



Leibniz
Universität
Hannover

Jahresbericht 2024



Institut für Elektrische Energiesysteme

Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset Management

Schering-Institut

Inhalt

1	Vorwort.....	2
2	Personelle Besetzung des Instituts	4
3	Lehre	5
4	Neue Mitarbeiter	9
5	Promotionen	12
6	Forschungsarbeiten.....	18
7	Konferenzen und Exkursionen	76
8	Umbau des Instituts.....	87
9	Veröffentlichungen	90
10	Lageplan und Ausstattung.....	93

1 Vorwort

Lieber Freundeskreis des Schering-Instituts,

im Wintersemester 2014/15 habe ich die Leitung des Schering-Instituts übernommen, so dass es nach nun etwa zehnjähriger Tätigkeit Zeit für eine Zwischenbilanz ist. Anfangs erfolgte zunächst eine notwendige Sanierung und Modernisierung unseres Gebäudes, wobei in diesem Zuge auch alle Hochspannungsmesszellen von uns neu aufgebaut und mit neuester Messtechnik und modernen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet wurden, so dass mittlerweile mehr als 15 moderne Hochspannungsprüfsysteme zur Verfügung stehen, von denen 2 komplett geschirmt sind. Parallel dazu wurde ein neuer, 15-stufiger Stoßspannungsgenerator beschafft und die 800 kV Großgeräte in der Hochspannungshalle wurden mit neuen Steuerungs- und Kontrolleinrichtungen versehen. Ferner erfolgte die Errichtung eines neuen Isolierflüssigkeitslabors, welches in diesem Jahr noch einmal erheblich erweitert wurde, da immer mehr Flüssigkeiten auch für die E-Mobilität untersucht werden. Alle Arbeitsplätze - inklusive der Werkstatt, welche ebenfalls grundlegend modernisiert und mit neuen Geräten ausgestattet wurde - sind somit auf dem neuesten Stand der Technik, ebenso wie der neue Seminarraum und die Studierendenräume, so dass insgesamt erstklassige Umgebungsbedingungen vorliegen. Dies hat es ermöglicht - trotz einiger schwieriger Corona-Jahre - viele Projekte zu akquirieren, woraus in den letzten 10 Jahren fast 300 nationale und internationale Veröffentlichungen entstanden sind. Insgesamt 10 dieser Publikationen wurden ausgezeichnet, was belegt, dass die Forschungsarbeiten am Schering-Institut auch für die Fachwelt von besonderem Interesse sind. Infolge dieser Forschungsprojekte konnten mehr als 250 Bachelor- und Masterarbeiten betreut werden, welche bisher zu mehr als 10 Promotionen führten, wobei allein im nächsten Jahr weitere 4 abgeschlossen werden sollen. In der Lehre wurden zudem 2 neue Vorlesungen aus dem Bereich des Asset-Managements und der Hochspannungskomponenten etabliert, welche jeweils durch Gastvorlesungen von Industriepartnern ergänzt werden, so dass die Studierenden auch viele Informationen aus der Praxis erhalten. Mit der Übernahme des Grundlagenlabors wurde dieses auch sukzessive modernisiert, wobei zukünftig weitere neue Versuche eingebaut werden, durch welche eine Erhöhung der Attraktivität erfolgen soll, um die Möglichkeit zu eröffnen, die Studierenden schon im Grundstudium für den Bereich Hochspannungstechnik und Energieversorgung zu begeistern.

Viele der o.g. Forschungsarbeiten werden auch auf unserer jährlich durchgeführten TLM-Tagung (Transformer Life Management) vorgestellt, welche sich im Laufe der Jahre zur größten Transformatorenkonferenz in Europa entwickelt hat, so dass mittlerweile eine KI-basierte Simultanübersetzung in verschiedene Sprachen angeboten wird und sich mehr als 2000 Besucher und über 250 Fachaussteller im letzten Jahrzehnt mittels Vorträgen, Workshops und Poster-Sessions umfangreich auf der TLM informieren konnten.

Auch wenn die aktuelle Lage weltpolitisch und binnenwirtschaftlich weiterhin angespannt bleibt, ist die Stimmung in unserer Energietechnikbranche besonders gut, da der Ausbau des Elektro-Energiesystems infolge der Energiewende eines der größten Infrastrukturprojekte darstellt, die es in Deutschland je gegeben hat. Somit ist es nicht verwunderlich, dass in diesem Bereich dringend nach Fachkräften gesucht wird, weshalb sich den Studierenden und Promovierenden lukrative Jobs in diesem Bereich bieten, zumal die Universitäten den aktuellen Bedarf an Energie-Elektrotechnik-Absolventen:innen nicht decken können. Dies scheint sich zunehmend bei den Abiturjargängen herumsprechen, so dass zu hoffen bleibt, dass die Anzahl der

Studierenden in diesem Bereich wieder ansteigt, da es auch in den nächsten Jahrzehnten noch sichere und interessante Arbeitsplätze für die Gestaltung der Energieversorgungszukunft geben wird.

Diese insgesamt positiven Rahmenbedingungen tragen dazu bei, dass am Schering-Institut derzeit viele interessante und teilweise auch internationale Forschungsvorhaben untersucht werden, weshalb drei neue Mitarbeiter:innen eingestellt wurden. Hierbei ist besonders erfreulich ist, dass von den aktuell 14 Promovierenden mit 6 Doktorandinnen und 8 Doktoranden eine recht paritätische Verteilung vorliegt, was nicht zuletzt zu einem angenehmen Arbeitsklima beiträgt. Dabei soll auch das Arbeiten in Gremien gefördert werden, so dass einige der etwas erfahreneren Doktoranden:innen nun auch in Arbeitsgruppen der CIGRÉ und des IEC intensiv mitarbeiten und auf diese Weise ein kontinuierlicher internationaler Austausch und eine Erweiterung des eigenen Netzwerks gewährleistet ist.

Zu den o.g. Themen finden Sie nachfolgend viele weitere Einzelberichte, so dass Sie sich bei der Durchsicht dieses Jahresberichtes weiterführend informieren können.

Wie Sie aus diesen einleitenden Worten entnehmen können, geht ein arbeitsreiches Jahr dem Ende entgegen, so dass wir uns abschließend sehr herzlich für die gute Zusammenarbeit, Förderung und Unterstützung bei Ihnen, unseren Kooperations- und Industriepartnern, dem ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) des BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz), der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) "Otto von Guericke" e.V. - Projekt GmbH, der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Deutschen Akademischen Auslandsdienst (DAAD) und der Alexander von Humboldt Stiftung (AvH) bedanken möchten, wobei wir uns auf eine Weiterführung dieser Kooperationen im nächsten Jahr freuen.

Bis dahin wünscht das Team des Schering-Instituts Ihnen und Ihren Familien ein gesundes, erfolgreiches und friedvolles neues Jahr!

Hannover, Dezember 2024



Prof. Dr.-Ing. Peter Werle

2 Personelle Besetzung des Instituts

Institutsleiter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Werle
Oberingenieur:	M.Sc. Moritz Kuhnke
Geschäftszimmer:	Hala Ahmi
Werkstatt:	Erich Semke (Leitung) Ina Wolf
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Borsi
Lehrbeauftragte:	Hon.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Pöhler Hon.-Prof. Dr.-Ing. Monika Sturm
Gastwissenschaftler:	Prof. Dr.-Ing. Asghar Akbari
Doktorandinnen und Doktoranden:	M.Sc. Behnam Balali M.Sc. Sebastian Braun M.Sc. Felix Graff M.Sc. Kristin Homeier M.Sc. Meike Jopert M.Sc. Christian Kohlsaatt M.Sc. Büsra Özdemir M.Sc. Aref Sharifi M.Sc. Laureen Stahl M.Sc. Javier Torres
Externe Doktoranden:	M.Sc. Oliver Derigs Dipl.-Ing. (FH) Henry Hirte M. Sc. Kübranur Varli M.Sc. Franziska Gebhardt
Dissertation in Vorbereitung:	Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović M.Sc. Mohammad Taghi Imani Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey M.Sc. Tobias Münster M.Sc. Henning Schnittker M.Sc. Mahmoud Moh'd

