohe Spannungsfestigkeit mit einer geringen Standardabweichung aufweisen. Bei dem PEEK hingegen ist die Streuung der Ergebnisse sehr groß. In der rechten Grafik ist das zugehörige Diagramm zu sehen, welches die Spannungsfestigkeit der Kunststoffe während der Abfolge der fünf Messungen dargestellt.

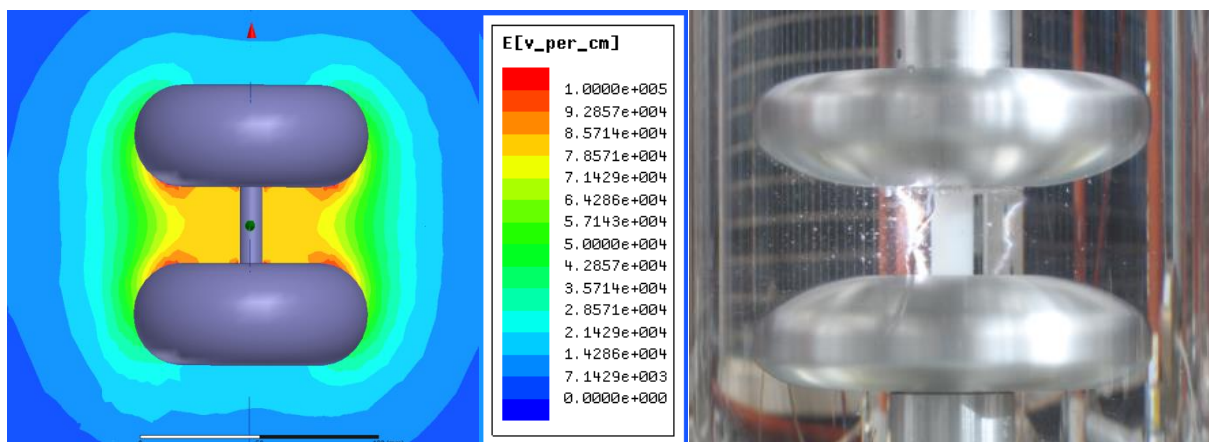


Bild 1: Untersuchung der Gleichspannungsfestigkeit von Grenzflächen

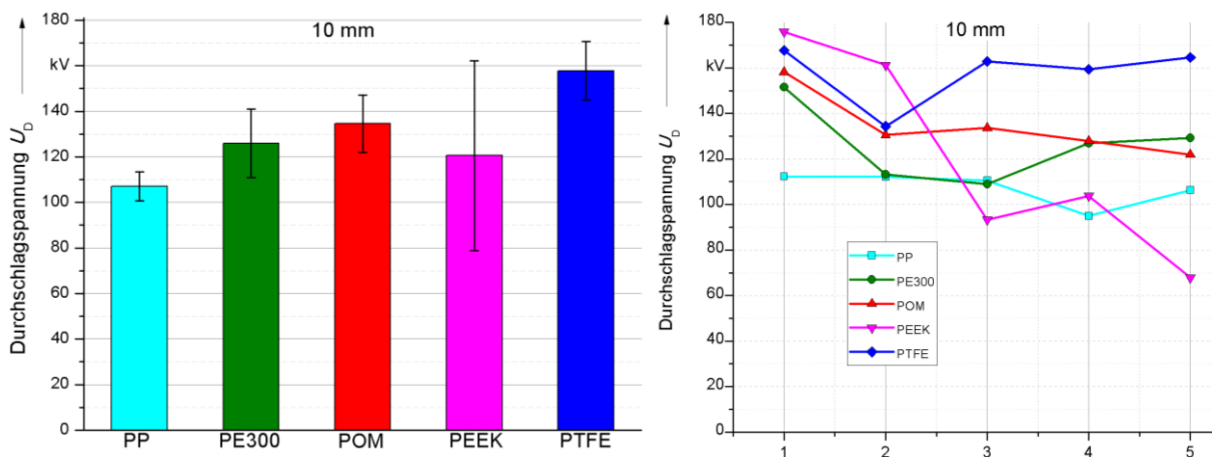


Bild 2: Elektrische Festigkeit der Kunststoff-Öl-Grenzfläche bei einer Schlagweite von 10 mm

Hier ist zu erkennen, dass bei dem PEEK die Spannung nach dem zweiten Überschlag deutlich abnimmt. Ursache hierfür ist die ausgeprägte Neigung des PEEK, auf seiner Oberfläche durch Karbonisierung leitfähige Kanäle auszubilden, was in **Bild 3** dargestellt ist.

Dieser Effekt ist bei POM nicht oder allenfalls deutlich geringer ausgeprägt. Nach fünf Überschlägen entlang der Feststoff-Öl-Grenzfläche sind mit Ausnahme einer gleichmäßigen farblichen Eintrübung keine sichtbaren Schäden zu erkennen. In **Bild 4** sind die Ergebnisse der Grenzflächenuntersuchungen von Kunststoffproben mit einer Länge von 20 mm dargestellt. Auch bei dieser Schlagweite ist eine Abnahme der elektrischen Festigkeit bei PEEK infolge von Entladungen an der Oberfläche zu erkennen. Dieser Effekt tritt beim PP nach der dritten Entladung ebenfalls in Erscheinung.

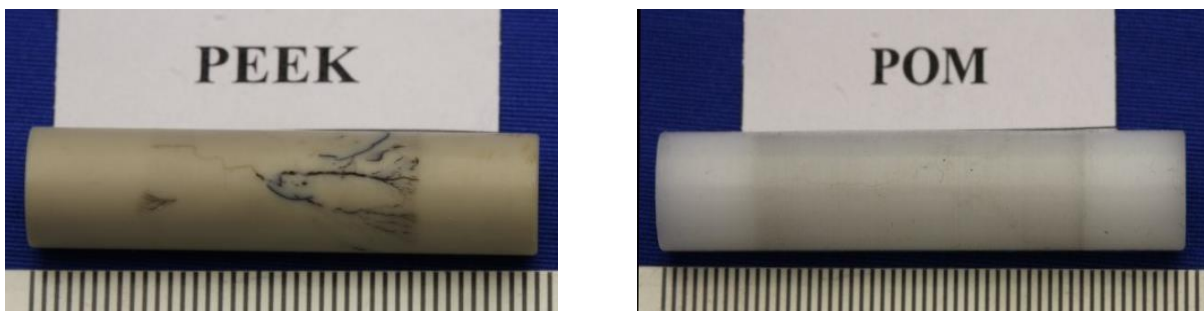


Bild 3: Oberfläche von PEEK im Vergleich zu POM nach fünf Überschlägen

Bei einer Schlagweite von 30 mm weist das POM die höchste elektrische Grenzflächenfestigkeit auf, was in **Bild 5** dargestellt ist. Bei dem PE300 ist bei dieser Schlagweite ebenfalls der beschriebene Rückgang der Festigkeit zu verzeichnen, was auch in diesem Fall auf eine Schädigung der Oberfläche zurückgeführt werden kann.

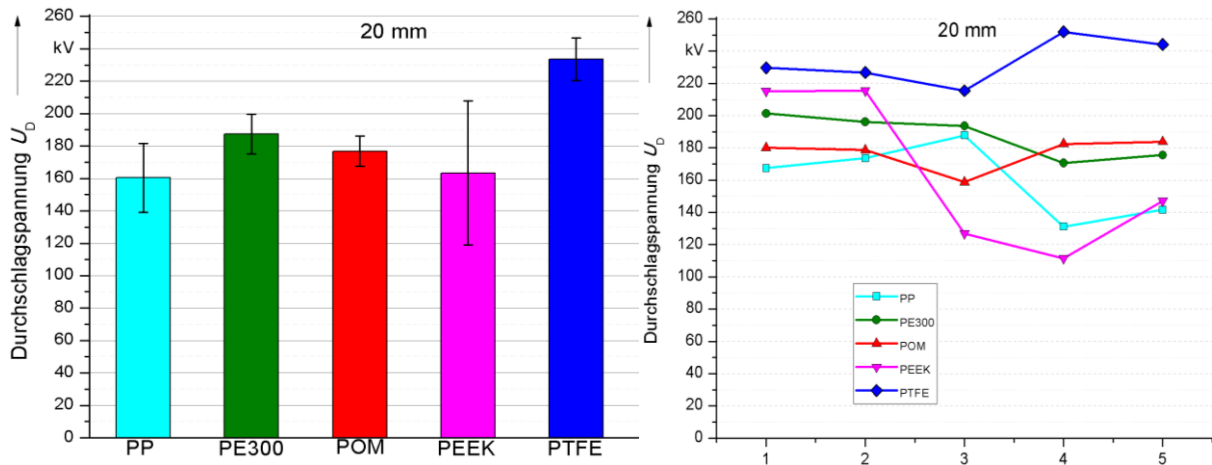


Bild 4: Elektrische Festigkeit der Kunststoff-Öl-Grenzfläche bei einer Schlagweite von 20 mm

Bei allen untersuchten Schlagweiten wies das PP die niedrigste Spannungsfestigkeit auf. Das PE300, das POM und das PTFE weisen insgesamt eine hohe elektrische Festigkeit sowie eine gute Beständigkeit der Oberfläche gegenüber Endladungsspuren auf. Aufgrund seiner höheren mechanischen Stabilität gegenüber PTFE und PE300 wurde das POM mit einem Elastizitätsmodul von ca. 3000 N/mm² für die Fertigung der Isolationskomponente der Durchführung verwendet. Es eignet sich für den Einsatz von Temperaturen bis zu 100 °C und weist darüber hinaus eine hohe Beständigkeit gegenüber Röntgenstrahlen auf.

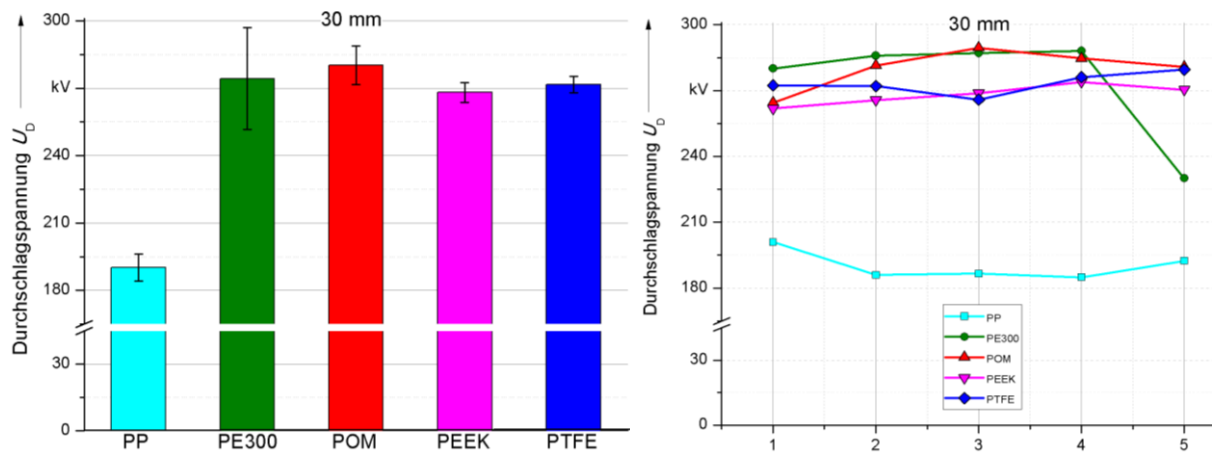


Bild 5: Elektrische Festigkeit der Kunststoff-Öl-Grenzfläche bei einer Schlagweite von 30 mm

Neben diesen Untersuchungen im Kurzzeitbereich wurde im Rahmen von Stehspannungsprüfungen die dauerhafte Spannungsfestigkeit der POM-Öl-Grenzfläche ermittelt. Durch die Beanspruchung bei verschiedenen Spannungshöhen konnten unterschiedliche Zeiten bis zum Durchschlag der Anordnung ermittelt werden. Die Spannungshöhe sowie die zugehörige Beanspruchungsdauer ergeben in einer doppelt-logarithmischen Darstellung näherungsweise eine Gerade, was in **Bild 6** dargestellt ist. Wird die Kurve für eine Dauerbeanspruchung von einem Jahr extrapoliert, so lässt sich eine maximale elektrische Festigkeit von etwa 52 kV/cm ablesen.

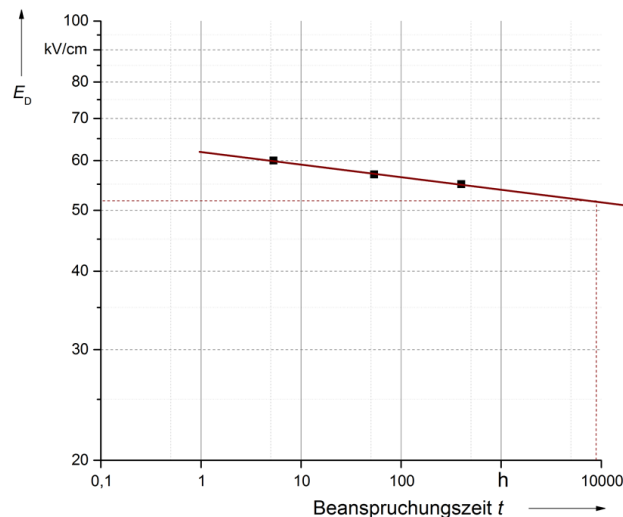


Bild 6: Untersuchung zur dauerhaften Spannungsfestigkeit

Bei der geometrischen Auslegung wurde zunächst ein CAD-Modell einer möglichst einfachen Anordnung erstellt und von diesem mit Hilfe einer Simulationssoftware eine Feldberechnung durchgeführt. Durch die Variation der Abmessungen wurde bei der nachfolgenden Optimierung dafür gesorgt, dass die Feldstärken innerhalb des Isoliermaterials und an den Grenzflächen des Kunststoffes zum Öl bzw. zum Vakuum unter Beachtung der geforderten Kompaktheit der Durchführung derart reduziert wurden, dass sie unterhalb der zulässigen Maximalfeldstärke liegen. Die Feldverteilung der finalen Geometrie ist in **Bild 7** dargestellt.

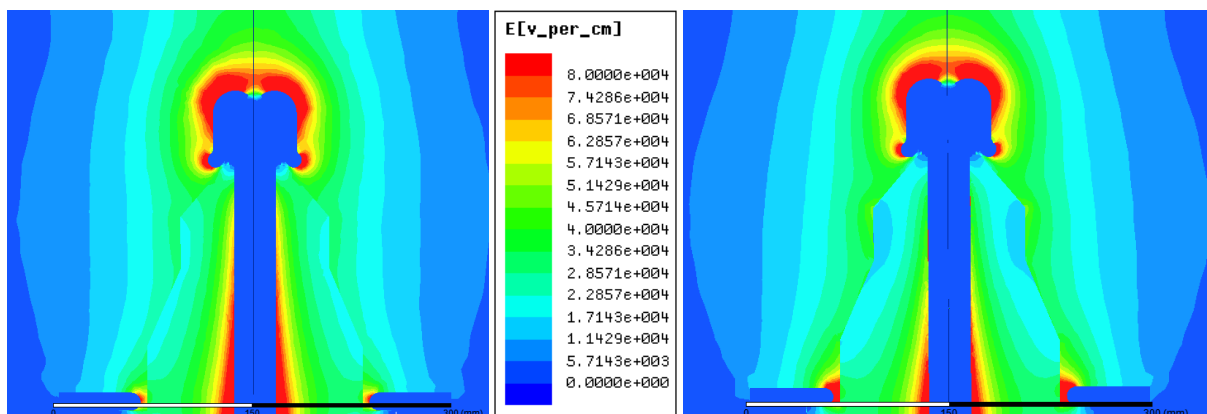


Bild 7: Simulation des elektrischen Feldes unter Öl (links) und unter Vakuum (rechts)

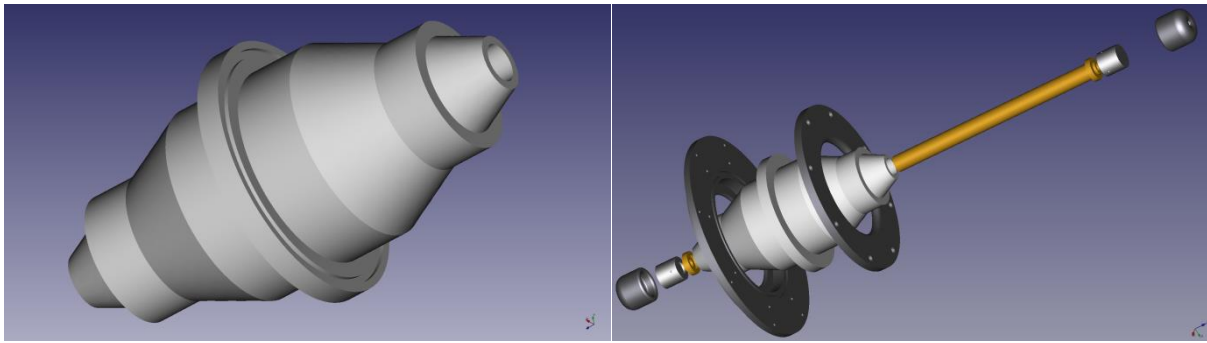


Bild 8: CAD-Modell der Isolierung (links) und Explosionsdarstellung der Durchführung (rechts)

Im rechten Teil von **Bild 8** ist die Explosionsdarstellung mit allen Komponenten der Durchführung zu sehen und in der linken Bildhälfte der Isolator aus POM. Der Innenleiter stellt einen Hohlzylinder aus bleifreiem Messing dar, an dessen Enden sich die Hochspannungselektroden befinden. Im Inneren dieses Zylinders werden die Zuleitungen für das auf HS-Potential befindliche Filament untergebracht und vakuumdicht vergossen. Für die Montage der Durchführung wurde ein zweiteiliger Flansch aus einer ebenfalls bleifreien Aluminiumlegierung angefertigt. Temperaturbeständige Dichtringe sorgen im späteren Betrieb zur Abdichtung der Vakuumröhre gegenüber dem mit Isolieröl gefüllten Kaskadengehäuse.

In **Bild 9** ist das CAD-Modell der kompletten sowie eine Abbildung der real montierten Durchführung zu sehen. Die elektrische Prüfung sowie die Untersuchung der Dichtigkeit stehen derzeit noch aus. Weiterhin ist ein Prüfgefäß entwickelt worden, mit welchem die elektrische Festigkeit der Kunststoff-Vakuum-Grenzfläche in Analogie zu der Öl-Feststoff-Grenzfläche eingehender untersucht werden kann.

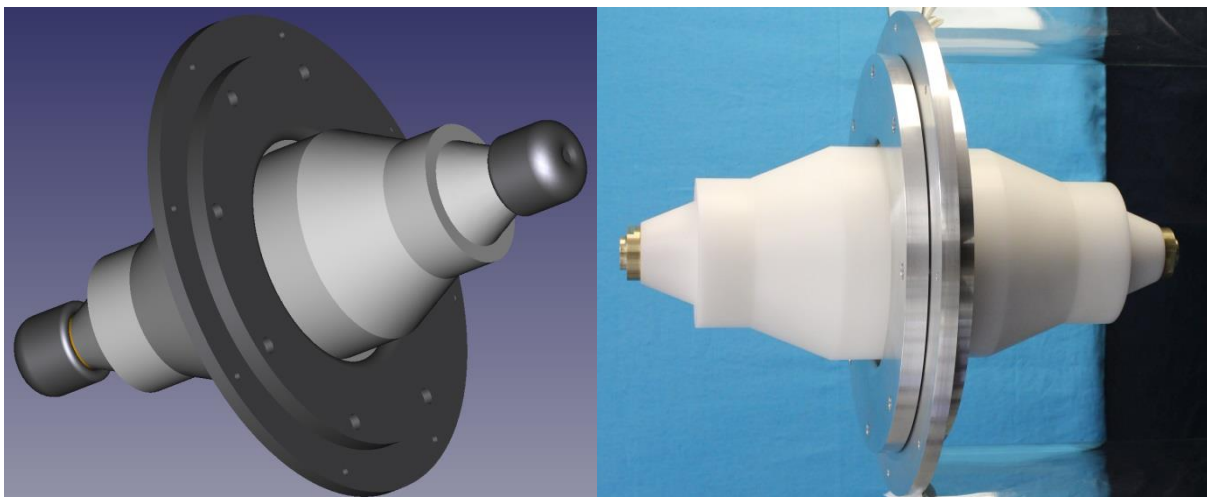


Bild 9: CAD-Modell der gesamten (links) und der real montierten Durchführung (rechts)

Die elektrische Festigkeit von Isolierflüssigkeiten unter Gleichspannungsbeanspruchung bei unterschiedlichen Schlagweiten

Dipl.-Ing. Olaf Gratz, M.Sc. Moritz Kuhnke

Da in der Hochspannungstechnik hohe Gleichspannungen sowohl zur Energieübertragung als auch in kompakten Anwendungen wie Elektronenmikroskopen und Röntgenanlagen zunehmend an Bedeutung gewinnen, sollte im Rahmen dieser Untersuchung die elektrische Festigkeit verschiedener Isolierflüssigkeiten bei Gleichspannung untersucht werden.

Die klassische Bestimmung der elektrischen Festigkeit von flüssigen Isolierstoffen wird, entsprechend den Anforderungen nach *VDE 0370-5*, mit Hilfe von VDE-Kalotten vorgenommen, welche sich in einem Abstand von 2,5 mm befinden. An die Elektroden wird eine sinusförmige Wechselspannung mit einer Frequenz von 48 Hz – 62 Hz gelegt, die bei 0 kV beginnend, gleichmäßig um 2 kV/s bis zum Durchschlag der Ölschicht gesteigert wird. Gemessen wird der im Durchschlagsaugenblick anliegende Effektivwert der Wechselspannung. Aus den Ergebnissen von sechs Einzelmessungen wird der Mittelwert bestimmt und als Durchschlagspannung der untersuchten Probe angegeben. Der bei Wechselspannung ermittelte und für viele Isolierflüssigkeiten bekannte Wert lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung nicht auf die bei Gleichspannung zu erwartende Festigkeit übertragen. Weiterhin sind die in Hochspannungsgeräten üblicherweise auftretenden freien Ölstrecken, welche einer hohen elektrischen Beanspruchung unterliegen können, deutlich länger als die in der Norm vorgesehene Schlagweite von 2,5 mm. Die bei dieser Distanz ermittelten Werte lassen sich aufgrund des Volumeneffektes nicht einfach auf größere Abstände übertragen.

Für die Vielzahl der in der Praxis anzutreffenden Isolieröle wurde bei dieser Untersuchung eine Auswahl von vier unterschiedlichen Ölen untersucht. Bei dem Öl *S2 ZU-I* handelt es sich um ein nicht inhibiertes, auf herkömmliche Weise raffiniertes Isolieröl, auf der Basis von speziellen naphthenischen Grundölen. Beim *S3 ZX-I* handelt es sich um ein inhibiertes Isolieröl auf Mineralölbasis. Es wird aus speziell raffinierten Grundölen hergestellt, wodurch ein geringer Schwefelgehalt erreicht wird und es dadurch ohne den Einsatz eines Kupferpassivators auskommt. Bei dem Isolieröl *S4 ZX-I* handelt es sich um ein neuartiges inhibiertes Öl, welches durch das GtL-Verfahren aus Erdgas hergestellt wird. Hierbei wird das Isolieröl aus Methan, das den Hauptbestandteil des Erdgases ausmacht, in einem dreiteiligen Prozess gewonnen. Das Besondere an diesem Öl ist, dass es nach *ISO 14596* bzw. *ASTM D2622* keinen nachweisbaren Schwefel enthält, wodurch die Gefahr von korrosivem Schwefel beseitigt wird. Neben diesen Isolierflüssigkeiten wurde zum Vergleich ein synthetischer Ester vom Typ *Midel 7131* eingesetzt. Bei dieser synthetischen Isolierflüssigkeit handelt es sich um eine oxidationsinhibierte und

passivierte Esterflüssigkeit auf Basis des Pentaerythrit-Tetrafettsäureesters.

Zur Erzeugung der benötigten hohen Prüfgleichspannung von bis zu 400 kV wurde mit Hilfe von Komponenten aus dem Hochspannungsbaukastensystem eine 3-stufige Kaskadenschaltung aufgebaut, wie sie in **Bild 1** schematisch dargestellt ist.

Die maximale Ausgangsspannung dieser Kaskade beträgt etwa $U_{DC} = 418 \text{ kV}$ bei

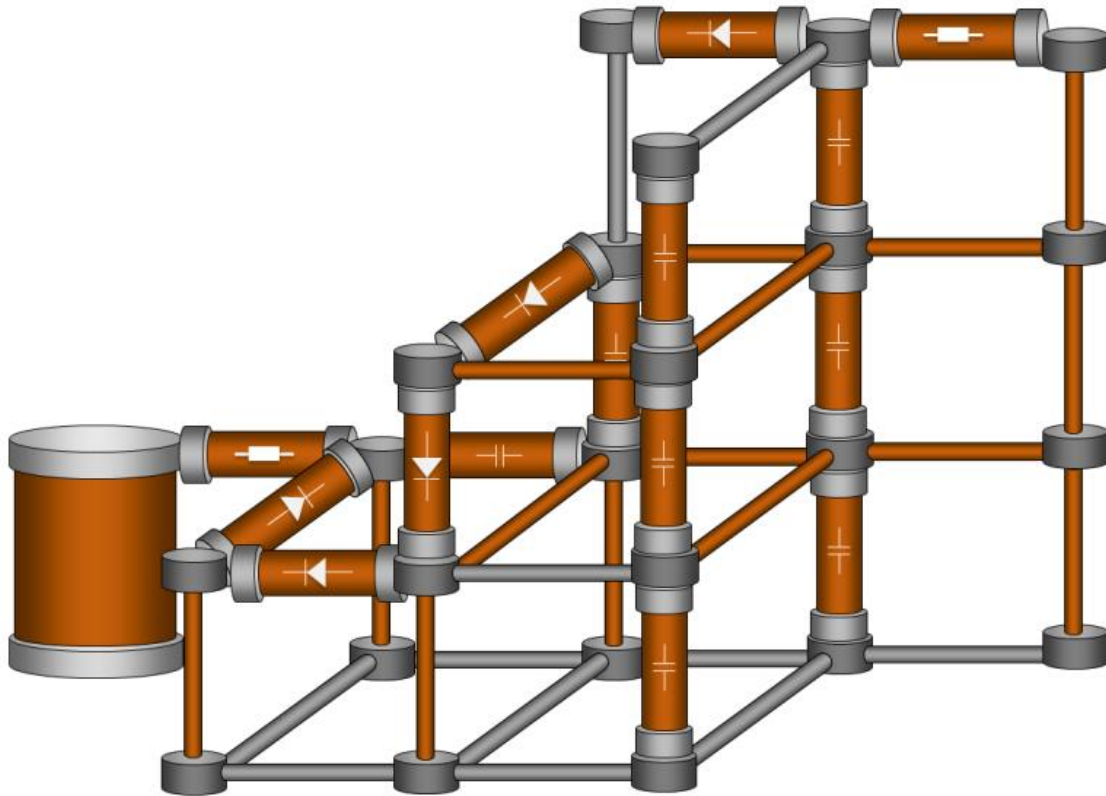


Bild 1: 3-Stufige Gleichspannungskaskade

einer überlagerten Restwelligkeit von $<1 \%$. Zur messtechnischen Erfassung wurde ein ohmscher Spannungsteiler verwendet. Die Spannungssteigerung bis zum Durchschlag betrug 10 kV/s .

Zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit kamen zwei unterschiedliche Prüfgefäße zur Anwendung. Zur Bestimmung der Durchschlagfestigkeit von Isolieröl, entsprechend *VDE 0370-5*, stand das Prüfgefäß gemäß **Bild 2** zur Verfügung. Die polierten VDE-Kugelkalottenelektroden aus nicht rostendem Stahl sind bei diesem Doppelmantelglasgefäß in der horizontalen Achse montiert und über einen Gewindestempel einseitig verstellbar. Mit Hilfe aus Glas gefertigter Verdrängungskörper lässt sich das Ölvolumen innerhalb des Prüfgefäßes, entsprechend der von der Norm empfohlenen Menge, auf etwa 550 ml Probenmenge reduzieren. Die Beheizbarkeit des Gefäßes ermöglicht die Bestimmung von Durchschlagspannungen bei höheren Temperaturen. Hierzu wurden die Stützen des äußeren Glasmantels an eine thermostatisch geregelte Umlaufheizung angeschlossen und somit der Raum zwischen dem inneren

und äußeren Glasmantel mit der Heizflüssigkeit fortwährend durchströmt. Dies ermöglicht eine über die innere Glasmantelfläche gleichmäßige Erhitzung bis auf etwa 110 °C. Zur Bestimmung der Temperatur kann in einen der Elektrodenstempel ein NiCr-Ni-Messfühler eingeführt werden. Mittels einer Rührvorrichtung, bestehend aus einem Wischer aus PTFE, welcher an einem Glasstab befestigt ist, können die nach einem Durchschlag im Elektrodenzwischenraum vorhandenen Partikel gleichmäßig im Öl verteilt werden.