3 Lehre

Prof. Dr.-Ing. P. Werle

Hochspannungstechnik I

(SS, Vorlesung 2 SWS, Übung 1 SWS, Studienleistung 1 SWS)

Aufgaben und Zukunft der Hochspannungstechnik
Erzeugung hoher Spannungen (Wechsel-, Gleich- und Stoßspannungen)
Kaskadenschaltungen
Messung hoher Wechsel-, Gleich- und Stoßspannungen
Messung von hohen Strömen auf hohem Potential
Elektrische Festigkeitslehre
Elektrostatistisches Feld
Messung und Berechnung von Ersatzanordnungen
Durchschlagmechanismen, Durchschlag von Gasen
Polaritätseffekt
Durchschläge in Isolierstoffen

Hochspannungstechnik II

(WS, Vorlesung 2 SWS, Übung 1 SWS, Studienleistung 1 SWS)

Durchschlagsarten flüssiger Isolierstoffe
Durchschlagsarten fester Isolierstoffe
Einflussgrößen auf die Durchschlagspannung
Lebensdauerkennlinie, Volumeneffekt
Dielektrisches Verhalten flüssiger und fester Isolierstoffe
Dielektrische Messungen
Schering-Brücke
Teilentladungsmessungen
Bestimmung der Durchschlagspannung nach Norm

Hochspannungsgeräte I

(WS, Vorlesung 2 SWS, Übung 1 SWS, Studienleistung 1 SWS)

Ein- und Ausschaltvorgänge in Netzen
Betrachtung auftretender Überbeanspruchungen
Funktionsweise und Bauform von Hochspannungsschaltern
Lichtbogenkennlinien
Leistungs-, Last-, Trenn- und Erdungsschalter
SF₆-Systeme, Ersatzgase
Strom- und Spannungswandler, Verhalten bei Wanderwellen
Hochspannungskabel
Vergleich von Energieübertragungssystemen
Spannungsdurchführungen und -ausleitungen
Dimensionierung und Feldberechnung
Hochspannungs-Leistungskondensatoren
Überspannungsableiter
Schutzkonzepte

Hochspannungsgeräte II**(SS, Vorlesung 2 SWS, Übung 1 SWS, Studienleistung 1 SWS)**

Energiewende: Ursache und Auswirkungen

Transformatoren: Arten, Design, Berechnung, Herstellung, Prüfung, Service

Freileitungen: Materialien, Aufbau, Masten, Auslegung, Schwingungen

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HVDC)

Supraleitende Betriebsmittel

Konventionelle Erzeugungssysteme

Energiespeicher und Kernfusion

Blitzschutz und EMV

Zustandsdiagnose und Asset Management**(WS, V. 2 SWS, Übung 1 SWS, Studienleistung 1 SWS)**

Asset-Management Grundlagen

Normen, ISO, IEC, VDE, IEEE

DIN ISO 55000, 55001, 55002

DIN EN ISO 12100, DIN ISO 31000, DIN EN 60812, DIN EN 60300, DIN EN 61025

IEC 60422, IEC 60599

Energiewirtschaftsgesetz

Aufgaben des Asset Managers

Flottenmanagement

Instandhaltungsstrategien

Risiko-Wichtigkeits-Diagramme

Zustandsanalysemethoden

Ölanalytik, DFR, FRA, TE, Isolationsmessungen, Thermovision

Sensortechniken

Monitoringsysteme

Datenkorrelationstechniken

Zustandsverbesserungsstrategien

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Oberstufenlabor Hochspannungstechnik**(SS, WS, experimentelle Übungen, 4 SWS)**

Elektrischer Durchschlag in Gasen

Ausmessen von elektrischen Feldern

Erzeugung und Messung hoher Gleichspannungen

Gas-in-Öl-Analyse (DGA)

Teilentladungslokalisation mit UHF-Antennen

Stoßspannungsmessung

Polymerisationsgradbestimmung von Isolierpapier

Raumladungsmessung in festen Isolierstoffen

M.Sc. M. Kuhnke

Elektrotechnisches Grundlagenlabor Teil I (ET)

(SS, experimentelle Übungen, 2 SWS)

Strom- und Spannungsmessungen

Gleichstrom-Netzwerke

Kennlinien elektrischer Bauelemente

Einfache Wechselstromkreise

Elektrotechnisches Grundlagenlabor Teil II (ET)

(WS, experimentelle Übungen, 3 SWS)

Feldmessungen

Schwingkreise

Leistung bei Wechselstrom

Dreiphasenwechselstrom

Technisches Schreiben

Elektrotechnisches Grundlagenlabor Teil III (ET)

(WS, experimentelle Übungen, 2 SWS)

Schaltvorgänge

Halbleiterschaltungen und Operationsverstärker

Spektralanalyse und-synthese periodischer Signale

Feldeffekttransistor und CMOS-Grundsaltungen

Elektrotechnisches Grundlagenlabor (MB)

(WS, SS, experimentelle Übungen, 2 SWS)

Strom- und Spannungsmessungen

Gleichstrom-Netzwerke

Schwingkreise

Kennlinien elektrischer Bauelemente

Physiklabor für Wirtschaftsingenieure

(SS, experimentelle Übungen, 1 SWS)

Feldmessungen

Schwingkreise

Leistung bei Wechselstrom

Dreiphasenwechselstrom

Elektrotechnisches Grundlagenlabor f. Nachhaltige Ingenieurwissenschaften

(SS, experimentelle Übungen, 1 SWS)

Kennlinien elektrischer Bauelemente

Schwingkreise

Hon.-Prof. Dr.-Ing. S. Pöhler / Prof. Dr.-Ing. P. Werle**Komponenten der Hochspannungsübertragung und deren Isolierstoffe
(SS, Vorlesung 3 SWS, Studienleistung 1 SWS)**

Energiewirtschaftliche Einführung
Hochspannungsschalttechnik
Hochspannungsübertragungstechnik
Fernübertragung elektrischer Energie
Ursachen und Auswirkungen von Instabilitäten im Übertragungsnetz
Flexible AC Transmission Systems (FACTS)
Hochspannungsgleichstrom-Übertragung
Übertragungssysteme für on- und offshore Anwendungen
Physikalische Grundlagen der Isolierstoffe
Elektrisches und dielektrisches Verhalten von Isolierstoffsystemen
Herstellung, Kenngrößen, Anwendungen, Vor- und Nachteile diverser Isolierstoffe
Technisch relevante gasförmige, flüssige, und feste Isolierstoffe
Mischdielektrika

Hon.-Prof. Dr.-Ing. M. Sturm**Systeme zur zukünftigen Energieoptimierung und -vermarktung
(SS, Vorlesung 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

4 Neue Mitarbeiter

M.Sc. Felix Graff

Im Jahr 2017 begann ich mein Studium der Elektrotechnik an der Jade Hochschule in Wilhelmshaven, welches ich im Jahr 2021 abschloss. Anschließend führte ich meine akademische Ausbildung mit dem Masterstudium der Elektrotechnik mit der Vertiefungsrichtung "Energie und Mobilität" an der Leibniz Universität Hannover fort. Im Rahmen des Masterstudiums verfasste ich meine Masterarbeit mit dem Titel "Optimierung einer modularen Superkaskodenschaltung hinsichtlich der Spannungsflankensteilheit" am Schering Institut. Das Studium schloss ich im Oktober 2023 erfolgreich ab. Seit Februar 2024 bin ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Schering-Institut der Leibniz Universität Hannover tätig. Derzeit befasse ich mich intensiv mit der berührungslosen Messung von Impulsspannungen für Stoßspannungsprüfungen. Die Relevanz dieser Forschung liegt in der zentralen Bedeutung von Stoßspannungsprüfungen für die Bewertung der Isolationsfestigkeit elektrischer Betriebsmittel. Es ist zu erwarten, dass die kontaktlose Messung die Kalibrierung von Prüfeinrichtungen sowie die Durchführung mobiler Messungen vereinfacht. Die kontaktlose Messung ermöglicht zudem eine Miniaturisierung der Messtechnik, sodass die Prüfung größerer Betriebsmittel in bestehenden Prüfeinrichtungen vereinfacht werden kann. Darüber hinaus ist mit einer Reduktion der Kosten zu rechnen.



M.Sc. Meike Jopert



Im Jahr 2017 habe ich mein Bachelorstudium an der Leibniz Universität Hannover (LUH) im Bereich Elektrotechnik und Informationstechnik begonnen und schnell meine Begeisterung für den Fachbereich der elektrischen Energietechnik entdeckt. Nach meinem Bachelorabschluss habe ich mich entschieden den Fachbereich zu wechseln und habe daraufhin im Jahr 2021 mein Double Degree Masterstudium an der LUH in Kooperation mit der Technischen Universität Lappeenranta (LUT) begonnen, an der ich das erste Jahr verbracht habe.

Durch hilfswissenschaftliche Tätigkeiten sowie meine Bachelorarbeit bin ich früh in Kontakt mit dem IfES gekommen und habe mich daraufhin für eine Masterarbeit am Schering-Institut zum Thema „Influence of the Initial Condition of the Insulation Liquid on the Formation of Fault Gases due to Electrical Transformer Faults“ entschieden.

Nach Abschluss meines Masterstudiums im Dezember 2023 sowie meines zweiten Bachelorstudiums in Wirtschaftsingenieurwesen im Februar 2024, habe ich zum Mai 2024 meine Stelle als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Schering-Institut angetreten.

In den nächsten Jahren werde ich mich voraussichtlich mit der Untersuchung von Isolierflüssigkeiten und -papier für Leistungstransformatoren beschäftigen. Dabei sind vor allem das Alterungsverhalten beider Materialien sowie die Identifikation von Korrelationen zwischen dielektrischen Parametern und potentiellen Alterungsprodukten als auch die Untersuchung von Möglichkeiten zur Aufbereitung der Isoliermaterialien zentrale Punkte meiner Arbeit. Zusätzlich dazu ist im Hinblick auf verschiedenste Isolierflüssigkeiten insbesondere die Entgasung zur Verbesserung der Isoliereigenschaften als auch zur Identifikation möglicher Fehler in der Komponente von besonderem Interesse, weshalb auch dies Teil meines zukünftigen Forschungsbereichs wird.

M.Sc. Christian Kohlsaat

Im Jahr 2017 begann ich mein Bachelorstudium im Bereich der Elektrotechnik an der Leibniz Universität Hannover, wobei ich schon mit der Wahl des Themas meiner Bachelorarbeit den ersten Berührungspunkt mit dem Schering-Institut hatte. Nach meinem Bachelorabschluss im Jahr 2021 habe ich ebenfalls mein Masterstudium an der Leibniz Universität Hannover absolviert, wobei ich während des Studiums aufgrund von hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten sowie aufgrund meiner Seminararbeit vermehrt Kontakt zum Schering-Institut hatte. Schlussendlich habe ich hier am Institut auch meine Masterarbeit mit dem Thema „Aufbau und Inbetriebnahme eines optimierten elektroakustischen Messsystems (PEA) zur Bestimmung der Raumladungsverteilung in polymeren Isolierstoffen“ geschrieben.



Seit August 2024 bin ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Schering-Institut tätig. Mein Forschungsthema beschäftigt sich mit der Fehlererkennung und -untersuchung sowie der Zustandsanalyse und -bewertung von Hochspannungs-Energieversorgungskabeln. Dabei wird mithilfe der Frequency-Domain-Analyse (FDA) das Systemverhalten des Kabels im Frequenzbereich untersucht. Das Systemverhalten bzw. die Frequenzantwort des Systems, welche mittels einer Frequenzgangmessung ermittelt werden kann, gibt basierend auf der Leitungstheorie Aufschluss über Änderungen der elektrischen Kabelparameter. Mithilfe dieser Parameteränderungen können Fehler entdeckt, klassifiziert sowie geortet oder auch eine Beurteilung des Kabelzustandes durchgeführt werden. Ziel meiner Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Systems zur Analyse und Lokalisierung von Fehlern in Hochspannungs-Energieversorgungskabeln mittels der FDA-Methode.

5 Promotionen

Condition Monitoring of Power Transformers using Frequency Response Analysis and Partial Discharge Evaluation

Dr.-Ing. Sahand Seifi

The rapid increase in electricity demand, driven by population growth, the emergence of new electrical devices in daily life, advancements in electromobility, and the consideration of electricity as an alternative solution for home heating, has necessitated the swift expansion of electrical networks worldwide. Additionally, international agreements on carbon neutrality, the reduction of greenhouse gases, and energy independence are steering the future towards renewable energy as the primary source, leading to significant investments in this sector. These investments and the associated network costs can be mitigated by enhancing the reliability and lifespan of the network equipment. Therefore, the reliability and availability of transformers, which are among the most expensive and complex components of the power system, are of paramount importance. Any serious damage or unplanned outage of transformers can result in substantial expenses due to interruptions in the continuous transmission of electricity and repair costs. Therefore, it is crucial to detect transformer failures at early stages to avoid operational costs and minimize repair times.

Condition assessment is a method employed to enhance the reliability and lifespan of transformers, thereby reducing the likelihood of sudden equipment outages and facilitating the planning for troubleshooting or overhauling to extend their operational life. Two common techniques used to assess the condition of transformers windings are Frequency Response Analysis (FRA) and Partial Discharge (PD) measurements.

FRA has been frequently utilized to detect mechanical failures in transformer windings, such as winding movement and deformation, as well as inter-turn and turn-to-ground faults. In this work, the Sweep Reflection Coefficient (SRC) is proposed as an alternative to FRA for detecting internal faults in transformer windings, including turn-to-ground faults, inter-turn faults, and mechanical failures.

To measure the reflection coefficient of a transformer, the measuring device is connected to one end of the transformer winding using a coaxial cable, as illustrated in Figure 1. The device calculates the reflection coefficient by measuring the incident and reflected voltage signals. Since the signals are measured at the terminals of the measuring device before the coaxial cable, the calculated reflection coefficient corresponds to Γ_{in} . Calibration of the measuring system prior to measurement provides the values of Z_0 and γl . Consequently, Z_{in} can be calculated from Γ_{in} and Z_0 using the following relationship:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}}$$

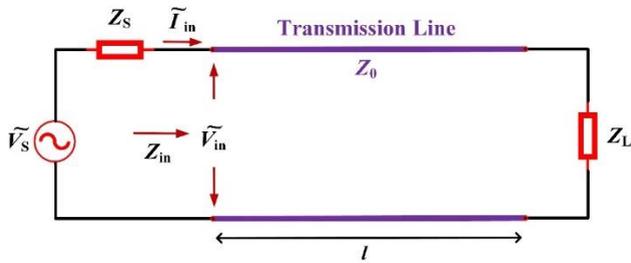


Figure 1: Transmission line with length l whose one end is connected to a source and another end to a load Z_L .

The load impedance Z_L can be expressed as:

$$Z_L = Z_0 \frac{Z_{in} - Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 - Z_{in} \tanh \gamma l}$$

Consequently, the reflection coefficient Γ_L , SRC of the transformer winding, can be determined as:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$



Figure 2: Two test objects; left: Model winding, right: 3-phase distribution transformer

Since Z_L is a function of frequency, Γ_L is also a function of frequency. Given that the SRC is calculated from the impedance function of the winding, it can be assumed that SRC represents a new form of the frequency response of transformers. This new representation may offer enhanced capability to distinguish and localize various internal faults within transformers.

These capabilities have been evaluated using two test objects, as shown in Figure 2. The left figure displays a model winding with 12 accessible terminals, while the right figure presents the active part of a 35/0.4 kV, 100 kVA, Yzn5 3-phase distribution transformer with a short circuit impedance of 5 %. To simulate internal winding faults, resistances and capacitances of varying values are applied between different turns as well as turn-to-ground. Figure 3 illustrates the changes in SRC traces for resistive turn-to-ground faults with four different values of 0 Ω , 10 Ω , 1 k Ω , and 20 k Ω , at 25 % of the winding length of the distribution transformer.