Die Ergebnisse der mit dieser Prüfanordnung bei DC-Beanspruchung ermittelten

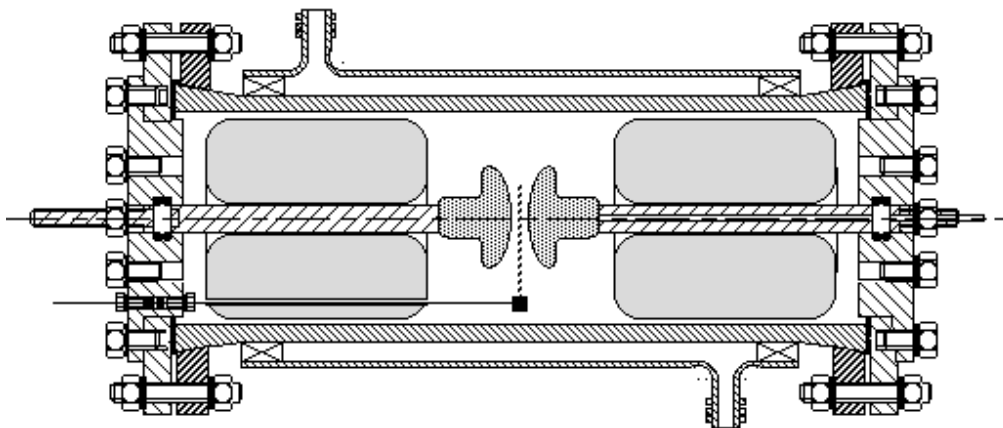


Bild 2: Doppelmantelprüfgefäß zur Bestimmung der Durchschlagspannung von Isolieröl

Werte sind in **Bild 3** dargestellt. Mit Ausnahme der Esterflüssigkeit ist bei allen Ölen sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 90 °C eine Festigkeit zwischen 60 kV und 70 kV zu verzeichnen, wobei die Durchschlagspannung bei der hohen Temperatur leicht abnimmt. Dieser Effekt ist bei der Esterflüssigkeit nicht zu verzeichnen. Hier ist eine Zunahme der elektrischen Festigkeit bei 90 °C zu beobachten, wobei allerdings

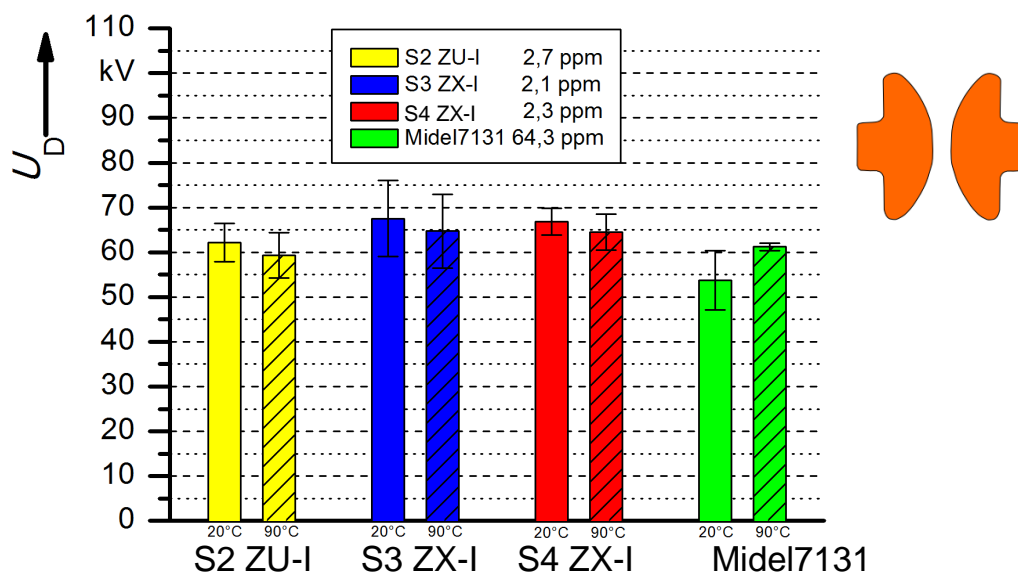


Bild 3: Durchschlagfestigkeit bei DC mit 2,5 mm Elektrodenabstand

erwähnt werden muss, dass die Durchschlagspannung bei Raumtemperatur deutlich unter denen der übrigen Öle liegt.

Zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit bei langen Distanzen wurde das beheizbare Durchschlagsgefäß nach **Bild 4** entwickelt, mit dem es möglich ist, die Durchschlagspannung bei mehreren Zentimetern Elektrodenabstand und unterschiedlichen Temperaturen zu ermitteln. Das Doppelmantelgefäß besteht aus einem zylindrischen Hohlraum, der wiederum von einem Außenmantel umschlossen wird. Der zwischen beiden Glasebenen bestehende Mantelraum wird von der Heizflüssigkeit durchströmt, wodurch ein Wärmeaustausch zwischen beiden Medien stattfinden und die Prüfflüssigkeit erhitzt werden kann. Die Beheizung der Konvektionsflüssigkeit geschieht ebenfalls mit Hilfe einer thermostatisch geregelten Umlaufheizung, welche an den Einflusstutzen des äußeren Glasmantels angeschlossen ist. Mittels Konvektion wird dann die Isolierflüssigkeit homogen erwärmt, ohne dass die zu untersuchende Flüssigkeit durch „Hot-Spots“ beeinträchtigt wird, wie dies bei direkten Heizeinrichtungen oftmals der Fall ist. Abweichend von den bei kleinen Schlagweiten verwendeten VDE-Kalotten, wurde bei diesem Aufbau eine Kugel-Kugel-Anordnung gewählt.

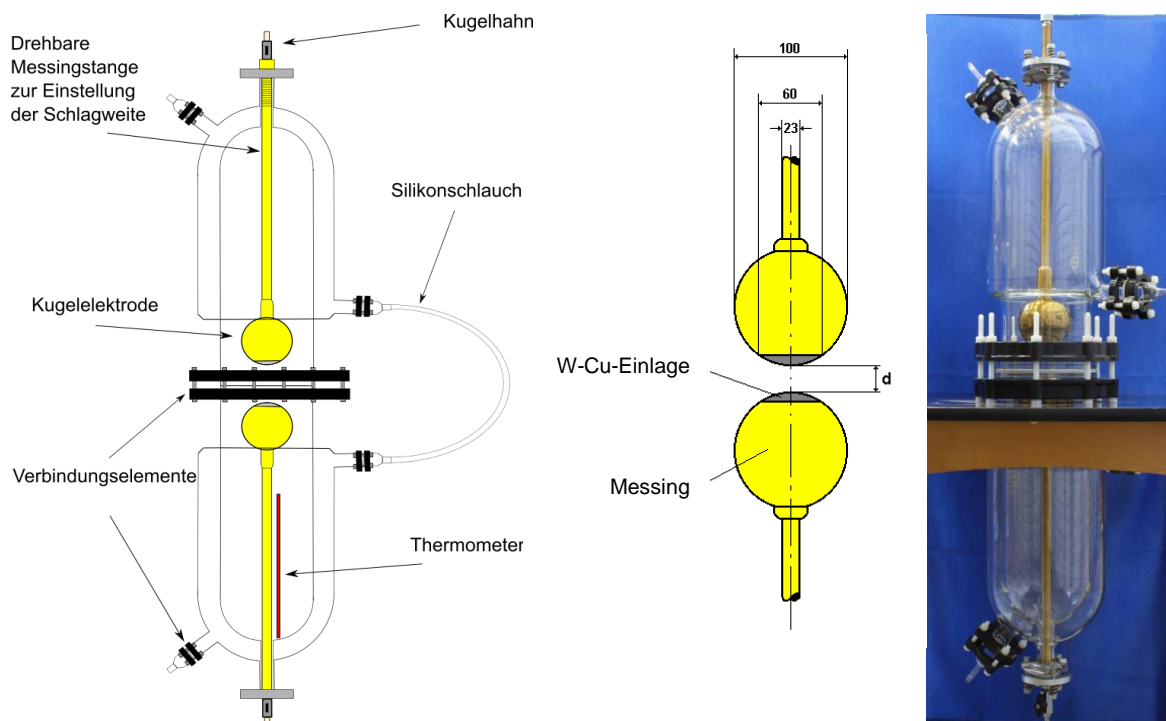


Bild 4: Doppelmantelprüfgefäß zur Bestimmung der Durchschlagspannung von Isolieröl

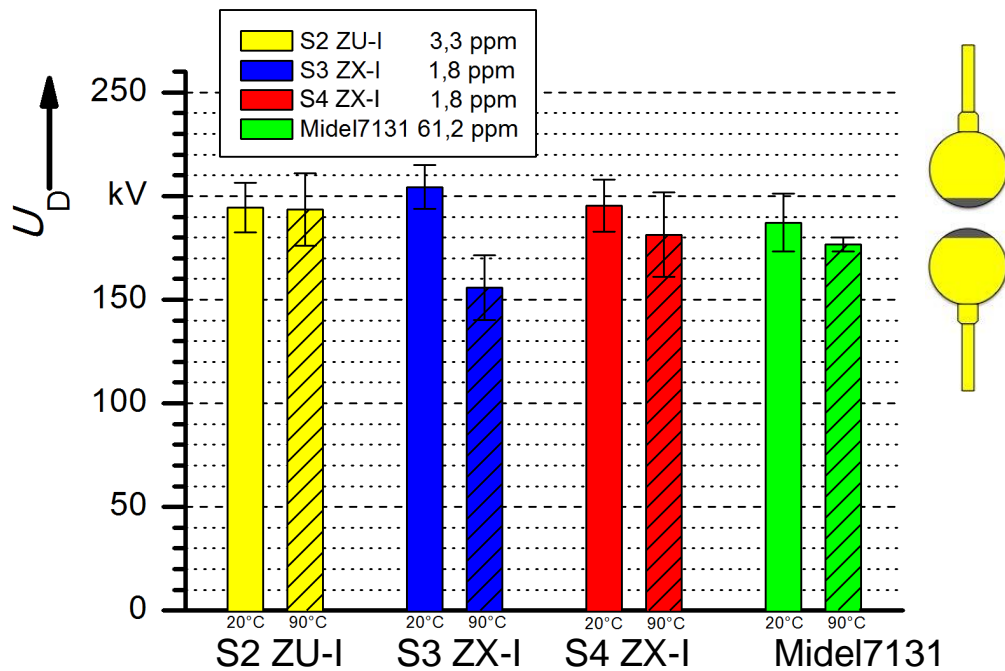


Bild 5: Durchschlagfestigkeit bei DC mit 10 mm Elektrodenabstand

Mit Hilfe dieses Prüfgefäßes wurden die bereits erwähnten Öle hinsichtlich ihrer Festigkeit bei einer Schlagweite von 10 mm unter Gleichspannungsbeanspruchung untersucht. Bei Raumtemperatur liegt die Durchschlagfestigkeit bei allen Isolierflüssigkeiten in einem relativ dichten Bereich zwischen 190 kV und 205 kV. Bei einer Temperatur von 90 °C ist hingegen eine unterschiedlich stark ausgeprägte Abnahme der elektrischen Festigkeit zu verzeichnen. Diese ist beim *S3 ZX-I* besonders ausgeprägt. Einzig beim *S2 ZU-I* bleibt im Gegensatz zu allen anderen Ölen die Durchschlagspannung weitestgehend konstant. Dies kann möglicherweise darauf zurückgeführt werden, dass es sich beim *S2 ZU-I* um das einzig untersuchte nicht inhibierte Öl handelt.

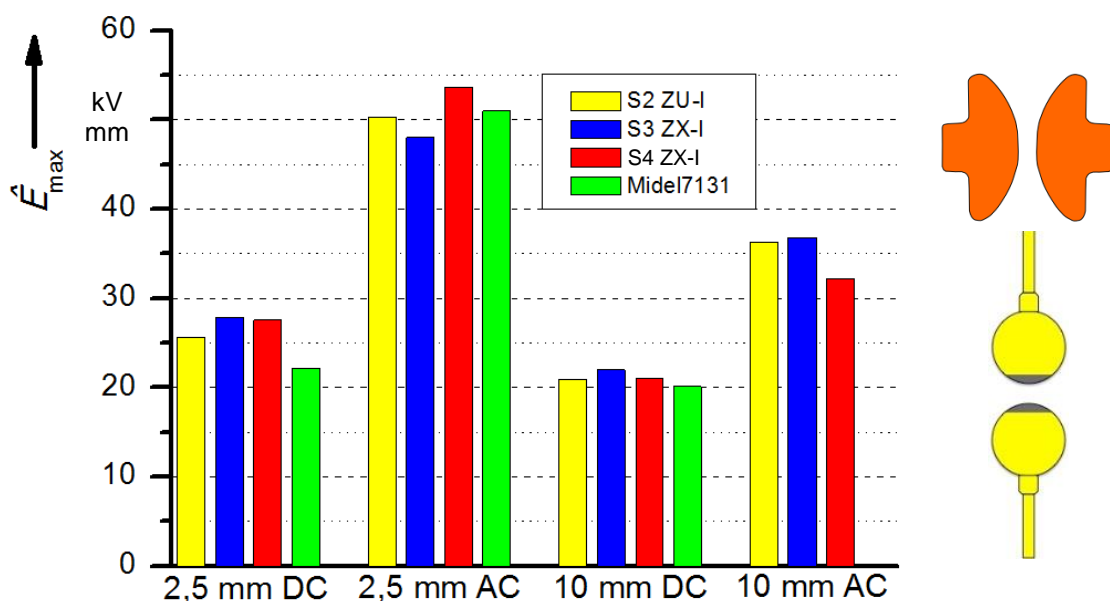


Bild 6: Durchschlagfeldstärken bei AC und DC mit unterschiedlichen Schlagweiten bei RT

Zur besseren Vergleichbarkeit sind in **Bild 6** die Durchschlagfeldstärken der untersuchten Öle bei verschiedenen Schlagweiten aufgeführt. Weiterhin sind in dieser Darstellung die Werte der elektrischen Festigkeit bei Beanspruchung mit einer sinusförmigen Wechselspannung mit 50 Hz gegenübergestellt.

Es ist festzustellen, dass die Durchschlagfeldstärke bei langen Distanzen, sowohl bei Beanspruchung mit Wechsel- wie auch mit Gleichspannung, geringer ausfällt als bei kleineren Elektrodenabständen. Zurückzuführen ist dies auf den in der Literatur bekannten Volumeneffekt. Besondere Ausprägung findet dieser Effekt vor allem bei der Wechselspannungsbeanspruchung. Daher wird deutlich, dass eine bei AC und einer Schlagweite von 2,5 mm ermittelte Festigkeit kaum Aufschluss über die zu erwartende Durchschlagspannung bei größeren Abständen, insbesondere aber keinen Rückschluss auf das Verhalten bei DC zulässt. Betragen die hier ermittelten Werte in der Größenordnung von 20 kV/mm gerade einmal etwa 40 % der nach *VDE 0370-5* gemessenen Feldstärke.

Da für den Durchschlag in Öl bisher keine geschlossene analytische Erklärung existiert, insbesondere nicht unter Berücksichtigung der Spannungsform, ist zu empfehlen, vor der Dimensionierung einer mit Isolieröl gefüllten und mit Gleichspannung beanspruchten Anordnung eine die späteren Betriebsbedingungen nachbildende experimentelle Untersuchung durchzuführen.

Die elektrischen Eigenschaften von Nanofluiden mit verschiedenen Nanopartikelkonzentrationen

M.Sc. Mohammad Taghi Imani

Seit über einem Jahrhundert werden in vielen Betriebsmitteln, einschließlich in den Leistungstransformatoren, Isolierflüssigkeiten auf Erdölbasis (Mineralöl) zur Isolierung eingesetzt. Hauptsächlich dient dieses Isolieröl dazu, die aktiven Teile zu isolieren, die Feststoffisolierung zu imprägnieren und die im Betrieb erzeugte Wärme abzuführen. Zusätzlich stellt die Isolierflüssigkeit ein geeignetes Mittel dar, um durch eine chemische Analyse des Öls den Gerätezustand zu ermitteln, analog zur Analyse des Blutes im menschlichen Körper.

Heutzutage sollen die konventionellen elektrischen Stromnetze in ein Smart-Grid-Konzept überführt werden. Dies verlangt die Weiterentwicklung der Komponenten der Stromnetze. Zurzeit ermöglichen die Fortschritte auf dem Gebiet der Materialwissenschaft neuartige Isolierungen mit besseren Eigenschaften herzustellen. Ein besonders innovatives Beispiel ist die Entwicklung von dielektrischen Nanofluiden als eine aussichtsreiche Alternative zu konventionellen Isolierflüssigkeiten. Obwohl bereits einige Nanofluiden verfügbar sind, befindet sich die Forschung auf diesem Gebiet noch in einem frühen Stadium. Smart-Fluids stellen neue Konzepte dar, um drastisch auf die Isolierflüssigkeits-Industrie einzuwirken. Sie enthalten multifunktionale Nanopartikel mit optimierten spezifischen Eigenschaften, beispielsweise mit verminderten dielektrischen Verlusten und erhöhter dielektrischer Festigkeit. Tatsächlich könnten diese Smart-Fluids für den Einsatz in ölgefüllten Energieversorgungsanlagen angepasst werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden leitfähige Nanopartikel im Mineralöl als Trägerflüssigkeit dispergiert und in drei verschiedenen Konzentrationen hinzugefügt. Die aus der Anhäufung der Nanopartikel resultierende Sedimentation in einem Kolloid wirkt sich negativ auf die Wärmeübertragung und auf die dielektrischen Eigenschaften aus. Um dies zu vermeiden und stabile Nanofluiden zu erzeugen, wurden die Nanoadditive durch Hinzugabe von so genannten Surfactants stabilisiert.

In **Bild 1** werden die Dispersionen mit verschiedenen Konzentrationen an Nanopartikel einem Monat nach der Zugabe dargestellt. Erkennbar ist keine Bildung von Ablagerungen der Nanopartikel in der Isolierflüssigkeit.



Bild 1: Mineralöl, Nanofluid A, Nanofluid B, Nanofluid C
(von links nach rechts mit erhöhter Konzentration)

Zunächst wird das Nanopulver mithilfe der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) untersucht und analysiert, was in **Bild 3** dargestellt ist. Die TEM liefert Informationen über die Morphologie der Nanopartikel in Hinsicht auf die Form und die Größe der einzelnen sowie angehäuften Nanopartikel.

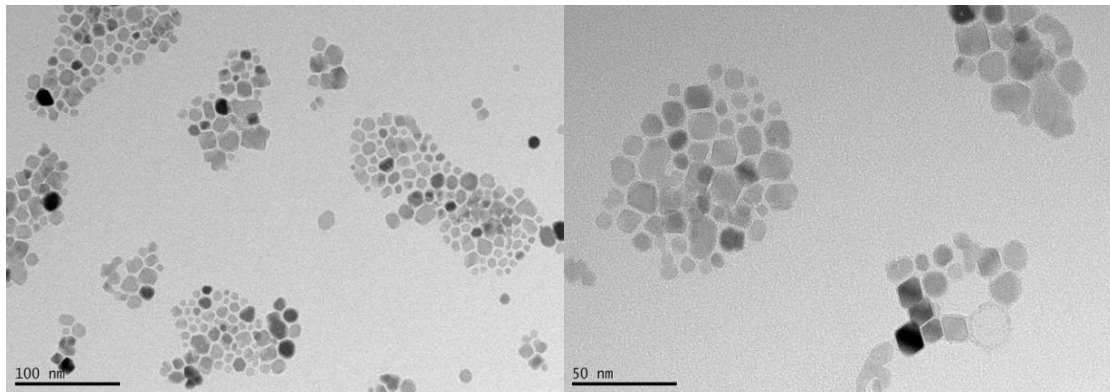


Bild 3: TEM von Nanopartikeln

Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung im Isolieröl wurde die so genannte dynamische Lichtstreuung (DLS) verwendet. Mithilfe dieser Technik kann die erfolgreiche Dispersion von Nanopartikeln beurteilt und deren Anlagerungseigenschaften erforscht werden. In **Bild 4** werden die DLS-Ergebnisse der Nanofluide vorgestellt. Anhand dieser Ergebnisse kann abgeleitet werden, dass der größte Anteil der Nanopartikel eine Größe von ca. 15 nm aufweist.

Nach der Dispersion der Nanopartikel im Isolieröl wurden alle Ölproben im Vakuumschrank bei einer Temperatur von 55 °C für einen Zeitraum von 48 h entgast und getrocknet, um diese miteinander vergleichen zu können. Anschließend wurde mithilfe der *Karl-Fischer-Titration* ein Wassergehalt aller Proben von weniger als 4 ppm nachgewiesen.

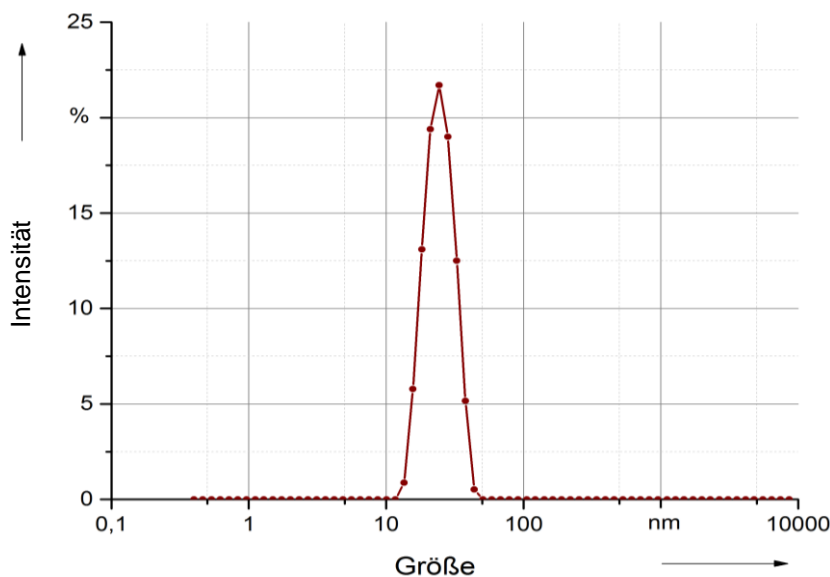


Bild 4: DLS-Ergebnis von Nanopartikeln in Hexan

Eine der wichtigsten Voraussetzungen von Isoliermaterialien ist, dass diese einer Beanspruchung mit Wechselspannung standhalten. Daher ist es von großer Bedeutung, die Durchschlagfestigkeit von Nanoflüssigkeiten in Bezug auf die verschiedenen Arten und Konzentrationen von Nanofüllstoffen zu erforschen. In einer weiteren Untersuchung wurden daher die Durchschlagsspannungen der Nanofluide A und B ermittelt und mit dem von reinem Mineralöl verglichen. Diese Messung erfolgt nach der Prüfnorm *IEC 60147* mit einem Elektrodenabstand von 2,5 mm, welche zwölf Mal wiederholt wurde. Die Messergebnisse zeigt **Bild 5**.

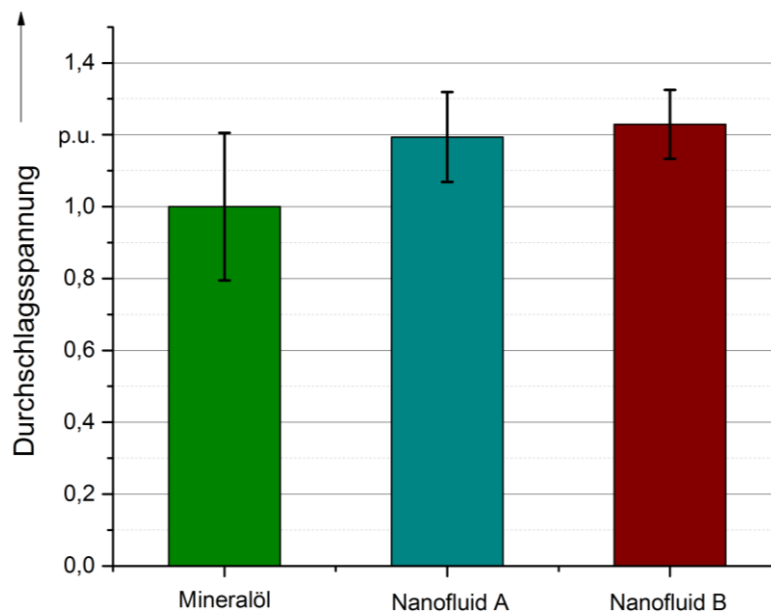


Bild 5: Messergebnisse der elektrischen Festigkeit verschiedener Nanofluide

Ersichtlich ist, dass sich durch die Ermittlung einer optimalen Konzentration der Nanopartikel die Durchschlagfestigkeit im Vergleich zu herkömmlichem Mineralöl deutlich verbessert hat. Das bedeutet, dass ein Einsatz solcher Flüssigkeiten ggf. die Herstellung von kompakteren Hochspannungssystemen mit geringerem Gewicht und geringeren Dimensionen ermöglicht, wenngleich in weiteren Untersuchungen noch verschiedenste weitere Parameter der Smart-Fluids betrachtet werden müssen. Generell scheint es jedoch möglich, durch Variation von Art und Konzentration von Nanopartikeln gezielt bestimmte Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Isolierflüssigkeiten zu verbessern, wie beispielsweise die elektrische Festigkeit aber auch andere Eigenschaften wie z.B. die Wärmeabfuhr. Zukünftige Untersuchungen werden zeigen, welche Optimierungsmöglichkeiten solcher Smart-Fluids erzielt werden können, so dass dies ein über Jahre andauerndes Forschungsgebiet am Schering-Insitut sein wird.

Untersuchung des Einflusses der Teilentladungsintensität auf die Bildung fester Alterungsprodukte in Silikon- und Esterflüssigkeiten

M.Sc. Moritz Kuhnke, B.Sc. Kristin Homeier

Bei Windenergieanlagen ist die Integration des Transformators in den Turm häufig aus umwelttechnischen Aspekten erwünscht. Problematisch ist dabei vor allem die Größe der Turmöffnung, die verglichen mit üblichen Mittelspannungstransformatoren eine deutliche Reduzierung der äußeren Abmessungen des Transformators nötig macht. Aufgrund der geringeren Dimensionen dieser Kompakttransformatoren werden an deren Isoliersystem erhöhte Anforderungen gestellt. Das Isoliersystem sollte angesichts der resultierenden geringeren Isolierabstände eine hohe elektrische Festigkeit aufweisen sowie gute dielektrische Eigenschaften zur Verlustminimierung besitzen. Infolge verringerter Kühlflächen steigt die Betriebstemperatur über die für Mineralöl und Zellulosepapier zulässigen Werte. Aus diesen Gründen werden in Kompakttransformatoren Silikon- und Esterflüssigkeiten in Verbindung mit Aramidpapier eingesetzt. Allerdings wurden vermehrte Ausfälle dieser Kompakttransformatoren verzeichnet, meist hervorgerufen durch Teilentladungen mit starker Gasbildung. Zusätzlich wurden oftmals Ablagerungen fester Alterungsprodukte an den inneren Wicklungen festgestellt. Obwohl die größere Gefährdung in der Regel von Teilentladungen ausgeht, besteht die Gefahr, dass durch die wachsartigen Ablagerungen Kühlkanäle verstopft werden, was die Lebensdauer der Transformatoren erheblich verkürzen kann.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen dieser Untersuchung verschiedene Einflussfaktoren auf die Bildung fester Alterungsprodukte und deren Auswirkungen auf die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften der gealterten Isolierflüssigkeiten untersucht und mithilfe von gaschromatographischen Analysen Indikatoren zur frühzeitigen Fehlererkennung gesucht.