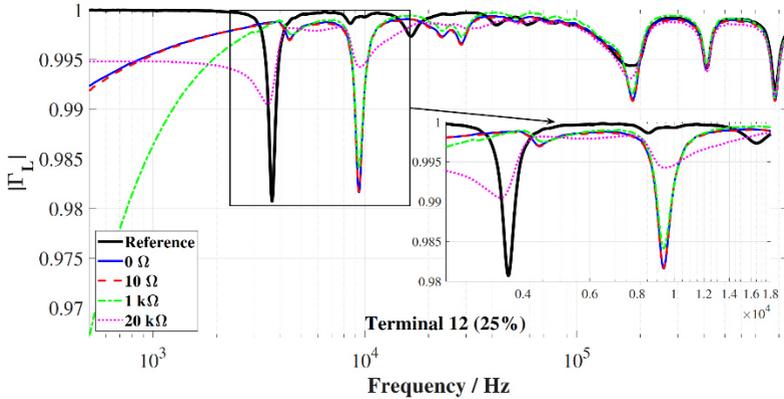


Figure 3: Measurement results at H2 (HV terminal) corresponding to resistive turn-to-ground faults at 25 % of the length of winding of in the distribution transformer

The investigation revealed that this method offers a reliable means to detect and differentiate between various types of faults examined in this study. The effect of a resistive turn-to-ground fault on the SRC trace is a deviation from 1 pu in the very low-frequency range. The shift of the first resonance of the SRC signature to a lower frequency range is characteristic of a capacitive turn-to-ground fault, whereas the first resonance frequency shifts to a higher frequency range for a resistive inter-turn fault. For a capacitive inter-turn fault, the shift in the first resonance frequency is nearly zero, but there are noticeable differences in the middle-frequency range. By following this sequence, it is possible to easily discriminate between different types of faults.

The comparison between SRC traces and FRA traces confirms that both measurements exhibit similar sensitivity in detecting various types of faults and their severity. Both methods can effectively detect resistive faults up to 20 k Ω , while capacitive fault of 22 pF is at the sensitivity limit for both methods in the two test objects investigated. However, SRC traces offer distinct advantages over FRA traces by distinguishing between different types of faults and showing relationship between the fault location and the differences between healthy and faulty traces.

In this work, the SRC measurement has also been utilized to localize internal faults within transformer windings. The general concept of localization involves measuring from two terminals of the winding and identifying an appropriate feature that has a monotonic relationship with the distance of the fault from these terminals. Therefore, a two-step approach is proposed, which at the first step determines the type of fault, and at the second step employs the

appropriate localization methods, introduced for different types of faults based on the appropriate feature for the localization.

The *input resistance method* has been suggested for localizing internal faults with a resistive turn-to-ground component. Since a capacitive turn-to-ground fault shifts the first resonance frequency to lower frequency ranges linearly with the distance of the fault from the measuring terminal, the *Shift of First Resonance Frequency (SFR)* method is recommended for this type of internal fault or any fault with a capacitive turn-to-ground component without a resistive component. For inter-turn faults, the *Normalized Euclidean Distance (NED)* method has been utilized. Figure 4 presents a flowchart that automatically determines the type of fault and assigns the corresponding localization method.

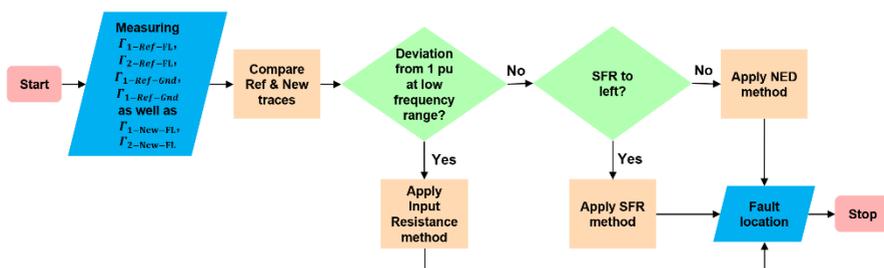


Figure 4: Flowchart of winding fault localization algorithm

To verify the performance of the proposed methods, various types of resistive, capacitive, and hybrid inter-turn and turn-to-ground faults as well as several complex faults simulating winding deformation, were applied at different points along the model winding and the distribution transformer winding. The results reveal localization errors of less than 5 % for any faults with a resistive turn-to-ground component. For all other faults, the localization errors are less than 15 %. Therefore, based on measurements from the two test objects, the performance of SRC in detecting internal faults is comparable to that of typical FRA measurements. However, the ability of SRC to differentiate between various types of internal faults, as well as its capability to fault localization with high accuracy, makes it a more suitable solution for internal fault analysis.

Partial Discharges (PDs) are a significant cause of insulation degradation in power transformers. These discharges occur within a portion of the insulating system, leading to gradual deterioration and eventually resulting in insulation failure. The electrical method of PD measurement offers the advantage of calibrating the measurement to determine the apparent charge of the PD, and it allows for the analysis of the chronological trend of PDs to evaluate their progression. While this trend is very useful for assessing the condition of the transformer, it is not applicable in several scenarios, such as with new or repaired transformers, or those experiencing a sudden onset of PDs. Therefore, understanding the real charge of the PD is crucial. Moreover, it can help establish a more accurate threshold value for the PD acceptance test of the transformer in the relevant standard. Additionally, knowing the real charge of PDs can provide valuable insights into the severity of the problem, aiding in the decision-making process. Unfortunately, PD calibration according to IEC 60270 only eliminates the effect of the measuring system and produces comparable measurements across different systems. This process is known as

"apparent charge calibration" or "measuring system normalization". In complex power system equipment like power transformers, this calibration is only valid for PD sources near the calibration point. As the distance between the PD location and the calibration point increases, the discrepancy between the apparent charge and the real charge of the PD becomes more pronounced. Consequently, the apparent charge is influenced by the location of the PD source.

In the thesis, the localization of PD using the electrical method was enhanced by investigating the appropriate bandwidth, applying effective denoising techniques, and introducing new indices. The theoretical foundation of a new method to estimate the original charge of PDs in transformers has been established and validated through various measurements. To further study PD localization, six different real PD sources were considered. The reconstructed signals of real PDs revealed a high noise level. Therefore, a moving average filter was employed before localization, significantly improving the quality of the signals. In the initial step, comparisons of pairs of reconstructed signals to localize PDs were performed using four common indices found in the literature namely, *Euclidean Distance (ED)*, *Correlation Coefficient (CC)*, *Standard Deviation (σ_e)*, and *Root Mean Square Error (RMSE)*. The best localization result was achieved with the RMSE index, with an error of less than 25 %.

To improve localization accuracy, these indices were modified by incorporating a damping factor (D) and combining them, leading to the proposal of several new indices. The performance of these new indices was scrutinized by studying the effect of various damping factors and analyzing the localization errors for reconstructed signals across different frequency ranges. Ultimately, new index (E), shown in the following, were proposed for PD localization, which demonstrated errors of less than 7 %.

$$E = (1 - CC) \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta(i)}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N X(i)Y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [X(i)]^2 \sum_{i=1}^N [Y(i)]^2}}$$

$$\Delta(i) = \left(\frac{|X(i)| - |Y(i)|}{\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N |X(i)| \sum_{i=1}^N |Y(i)|}} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{D}{N} i\right)$$

where $X(i)$ and $Y(i)$ are reconstructed PD signals, and N is the number of samples.

Furthermore, the charge of PDs in transformer windings was analyzed. Initial measurements on a real distribution transformer revealed that the apparent charge measured at the terminal of the transformer could be up to 50 times smaller than the original charge value in the winding for some points along the winding, complicating the assessment of PD in the transformer winding. To address this challenge, a new method was introduced to estimate the original charge of the PD based on reconstructed current signals. Seven different methods, four in the time domain and three in the frequency domain, were introduced and investigated to extract the PD charge value from its reconstructed current signal. The weighted averaging method was also suggested

to enhance the accuracy of the estimation. The performance of these methods was then scrutinized by applying them to six different types of PD sources.