Die ablaufenden Alterungsmechanismen wurden bei drei unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten erforscht. Als synthetischer Ester wird *Midel 7131*, ein oxidationsinhibierter und passivierter Pentaerythritol-Tetraester verwendet. Für Silikonflüssigkeiten wird repräsentativ *TR 50* eingesetzt, bei der es sich um ein synthetisch gewonnenes Polymethylsiloxan handelt. Ebenfalls wird zum Vergleich ein Mineralöl untersucht, um Parallelen zur X-Wachsbildung festzustellen. Dazu wurde *S2 ZU-I*, das keine Oxidationsinhibitoren oder Passivatoren beinhaltet, verwendet.

Zur Nachbildung der Alterungsprozesse im Labor dient das in **Bild 1** abgebildete Prüfgefäß. Dessen Boden bildet eine Polytetrafluorethylen-Grundplatte, auf der zwei Heizpatronen mit aufgesetzten Kühlkörpern befestigt sind. Diese Heizpatronen werden über einen Trenntransformator gespeist und erlauben eine Erwärmung der Isolierflüssigkeit auf bis zu 180 °C. Durch die Oberflächenvergrößerung der Kühlkörper beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den Heizpatronen und der Isolierflüssigkeit

nur wenige Grad Celsius. Zentriert auf der Grundplatte befindet sich eine Verbindungsstange, an der die Erdelektrode aufgeschraubt ist. Die Hochspannungselektrode wird über einen Haltering im Deckel fixiert. Den Abschluss des Gefäßes bildet ein Aluminiumdeckel, der über einen Schlauch mit einem Vorratsgefäß verbunden ist, welches einerseits zum Befüllen andererseits als Ausgleichsgefäß fungiert.

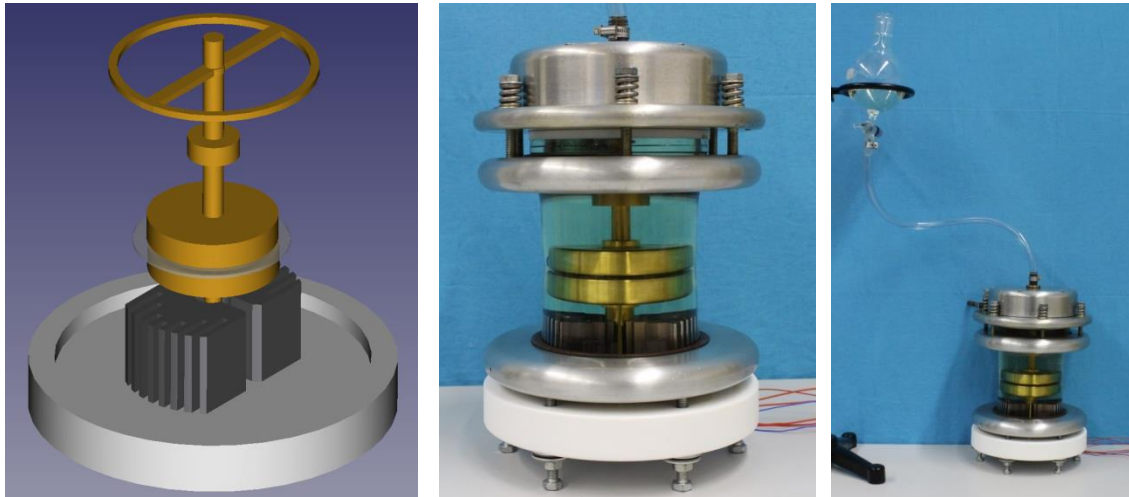


Bild 1: Aufbau des Prüfgefäßes

Verwendet wurden zwei identische Plattenelektroden aus Messing mit konzentrischen Rillen, die die Drähte der Hochspannungswicklung des Kompakttransformators nachbilden. Um ein möglichst inhomogenes elektrisches Feld und damit eine niedrige Teilentladungseinsetzspannung zu erreichen, sind die Kanten rechteckig und nicht abgerundet. Als fester Isolierstoff dient eine Quarzglasscheibe mit einer Höhe von 2 mm anstelle des Aramidpapiers. Diese wird im Gegensatz zum Aramidpapier nicht durch die Teilentladungen beschädigt und gleichzeitig konnte so der Nachweis erbracht werden, dass Aramidpapier nicht für die Bildung fester Alterungsprodukte benötigt wird. Das durch diese Elektrodenanordnung und dem geschichteten Dielektrikum entstehende inhomogene elektrische Feld wurde zunächst mit einer Simulationssoftware berechnet, was **Bild 2** veranschaulicht.

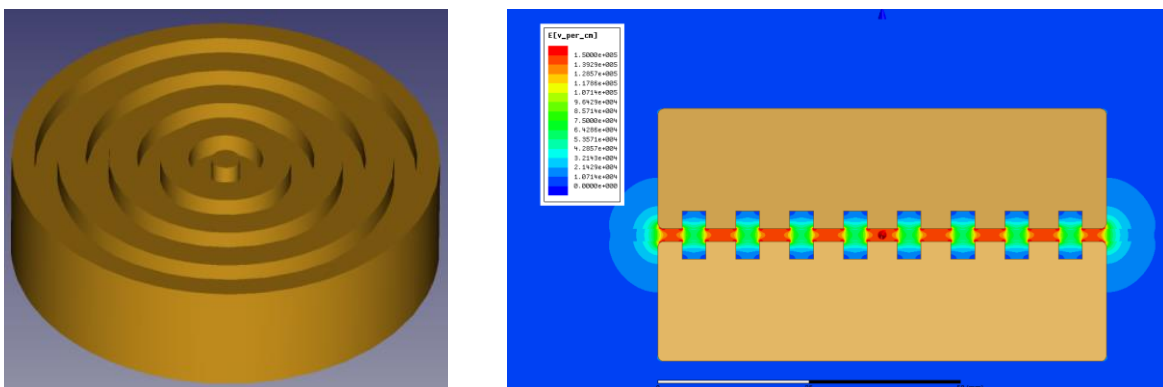


Bild 2: Elektrodenanordnung und simuliertes elektrisches Feld des geschichteten Dielektrikums mit *Midel 7131*

Die elektrische Beanspruchung erfolgte mit netzfrequenter Wechselspannung aus einem Hochspannungsprüftransformator und wurde gemäß der Prüfnorm *IEC 60270* über einen Teilentladungsprüfkreis mit Parallelauskopplung erfasst. Schematisch wird dieser in **Bild 3** dargestellt. Mithilfe des messtechnisch erfassten Nachladestromes wurden die umgesetzten Energien ermittelt. Die umgesetzte Gesamtenergie der jeweiligen Versuchsreihe wurde als Referenzwert für die Teilentladungsintensität zur späteren Interpretation der Messergebnisse verwendet.

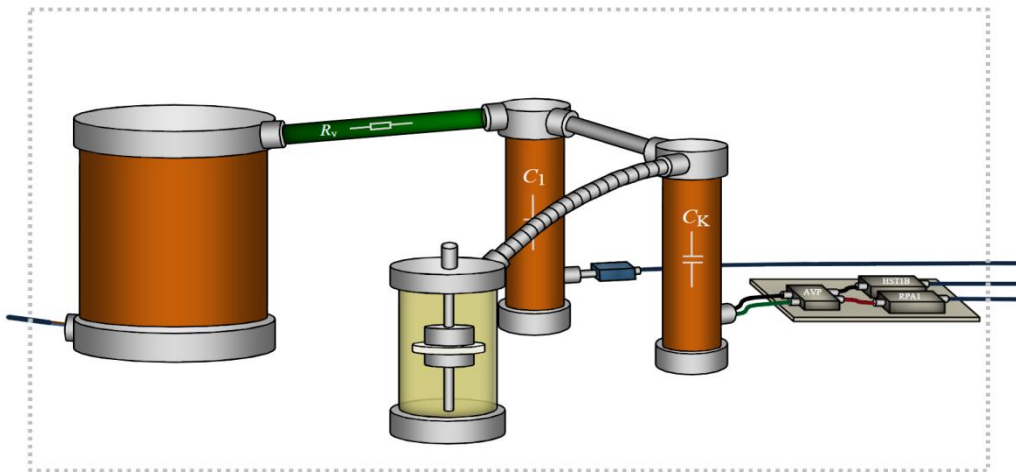


Bild 3: Schematische Darstellung des Teilentladungsprüfkreises

Bei einer Belastungsdauer von 200 h wurden die zuvor beschriebenen Isolierflüssigkeiten thermisch und elektrisch beansprucht. Während bei der Siliconflüssigkeit *TR 50* und dem Mineralöl *S2 ZU-I* bereits bei einer Temperatur von ca. 110 °C feste Alterungsprodukte erzeugt wurden, reichte diese Temperatur bei der Esterflüssigkeit nicht aus. Auch eine Zugabe von Kupferpulver als Katalysator führte nicht zur Bildung von festen Alterungsprodukten. Erst bei einer Temperatur von 134,6 °C konnten bei *Midel 7131* feste Alterungsprodukte erzeugt werden. Dies deutet darauf hin, dass die erforderliche Aktivierungsenergie für die zur Wachsbildung führenden Sekundärreaktionen bei *Midel 7131* deutlich höher liegt. **Bild 4** zeigt die gebildeten festen Alterungsprodukte auf den Elektroden und der Glasplatte.



Bild 4: Feste Alterungsprodukte aus der Esterflüssigkeit *Midel 7131*

In **Bild 5** sind die Messergebnisse von *Midel 7131*, *TR 50* und *S2 ZU-I* dargestellt. Dabei ist die Masse der gebildeten festen Alterungsprodukte in Abhängigkeit von der der Gesamtenergie aufgetragen.

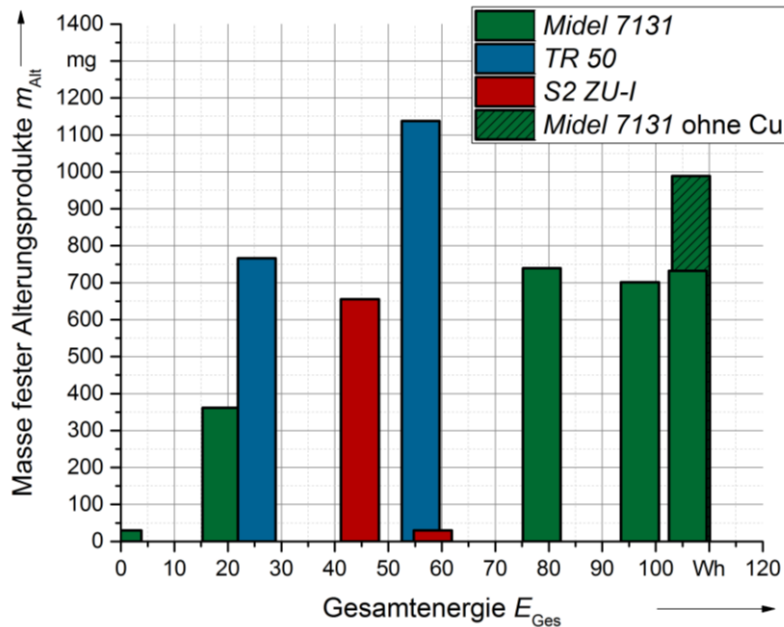


Bild 5: Einfluss der elektrischen und thermischen Beanspruchung auf die Erzeugung fester Alterungsprodukte

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Menge der wachsartigen Alterungsprodukte oftmals mit der Teilentladungsenergie ansteigt. Allerdings scheint bei *Midel 7131* kein linearer Zusammenhang zwischen der Gesamtenergie und der Masse der festen Alterungsprodukte zu bestehen, da bei unterschiedlicher Teilentladungsenergie von 80 Wh bis 106 Wh bei gleichbleibender Temperatur und Alterungsdauer nahezu identische Mengen an Wachs erzeugt wurden. Bei *TR 50* hingegen ist eine deutliche Relation zwischen der Gesamtenergie der Teilentladungsimpulse und der Masse an festen Alterungsprodukten ersichtlich: Umso höher die Gesamtenergie ist, desto größer ist die Masse der entstandenen Ablagerungen.

Die Zugabe von Kupfer als Katalysator sollte bei *Midel 7131* dazu dienen, die Reaktionskinetik der Alterungsmechanismen zu beschleunigen, indem es die notwendige Aktivierungsenergie zum Einsetzen der Alterungsreaktionen verringert. Allerdings zeigte der Vergleich zweier Messungen bei gleicher Alterungstemperatur und Teilentladungsenergie mit und ohne die Zugabe von Kupfer, dass dieser für die Alterungsprozesse nicht notwendig und sogar eher hinderlich ist, da bei dieser Konzentration der Kupferionen vermutlich eine Autoinhibierung und somit eine geschwindigkeitshemmende Wirkung eingetreten ist.

Zudem wurden eine Reihe von Messungen mit thermischer Belastung ohne Teilentladungen oder mit verkürzter Alterungsdauer durchgeführt, bei denen keine festen Alterungsprodukte gefunden wurden. Zusammenfassend lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse zu den verschiedenen Einflussfaktoren auf die Erzeugung fester Alterungsprodukte vereinfacht über ein Dreieck mit der Höhe der Temperatur, der Belastungsdauer sowie der umgesetzten Teilentladungsenergie als Seiten eines Dreiecks modellieren, dargestellt in **Bild 6**.

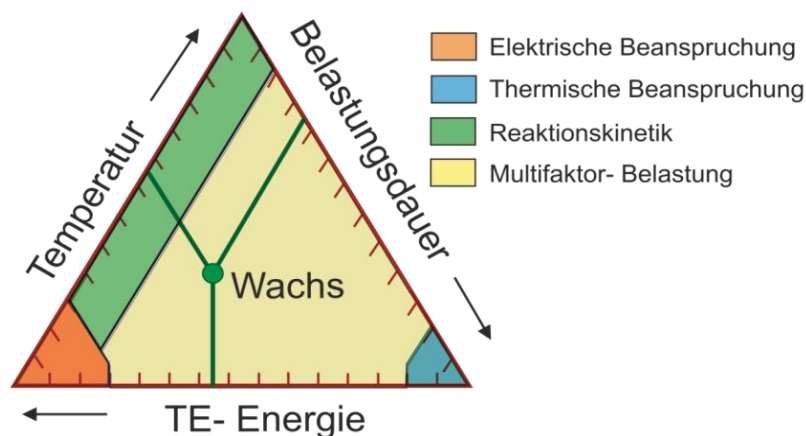


Bild 6: Einflussfaktoren auf die Bildung fester Alterungsprodukte

Dieses Dreieck ist unterteilt in vier verschiedene Bereiche. Während der gelbe Bereich eine hohe Wahrscheinlichkeit der Präsenz fester Alterungsprodukte kennzeichnet, charakterisieren die übrigen eine eher unwahrscheinliche Bildung fester Alterungsprodukte. Dabei stellt der orangene Bereich eine rein elektrische Beanspruchung, der blaue Bereich eine rein thermische Beanspruchung und der grüne Bereich die erforderliche Mindestbelastungsdauer dar.

Anschließend wurden die Auswirkungen der festen Alterungsprodukte auf die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften der gealterten Isolierflüssigkeiten ermittelt. Die dielektrischen Messungen des Verlustfaktors, der relativen Permittivität und des spezifischen Gleichstromwiderstandes erfolgten nach der Prüfnorm *IEC 60247*. Die elektrische Festigkeit wurde gemäß der Norm *IEC 60156* ermittelt. Es konnten keine Zusammenhänge zwischen den erzeugten Massen der festen Alterungsprodukte und den dielektrischen sowie elektrischen Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten nachgewiesen werden.

Die gaschromatographische Analyse nach *IEC 60567* ergab hohe Konzentrationen an Wasserstoff und Methan als typische Fehlertypen für Teilentladungen. Deren Konzentration steigt mit zunehmender Teilentladungsenergie, wie dies in **Bild 7** links veranschaulicht ist.

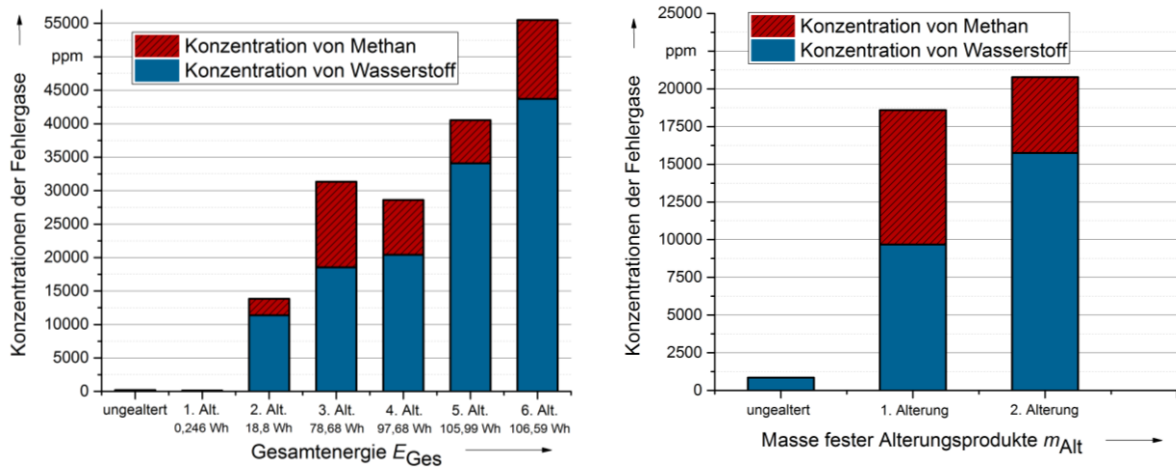


Bild 7: Konzentrationen von gelöstem Methan und Wasserstoff

Links: Messergebnisse von *Midel 7131*

Rechts: Messergebnisse von *TR 50*

Darüber hinaus wurde bei *TR 50* und *S2 ZU-I* ein Zusammenhang zwischen der Menge fester Alterungsprodukte und dem Verhältnis von gelöstem Wasserstoff zu gelöstem Methan festgestellt. Bei einer größeren Masse an Wachs steigt die Wasserstoffkonzentration an, während sich die Methankonzentration verringert. Dieses Verhältnis könnte einen möglichen Indikator für die Bildung fester Alterungsprodukte darstellen, so dass dann, basierend auf regelmäßigen gaschromatografischen Analysen, die an Windturmtransformatoren durchgeführt werden, eine Aussage über möglicherweise entstandene Alterungsprodukte denkbar scheint, wobei hierzu weitere Analysen und Untersuchungen derzeit durchgeführt werden.

Motor-Generatorsatz zur Spannungsversorgung von Schaltungen auf hohem Gleichspannungspotential

M.Sc. Moritz Kuhnke, Dipl.-Ing. Olaf Gratz, B.Sc. Henning Schnittker

In der Röntgentechnik werden hohe Gleichspannungen benötigt, um innerhalb einer Röntgenröhre Elektronen aus der Kathode zu emittieren und in Richtung der Anode zu beschleunigen. Beim Eindringen der Elektronen in das Anodenmaterial werden diese abgebremst und ein Teil der freiwerdenden Energie in die nutzbare Bremsstrahlung umgesetzt. Zur Erzielung möglichst kleiner Wellenlängen und damit großer Eindringtiefen und hoher Auflösungen wird angestrebt, Röntgenröhren mit hohen Anodenspannungen von mehreren 100 kV zu betreiben. Eine der sich daraus ergebenden Herausforderungen stellt die Energieversorgung der Glühkathode sowie des Wehnelt-Zylinders dar. Die dazu notwendige elektronische Regeleinrichtung befindet sich auf dem hohen (negativen) Gleichspannungspotential der Kathode. In bisherigen Anlagen wird die Versorgung dieser Schaltung mit einem so genannten Filament-Transformator realisiert. Der Transformator, welcher lediglich über eine Leistung von einigen 10 W verfügt, übernimmt in dieser Anwendung zwei Funktionen: Die Übertragung von elektrischer Energie und die Isolierung der Hochspannung gegenüber der auf Erdpotential befindlichen Niederspannungswicklung und dem Gehäuse. Ab einer gewissen Spannungshöhe wird der Isolationsaufwand, der beim Bau eines solchen Transformators erforderlich ist, beträchtlich, was sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Baugröße negativ beeinflusst.

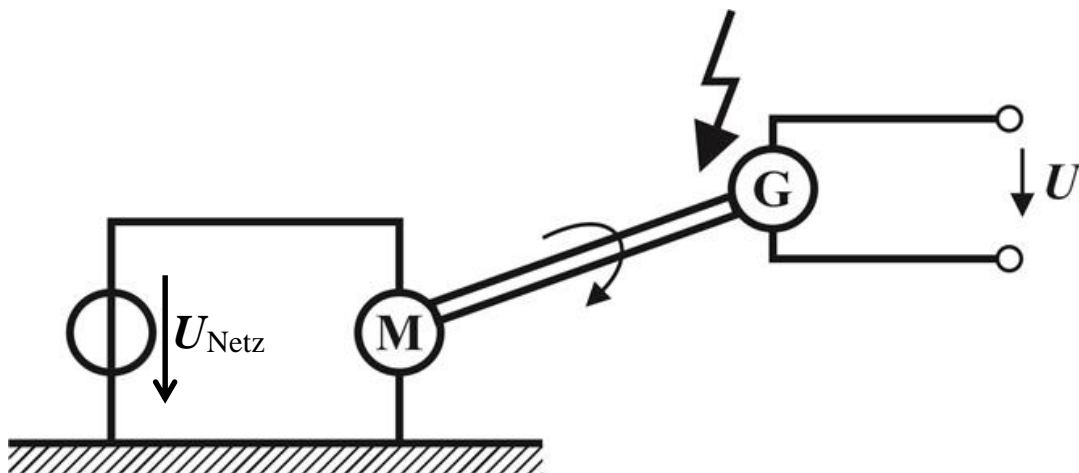


Bild 1: Prinzipskizze eines Umformers

Vor diesem Hintergrund wurden Möglichkeiten untersucht, um elektrische Energie auf ein hohes Gleichspannungspotential zu übertragen. Wichtigste Kriterien waren die kompakte Baugröße, möglichst geringe Kosten, eine hohe Betriebssicherheit und eine nur geringe Belastung der Hochspannungsquelle. So wurde z.B. die Idee der Kaskadierung mehrerer Transformatoren verworfen, da bei der Verwendung von am

Markt verfügbaren hochspannungsfesten Kleintransformatoren aufgrund des geringen Isolationsvermögens eine große Anzahl dieser Komponenten nötig gewesen wäre und damit kein kompakter Aufbau realisierbar ist. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Spannungsaufteilung wäre bei dieser Anordnung zudem eine resistive Potentialsteuerung der einzelnen Wicklungen notwendig, die der Kaskade Energie in Form von ohmschen Verlusten entzogen hätte. Vor diesem Hintergrund wurde schließlich eine mechanische Energieübertragung favorisiert. Elektromotoren und Generatoren sind in einer Vielzahl von Größen und Funktionsprinzipien verfügbar. Insbesondere im Vergleich mit thermoelektrischen oder photovoltaischen Erzeugern weisen sie einen hohen Wirkungsgrad und eine hohe Leistungsdichte auf. Die praktikabelste Lösung schien dabei die Konstruktion eines Umformers zu sein. Bei diesem treibt ein Elektromotor einen Generator über eine isolierende Welle an. Um die Länge der Welle möglichst kurz zu halten und damit einen kompakten Aufbau bei gleichzeitiger hoher Spannungsfestigkeit zu ermöglichen, soll der Umformer vollständig unter Isolieröl betrieben werden. Daraus ergeben sich eine Reihe von Anforderungen an die verwendeten Maschinen. Durch den Betrieb unter Öl kommen nur bürstenlose Motoren und Generatoren in Betracht, da es zu Kontaktproblemen kommen könnte oder der Abrieb das Öl mit leitfähigen Partikeln kontaminieren würde. Durch den Betrieb auf hohem Gleichspannungspotential, bei dem auch vereinzelt Überschläge nicht ausgeschlossen werden können, sollten die Motoren unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen sein. Daher schieden z.B. elektronisch gesteuerte Maschinen wie *Brushless-DC-Motoren* aus. Die endgültige Realisierung erfolgte mit einem Asynchronmotor mit Käfigläufer und einer permanent erregten Synchronmaschine als Generator. Ein provisorischer Aufbau der zur Überprüfung der prinzipiellen Einsatzfähigkeit sowie zur Bestimmung der übertragbaren Leistung verwendet wurde ist in **Bild 2** dargestellt.

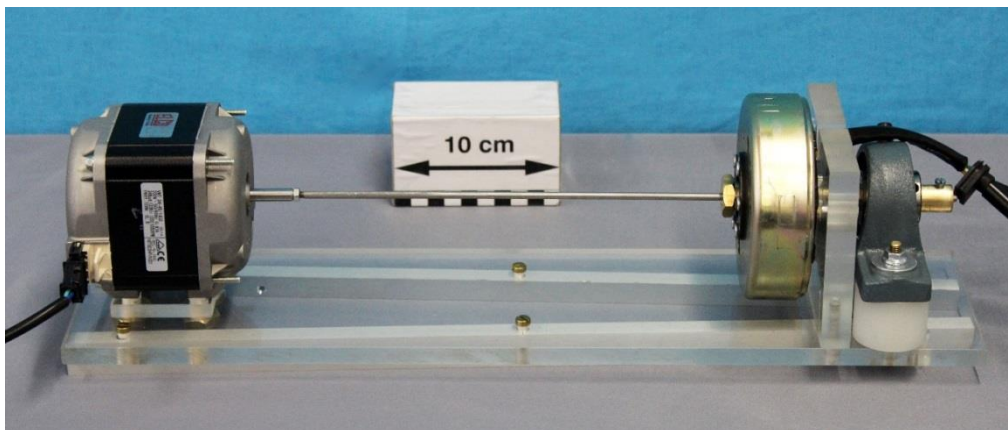


Bild 2: Prototyp eines Umformers zur Leistungsmessung

Parallel zur Auswahl und Erprobung der elektrischen Maschinen wurden Untersuchungen für eine hochspannungsfeste Befestigung und Verbindung der Maschinen durchgeführt. Die Welle ist als rotierende Öl-Feststoff-Grenzfläche einer besonderen Belastung ausgesetzt, da es aufgrund der nicht vermeidbaren Oberflächenrauigkeit

(siehe **Bild 3**) zu einer ständigen räumlichen Verlagerung von makroskopischen Öl-Feststoff-Grenzflächen infolge der Drehbewegung kommt. Der Verbindungsstab sollte daher eine möglichst glatte Oberfläche sowie eine Permittivitätszahl aufweisen, die möglichst nah an der der verwendeten Isolierflüssigkeit liegt. Auf diese Weise wird die Feldüberhöhung an kleinen Unebenheiten verringert.

Die Relativgeschwindigkeit zwischen der Wellenoberfläche und dem umgebenen Öl ist bei Vernachlässigung von Strömungseffekten abhängig von der Motordrehzahl und dem Wellendurchmesser. Dieser soll daher möglichst klein sein, weshalb die Welle eine hohe Torsionssteifigkeit aufweisen muss. Daher wurde als Material ein Polyetheretherketon (PEEK) ausgewählt. Dieses lässt sich gut spanend bearbeiten und besitzt eine hohe mechanische und elektrische Festigkeit.