This study reveals that the best time domain method can estimate the original PD charge within a range of 0.26 to 1.77 times its real value, as shown in Figure 5. It indicates that, the most of overestimations take place for PDs at two ends of the winding especially at terminal 15, in which the highest one is related to the corona discharge in the air with the value of 1.77 pu. The lowest underestimation is 0.26 pu associated with surface discharge in oil at terminal 3 as well as internal discharges at terminal 5. These values mean a PD with the original charge of 100 pC will be estimated between 26 pC and 177 pC. In other words, if a charge has been estimated 100 pC by this method, its original charge value is between 56 and 384 pC, whereas using the IEC method, it could be up to 5000 pC for this transformer. In contrast to time domain, the best method in the frequency domain estimates the charge within a range of 0.38 to 3.6 pu. It should be noted that the relatively high nominal voltage of the test transformer, along with its thin conductors, results in a winding with high damping ($R_{dc} = 131 \Omega$) and large inductance, making this transformer a challenging case study for investigating PD propagation. Moreover, in real applications, the measurement and charge estimation can be repeated for multiple sets of PD signals. The average value of these repeated measurements, which is more reliable and accurate than a single measurement, can then be considered the charge of the original PD. In this way, an accuracy higher than the values mentioned in this study is achievable.

By improving two well-established methods for transformer condition monitoring and introducing new capabilities, this work contributes to extending the lifespan and enhancing the reliability of power transformers. These advancements help reduce the operational costs of the electrical network and improve the overall quality of the energy supply.

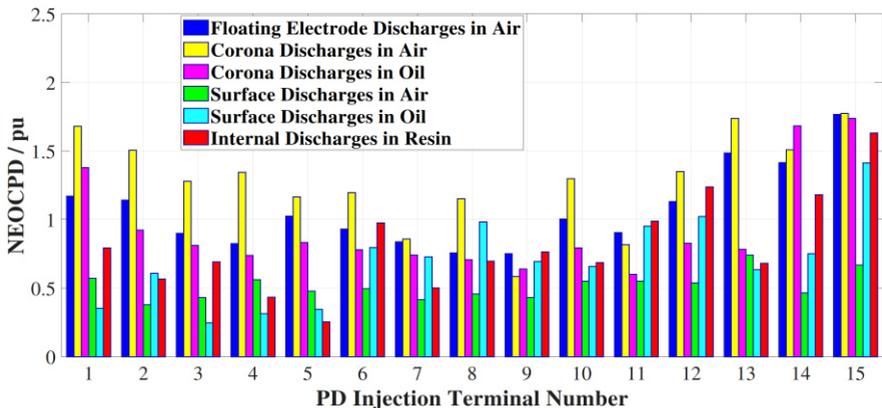


Figure 5: Normalized estimated original charge of PD values for different types of PD and different PD injections terminals in the frequency range 10-1000 kHz

6 Forschungsarbeiten

CIGRÉ WG A2.68 Failure Survey of Lower Voltage GSUs

M.Sc. Meike Jopert

Im Zuge der Energiewende und der damit stetig zunehmenden dezentralen Energieversorgung kommt den Niederspannungsmaschinentransformatoren eine immer größer werdende Bedeutung zu. Der steigende Energiebedarf, bedingt durch das Bevölkerungswachstum sowie den E-Mobilitätssektor und E-Wärme, führt zu einem deutlichen Ausbau des Energieerzeugungssektors. Bedingt durch den Klimawandel ist ein zunehmender Anteil erneuerbarer Energien von entscheidender Bedeutung, um den stetig steigenden CO₂ Emissionen entgegenzuwirken, so dass weltweit mittlerweile etwa 1 Million neue Transformatoren für Wind- und Solarenergie installiert wurden. Das verglichen mit konventionellen Maschinentransformatoren deutlich abweichende Lastprofil durch Lastspitzen und -täler, je nach Tageszeit und Witterungsbedingungen, sowie das Fehlen von Statistiken zu Ausfällen und Lebensdauer führt zur Frage nach der Verlässlichkeit solcher Niederspannungsmaschinentransformatoren in Wind- und Photovoltaikanlagen. Zudem lassen vermehrte Meldungen über Ausfälle dieser Transformatoren auf eine verminderte Zuverlässigkeit gegenüber den herkömmlichen Transformatoren mit konstantem Lastprofil schließen. Vor diesem Hintergrund hat das CIGRÉ Study Committee A2 die Arbeitsgruppe WG A2.68 zum Thema der Ausfalluntersuchung von Niederspannungs-GSUs (Failure Survey of Lower Voltage GSUs) gegründet, in welcher sich auch das Schering-Institut engagiert. Ins Leben gerufen wurde diese Arbeitsgruppe im ersten Quartal des Jahres 2023, vorerst für die Dauer von drei bis vier Jahren. Ihre 32 Mitglieder aus 18 unterschiedlichen Ländern, verteilt über den ganzen Globus, kommen aus den Sektoren Dienstleistung / Beratung, Versorgung / Betreiber, Hersteller sowie der Wissenschaft und stellen somit ein vielfältiges Team mit umfangreichem Know-How in unterschiedlichsten Bereich dar. Ziel dieser Arbeitsgruppe ist eine weltweite Studie zur Zuverlässigkeit sowie den Ausfallraten und der Identifikation von Fehlerquellen von Niederspannungsmaschinentransformatoren in Wind- und Solarparks. Dadurch sollen eine Vielzahl relevanter Daten aus der Praxis gesammelt und Statistiken erstellt werden, um künftig Anwendungsempfehlungen geben zu können und hohe Kosten durch Reparaturen oder den Ersatz von nicht mehr funktionsfähigen Komponenten, insbesondere in Bezug auf Offshore-Systeme, zu vermeiden. Über den Link [A2.cigré.org](https://www.cigré.org) gelangen Sie zu der extra für diese Arbeitsgruppe eingerichteten Internetseite.

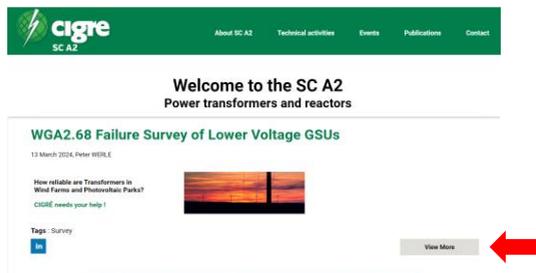


Bild 1: Internetseite der CIGRÉ WG A2.68

Über „View More“ gelangen Sie dann zu einigen einleitenden Worten zur Entstehung und den Zielen der WG A2.68.



WGA2.68 Failure Survey of Lower Voltage GSUs

13 March 2024, Peter WERLE

Failure Survey of LV-GSUs installed in Wind Farms and Photovoltaic Parks Your contribution is appreciated !

Foreword: This study deals exclusively with Lower Voltage Generator Step-Up Transformers (LV-GSUs) which are used for transforming the low voltage generated in wind and photovoltaic power generation systems to the medium voltage level. Therefore these LV-GSUs represent grid nodes that provide the power flow from the renewable power plant into the medium-voltage level system. These transformers are defined as LV-GSUs in this study, as there are different names for this type of transformers in different regions around the world, such as small GSUs, inverter transformers, pad mount transformers (PMTs) etc. Thus, other transformers, such as auxiliary or so called collector transformers (collecting power from several LV-GSUs and transferring the voltage from the medium voltage level to the high voltage system) are not considered in this study, but only the LV-GSUs as defined above.

As a result of the energy transition thousands of LV-GSU-transformers have been installed worldwide in the last decade in renewable energy generation plants such as wind farms and photovoltaic parks. These LV-GSUs differ from conventional generator step-up transformers in large power plants, because they have significantly lower power ratings and lower operating voltages, making these transformers incorrectly appear similar to standard distribution transformers. Moreover, usually these LV-GSUs are subjected to fluctuating loads and high harmonics from inverter-systems, in contrast to classical generator sets with high load factor and quasi-sinusoidal waveforms. Therefore the design and insulating system of these LV-GSUs can differ significantly from those of the conventional GSUs. These LV-GSUs can be designed as either liquid type, or dry type transformers with epoxy resin insulation. In the case of liquid insulated systems, alternative liquids like natural or synthetic esters in combination with thermally upgraded or aramid paper are often used. Failures in such units result in power interruption, and in the special case of offshore systems the installation, repair or replacement costs could be extremely high.

In the past several failures have been reported, leading to an assumption that these transformers are less reliable than the conventional transformers. A study is therefore warranted for these LV-GSUs in order to better estimate the failure rate, reliability and failure root causes. This will allow recommendation for future specifications, certain design parameters or improved testing and may trigger additional working groups if specific failure root causes are identified as more prevalent.

Therefore CIGRE working group A2.68 kindly requests operators and owners of onshore and offshore wind and photovoltaic parks to share their data anonymously for LV-GSU transformer failures in such applications. It would also be helpful to receive data from wind/solar power generation plants in which no transformer fault has occurred, so that comprehensive statistics can be compiled. This can be done easily by filling out the questionnaire (Excel-File) and sending it back via e-mail to A2.survey@cigre.org.

Please help CIGRE in collecting relevant data in order to give recommendations for future applications – the Excel-File (which does not contain any macros) is available in different languages and can be simply filled out, even for larger parks. After collecting the data the Working Group will analyse the data anonymously and prepare a corresponding Technical Brochure, which will be available from CIGRE.

DISCLAIMER: By submitting data, you agree to its anonymized and aggregated evaluation and publication!

[Link to Excel Sheet in English](#)

[Link to Excel Sheet in Spanish](#)

[Link to Excel Sheet in French](#)

[Link to Excel Sheet in Chinese](#)



Bild 2: Übersicht über die Motivation und Ziele der WG A2.68

Des Weiteren findet sich am Ende der Seite ein Link zu einer Exceltabelle, welche in verschiedensten Sprachen verfügbar ist, in der die Daten von Solar- und Windparktransformatoren in einfachster Weise erfasst werden können.

In dieser Tabelle sind, neben ein paar grundsätzlichen Informationen beispielsweise über die Spannung, Leistung sowie die Art der Isolierung, insbesondere Informationen über die Gründe, weshalb der Transformator außer Betrieb genommen wurde, den Hauptausfallort, die Hauptursache pro Ausfall sowie die durchschnittlich Anzahl an Betriebsjahren des Transformators vor Eintritt des Fehlers von Interesse. Dank der simplen Gestaltung der Tabelle

müssen lediglich Zahlen eingetragen werden, was das Einpflegen von Daten für Betreiber von Wind- und Solarparks besonders einfach macht. Auf diese Weise konnten bereits über 3000 Transformatorendaten gesammelt werden. Für verlässliche Statistiken werden allerdings weitere Daten gebraucht. Deshalb möchten wir Sie bitten: Wirken Sie aktiv bei der Verbesserung der Zuverlässigkeit von Transformaten mit! Damit können wir gemeinsam nicht nur die Versorgungssicherheit verbessern, sondern auch Empfehlungen für unterschiedlichste Anwendungsfälle geben und somit ökonomisch und ökologisch nachhaltig arbeiten und damit langfristig einen Beitrag zu einer klimafreundlicheren und sicheren Energieversorgung leisten.

CONTACT INFORMATION									
Name of the company									
Name of the contact person filling out the questionnaire									
Email address of the contact person									
Internal Identifier Number (IIN)									
		Wind- or PV park	Region	Type	Altitude	Regional temperature climate	HV [kV]	Vector group	Total number of GIS in this park
Information of park no. 1									
Transformer Group									
		Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8
Number of similar transformers put into service at the start of the reference period									
Reference Period: Number of years of service (or observation)									
Power (MVA)									
LV [kV]									
Transformer insulation									
Winding insulation type									
Cooling type									
Power inverter fed									
Location of Transformer									
Total number of transformer failures in this group									
Reason why the transformer was put out of service (number per reason)	Transformer was tripped by a protection system								
	Transformer was put out of service due high gas concentration								
	Transformer was put out of service due to a necessary repair								
	Transformer was put out of service due to oil quality								
	Other reasons (please use comments) or Unknown								
Main Failure Location (number per location)	Windings								
	Bushings, Cable Terminations								
	Magnetic core								
	Safety devices malfunction (oil level, pressure, temp. sensor, etc.)								
	Tank, Conservator, Piping, Rubber Bag, Gaskets, Housing								
	Cooling System								
	Tap Changer								
Dominant Cause per Failure (number per cause)	Others (please use comments) or Unknown								
	Problems with Transport, Handling or Storage								
	Insulating system ageing								
	Overload, Load profile, fluctuating load								
	Overvoltage, Lightning								
	Overheating								
	External short-circuit								
	Vibrations and shocks								
	Design or manufacturing issues								
	Leakage								
Average number of years the transformers failed were in service	Partial Discharges								
	Circulating currents								
	Harmonics								
	Others not listed above (please use comments) or Unknown								
	Comments (i.e. information on gas concentrations, moisture content, etc.)								

Bild 3: Exceltabelle zur Datenerfassung der Windparktransformatoren

Feasibility of Partial Discharge Detection in Power Transformers Using Special Compact UHF PD Sensors

M.Sc. Behnam Balali

This report discusses the integration of partial discharge (PD) detection techniques into commercially available power transformer monitoring systems. Detecting PD in transformers can help to prevent large failures and collateral damages. By combining PD detection with other monitoring techniques, such as oil condition analysis, a multidimensional monitoring system can offer a more comprehensive evaluation of the transformer condition.

In this study, two compact UHF PD detectors, ANT-1 and ANT-2, were selected due to their small size and suitability for PD measurements as show in Figure 1. ANT-1 operates in the range of 824-2100 MHz, while ANT-2 works in the range of 400-410 MHz. Although these detectors are primarily designed for other high frequency applications, they were tested for PD detection inside transformer tanks. The sensors were integrated into metal tubes and placed inside the transformers' oil valves.

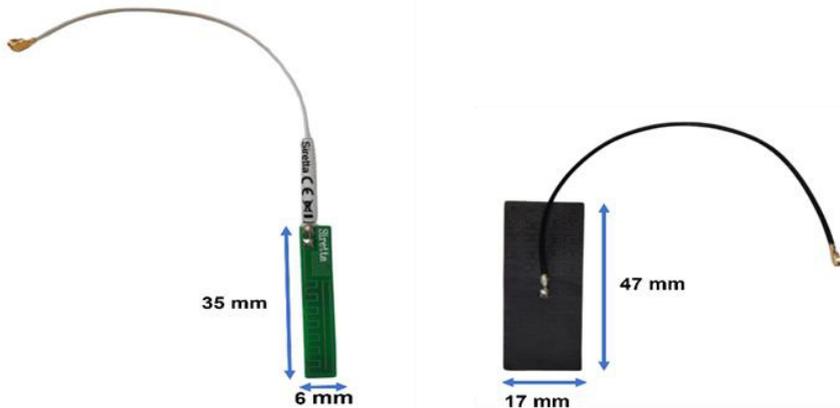


Figure 1: ANT-1 (left) and ANT-2 (right) as compact UHF PD detectors

Various PD fault models including internal discharge, surface discharge, and corona discharge, were used inside the transformer tank to assess the performance of the UHF PD sensors. These models simulate common PD types in transformers (see Figure 2). The PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) patterns captured by the ANT-1 and ANT-2 sensors were compared with patterns obtained from conventional electrical PD measurements (IEC 60270) and a commercially available UHF sensor (UVS 610) using the UHF PD measurement setup as shown in Figure 3.



Figure 2: PD models for corona discharge (left), internal discharge (middle), and surface discharge (right)

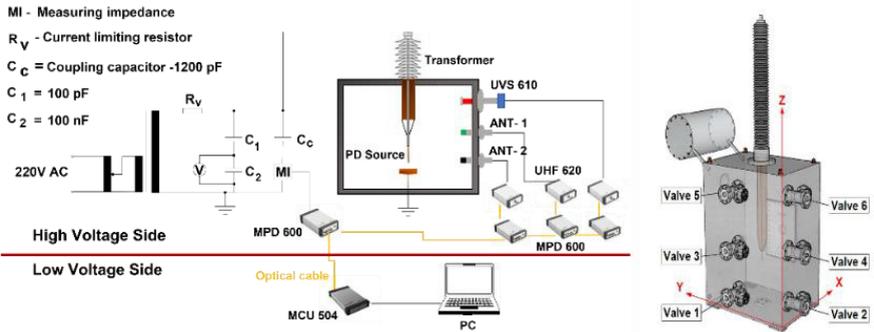


Figure 3: UHF PD measurement setup (left) and transformer tank model (right)

Results showed that ANT-1 demonstrated strong correlation with the IEC method for the measured PD types, while ANT-2 had difficulty detecting internal discharges and no detection in corona discharge. ANT-1 proved more versatile, capturing signals across all PD models, but ANT-2 showed weaknesses in specific scenarios (Figure 4).