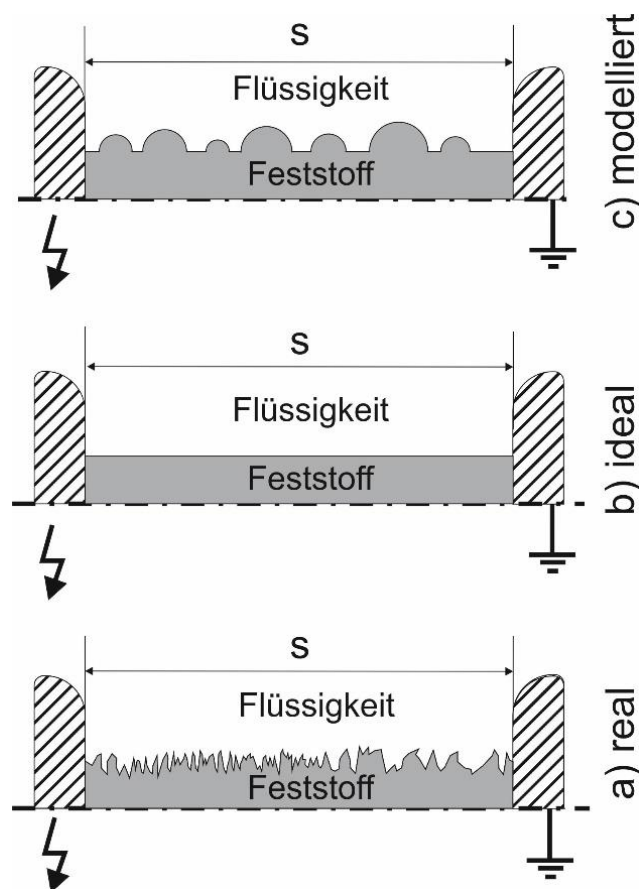


Bild 3: Flüssigkeits-Feststoff-Grenzflächen

Um die elektrische Feldstärke entlang der Welle zu homogenisieren wurden an den beiden Maschinenhaltern Toroide angebracht, die im Zwischenraum entlang der rotierenden Welle ein möglichst homogenes Feld erzeugen sollen. Damit wurden auch Feldüberhöhungen, wie diese z.B. an Kanten der Maschinen auftreten, deutlich verringert. Um die Dimensionierung der Toroide zu überprüfen und die Belastung entlang der Welle abzuschätzen, wurde eine Feldsimulation mit *Ansys-Maxwell* durchgeführt. Das Ergebnis ist in **Bild 4** dargestellt.

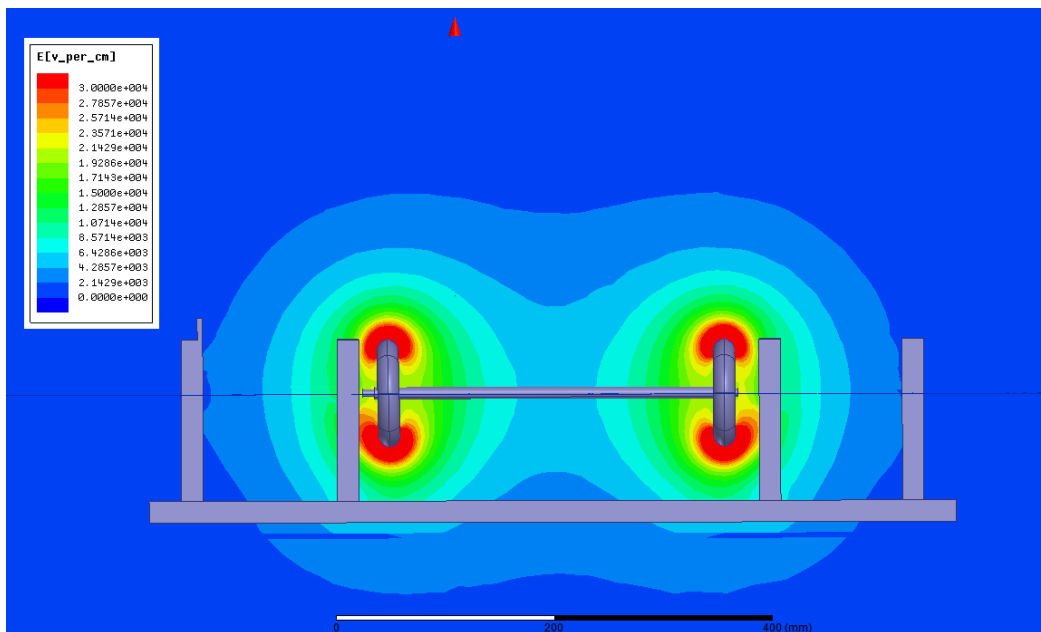


Bild 4: Feldsimulation der Toroide und Welle.

Es ist gut zu erkennen, dass die höchste elektrische Feldstärke mit etwa 9,1 kV/mm an den Toroiden auftritt, während der Bereich entlang der Welle deutlich entlastet wird. Die höchste elektrische Beanspruchung wird damit in das Isolieröl und in eine Region verlagert, in der keinerlei Strömung oder andere Festigkeitsmindernde Effekte während des Betriebs auftreten. Untersuchungen hinsichtlich der elektrischen Festigkeit von Isolieröl bei Beanspruchung mit Gleichspannung haben darüber hinaus gezeigt, dass eine derartige Feldstärke vom Öl gut beherrscht wird. In **Bild 5** ist der fertig aufgebaute Umformer dargestellt.

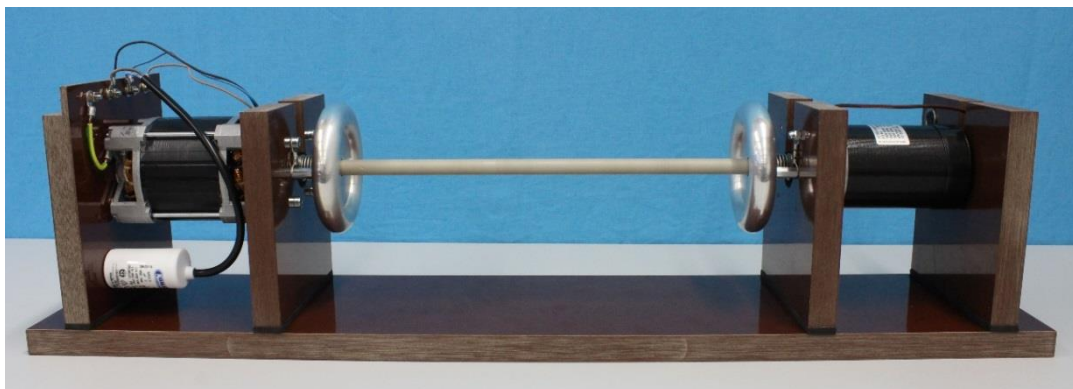


Bild 5: Aufgebauter Umformer mit einer Halterung aus Hartgewebeplatten

Es konnte durch praktische Messungen nachgewiesen werden, dass die rotierende Öl-Feststoff-Grenzfläche der elektrischen Beanspruchung standhält. Weiterhin wurde festgestellt, dass sich die Anordnung durch eine hohe Laufruhe auszeichnet und keine starke Ölströmung oder ein Aufschäumen zu erkennen ist. Auch die gewünschte elektrische Leistung von ca. 20 W wird von diesem Generator bereitgestellt, so dass eine adäquate Lösung für das vorliegende Problem gefunden wurde.

Finding Sectional Winding Transfer Functions of Transformer Windings based on Design Information

M.Sc. Mahdi Rahimbakhsh

Power transformers are the most expensive and strategically important devices in power systems. Power quality, economic cost and reliability are influenced by transformer health. During recent years different methods have been recognized in order to improve transformer monitoring and failure detection. There is a large number of researches devoted to power transformers. Especially Partial Discharges (PD) in Power Transformers could be critical depending on the amount of charge and the location of the PD source within power transformer. Research activities in this field were established long time ago, but the required uncertainty concerning the location of the PD source was not reached sufficiently.

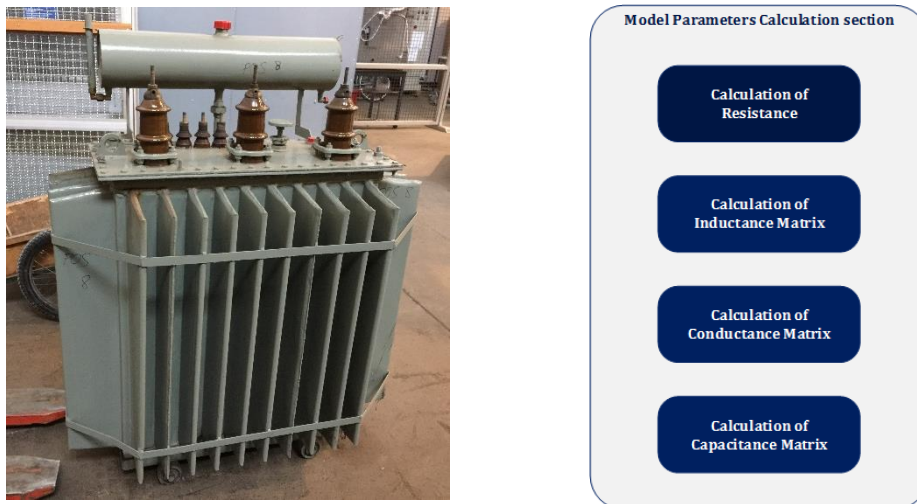


Figure 1: Sample transformer (left) and model parameters calculation plan (right)

In this project the sectional winding transfer functions, which can be used for a PD-localisation, should be calculated based on design information by using a multi-conductor transmission line model (**Figure 1**). In this model, each turn or several turns of winding are represented by a transmission line. All calculations have been done based on this model in each frequency for a defined frequency range. Some model parameter matrices should be calculated to obtain sectional transfer function such as resistance, inductance matrix, conductance matrix, capacitance matrix. Resistance matrix depends on cross-sectional dimensions of rectangular conductor and frequency and in high frequencies resistances are influenced by skin and proximity effects. In calculation of inductance matrix process, at high frequencies the magnetic flux penetration into the laminated iron core is assumed by zero. Conductance matrix depends upon the frequency, the capacitance and the dissipation factor that varies by insulation paper type and frequency. The Capacitance matrix is based on geometry of the winding and permittivity of the insulation. These are three components contains inter-turn, inter-section and

capacitance to low voltage winding that each one has different calculation method. All required matrices have been considered according to the model calculation rules and the sectional transfer function also been calculated by using the model parameters in each frequency.

Evaluation of using multi conductor transmission line model for calculating transfer function of power transformer has been prepared by make a comparison between result of simulation and result of measurement. Various traces of frequency response analysis measurement have been done on a sample transformer (**Figure 1**) by using *Omicron FRAnalyzer* device (**Figure 2**).

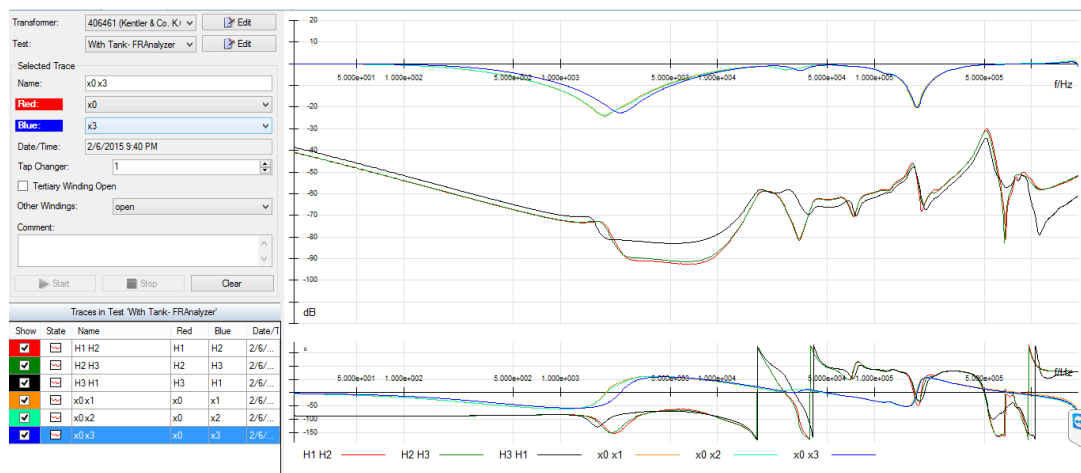


Figure 2: FRA measurements on sample transformer

The measurements have been done on transformer with and without tank and with different terminal conditions. Two results of different terminal conditions have been compared in **Figure 3**.

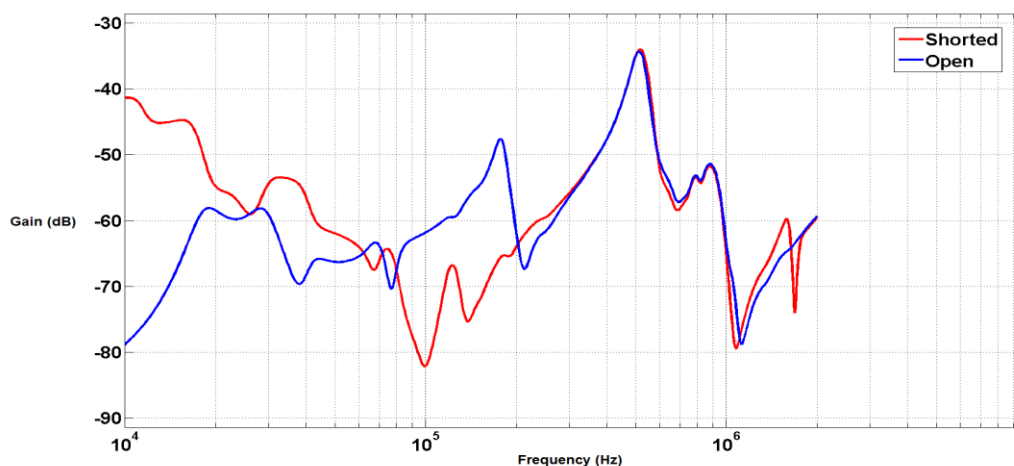


Figure 3: Comparison between two measurements on Transformer without Tank- H1H3

The reference transfer function has been achieved by one defined measurement considering a certain terminal condition. The results of optimized simulation and real measurement are presented in **Figure 4**.

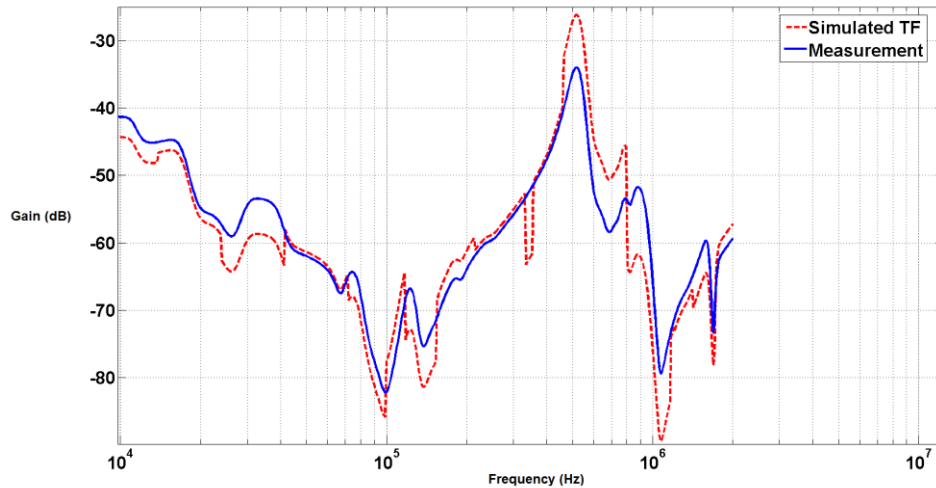


Figure 4: Transfer Function of sample transformer in study frequency range (10 kHz to 2 MHz)

It is necessary to define some comparison factors to avoid unclear visual comparison faults. The comparison factors such as deviation factor and processing time have been proposed. The Deviation Factor for comparison between two different techniques in transfer function simulation has been calculated (**Figure 5**). The results show that changing one turn to two turns, which represented by one transmission line (MTLM-1 to MTLM-2) don't have a dramatic effect on accuracy of results but it decreases the processing time to less than half time with the same processor. The other evaluation process will be done in future by adding some connection on transformer winding. The next section of this contribution will be partial discharge localization by using the simulated sectional transfer function and inject the partial discharge pulses to different points in sample transformer winding.

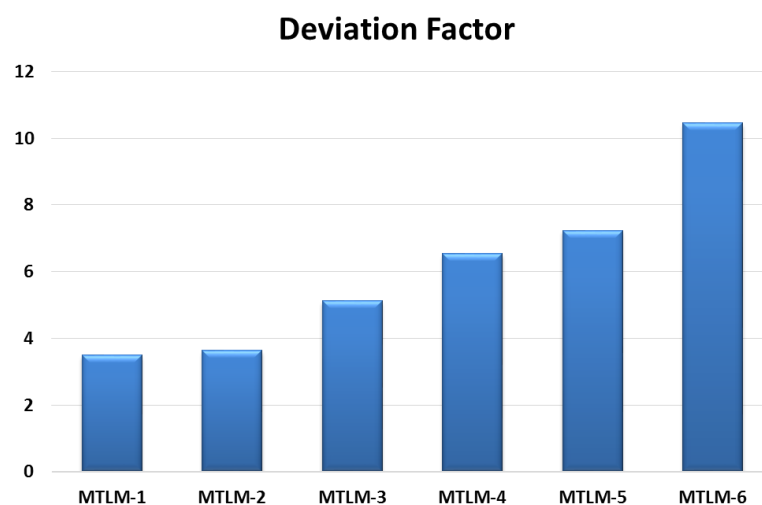


Figure 5: Simulation Result from Various Techniques

Utilization of Introduced Analysis Software Using a New Developed Algorithm for the Evaluation of AC and DC Signals from Measurement Instrument

M.Sc. Mahdi Rahimbakhsh

The high voltage industry has requested standardized tools to provide confidence in high voltage and high current testing results and to ensure comparability between tests performed in different laboratories. Today digital capture with recording instruments based on sampling technology are using largely instead of analogue capture. Nowadays, digital measurement is quite common in electric power laboratories, because the test results can be analyzed with software algorithms automatically. The IEC 61083-4 recommendation provides the procedures to validate the performance of software routines used for evaluation of waveforms captured by modern digitizers during the measurement. The Test Data Generator (TDG) with variable characteristics such as sampling frequency, resolution and noise level is released for digital recorders simulation.

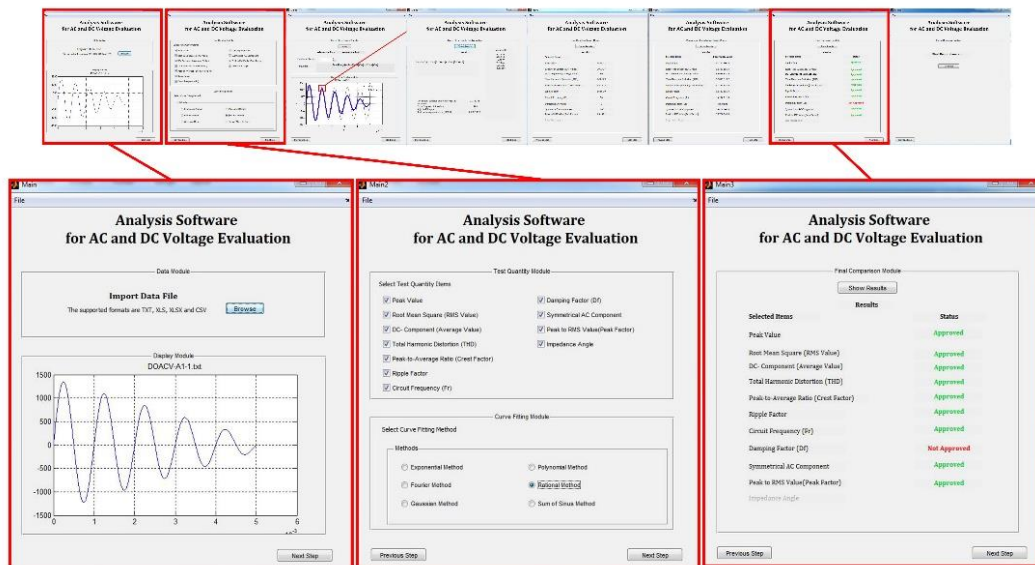


Figure 1: Interface of the used Analysis Software

Previously, a new analysis software was introduced and investigated in order to analyze AC and DC signals. The used algorithm is based on curve fitting methods in order to extract the main parameters of the input signal, such as peak value, RMS etc. The mentioned analysis software and developed algorithm have been evaluated and presented before. The presented analysis software has been utilized to evaluate and calculate the measurement uncertainty of the exported result of digital recorders and measurement instrument (**Figure 1**). The results of measurement uncertainty evaluations and finding the sensitive parameters and their influences are described and discussed in details in this project. Some comparative factors are introduced that can be used to ensure comparability between tests performed in different

laboratories with various digital recorders. The acceptance range of the measured parameter and calculated factors are discussed in details in this project. In this summary, only three results are presented such as effects of resolution on the uncertainty of peak value, effects of noise level on the uncertainty of the crest factor and effects of sampling frequency on measurement uncertainty of the peak value. The effect of increasing the resolution from 2 bits to 24 bits on many factors such as R-Square, measurement uncertainty of the peak value, measurement uncertainty of the RMS value, and measurement uncertainty of the crest factor are investigated.

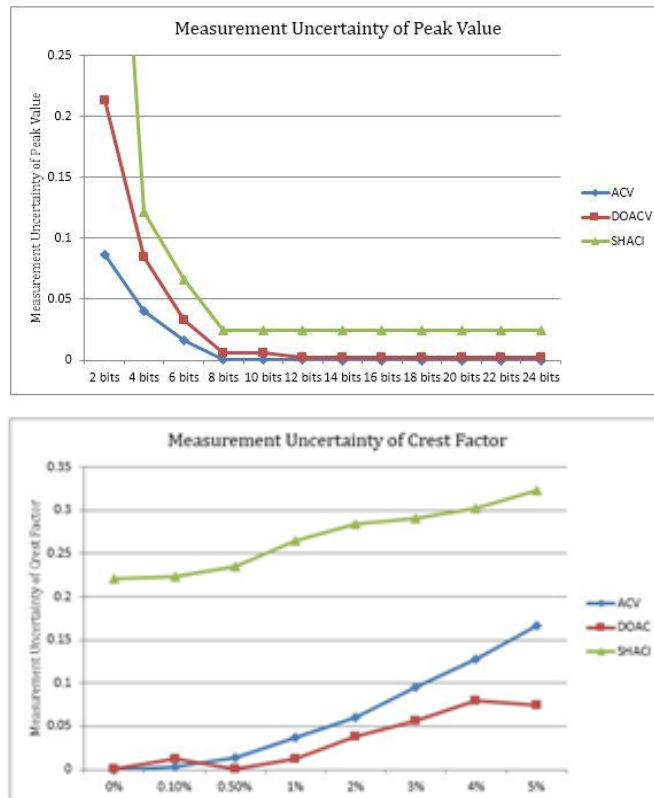


Figure 2: Effects of resolution on the uncertainty of peak value (top), effects of noise level on the uncertainty of the crest factor (bottom)

The results of the effect of resolution on measurement uncertainty of peak value are shown in **Figure 2** (left). ACV represented by waveforms, which are ideal sine waves with high sampling frequency and various resolutions, DOACV as damped alternating voltage with various resolutions and SHACI as DC-time constant with also various resolution. The next investigation is performed by increasing noise level from 0 to 5 percent, which influences each parameter such as R-Square, measurement uncertainty of the peak value, measurement uncertainty of the RMS value, and measurement uncertainty of the crest factor. The effects of noise level on measurement uncertainty of crest factor are shown in **Figure 2** (right). ACV represented by a waveforms, which is ideal sine wave with high sampling frequency and various noise level, DOACV as damped alternating voltage with various noise

level and SHACI represented by a DC-time constant with also changing noise. The other investigation process is performed by increasing sampling frequency from 1000Hz to 1 MHz. It influences each parameter such as R-Square, measurement uncertainty of the peak value, measurement uncertainty of the RMS value, and measurement uncertainty of the crest factor. Effects of sampling frequency on measurement uncertainty of peak value shows that changing the sampling frequency between 1 kHz to 3 kHz has a dramatic effect on measurement uncertainty of peak value but after 3 kHz to 1 MHz the this fluctuating has been damped.

Investigations Concerning the Behaviour of Partial Discharges in Silicone Rubber and GFRP under AC, DC and Hybrid AC/DC Field Stress

M. Sc. Hassan Saadati

The growing penetration of renewable energy systems, mostly from offshore wind turbines, which are located in the north of Germany far from the load centers, while shutdown of nuclear power plants partly in the south of Germany, as well as new consumer structures, such as electric vehicles makes technological alternatives for design of the power transmission line required.

As an option, integration of direct current (DC) transmission systems in the existing alternating current (AC) infrastructure is proposed; therefore particular attention is paid to the analysis of such hybrid structures.

Obtaining a better understanding on the dynamics of partial discharges (PD) in insulation systems under hybrid field stress is necessary. Partial discharges are well known in pure AC and partly known in pure DC systems, but almost no knowledge is available about the PD behavior under hybrid field stress. The emergence, dynamics and stability of the surface discharges for the long-term insulation performance and potential for associated damage processes and long-term aging processes, are needed research topics.

Due to the lack of experience as well as no available appropriate models, the development of suitable models for the prediction of the PD-behavior under hybrid field stress including the derivation of reliability statements is required.

Therefore, in this project partial discharge activities in solid dielectric materials under AC, DC and hybrid voltages have been investigated in order to understand better the PD mechanisms under hybrid field stress. Achieving a model with an equivalent circuit and mathematic formula, which can explain internal partial discharge in hybrid systems is one of the goals in this project. The model should be validated by several experimental tests. In this contribution a preliminary model is presented, which explains the partial discharge activity in hybrid systems. This model consists of an equivalent circuit as well as a mathematic equation.

Experimental evaluation of PD in the hybrid AC/DC system

Construction of AC, DC and hybrid circuit

Different test circuits have been investigated and developed, resulting in the final version of hybrid voltage generator circuit, which is illustrated in **Figure 1** and **Figure 2**. The main advantages of this circuit are:

- Only one power supply is required.
- Constant hybrid ratio at different voltage levels can be easily achieved.
- Pure AC superimposed to DC.

- Adjustable hybrid ratio between -100% to +100% by changing the value of the circuit elements.

Figure 1 shows different sections of the circuit. By changing the diode polarity and also changing R_1 , R_2 , C_1 and C_s different hybrid voltages are achievable.

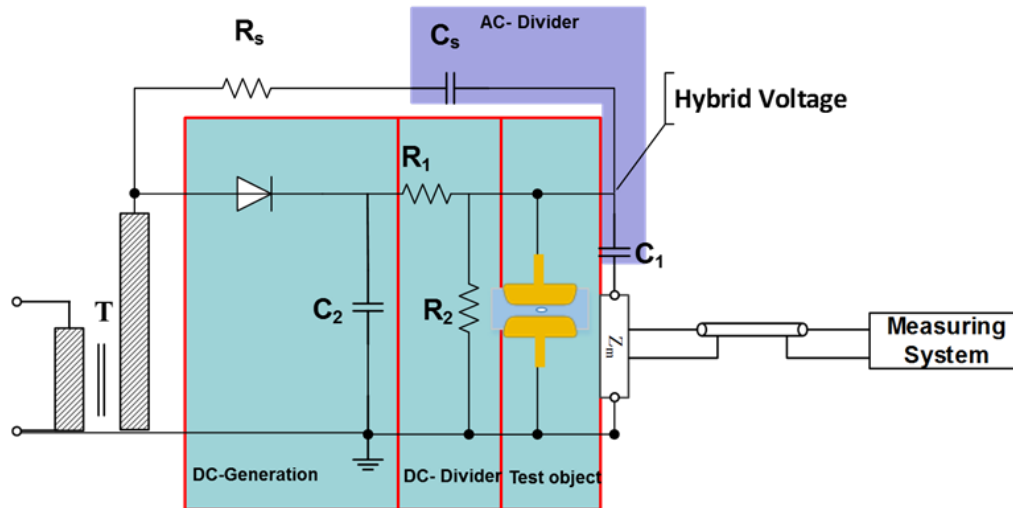


Figure 1: Final version of hybrid AC/DC voltage generator circuit

To classify different hybrid voltages, “hybrid ratio” has been defined by the ratio of the DC amplitude to the waveform peak value in percent with following formula:

$$\%V_{DC} = \frac{V_{DC}}{(V_p)} \times 100$$

Some of the voltages with different hybrid ratio which has been built with this circuit are illustrated in **Figure 2**.

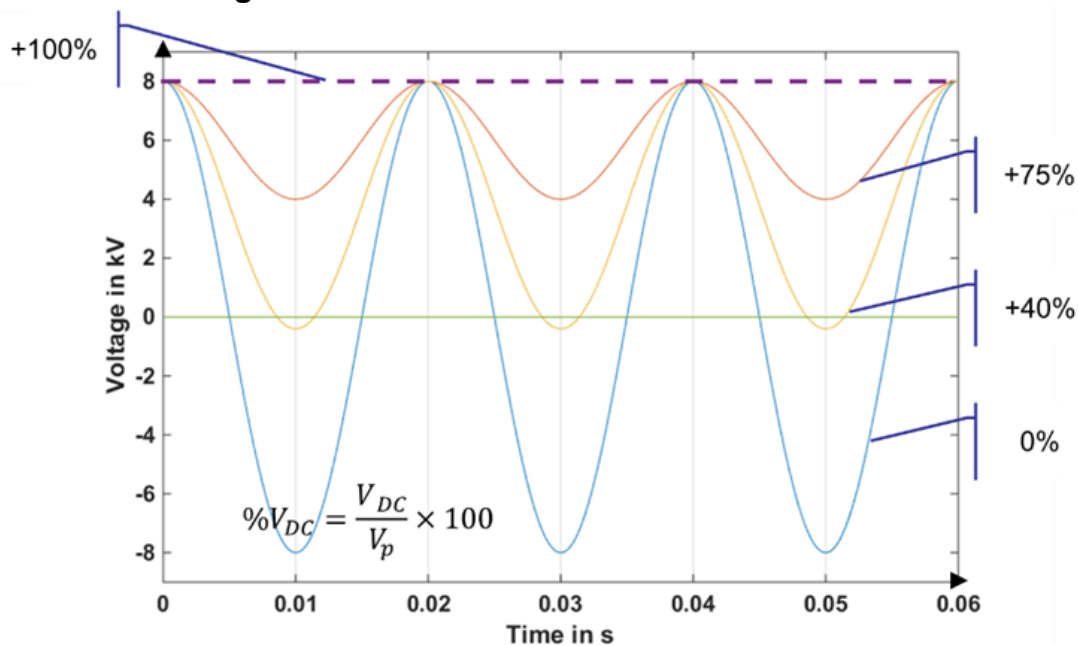


Figure 2: Examples of generated voltages

Test set-up

Figure 3 shows the first and second generation of the electrodes after insulating.

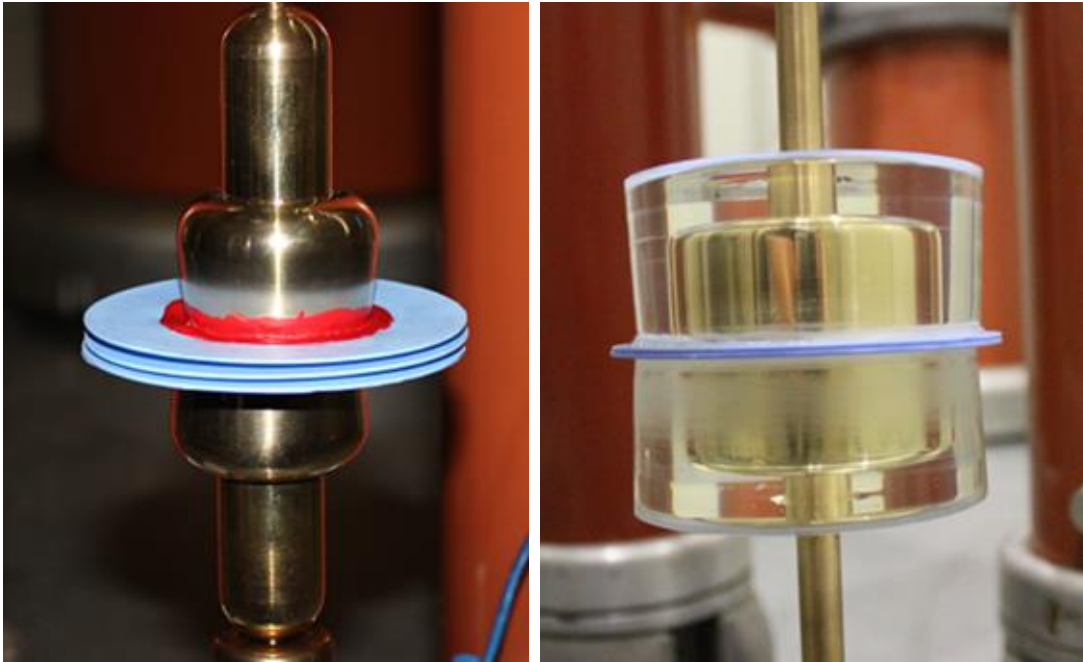


Figure 3: First and second generation of the electrode configuration

Figure 4 shows the electric field distribution inside the test object which is calculated by Finite Element Method using “FEMM” software.

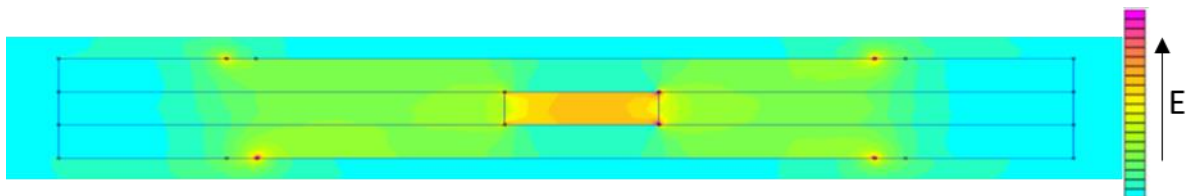


Figure 4: Electric field distribution inside the test object

Figure 5 shows the test set-up which has been used in the laboratory with:

1. PD measuring system.
2. Test object.
3. Hybrid voltage wave form applied to the test object.
4. High voltage probe.

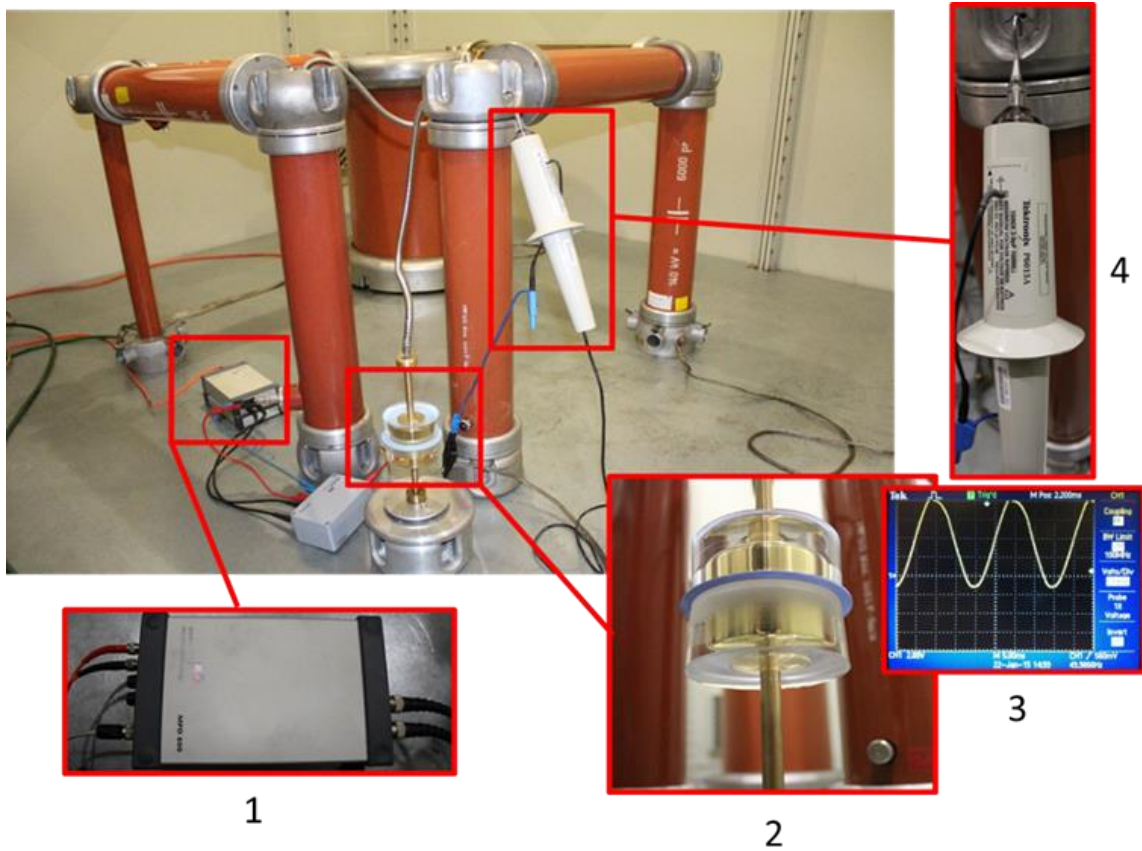


Figure 5: Test set-up

Experimental results

The partial discharge activities are shown in **Figure 6** for a silicone sample with 5 mm cavity under AC stress.

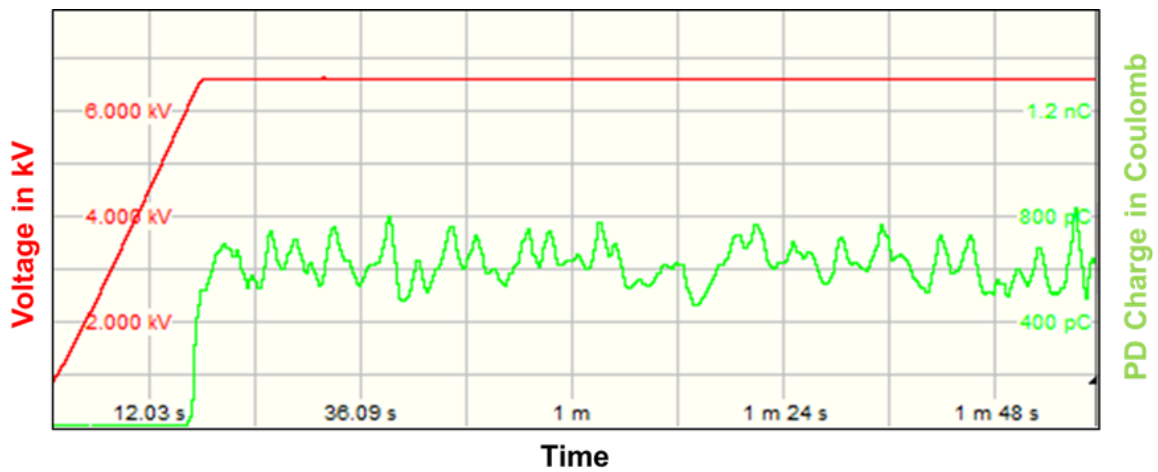


Figure 6: Partial Discharge activities inside a 5 mm cavity in silicone under AC field stress

As **Figure 6** shows, some partial discharge activities have been recorded at AC voltage.

Such experiments have been carried out for each test object at AC, DC and hybrid (with different hybrid ratio) voltages and the results have been evaluated.

Partial Discharge activity on the surface of silicone

In this section investigations on PD activity on the surface of silicone material under different electric field stresses are reported.

In order to investigate PD on the silicone surface, a test object according to **Figure 7** has been prepared.

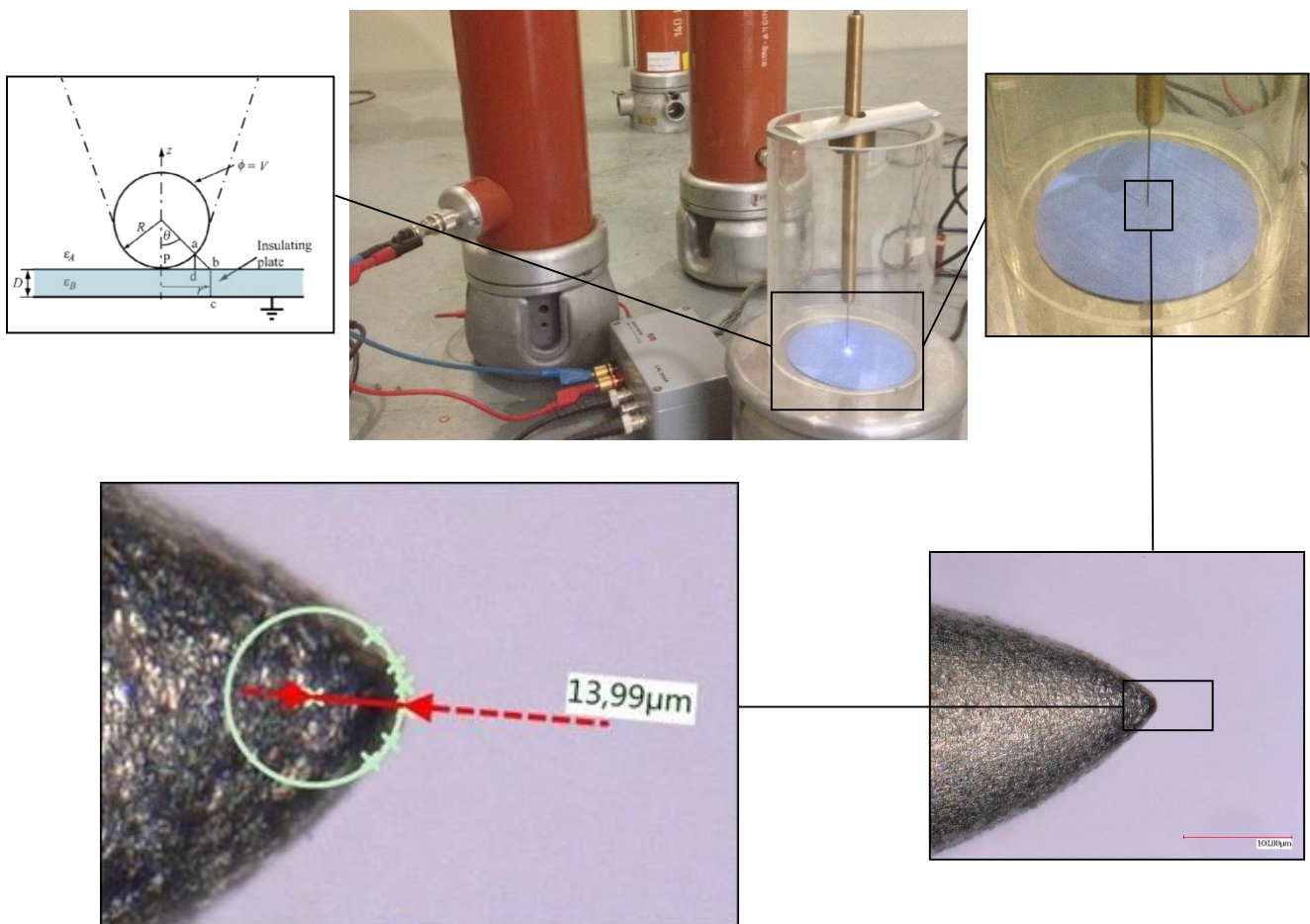


Figure 7: Test object for investigation of PD on the surface of silicone rubber

AC voltage, hybrid 40% and hybrid 75% have been applied to the test object and partial discharge activities on the surface of silicone rubber have been recorded and evaluated.

Figure 8 shows the PD pattern on surface of silicon rubber under the positive hybrid AC/DC 40%.

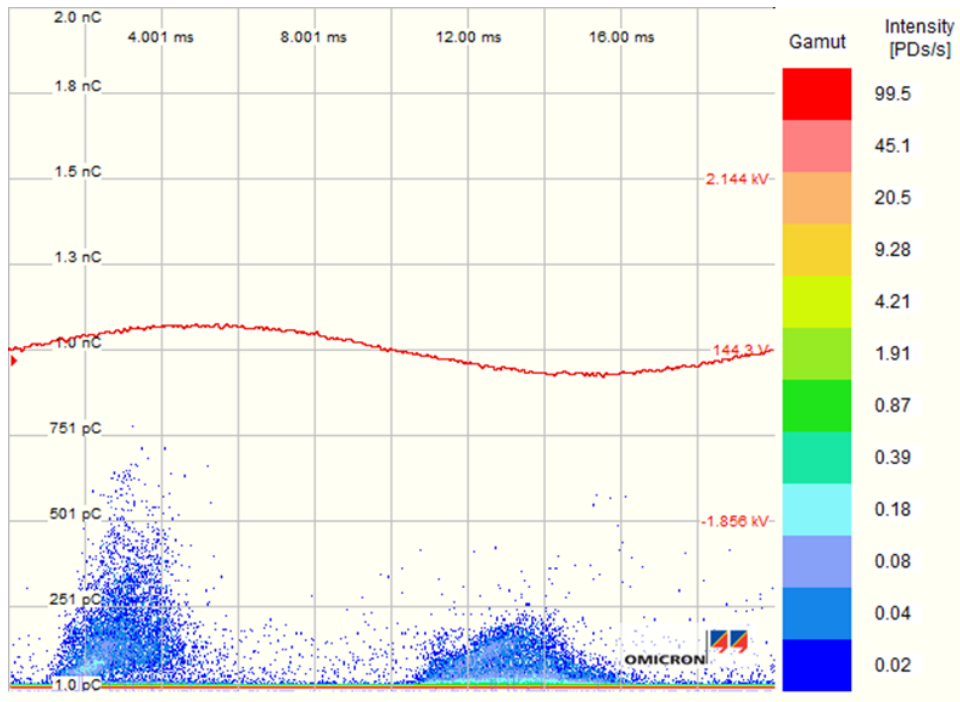


Figure 8: PD Pattern on the Surface of Silicon Rubber under Positive Hybrid AC/DC 40%

Figure 9 shows the PD pattern on the surface of silicon rubber under negative hybrid AC/DC 40%.

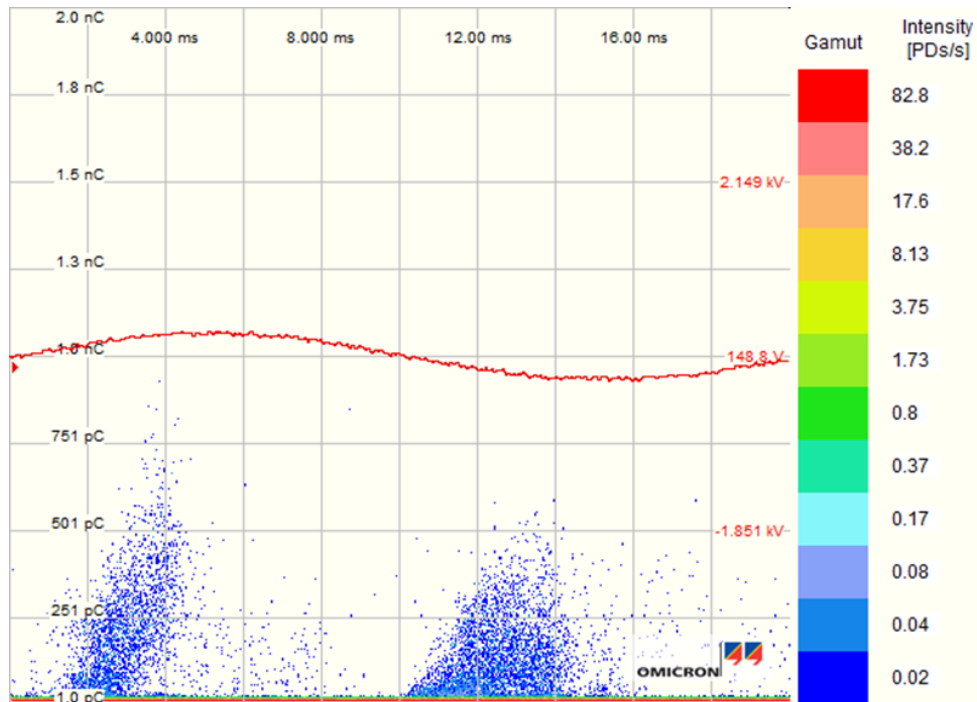


Figure 9: PD Pattern on the Surface of Silicon Rubber under negative Hybrid AC/DC 40%

Investigation of Moisture Effect on Dissipation Factor and PD Activities in GFRP Dielectrics under Hybrid AC/DC Field Stress

M.Sc. Hassan Saadati

Recently Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) dielectrics are commonly used in high voltage insulation systems due to their promising mechanical and electrical characteristics as well as their robustness against chemical and thermal stresses.

Investigation of partial discharge and dissipation factor may provide some interesting information about dielectrics performance in high voltage insulation systems.

The effect of moisture in GFRP dielectric on dissipation factor as a function of frequency and partial discharge under hybrid AC/DC field stress was investigated. The results could provide information about the moisture inside the GFRP dielectrics which may cause failure in the insulation system.

Experimental set up

Figure 1 shows the electrodes, insulation oil and the test samples, which have been used for the first PD measurements. This configuration is a PD measuring setup in oil.

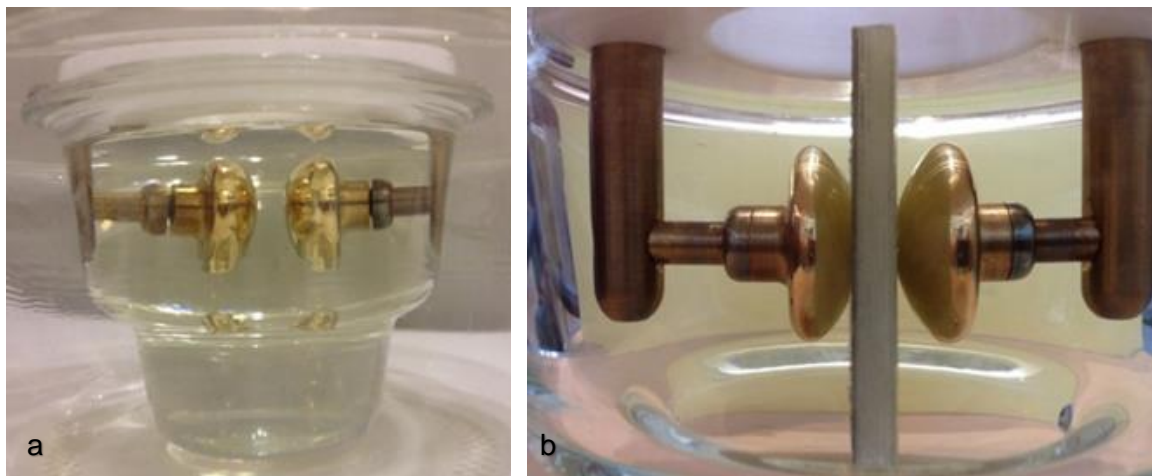


Figure 1: a) Electrode configuration, b) Test sample under oil

The electrodes are usually used for breakdown voltage measurement of fluids (according to DIN EN 60156 VDE 0370-5) and will provide high enough electric field stress inside the sample and prevent discharges on the surface of the test sample.

Effect of Partial Discharge in GFRP on the temperature contribution of the material

Internal partial discharge changes the temperature of the GFRP material and changes the dielectric characteristic of the insulation material. Investigations of partial

discharge effect on the temperature distribution within the samples are therefore necessary.

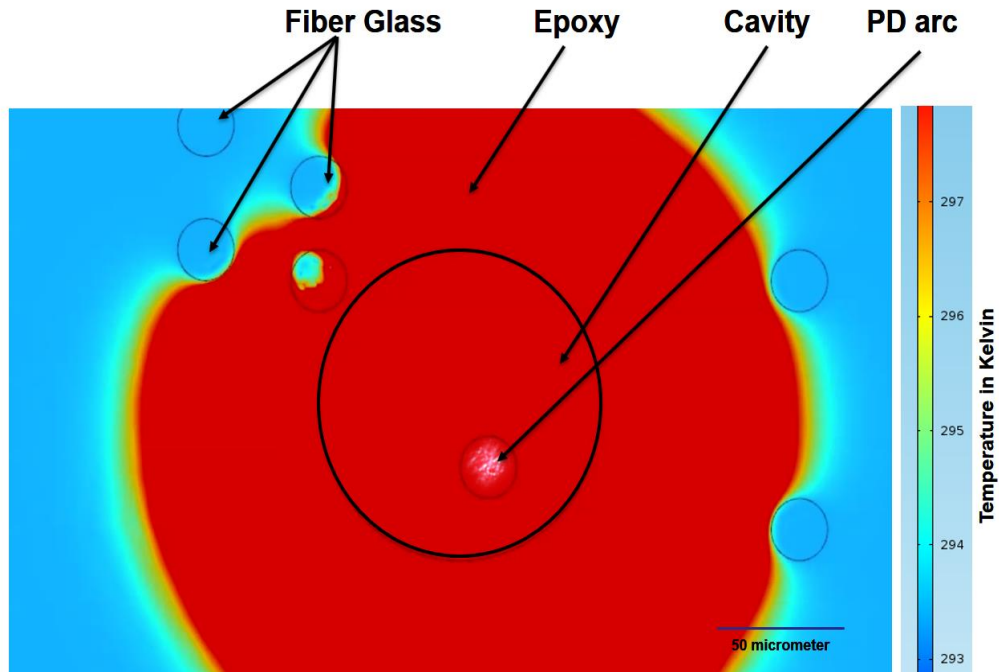


Figure 2: Temperature distribution inside a GFRP sample at partial discharges

Figure 2 shows the simulation result of the temperature distribution inside a GFRP sample at partial discharges.

Dissipation factor

Dissipation factor analysis could be a useful tool for insulation system diagnosis. Investigation of dissipation factor for different dielectric materials is a section in this project.

Figure 3 shows the test object which was used to investigate the dissipation factor of the GFRP material.

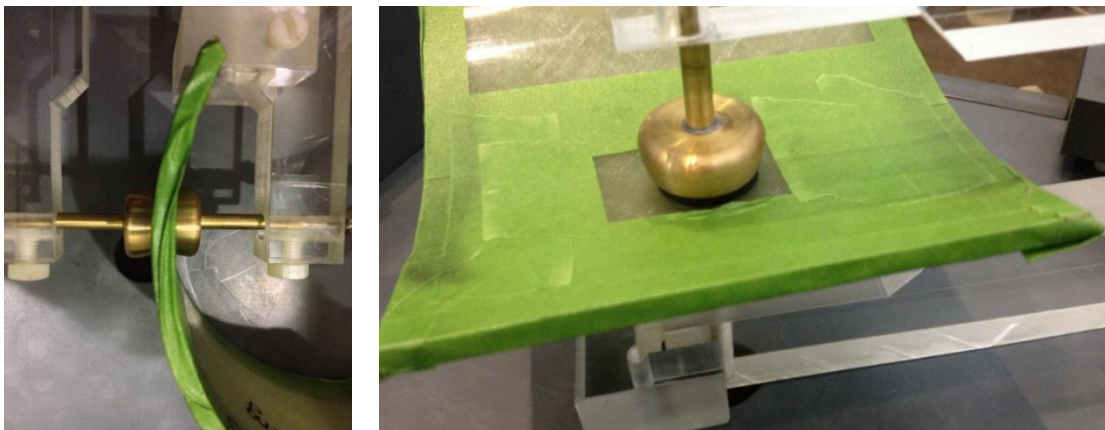


Figure 3: GFRP test object for the dissipation factor.

Figure 4 shows a result of dissipation factor measurement for a sample over a range of frequency.

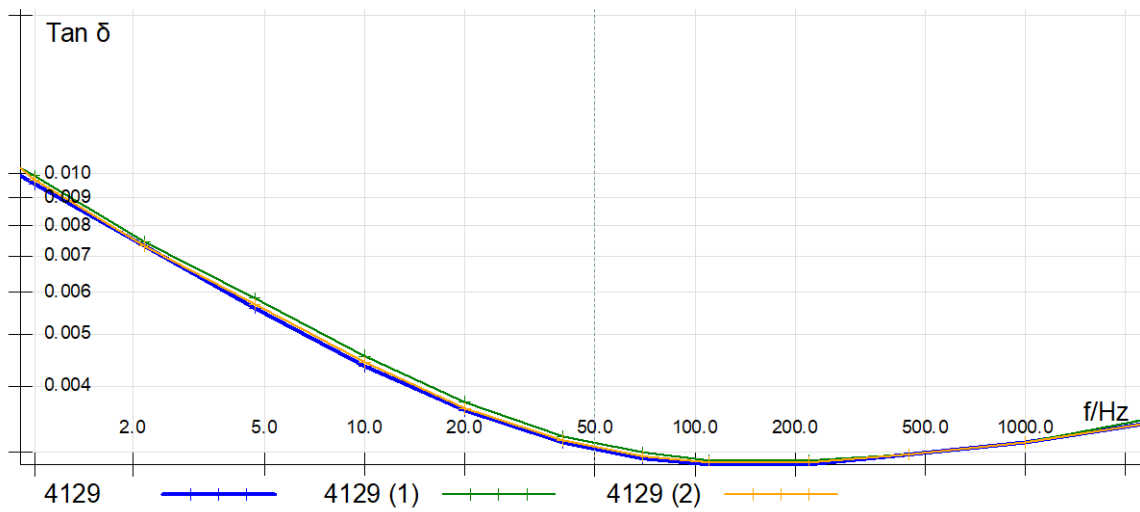


Figure 4: Dissipation factor for a GFRP sample from 1 Hz to 2 kHz

The PD Patterns Related to AC Creeping Discharge of Thermally Aged Pressboard

M.Sc. Xin Zhou

It is found that AC creeping discharge at oil/pressboard interface may generate two different physicochemical phenomena on pressboard surface, i.e., carbonization and white mark, as illustrated in **Figure 1** and **Figure 2**. Our previous researches show that the carbonized pressboard can still withstand high voltage for a comparatively long time. By contrast, those pressboards having white mark would experience flashover within 1 hour and the expansion process of white mark on pressboard surface is always accompanied by dangerous bubbling effect.