In conclusion, ANT-1 performed well across various PD sources and demonstrated a strong correlation with IEC standard measurements. On the other hand, despite ANT-2's good performance in surface discharge detection, it was less effective in detecting internal and corona discharges. Future research should focus on refining detection techniques in the optimal frequency range for PD detection using compact UHF PD detectors.

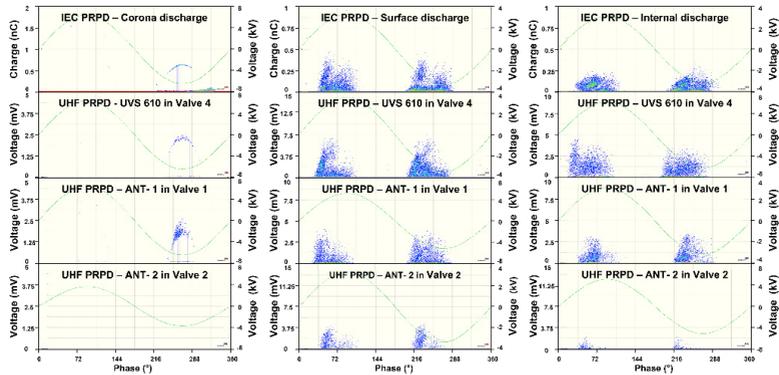


Figure 4: Comparison between IEC PRPD pattern and UHF PRPD patterns captured by UVS 610 and ANT- 1 and ANT-2 for corona (left). surface (middle), and internal discharge (right)

Enhanced Sensitivity and Frequency Optimization of UHF Sensors for Partial Discharge Detection in Power Transformers

M.Sc. Behnam Balali

This study investigates the electromagnetic (EM) waves emitted by PD in the ultra-high frequency (UHF) range using a specialized UHF sensor for power transformers. Due to the complex internal structure of transformers, UHF-based PD detection faces challenges related to signal propagation and interference. This research addresses these challenges by assessing the sensitivity of a compact UHF PD sensor, ANT-1 (see also other contribution in the annual report), and focusing on optimizing detection accuracy. Additionally, it proposes a method for selecting an optimal frequency range to maximize the signal-to-noise ratio through frequency spectrum analysis. The approach is validated by comparing phase-resolved partial discharge (PRPD) patterns obtained from the IEC 60270 method and a commercial sensor with those from ANT-1.

ANT-1 is a compact dipole PCB antenna designed for PD detection in the 2G/3G/4G/5G frequency bands. The sensor was installed in a transformer tank model; thus, the arrangement allows an evaluation concerning the detection sensitivity based on insertion depth within the transformer tank. In the setup shown in Figure 1, the UHF PD sensor ANT-1 was tested at three different insertion depths: 0 cm, 3 cm, and 6 cm. The impact of these depths on PD sensitivity was assessed through PRPD pattern analysis, as displayed in Figure 2.

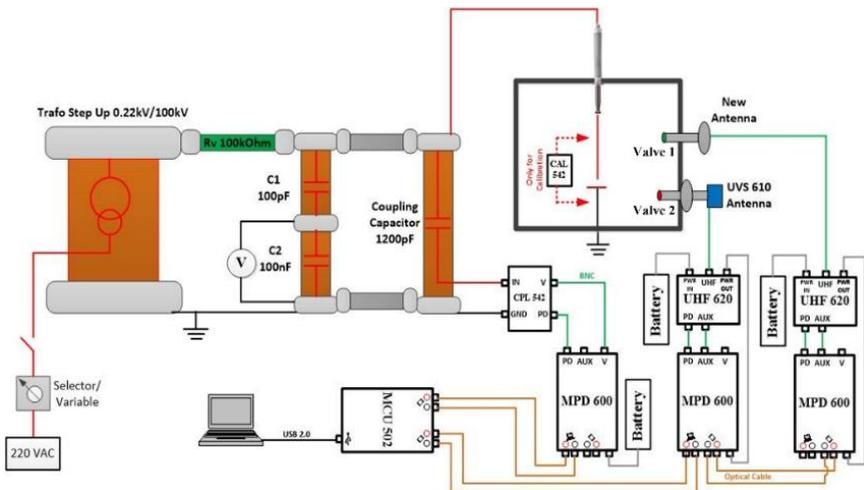


Figure 1: UHF PD measurement setup

Results showed that increasing the insertion depth enhanced the sensors' sensitivity, with significant improvements at 6 cm. As insertion depth increased, the PRPD patterns displayed better signal intensity, demonstrating a stronger correlation with IEC 60270-based PRPD patterns

for surface discharge. At greater depths, the sensor captured clearer PD signals due to reduced reflections from the tank walls.

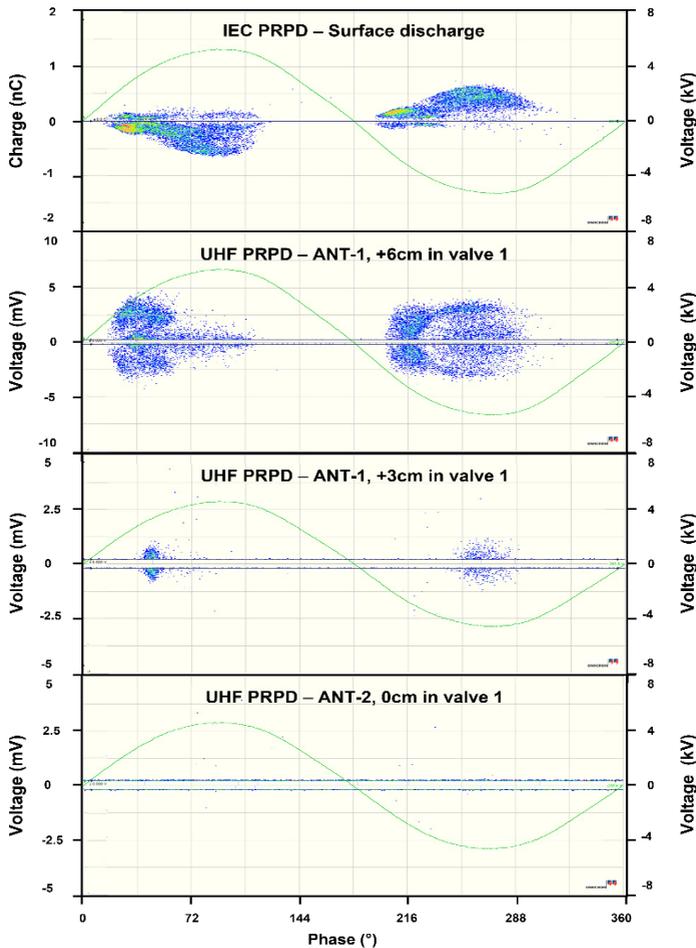


Figure 2: IEC PRPD pattern for surface discharge, and UHF PRPD pattern of the ANT-1 in valve 1 at different insertion depths

To determine the optimal PD detection frequency range, background noise frequency spectra were measured within the transformer tank across wide, medium, and narrow bandwidths as shown in Figures 3. Noise was most pronounced below 200 MHz and above 1 GHz suggesting an ideal PD detection range of 280 MHz to 480 MHz for minimizing interference. The PRPD pattern comparisons in Figure 4 further support these findings showing that a medium bandwidth centered at 440 MHz closely aligns with the patterns acquired according IEC 60270 method and enhances PD detection sensitivity for ANT-1.