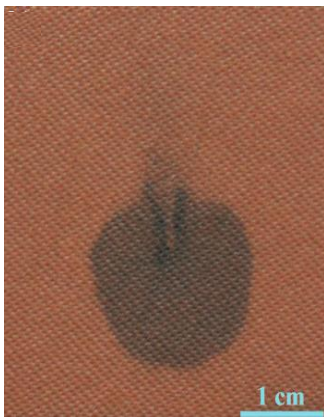


Figure 1: Carbonization of Pressboard



Figure 2: White Mark on Pressboard Surface



Figure 3: Electrode Geometry

Partial discharge (PD) detection is a potent tool for condition monitoring of power transformer. It can provide critical information to the evaluation of insulation condition. Moreover, the study on partial discharge can also contribute to a better understanding of the discharge process, since abundant knowledge has been gained with regard to different PD sources in the past decades. Therefore, investigations have been carried out in this work to study the PD patterns of AC creeping discharge at oil/pressboard interface. The first section of this report focuses on the PD pattern of carbonized pressboard and the second section deals with the PD pattern of pressboard having white mark.

A needle-to-plate electrode is adopted to apply high voltage AC field on pressboard surfaces, as shown in **Figure 3**. Long-term constant voltage tests were carried out with aged pressboard samples. The applied voltage amplitude was 36 kV. For carbonized pressboard, the tests lasted for 5 hours and the PD data were recorded every one hour.

Figure 4 gives the PRPD pattern of carbonized pressboard with discharge time. It can be seen that the PRPD pattern stays almost unchanged with discharge time. Moreover, the IEC PD quantities are analyzed as well. More specifically, the PD

numbers, PD discharge power as well as the PD pulse magnitude of carbonized pressboard are shown in **Figure 5**, **Figure 6** and **Figure 7**, respectively.

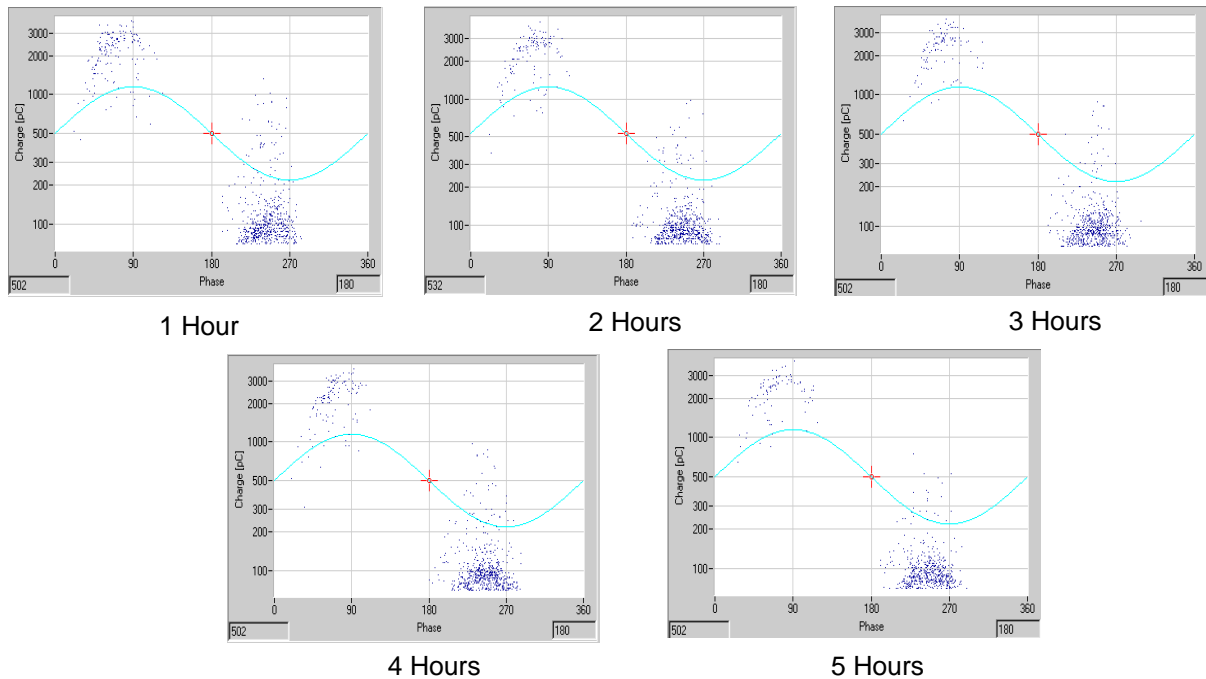


Figure 4: The PRPD of carbonized pressboard with discharge time

As displayed in **Figure 5**, the total PD number of carbonized pressboard decline gradually with discharge time. The numbers of positive PD pulses are much larger than those of negative pulses. With respect to the PD discharge power, the descending trend with time is even more pronounced. Therefore, it can be concluded from the results that the PD activity of carbonized tends to diminish as discharge time increases.

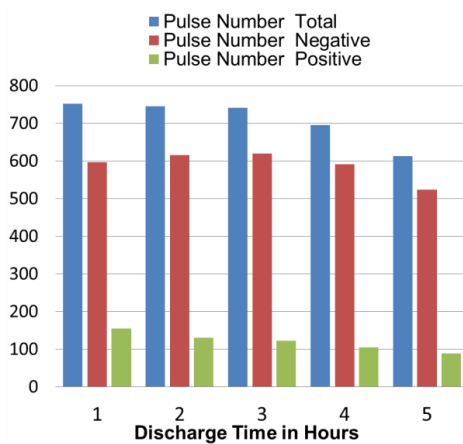


Figure 5: PD number of carbonized pressboard versus discharge time

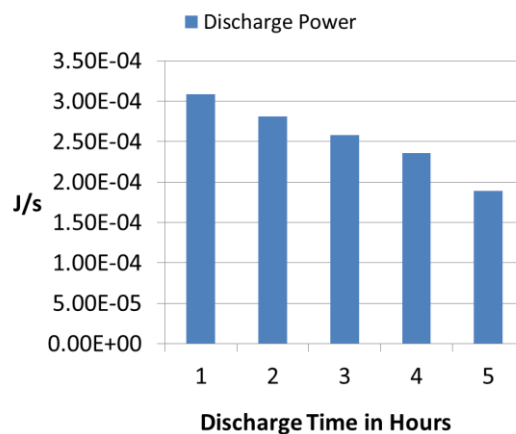


Figure 6: PD Discharge Power of carbonized pressboard versus discharge time

Figure 7 gives the statistics of PD pulse magnitudes of carbonized pressboard with time. The average magnitude of positive PD pulse is more than 20 times larger than

that of negative pulse. Besides, the average magnitudes of PD pulses of both polarities are almost unvaried with discharge time. It indicates the diminishing of PD activity of carbonized pressboard is mainly attributed to the decline of PD number.

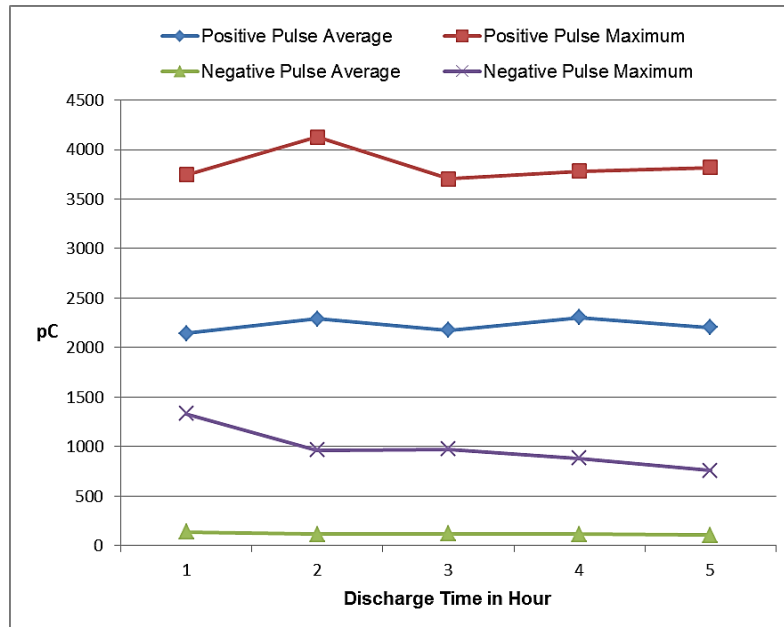


Figure 7: PD pulse magnitude of carbonized pressboard versus discharge time

For the pressboards having white mark, the tests are also carried out at 36 kV. However, the tests last for only around 50 minutes, because the bubbling effect accompanying the expansion process of white mark can lead to flashover. **Figure 8**

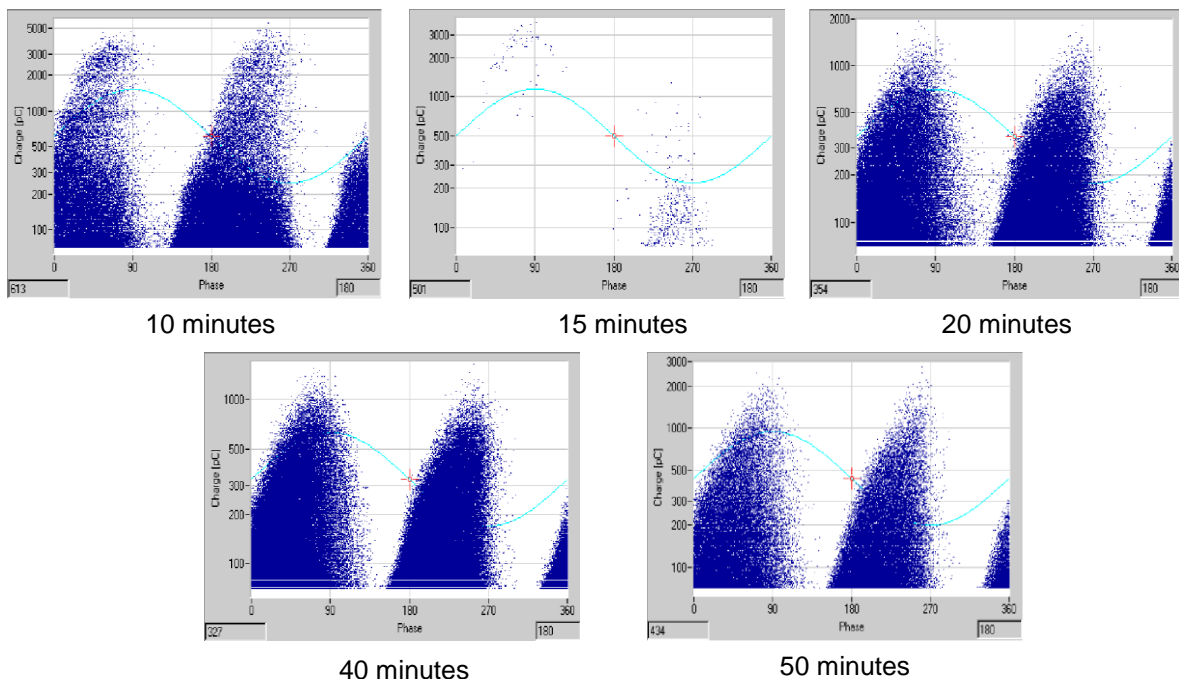


Figure 8: The PRPD of pressboard having White Mark with discharge time

shows the PRPD pattern of pressboards having white mark with discharge time.

It can be seen from **Figure 8** that the PRPD pattern of pressboard having white mark during creeping discharge is quite similar to that of surface discharge. However, a great exception is encountered 15 minutes after the discharge inception, of which the PRPD pattern at 15 minutes is quite different from that at any other sampling points. Actually, it is more like the PRPD pattern of carbonized pressboard.

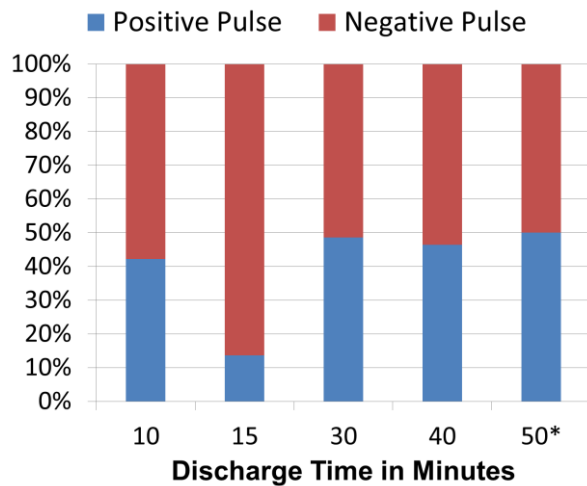


Figure 9: Percentages of positive and negative pulses of pressboard having White Mark with discharge

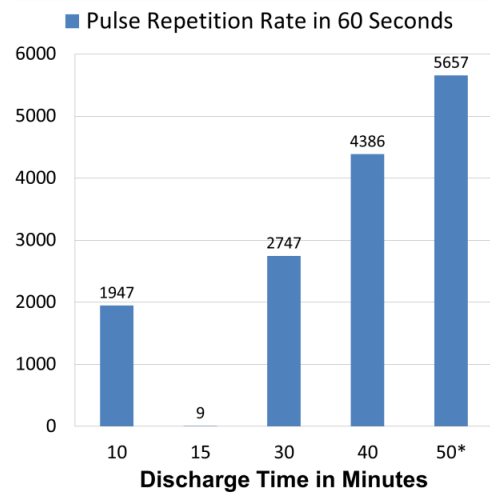


Figure 10: PD pulse repetition rate of pressboard having White Mark with discharge time

Compared to that of carbonized pressboard, the number gap between negative pulse and positive pulse is greatly narrowed, as shown in **Figure 9**. However, the PD signals recorded at 15 minutes don't follow this trend. This uniqueness is also observed with regard to the PD pulse repetition rate. As shown in **Figure 10**, the PD pulse repetition amounts to 2000 after 10 minutes of discharging but drops sharply to 9 at 15 minutes. Nevertheless, it increases thereafter steadily with discharge time.

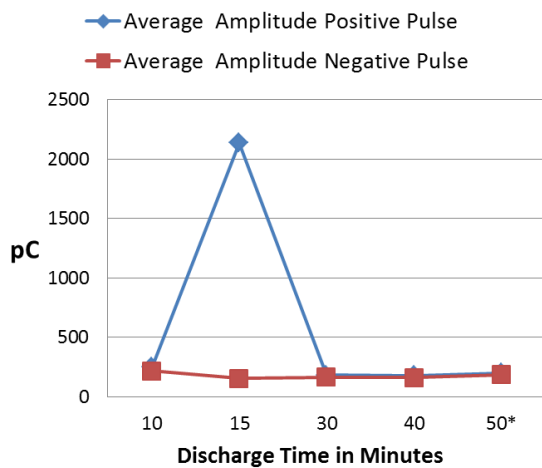


Figure 11: Average magnitudes of positive and negative PD pulse of pressboard having White Mark with discharge

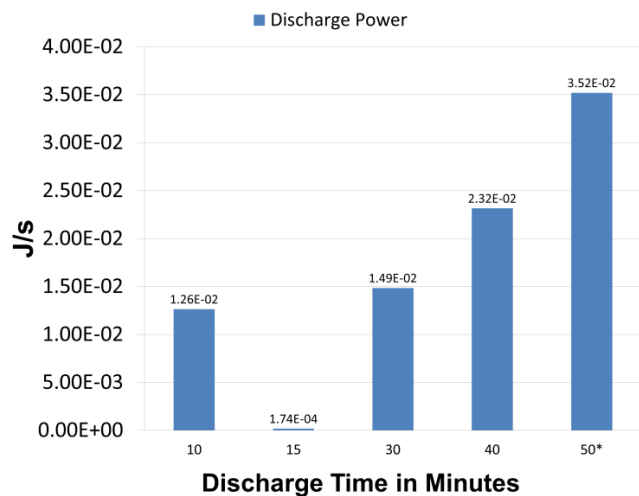


Figure 12: PD discharge power of pressboard having White Mark with discharge time

Figure 11 gives the average magnitudes of PD pulses of both polarities with discharge time. Except the PD signals recorded at 15 minutes, the average magnitudes of positive and negative PD pulses are almost identical to each other and experience very limited variations with discharge time. With regard to the discharge power, as shown in **Figure 12**, the trend is quite similar to that of PD repetition rate. It infers that the intensification of PD activity of pressboards having white mark is mainly due to the increment of PD numbers.

The PD signals recorded at 15 minutes are distinct from any other ones. The alteration of PD pattern at 15 minutes implies that the creeping discharge generating white mark is a complicated process and probably involves multiple discharge sources. More attention will be paid to this phenomenon in future.

The Influence of Thermal Ageing on the Water Absorption and Fiber Structure of Transformer Pressboard

M.Sc. Xin Zhou

It is found that AC creeping discharge at oil/pressboard interface may result in severe bubbling effect and thus lead to catastrophic flashover within a short period of time. This phenomenon is much more manifest with the aged pressboards than with the new ones. Previous researches report that bubbling effect in oil/solid insulation system is subject to various factors, e.g., moisture content of solid material, hydrostatic pressure of surrounding liquid and temperature. In general, the bubbling effect caused by creeping discharge is influenced by the moisture content as well as the water absorption of pressboard, since those factors determine the diffusion form of water from pressboard to oil under strong electric field. Therefore, investigations have been carried out in this work to study the water absorption, moisture content and fiber structure of variously aged pressboards.



Figure 1: Capillary Water Rise Test of pressboard

Water in pressboard, a porous material comprised of cellulose fibers, can be divided into two categories according to its state of existence: chemically-bonded water and physically-bonded water. Chemically-bonded water refers to water molecules that form hydrogen bonding with cellulose or hemicellulose molecules, while physically-bonded water refers to those absorbed by pressboard through capillary effect. Hence, capillary water rise test is often used to determine the water absorption of porous materials. The tests were carried out according to ASTM standard D202-08 at room temperature for 8 hours and the test setup is shown in **Figure 1**.

At first, pressboard samples are cut into strips with a dimension of 2x25x150 mm. The pressboard strips are then dried in a thermal vacuum oven at 110 °C for 96 hours. At last, the dried strips are artificially aged in a thermal oven at 130 °C for 20, 40 and 60 days, respectively. The dried unaged pressboard strips are used as benchmark. **Figure 2** displays the results of capillary water rise of different pressboard samples.

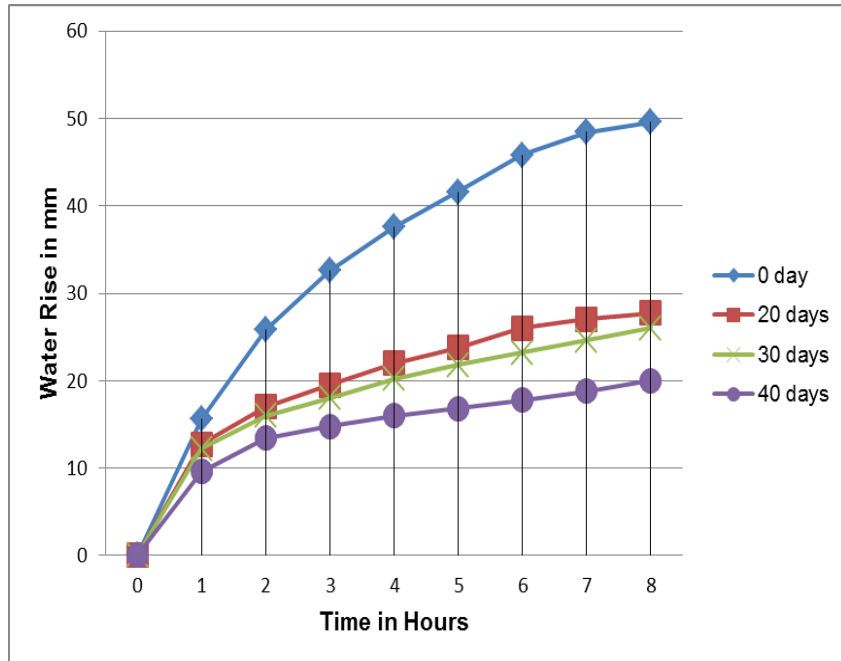


Figure 2: Capillary water rise of pressboard versus time

As shown in **Figure 2**, the pressboard samples exhibit no significant differences in absorbing water within the first hour. As the test proceeds, however, it gets apparent that the capillary water rise of pressboard is inversely proportional to the ageing degree. At the end of test, the capillary water rise of new pressboard is more than 2 times bigger than that of 60-days aged pressboard.

Water molecules in transformer always diffuse between oil and solid insulation materials and reach eventually a certain dynamic equilibrium. Therefore, the decline in water absorption ability implies the moisture in aged pressboard would emigrate more easily to liquid phase than that in virgin pressboard. As a consequence, the long-term moisture distribution equilibrium would shift towards liquid phase.

Moreover, there is a much worse scenario when considering the sudden overheating of solid materials in transformer. An instantaneous increment in temperature can enhance the diffusibility of water molecules that reside in the pores and capillaries of pressboard. As a result, some water molecules would leave pressboard surface and emigrate to surrounding liquid in a quick pace. However, the solubility of insulating oil to water will not increase proportionally. Consequentially, the excess water molecules

may exist in the form of free water in oil bulk or at oil/pressboard interface. This phenomenon must be more severe for the heavily aged pressboards taking into account the results shown in **Figure 2**.



Figure 3: The oil/pressboard samples of different ageing degrees (from left to right: new, 20 days, 40 days, and 60 days)

The moisture content of aged pressboard is determined by conventional Karl Fischer Titration method. The pressboard samples are cut into small pieces and then impregnated with dry mineral oil in a thermal vacuum oven. Afterwards, those pieces are contained in glass flasks and immersed by mineral oil. The mass ratio of oil to pressboard is maintained at 10 to 1. Finally, the sealed glass flasks are put into a thermal oven for accelerated ageing. The ageing temperature is maintained at 130 °C and the ageing periods are 20, 40 and 60 days, respectively. The unaged impregnated pressboard pieces are used as benchmark. **Figure 3** shows the oil/pressboard samples of different ageing degrees used for water content determination.

The measurements of water content in pressboard samples were carried out according to IEC standard 60814:1997 and the results are displayed in **Figure 4**.

As can be seen from **Figure 4**, the moisture contents in both oil and pressboard samples increase with ageing time. Regarding to the new oil/pressboard sample, moisture in oil is 7 ppm and moisture in pressboard is less than 0.2 % by weight, therefore either the oil or the pressboard samples can be considered completely dry. After 60 days of thermal ageing, by contrast, the moisture contents in oil and pressboard increase to 15 ppm and 0.55 %_{by weight}, respectively. According to IEC standard 60641-2: 2004, only the pressboard samples aged for 60 days in this test can be taken as “wet pressboard”.

The results prove that moisture content in pressboard is positively correlated to the ageing degree. As pressboards are gradually degraded by heat in transformer, it is logical to expect that ever more water accumulates inside of pressboards. However, this expectation is justified only when the surrounding oil is aged in the meantime,

because the moisture content in oil also increases with ageing time, which retards the emigration of water from pressboard to oil.

Cellulosic pressboard is a porous fibrous sheet comprised of cellulose, hemicellulose and lignin. The fiber structure of pressboard is of vital importance to maintain its mechanical integrity and electrical property. Moreover, as mentioned above, physically-bonded water in pressboard resides in inter-fiber space and is absorbed by pressboard through capillary effect. Therefore, it is of significance to study the influence of thermal ageing on the fiber structure of pressboard.

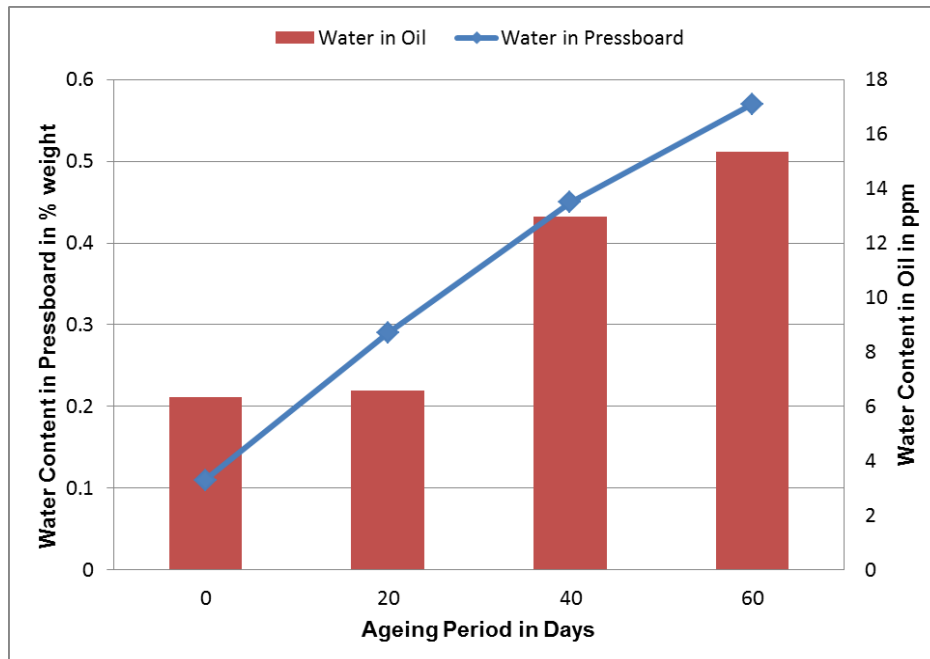


Figure 4: Moisture in oil and pressboard samples versus ageing time

Figure 5 displays the images of fiber structures of aged pressboards obtained by scanning electron microscope (SEM).

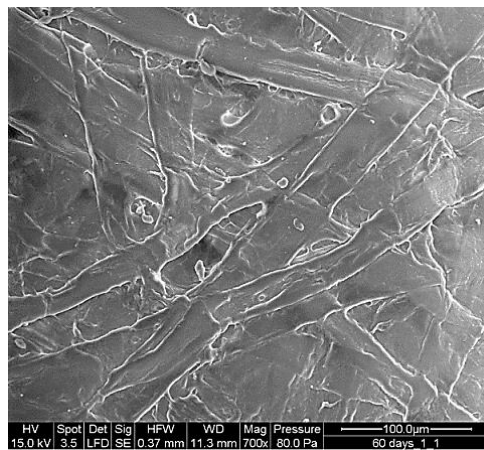
It can be seen that the new pressboard has a sound fiber structure and no observable rupture or crack on fibers. More important, there are also no holes between fibers. It implies that hemicellulose and lignin, which bond cellulose fibers together, are in healthy state. Although the pressboard sample aged for 20 days exhibits no obvious degradation of cellulose fiber itself, some holes between fibers exist, which indicates that hemicellulose and lignin have been degraded to some extent. Regarding to the pressboard sample aged for 40 days, more and larger inter-fiber holes appear and several cracks are also detected on fiber bundles. It indicates the cellulose fibers themselves have been deteriorated by thermal ageing. Even more and bigger inter-fiber holes are generated with the pressboard sample aged for 60 days; furthermore, larger cracks and even ruptures are also observed on the cellulose fiber, which manifests the disintegration process of fiber bundles into several smaller ones.



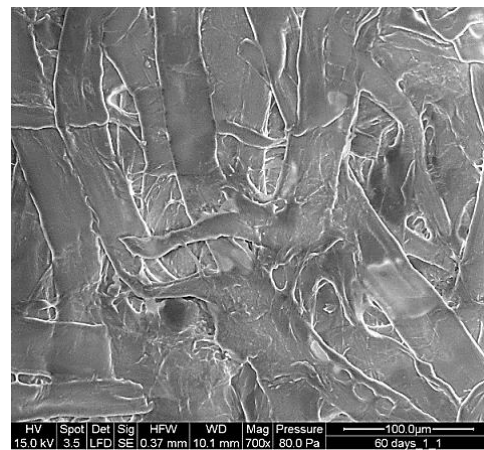
New Pressboard



20-days aged pressboard



40-days aged pressboard



60-days aged pressboard

Figure 5: SEM images of pressboard samples of different ageing degrees

It is known that hemicellulose is a highly hydrophilic substance due to its abundant hydroxyl groups. Once hemicellulose is degraded, the hygroscopicity of pressboard would decline accordingly. In addition, the capillary force of porous material is inversely proportional to its pore size. As shown in **Figure 5**, the inter-fiber holes are getting ever bigger as ageing degree increases, therefore the capillary effect of aged pressboard samples would get ever weaker.

Furthermore, attempts have been also made to establish a quantitative relation between thermal ageing degree and fiber diameter of pressboard samples. Q-Q plot are at first adopted to test the normality of distribution and then the normal distribution curve of each pressboard sample is drawn. **Figure 6** gives the fiber diameter distribution curve of 60-days aged pressboard sample.

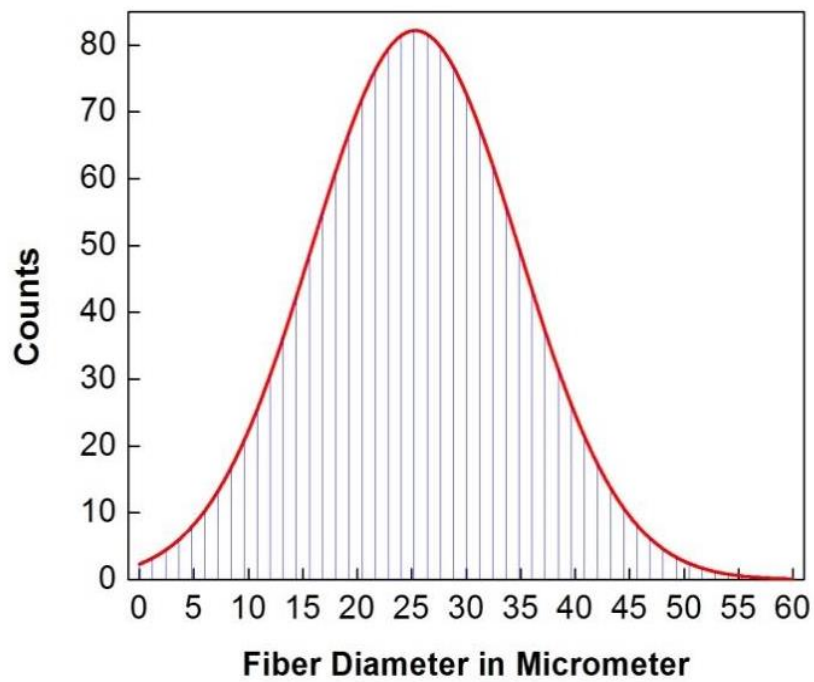


Figure 6: Fiber diameter distribution of 60-days aged pressboard sample

Table 1 summarizes the fiber diameters of differently aged pressboard samples. It is clear that the mean value of fiber diameter is inversely proportional to the ageing degree. This infers that the aged pressboard can provide larger free volume, which would facilitate the diffusion activity of water molecules within pressboard.

Table 1: Fiber diameter of pressboard samples of different ageing time

Pressboard	Sample Size	Mean Value	Standard Deviation
New	396	36.1 μm	11.2
20 Days-aged	459	28.9 μm	6.1
40 Days-aged	400	25.5 μm	8.0
60 Days-aged	488	25.0 μm	9.5

Complexities in Calibrating UHF Partial Discharge Measurement Procedure in Power Transformers

Dr.-Ing. Asghar Akbari

Introduction

Because of some advantages of UHF PD measuring method, particularly its capability to localize PD, this technique is being adopted for PD detection inside power transformers and in some cases is applied parallel to conventional electrical methods. Nowadays some manufacturers have provided some accessories to facilitate PD detection using this new method.

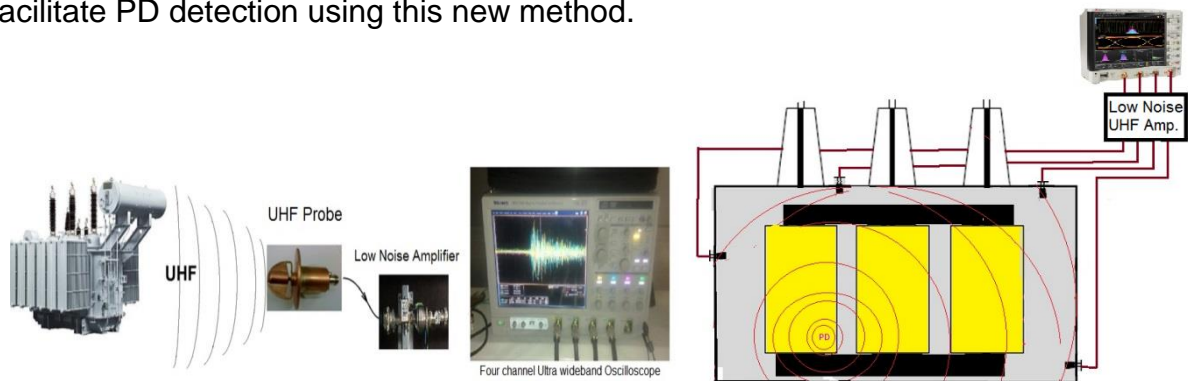


Figure 1: Schematic diagram of UHF PD localization in power transformers

UHF PD detection and localization as depicted in **Figure 1** is an effective diagnostic tool to detect the presence of PD and its location in the whole volume of a transformer tank. The main challenge in this regard is the correlation between the measured quantity according to IEC60270 and the quantities measured applying UHF technique.

UHF PD measurement calibration challenges

For the measurement of PD quantity using UHF method, the correlation between measured quantities by standard electrical method and the quantities measured with such a non-conventional UHF PD measurement have to be investigated.

The transformer tank is a conducting enclosure and thus exhibits resonances, standing waves and other electromagnetic (EM) phenomena in UHF domain. Also, the fields produced by different PD types in this highly reflective cavity, particularly in the presence of the active part of the transformer, vary considerably throughout the tank volume. The UHF sensor (UHF antenna) characteristics also play an important role in the received signals.

Because of the non-uniformity of the EM field, the measurements using UHF sensors is sensitive to position and the shape and polarity of the PD pulse at the origin and also the characteristic of antennas, the size and the shape of the transformer tank,

the size and the shape of all conducting elements including the active part. Also, the characteristics of the receiving antenna can be altered by its installation position and the proximity to the conducting surfaces.

Hence, the calibration of the UHF PD measurement is a very difficult task and there still is not a straightforward solution for the problem.

Basic Experiments

In order to show that the amplitude of the received UHF signals to a UHF probe in transformer cannot be correlated only to the distance between PD source and UHF probe and or to the angle between line of sight of the probe and the PD position regarding the radiation pattern of the UHF probe, **Figure 2** shows the distance and the direction of PD point and the UHF probe. Some experiments are performed to investigate the calibration complexities of PD measurement using UHF method.

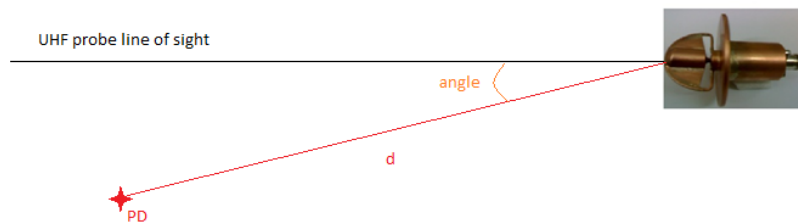
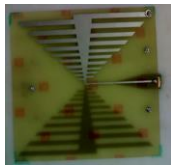



Figure 2: Distance and angle between UHF PD probe and the PD source

Four UHF probes of the same types are installed around a transformer tank and the received signals generated by an actual PD corona source at a specified point in transformer are measured and analysed as shown in **Table 1**.

Table 1: Amplitude of measured UHF signals with different distances and angles between UHF probe and PD position

Type of UHF probe	Probe number	Distance (d) in cm	Angle in degree	Amplitude in volt
	1	164	57	0.60
	2	91	8	0.20
	3	23	18	2.00
	4	88	25	0.30
	1	143	33	0.40
	2	26	40	0.20
	3	96	60	0.80
	4	128	67	0.40

As shown in **Table 1** it becomes obvious that there is no meaningful correlation between the measured amplitudes and neither distance between PD-source and UHF sensor nor the angle between PD source and line of sight of the UHF probe.

Another experiment showed that PD pulses with the same Pico coulomb but with different polarities also cause different UHF signal amplitude at the UHF probe output while all the measurement status of PD position and the probe remain unchanged.

Discussion and Conclusion

According to high frequency communication engineering, the given antenna patterns for UHF probes are far field patterns which are greatly influenced by the proximity of the metallic active part of the transformer. However, due to the closeness of the active part to the antenna, a near field pattern may be applicable, but such a pattern cannot be determined for various transformer designs. In addition, the polarization of the PD source current burst as well as the geometry of PD defect is unknown and as a consequence the PD radiation pattern is very complicated to be modelled and to be considered in calibrating UHF PD measurement.

The complexities in the calibration of the UHF PD measurement are due to resonances, standing waves, highly reflective characteristics of the transformer tank including the active part and the emission pattern of different PD types. So, to propose an approach to solve this problem, all of the mentioned phenomena must be investigated, analysed, modelled and taken into consideration.

Effect of Antenna Radiation Pattern and Polarization on UHF Partial Discharge Detection in Power Transformers

M.Sc. Hamid Jahangir, Dr.-Ing. Asghar Akbari

In this contribution, antenna radiation pattern and polarization as the two important characteristics of antennas for PD measurements are investigated. A typical UHF probe for transformer oil filling valve is simulated using CST Microwave and important characteristics of the antenna is evaluated. Using discrete ports in the software as the PD source, some received signals by the antenna is presented and effect of antenna radiation pattern and polarization is evaluated.

Radiation pattern is a mathematical function or a graphical representation of the radiation properties of the antenna as a function of space coordinates. In most cases, the radiation pattern is determined in the far field region and is represented as a function of the directional coordinates. Radiation properties include power flux density, radiation intensity, field strength, directivity, phase or polarization.

Figure 1 shows the structure of a typical UHF probe inserted into the transformer tank. To take the effect of the transformer oil into account, an oil filled box is considered around the antenna.

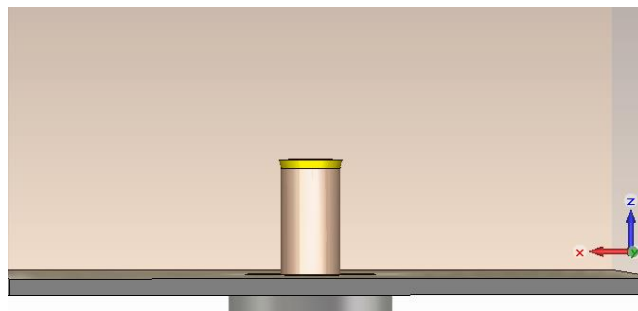


Figure 1: Simulated UHF probe structure in CST software

The probe radiation patterns at 0.5 and 1 GHz are shown in **Figure 2**. According to this figure, the antenna has more sensitivity for the incoming waves from the side than from the front.

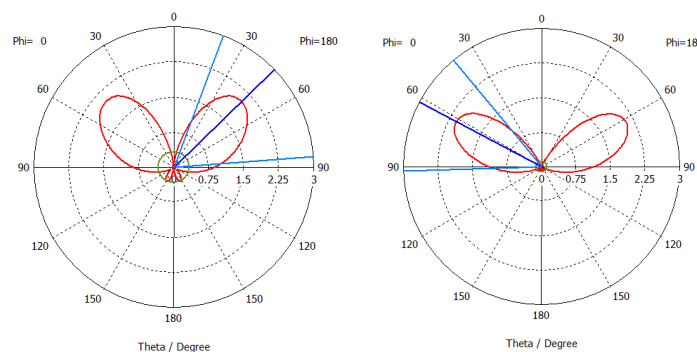


Figure 2: Radiation pattern (directivity) at 0.5 (left) and 1 (right) GHz

Figure 3 shows the received signals by the UHF probe from two simulated PD sources in front and side of the probe and in same distance. For the PD located outside of probe radiation pattern, the probe detects the surface wave on the transformer tank rather than the directed waves from the PD source. This leads to incorrect PD localization based on arrival time of the received signals.

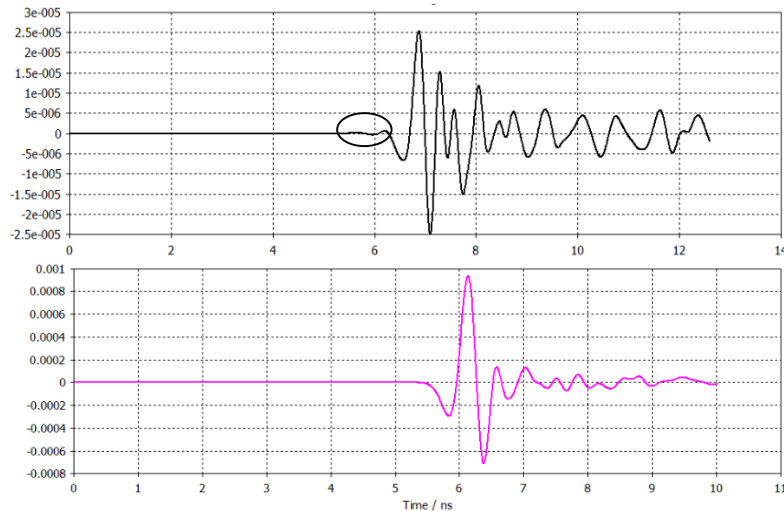


Figure 3: Received signals from simulated PD source in front (top figure) and side (bottom figure) of antenna

Polarization is a property of an electromagnetic wave describing the time-varying direction and relative magnitude of the electric field vector; specifically, the figure traced as a function of time by the extremity of the vector at a fixed location in space, and the sense in which it is traced, as observed along the direction of propagation. For an antenna, the polarization of the wave transmitted (radiated) by the antenna is considered as the antenna polarization. If polarization of receiving antenna differs from polarization of incident wave from partial discharge (PD) source, the amount of power extracted by the antenna from the incoming signal will not be at its maximum because of the polarization loss.

The electric field vectors around the simulated UHF probe are shown in **Figure 4**. The probe is polarized linearly along its axis. Therefore, it is expected that the

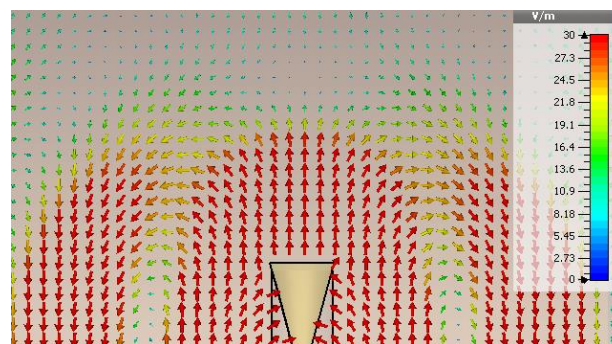


Figure 4: Field vectors of simulated UHF probe

antenna will have more sensitivity for PDs with electric field vectors in parallel to the antenna axis.

Figure 5 shows the received signal of the probe from simulated PD source in same and opposite polarization with and without considering the transformer tank. According to this figure, in the case of high polarization loss, the reflected pulses from the transformer tank may have more amplitude than the directly received waves by the UHF antenna. Therefore, transformer tank helps to detect PD in these cases but with a delayed time of arrival. This delay leads to inaccurate PD localization. The delay time varies with the PD location and transformer configuration. Therefore, same conclusion is obtained for effect of radiation pattern and polarization in PD detection in power transformers.

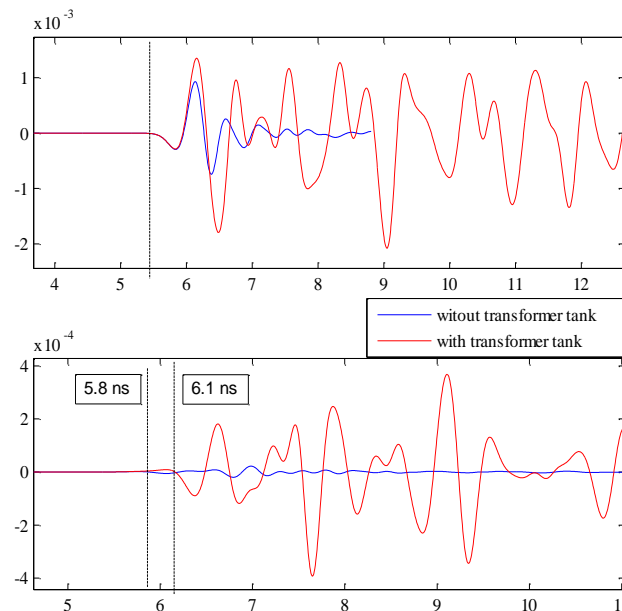


Figure 5: Effect of transformer tank on received signals from PD with low (top figure) and high (bottom figure) polarization loss

Correlation between Acoustic Emission (AE) and Electrical Signals of Partial Discharges (PD)

M.Sc. Seyed Amir Mahmood Najafi

Wind energy remains the front-runner in the increased use of renewable energy. In the quest for cost-efficient wind energy, the constant availability of strong winds is crucial for every project. Transformers in wind turbines are one of the major electrical capital items, and the costs due to a failure, are high in both direct costs and downtime especially in offshore platforms. Wind turbine transformers are normally facing different stresses like mechanical vibrations, repetitive voltages from converters and different overvoltages. In addition, fire behaviour and compact dimensions of the wind turbine transformers lead the manufactures to use different methods.

New technology is to use high temperature aramid insulation material (trade name NOMEX) and a silicone liquid or a biodegradable ester liquid (trade name MIDEL 7131) respectively. The insulation structure also contributes to heat management and mechanical integrity. These insulation materials have been selected on the basis of reliability, performance, safety and environmental concerns. The liquid, especially, receives a lot of attention. Mineral oil, as used in conventional transformers, is replaced by silicone or ester liquid, because the latter have a higher fire and flash point (>300°C) as well as being more environmental friendly.

However ester liquid oil and aramid papers have very good properties in terms of temperature and electrical resistance, but impregnating these kinds of papers with ester oil is not as easy as conventional oil-paper insulations. In this regard there would be a high possibility of partial discharges (PD) in non-complete impregnated aramid paper/pressboards. In addition, electrical, mechanical and thermal stresses increase the possibility of PD in high voltage insulation materials and can cause failure in high voltage windings. A PD is a short release of current caused by the build-up of electric field intensity in a finite region, which results in a localized, instantaneous release of energy and causes several effects such as chemical, electrostatic, electromagnetic and acoustic. Electrical measuring system also known as conventional measuring system has been used for several decades to detect PD in high voltage systems. The acoustic emission (AE) measuring technique (unconventional) is one of the non-destructive diagnostic methods used to measure, detect and localize PD in power equipment. Acoustic PD localization systems are most often used when PD has been identified by other diagnostic methods like gas analysis (DGA) or conventional electrical PD measurement. Conventional PD detection method is based on the detection of movement of charges. In this method, apparent charge in the range of picocoulombs (pC) is measured. The amplitude of these apparent charges is used as a criterion for judgement of PD activity in the insulation of power transformers. However no direct relation between the level of

deterioration of insulation materials and amplitude of the apparent charges has been found up to now. Acoustic localisation method is performed by acoustic sensors which are mounted outside the tank wall of the transformers. Acoustic sensor range is usually between 40 and 300 kHz.

There are two main acoustic detection method systems: all-acoustic and acoustic system with an electrical PD trigger. In all-acoustic method different mathematical solutions like non-linear equations can be used to increase the speed of localization with only acoustic sensors. On the other hand in acoustic systems with an electrical PD trigger, conventional measuring systems or ultra-high frequency (UHF) antenna combined with acoustic measuring systems are used to increase the sensitivity of localisation. Due to the very fast speed of the electrical signals, the electrical signals will be used as the trigger signal. Beside the immunity to electromagnetic interferences, AE signal detection is one of the most challenging problems in this localization method. Mechanical attenuation of AE signals from PD inside the windings of the transformers, finite number of AE sensors, narrow distance between the radiator banks of transformers (sensors mounted outside the power transformer) and ambient mechanical noise make the detection in some cases almost impossible. In this regards some methods such as averaging signals in time domain could be used to eliminate the background white noises. Studying the correlation between AE and electrical PD signals gives us the possibility to understand, how the AE signals are created and affected by electrical discharges.

However AE signals are generated by electrical PDs but practical measurements show that, there is no linear relation between AE and PD signals sometimes. In some cases a very high electrical PD discharge (about 2 nC apparent charge) can generate very small AE signal and vice versa. New investigations on correlation between AE and electrical signals of PD show that, there is a possibility to create

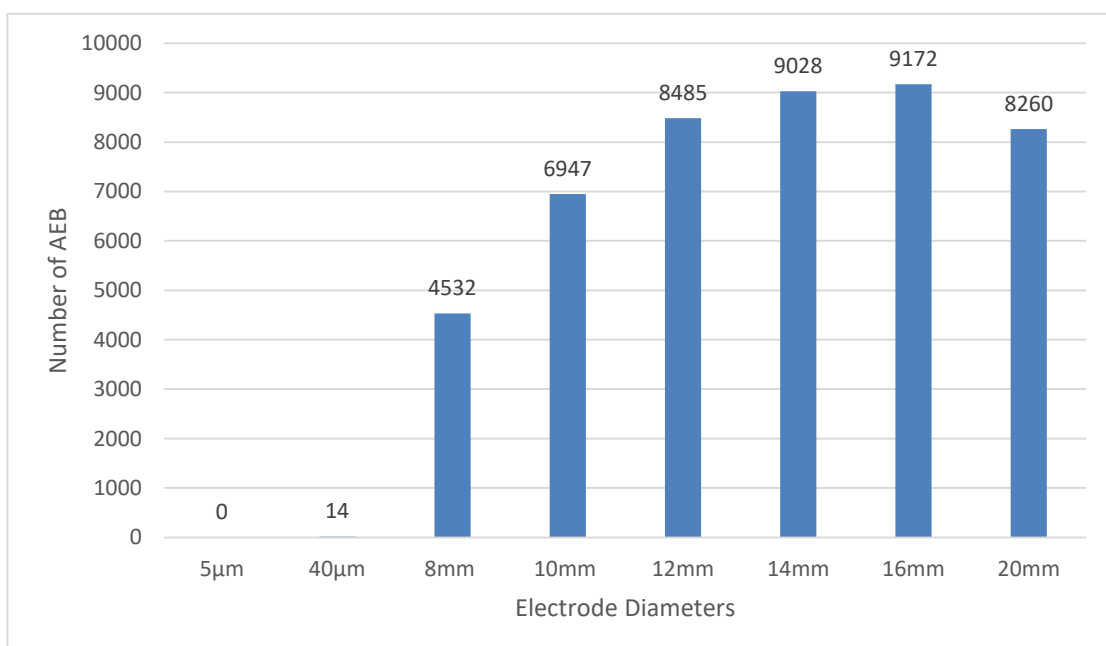


Figure 1: Number of AE bursts in one minute at average PD level about 1.5 nC

electrical PD activities without any detectable acoustic signals by normal AE sensors (75 and 150 kHz peak frequency). These kinds of PD are named silent PD by the author. **Figure 1** illustrates the AE numbers from PD on the surface of the aramid pressboard at different electrical stresses (5 micro-meters considers as the highest electrical stress).

The exact reasons of creation these kinds of discharges are still not clear. It is already known that the main reason of creation AE signals in a PD activity is temperature. **Figure 2** shows the carbonized patches on the surface of an aramid pressboard after PD activity at different stages of creation silent and non-silent PDs. Understanding the main reason of creation silent discharges can open a new era not only in detection and localisation of PD signals, but also in determination of the level of deterioration of solid insulations in power transformers by combining the acoustic and electric method together.



Figure 2: The effect of very high electrical stress on the surface of the aramid pressboard (surface discharge) at 1.5 nC average apparent charge

Erstellung einer online Datenbank für die Erfassung von Monitoring-Kenngrößen zur Zustandsbewertung von Transformatoren auf Basis des Health-Index

Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey

Mit der Liberalisierung des Strommarktes und dem zunehmenden Kostendruck wird von den Betreibern der Betriebsmittel für die elektrische Energieversorgung (Assets) zunehmend von einer intervallmäßigen Wartung (time based maintenance) zu einer zustandsabhängigen Wartungsstrategie (condition based maintenance) übergegangen.

Das Monitoring und die hierauf aufbauende Diagnose haben sich hierbei in den letzten Jahren zu einem festen Bestandteil eines umfassenden Asset-Managements entwickelt. Ziel dieser Maßnahmen ist die Gewährleistung hoher Betriebssicherheit bei Optimierung der Wirtschaftlichkeit durch Minimierung der anfallenden Wartungskosten. Durch den Fortschritt in der Sensorik und Datenspeichertechnologie stehen heutzutage umfassende Daten des Monitorings (Kenngrößen) für die Zustandsbewertung zur Verfügung.

Es ist daher wichtig, aus diesen Kenngrößen Aussagen zu dem Momentan-Zustand eines Assets abzuleiten und die Bedeutung der Kenngrößen auf die Aussagekraft hinsichtlich der Formulierung eines Zuverlässigkeitsmodells zu ermitteln. Anhand des Zuverlässigkeitsmodells soll dann ermittelt werden, ab welchem Zeitpunkt die Alterung eines Betriebsmittels, bedingt durch elektrische, thermische und mechanische Beanspruchungen, soweit fortgeschritten ist, dass das entstehende Gefährdungspotential nicht mehr vertretbar ist.

Dem Transformator kommt im Asset Management eine herausragende Bedeutung zu, da dieses Betriebsmittel ca. 60 % des im elektrischen Energieversorgungsnetz eingesetzten Investmentkapitals repräsentiert.

Als Quantisierungsansatz zur Beurteilung des Ist-Zustands eines Transformators hat sich der so genannte Health-Index (*HI*) in der Literatur etabliert. Er bildet eine praxisorientierte Methode um Monitoring-Kenndaten in eine umfassende Gesamtaussage über den Zustand eines Transformators zu überführen. Weiterhin ist der *HI* ein wichtiges Werkzeug für die strategische Planung von Wartungs- und Austauschstrategien.

Der Grundgedanke bei der Bildung des *HI* ist die Bewertung und Wichtung der Monitoring-Kenngrößen. Als Kenngrößen gelten hierbei u.a. das Teilentladungsverhalten, die Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse (DGA), die Feuchte, die Ölqualität (Durchschlagspannung, Säurezahl, das Farbverhalten, und die Grenzflächenspannung), Frequenz Response Analyse (FRA), Rückkehrspannung und viele andere Diagnoseparameter. Diese Kenngrößen werden zunächst in verschiedene, vom

betrachteten Asset abhängige Aussagekriterien eingeteilt und durch ein Bewertungs- und Gewichtungssystem in Aussagefaktoren überführt.

Stellvertretend für einen Aussagefaktor ist nachfolgend eine Bewertungsmöglichkeit für die Gas in Öl-Analyse abgebildet, wie sie in Anlehnung an die IEC 60599 in der Literatur zu finden ist.

Tabelle 1: Bewertungssystem für den DGA-Faktor anhand von Schlüsselgasen

Schlüsselgas (ppm)	Bewertung/ Score (S _i)						Gewichtung/ Weight (W _i)
	1	2	3	4	5	6	
Wasserstoff H ₂	≤ 100	100- 200	200- 300	300- 500	500- 700	> 700	W₁
Methan CH ₄	≤ 75	75- 125	125- 200	200- 400	400- 600	> 600	W₂
Ethan C ₂ H ₆	≤ 65	65- 80	80- 100	100- 120	120- 150	> 150	W₃
Ethen C ₂ H ₄	≤ 50	50- 80	80- 100	100- 150	150- 200	> 200	W₄
Ethin C ₂ H ₂	≤ 3	3- 7	7- 35	35- 50	50- 80	> 80	W₅
Kohlenmonoxid CO	≤ 350	350- 700	700- 900	900- 1100	1100- 1400	> 1400	W₆
Kohlendioxid CO ₂	≤ 2500	2500- 3000	3000- 4000	4000- 5000	5000- 7000	> 7000	W₇

Aus diesem Bewertungssystem wird nun mit Hilfe der folgenden Gleichung ein Aussagefaktor zum Kriterium der DGA gebildet.

$$DGAF = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Dabei können die Werte von S_i , wie in **Tabelle 1** gezeigt, für jedes Schlüsselgas einen Betrag von 0 bis 6 und die Werte der jeweiligen Wichtung (W_i) abhängig vom betrachteten Gas, einen Betrag von 1 bis 5 annehmen. Der so gewonnene DGA-Faktor wird dann anhand des unteren Bewertungsschemas (**Tabelle 2**), vergleichbar mit einem Notenschlüssel, einer den aktuellen Zustand repräsentierenden Klasse zugeordnet.

Tabelle 2: Bestimmung des Transformatorzustandes anhand des DGA-Faktors

Zustands-Rating	Zustand	Beschreibung
A	Gut	DGAF < 1,2
B	Akzeptabel	1,2 < DGAF < 1,5
C	Befriedigend	1,5 < DGAF < 2,0
D	Schlecht	2,0 < DGAF < 3,0
E	Sehr schlecht	DGAF >3

Die Einteilung basiert auf typischen Kennwerten von DGA-Untersuchungen einer Transformatorenflotte und kann dem typischen Gasungsverhalten der Transformatorenflotte individuell angepasst werden.

Das zuvor genannte Bewertungssystem ist auf alle anderen Diagnoseparameter (Leistungsfaktor, Furananalyse, Ölqualität usw.) übertragbar.

Tabelle 3: Zustandskriterien und Health-Index für Transformatoren

Kategorie	Kriterium	Gewichtung K	Zustands-Rating	HIF
1	DGA	10	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
2	Lastspitzen	10	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
3	Leistungsfaktor	10	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
4	Wärmestrahlung	10	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
5	Ölqualität	8	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
6	Furan	6	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
7	Zustand der Durchführung	5	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
8	Korrosion	2	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
9	Kühlung	2	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0

Tabelle 3 zeigt das gewichtete Bewertungsschema für eine Auswahl an Zustandskriterien und kann den Erfordernissen entsprechend um weitere Kriterien wie z.B. Geräuschentwicklung, Zustand der Dichtungen usw. mit jeweiliger Gewichtung modifiziert werden. Dabei sind die Gewichtungsfaktoren K in **Tabelle 3** und G in der **Tabelle 4** empirisch festgelegte Werte, welche repräsentativ für die Wichtigkeit des entsprechenden Kriteriums für die Gesamtaussage zum aktuellen Zustand des Assets stehen. Aus dem für jedes Kriterium individuell gewonnen Zustandsrating (vgl. Tabelle 2) wird nun ein sog. Health-Index-Faktor (HIF) durch direkte Zuordnung des Buchstabens, welcher als Ergebnis der Zustandsratings ermittelt wurde, zu einer entsprechenden Zahl im Bereich von 0 bis 4 gebildet. Dabei steht die Zahl 4 stellvertretend für den bestmöglichen Zustand A und 0 für den schlechtesten Zustand E.

Einen besonderen Stellenwert nimmt die Betrachtung des Zustandes des Stufenschalters des Transformators ein, da dieser nach internationalen Fehlerstudien eine der schwächsten Komponenten des Transformators darstellt. Daher werden hier gesonderte Untersuchungen und Bewertungen durchgeführt, die in **Tabelle 4** ausgeführt sind.

Tabelle 4: Zustandskriterien und Health-Index für den Stufenschalter

Kategorie	Kriterium	Gewichtung G	Zustands-Rating	HIF
1	DGA	6	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
2	Ölqualität	3	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
3	Gesamtzustand	2	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0

Wird nun beispielhaft den Eigenschaften des Transformators ein Anteil von 60 % an der Gesamtaussage zum Health-Index zugeordnet und dem Zustand des Stufenschalters 40 %, dann kann der Gesamt Health-Index nach folgender Formel gebildet werden:

$$HI = 60\% \frac{\sum_{j=1}^n K_j \cdot HIF_j}{\sum_{j=1}^n K_j} + 40\% \frac{\sum_{k=1}^n G_k \cdot HIF_k}{\sum_{k=1}^n G_k}$$

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Aussagen des Health-Index hinsichtlich des Zustands des Transformators und der benötigten Wartungsintervalle in Form eines Ampelsystems wieder.

Tabelle 5: Ampelsystem für den Health-Index und Schlussfolgerungen

HI	Zustand	Erwartete Lebenszeit	Maßnahmen
85 - 100	Sehr gut	Mehr als 15 Jahre	Normaler Wartungsintervall
70 - 85	Gut	Mehr als 10 Jahre	Normaler Wartungsintervall Kürzere Diagnoseintervalle
50 - 70	Normal	3 bis 10 Jahre	Genauere Diagnose notwendig Kürzere Wartungsintervalle Reparaturen durchführen
30 - 50	Schlecht	Weniger als 3 Jahre	Genauere Diagnose notwendig Kurze Wartungsintervalle Reparaturen zwingend durchführen Austausch planen
0 - 30	Sehr schlecht	Lebensende	Austausch notwendig

Im Rahmen zukünftiger Arbeiten wird am Aufbau einer web-basierten Datenbank gearbeitet, um die Monitoring-Kenndaten einer großen Transformatorflotte einheitlich zu erfassen und auf diese dezentral zugreifen zu können.

Anhand der Datenlage soll dann die Diagnose um absolute Fehlerindikatoren wie einer Betrachtung der Änderung der Öleigenschaften, der Furangehalte unter Nutzung der Fehlerformulierungen nach der Norm IEEE C57.104 und des Methanolgehalts, sowie der Gesamtgasmenge im Öl und der periodische (z.B. täglichen) Gaszunahme für diese Transformatorenflotte erweitert werden. Von grundsätzlicher Bedeutung für diese Forschungsarbeiten sind die Überprüfung und die Beurteilung der Gültigkeit und Aussagekraft der Wichtungsfaktoren.

Weiterhin soll die Methode der Zustandsbewertung anhand des Health-Index auch auf andere Betriebsmittel übertragen werden. Nach der Optimierung der Diagnosemethode wird angestrebt, anhand von weiteren Größen wie Wichtigkeit des Assets, Fehlerstatistik, Netzwerkkonfiguration und Lastfluss im Netz, sowie den Umgebungsbedingungen eine Aussage im Sinne eines Risiko-Managements zu gewinnen.

Das Verhalten elektrischer Betriebsmittel unter nicht sinusförmiger Spannungsbeanspruchung

M.Sc. Mohammad Taghi Imani

Für den Wandel von der konventionellen zu einer nachhaltigen Energieübertragung wurde das sogenannte Konzept Energiewende eingeführt, welches soziale, wirtschaftliche und ökologische Aspekte berücksichtigt. Das Zieldreieck der Energiewende, eine zuverlässige, bezahlbare sowie umweltschonende Energieversorgung zu erreichen, bildet den Kompass für den Umbau der Energieversorgung. Dieses Energiekonzept verfolgt zwei grundlegende Strategien: Den Ausbau der erneuerbaren Energien und die Erhöhung der Energieeffizienz.

Allerdings resultiert aus diesen auferlegten Anforderungen eine große Anzahl neuer Herausforderungen in Bezug auf das Design und den Betrieb von den Komponenten der Energieversorgung. Eine gesteigerte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Wind- und Solarenergie) geht mit der Verwendung von Leistungselektronikmodulen einher. Beim Einsatz der leistungselektronischen Schalter werden jedoch Rechteckspannungen mit Hochfrequenzkomponenten erzeugt, welche die Isolierung der Hochspannungskomponenten gefährden können, da deren Isolierung lediglich für konventionelle Spannungsformen mit reinem Sinusverlauf entwickelt wurde.

Somit werden umrichter gespeiste Bauteile und ihre Isolierungen durch immer häufigere und schnellere Umpolarisationsvorgänge beansprucht. Durch diese neuen Beanspruchungen werden einige physikalische Mechanismen in Isoliersystemen in den Vordergrund gerückt, die bei einer Wechsellspannungsbeanspruchung keine maßgebliche Rolle spielen. Infolge der transienten Schaltspannungen werden die elektrische Alterung der Isolierung beschleunigt, deren Eigenschaft verschlechtert und deren Lebensdauer reduziert. Dieses ist kritisch, da Lebensdauer und Kosten elektrischer Betriebsmittel größtenteils von der Isolierung bestimmt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Erkenntnisse in Bezug auf zulässige Beanspruchungen von Isoliersystemen und Materialien lediglich auf Beanspruchungen durch sinusförmige Spannungsverläufe oder singular auftretende Blitz- oder Schaltstoßspannungen beruhen, ist es sinnvoll und notwendig, auch die Auswirkungen der oben genannten nicht sinusförmigen Spannungen auf die Isoliersysteme näher zu untersuchen.

Für diese Untersuchungen steht eine Anlage zur Verfügung, mit der Hochspannungsimpulse oder Impulsfolgen mit großer Flankensteilheit erzeugt werden können. Die Flankensteilheit der Impulse kann dabei durch Veränderung der Lade- und Entladewiderstände eingestellt werden. Mit diesen rechteckförmigen Spannungsimpulsen werden die Prüflinge belastet. Anhand der Messung des Verlustfaktors sowie der Durchschlagsspannung vor und nach der Beanspruchung

kann der Einfluss der nicht sinusförmigen Beanspruchung auf das Fortschreiten der Alterung beurteilt werden.

Als Prüflinge wurden Folienkondensatoren verwendet, da diese bereits in der Praxis im Tiefpassfilter einer PVM durch impulsförmige Spannungen belastet werden. Die Folien bestehen aus Polypropylen, das einen sehr geringen Verlustfaktor gerade bei hohen Frequenzen aufweist. Die verwendeten Folienkondensatoren besitzen eine Kapazität von 470 pF und eine Nennspannung von 630 V und können direkt für die Versuchsdurchführung verwendet werden.

Die Untersuchung erfolgt bei vier verschiedenen Impulsformen: mit positiver, negativer und alternierender Spannung sowie bei positiver Spannung mit unterschiedlicher Anstiegszeit. Zur Erzeugung der positiven Prüfspannung wurde die im **Bild 1** dargestellte Schaltung verwendet.

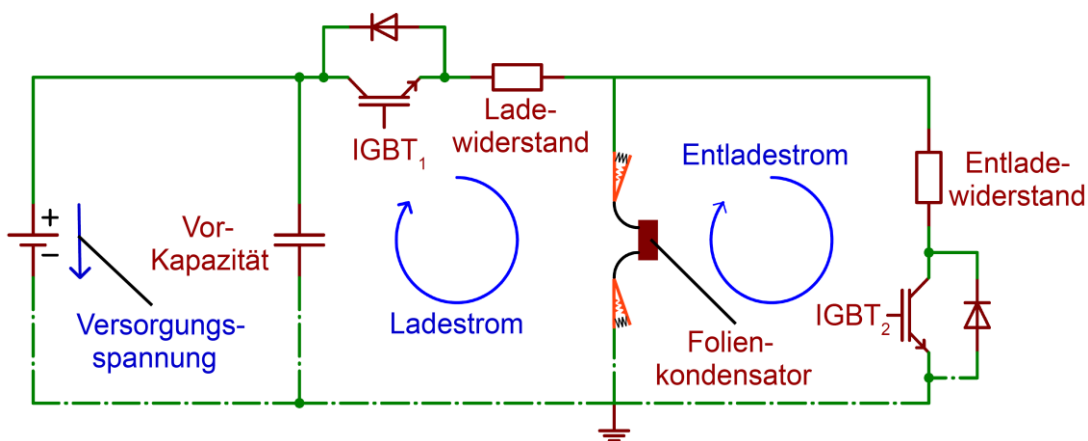


Bild 1: Schaltung zur Erzeugung Prüfimpulse positiver Polarität

Die Schaltung zur Erzeugung bipolarer Spannungsimpulse wird mit zwei IGBTs und einer positiven und negativen Spannungsversorgung realisiert, wie in **Bild 2** dargestellt.

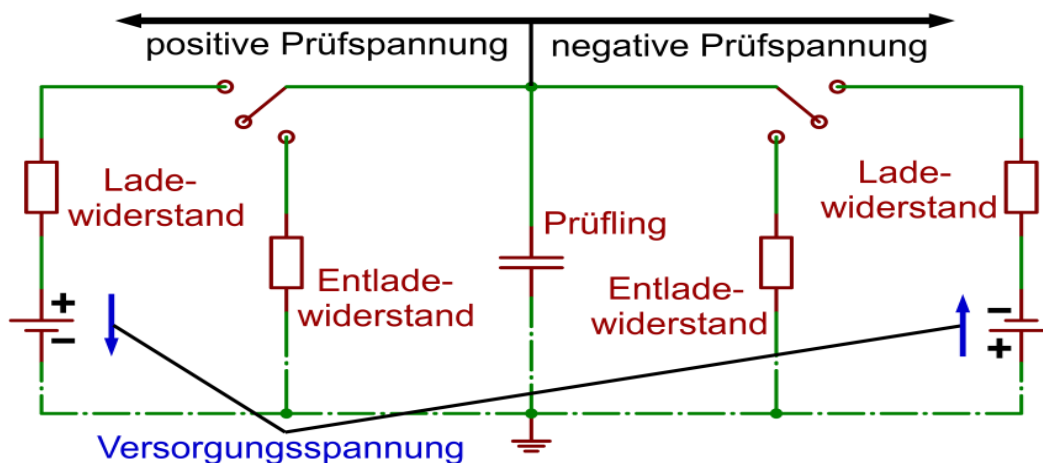


Bild 2: Prinzip der Schaltung zum Erzeugen der Rechteckspannung

Die Auswirkungen von schnell wiederholenden impulsförmigen Spannungen auf die Isolierung der Kondensatoren wurden mit verschiedenen Impulsspannungen bei einer Belastungsdauer von insgesamt 3 Stunden ermittelt. Jede einzelne Prüfung wurde dabei fünfmal wiederholt. **Tabelle 1** stellt die eingestellten Messparameter dar.

Tabelle 1: Prinzip der Schaltung zum Erzeugen der Rechteckspannung

	Prüfpuls A	Prüfpuls B	Prüfpuls C	Prüfpuls D
Polarität	positiv	negativ	alternierend	positiv
Frequenz (kHz)	1	1	0,5	1
Tastgrad	0,25	0,25	0,25	0,25
Anstiegs/ Fallzeit (μs)	1,23	1,22	1,22	0,42
Alterungsdauer (h)	3	3	3	3
Amplitude (kV)	1	1	1	1

Anschließend wurde der Verlustfaktor der Prüflinge gemäß der in **Bild 3** dargestellten Messschaltung ermittelt.

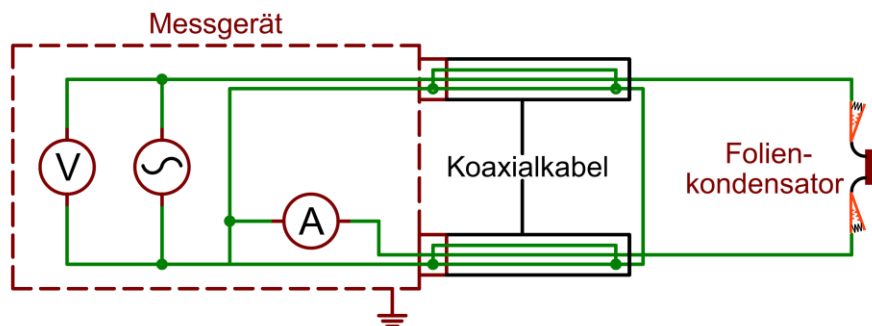


Bild 3: Messsystem zur Bestimmung des Verlustfaktors

Die Ergebnisse der Durchschlagsspannung und des Verlustfaktors zeigen nach der Beanspruchung durch positive und negative Prüfspannungen eine vergleichbare Verschlechterung der dielektrischen Eigenschaften, während die unter alternierender Spannung gealterten Kondensatoren einen deutlich höheren Verlustfaktor, besonders im Niederfrequenzbereich, und eine geringere Durchschlagfestigkeit aufweisen. Eine Reduzierung der Anstiegszeit von $1,23 \mu\text{s}$ auf $0,42 \mu\text{s}$ hat keinen Einfluss auf das Durchschlagverhalten und den Verlustfaktor.

6 Veröffentlichungen

Breakdown Behaviour of New Insulation Liquids under AC and DC Stress and Gap Distances over 10 mm

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

O. Gratz, M. Kuhnke, P. Werle, E. Gockenbach, D. Asenov, P. Knabel, J. Friedel, A. Hilker

Verification of a New Developed Algorithm for the Evaluation of AC and DC Signals Using the IEC Test Data Generator

M. Rahimbakhsh, E. Gockenbach, P. Werle

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

Investigation on Correlation between Breakdown Voltage and Diagnostic Measurements for an Insulation System Used in Rotating Machines

M. Farahani, P. Werle, E. Gockenbach

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

Prüfmethoden und Diagnoseverfahren für den Einsatz von polymeren Isolierstoffen in Kabeln für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen

E. Gockenbach

6. RCC Fachtagung 2015 - Werkstoffe zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik unter den besonderen Anforderungen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Partial Discharge Analysis under Hybrid AC/DC Field Stress

Hassan Saadati, Jens Martin Seifert, Peter Werle, Ernst Gockenbach, Hossein Borsi

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

The Influence of Thermal Ageing on the Electrical and Physicochemical Properties of Pressboard/Oil Interface

X. Zhou, A. Rybakov, P. Werle, E. Gockenbach, H. Borsi

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

New Techniques and Algorithms for UHF Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers

P. Werle, A. Akbari

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

Time-to-Arrival Estimation of UHF PD Signals Based on Dynamic Cumulative Sum of Likelihood Ratio

H. Jahangir, A. Akbari, P. Werle, H.R. Mirzaei, E. Hajipour

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

Attempts in Extending a new Method to improve Performance of Frequency Response Analysis

N.T. Tran, T.P. Nguyen, D.L. Ho, T.M.T. Pham, D.A.K. Pham, H. Borsi,
E. Gockenbach

19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic,
August, 23 – 28, 2015

Einfluss von Alterungsnebenprodukten auf das Gasungsverhalten von Isolierflüssigkeiten

M.T. Imani, I. Fofana, P. Werle

TLM 2015 – Transformer Life Management Tagung, 21.-22. September 2015,
Halle-Merseburg

Challenges of DGA Interpretation - Theory and Practical Examples

P. Werle

TRANSFORM 2015 Oktober, 13.-15., Vienna, Austria

Insulating Liquids for Power Transformers and their use for Condition Assessment Purposes

P. Werle

International TLM – Dubai 2015, Oktober, 27 – 28, Dubai, VAE

Asset Management strategies

O. Kuzmin, P. Werle

International TLM – Dubai 2015, Oktober, 27 – 28, Dubai, VAE

Asset Management of Transformer Fleets - an Overview

P. Werle, O. Kuzmin

International TLM – Shanghai 2015, November, 11 - 12. Shanghai, China

Partial Discharge UHF Electromagnetic Waves in Power Transformers: Simulation, Detection and Localization

P. Werle, A. Akbari H. R. Mirzaei, J. Szczechowski

CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015, September, 20-25, 2015, Shanghai, China

Diagnose von Leistungstransformatoren – Fallbeispiel aus der Praxis

P. Werle, M. Hartje, S. Schreiter, O. Kuzmin

OMICRON Diagnosewoche, 10.-12. März 2015, Feldkirch, Österreich

Increase Transformer Reliability – From Condition Assessment to On-Site Repair

P. Werle, J. Szczechowski, T. Asshauer

ITCE 2015, 2nd International Transformer Conference and Exhibition,
September, 1.-2., Tehran, Iran

7 Mitarbeit in Fachgremien, Teilnahme an Konferenzen

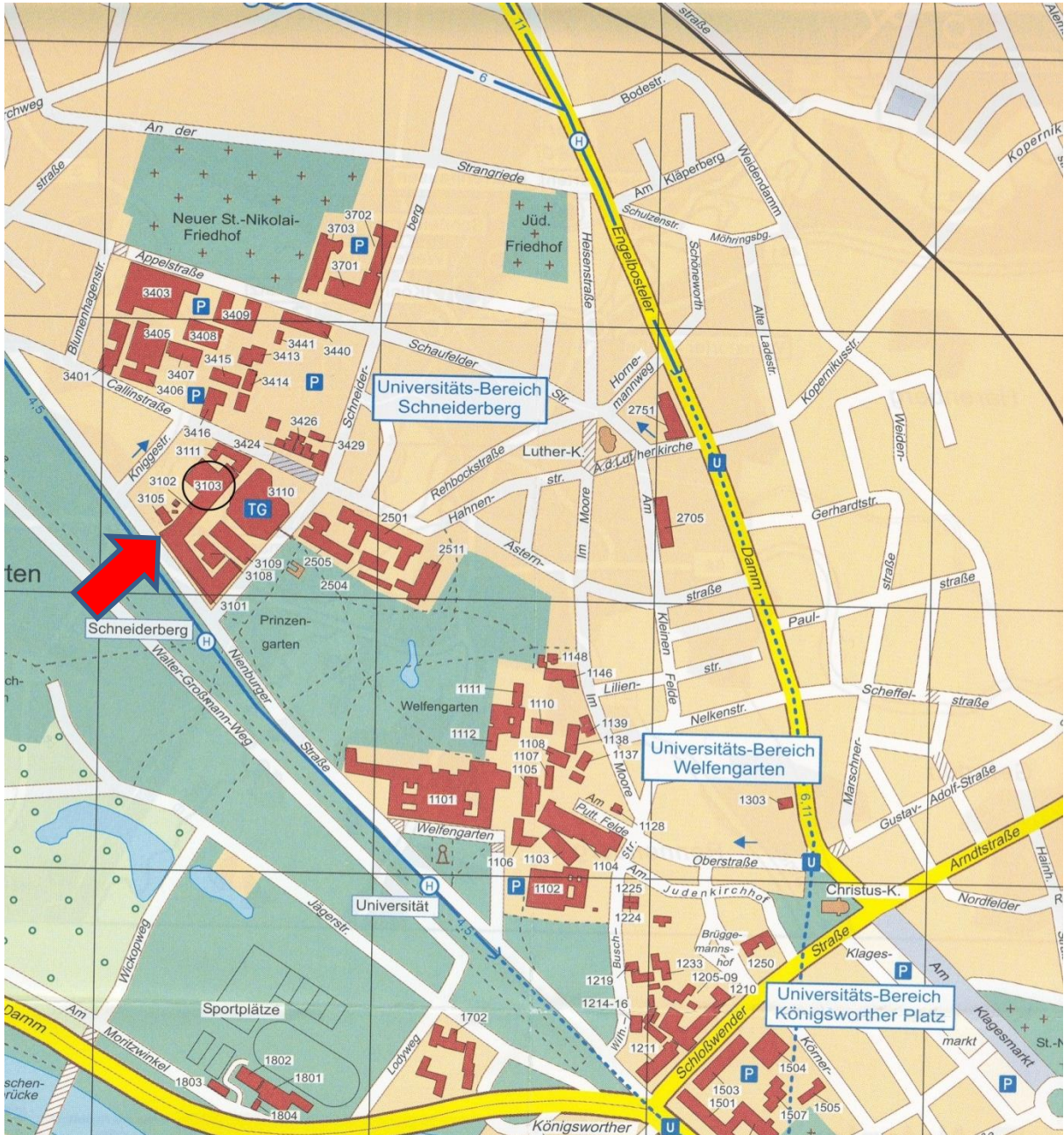
- 24.02.-25.02. Kabelseminar, Prof. Gockenbach
- 04.03.-05.03. Mitarbeit in der DKE K 182, Isolieröle, reguläres Meeting in Schmalkalden, Prof. Werle, Prof. Borsi
- 05.03.-06.03. Leitung DKE K 124, Hochspannungs- und Hochstromprüftechnik, Dresden, Prof. Gockenbach
- 10.03.-12.03. Vortrag auf der OMICRON Diagnosewoche in Feldkirch, Österreich, Prof. Werle
- 23.04. Mitarbeit AK 432.2.3 Ultra Hochspannung (UHV), Prof. Gockenbach
- 07.05.-08.05. Teilnahme und Sessionleitung auf dem HIGHVOLT Kolloquium 2015, Radebeul, Prof. Werle, Prof. Gockenbach
- 20.05.-21.05. Vortrag / Teilnahme an der 6. RCC Fachtagung 2015 - Werkstoffe zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik unter den besonderen Anforderungen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Berlin, Prof. Gockenbach, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- 20.05.-21.05. Vortrag 6. RCC Fachtagung Forschung und Entwicklung neuer Technologien zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik, Prof. Gockenbach
- 27.05.-28.05. Wissenschaftliche Leitung Power Transformer Workshop 2015, Teheran, Iran, Prof. Werle, Prof. Borsi
- 03.06.-04.06., Mitarbeit IEC TC 122 UHV AC transmission systems, Zürich, Schweiz, Prof. Gockenbach
- 23.08.-28.08. Diverse Beiträge und Sessionleitung auf der ISH 2015, International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Tschechien, Prof. Werle, Prof. Gockenbach, Prof. Borsi, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- 01.09.-02.09. Vorträge und Sessionleitung auf der ITCE 2015, 2nd International Transformer Conference and Exhibition, Teheran, Iran, Prof. Werle, Prof. Borsi
- 12.09.-16.09. CIGRE SC D1 Colloquium 2015, Mitarbeit in D1.29 Partial Discharges in Transformers, Rio, Brasilien, Prof. Werle

- 20.09.-25.09. Beitrag auf dem CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015, September, 20-25, 2015, Shanghai, China, Prof. Werle
- 21.09.-22.09. Vortrag / wissenschaftliche Tagungsleitung auf der TLM 2015, Transformer Life Management Tagung, Halle-Merseburg , Prof. Werle, Prof. Borsi, Wissenschaftliche Mitarbeiter
- 23.09. Mitarbeit CIGRE AG 2.4 Transformer Utilization Meeting, Shanghai, China, Prof. Werle
- 24.09. Mitarbeit CIGRE SC A2 (Transformers) Meeting, Shanghai, China, Prof. Werle
- 24.09. Mitarbeit AK 432.2.3 Ultra Hochspannung (UHV), Prof. Gockenbach
- 29.09.-30.09. Kableseminar, Prof. Gockenbach
- 13.10.-15.10. Vortrag auf der TRANSFORM 2015, Wien, Österreich, Prof. Werle
- 21.10. Teilnahme CIGRE/CIRED Tagung, Mannheim, Prof. Gockenbach
- 22.10. Teilnahme Deutsches Komitee CIGRE, Mannheim, Prof. Gockenbach
- 27.10.-28.10. Vortrag / wissenschaftliche Tagungsleitung der International TLM in Dubai 2015, Arabische Emirate, Prof. Werle, Prof. Borsi
- 11.11.-12.11. Vortrag auf der International TLM in Shanghai 2015, China, Prof. Werle
- 24.11. Teilnahme Fachtagung ETG Kabeldiagnostik, Prof. Gockenbach
- 26.11.-27.11 Mitarbeit im IEC TC 10 Meeting, Budapest, Ungarn , Prof. Werle
- 03.12.-04.12 Mitarbeit IEC TC 122 UHV AC transmission systems, Nanjing, China, Prof. Gockenbach

8 Technische Ausstattung

- Wechselspannung 800 kV, 1 A 50 Hz
- Wechselspannung 160 kV, 0,1 Hz
- Wechselspannung 75 kV, 500 Hz
- Stoßspannung 1800 kV, 18 kWs
- Stoßstrom 200 kA, 300 kWs
- Gleichspannung 800 kV, 100 mA
- Geschirmte Räume für Teilentladungsmessung und Teilentladungsortung
- Klimatisierte Messzellen für dielektrische Untersuchungen an flüssigen und festen Isolierstoffen
- Verlustfaktormesseinrichtungen für Hochspannung (50 Hz) und Niederspannung (10 μ Hz - 5 kHz)
- Nachbildung direkter und indirekter Effekte von Blitzentladungen
- Dauerversuchsstände für Materialuntersuchungen mit hohen Losgrößen
- Harz-Gießanlage zur Herstellung von Prüfkörpern
- Einrichtungen zur Trocknung und Imprägnierung von Papier

9 Lageplan



Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme
Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset Management -
Schering-Institut
Callinstraße 25 A
30167 Hannover
Tel: +49 511 762 2718
Fax: +49 511 762 2726
www.si.uni-hannover.de
schering@si.uni-hannover.de