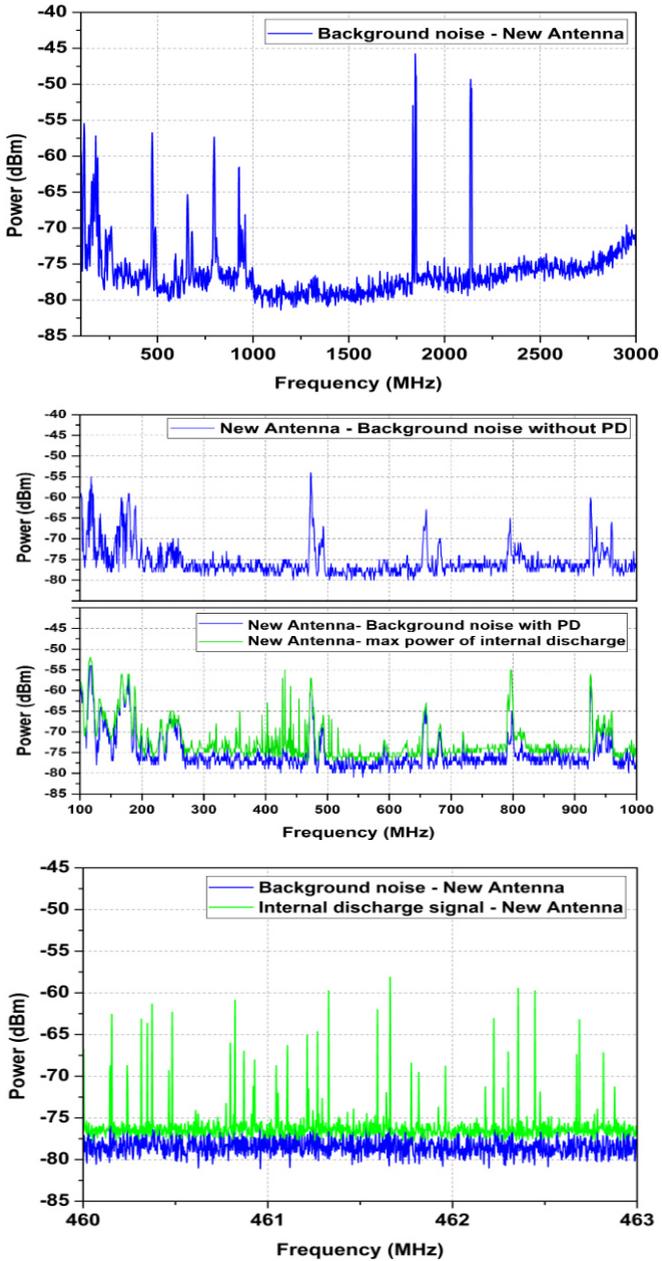


Figure 3: Frequency spectrum of internal discharge measured by ANT-1 in wide band (top), medium band (middle), and narrow band (bottom)

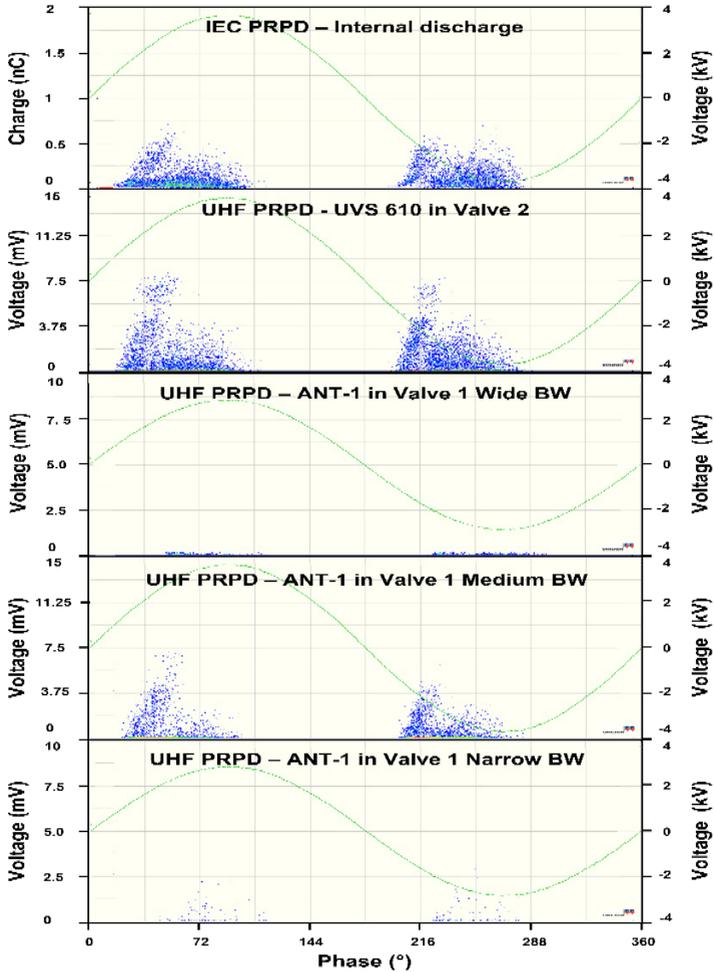


Figure 4: PRPD pattern for internal discharge from top to bottom: IEC method, UVS 610, the new antenna in wide, medium, and narrow bandwidth

Through PRPD pattern analysis and frequency spectrum evaluation, this study demonstrates that optimizing both, the insertion depth of ANT-1 and its detection frequency range can significantly improve partial discharge detection sensitivity for power transformers.

Zur Bewertung der Einflüsse auf die Durchschlagfestigkeit polymerer Isolierstoffe

M.Sc. Sebastian Braun, M.Sc. Henry Hirte

Die Hochschule Zittau/Görlitz und das Schering-Institut kooperieren aktuell im Bereich der Bestimmung der AC und DC Durchschlagfestigkeit von polymeren Plattenprüflingen. Der Fokus dieses Beitrags soll dabei gezielt auf den vorbereitenden Tätigkeiten, wie der Einbettung der Probekörper sowie dem Einfluss der Elektrodenanordnung liegen, da hier viele Feinheiten einer präzisen Ausführung bedürfen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Hierzu werden mehrere Versuchsreihen aus zwei verschiedenen Laboren mit verschiedenen Parametern in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt und evaluiert. Insgesamt wurden über 100 Untersuchungen durchgeführt und die in Bild 1 links gezeigten Parameter variiert. Beispielhaft sind in Bild 1 rechts zwei unterschiedliche Plattenelektroden gezeigt.

Parameter	Anzahl der Prüfungen	
Prüfmaterial	PE-HD	48
	PE300	39
	SIR	26
Elektrodenanordnung	EAP	67
	EAR	30
	EAK	16
Prüflingsdurchmesser	40 mm	83
	46 / 47 mm	12
	50 mm	8
Vergussmaterial	60 mm	10
	SF45	85
	RT625	8
Einbettungsflüssigkeit	SILGLAS	20
	S2 Äquivalent	40
	Diala S3	73

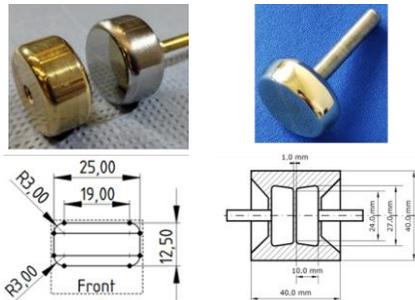


Bild 1: Gesamtübersicht der durchgeführten Untersuchungen und Parametervariationen (links), verwendete Elektroden in Zittau (Mitte), verwendete Elektroden in Hannover (rechts), Gesamtübersicht der durchgeführten Untersuchungen und Parametervariationen

Es werden die Auswirkungen verschiedener Versuchsparameter untersucht, darunter die Wahl des Probenmaterials und dessen Abmessungen, die Anordnung der Elektroden, das verwendete Vergussmaterial sowie die Einbettungsflüssigkeit. Zudem wird der Einfluss des Einbettungsmediums auf das Langzeitverhalten der Proben analysiert. Ein Lagerungstest in Mineralöl ergibt, dass das verwendete Silikon, in welches die Probekörper und Elektroden eingegossen werden, aufquillt. Dies führt zu einer Verschiebung der Elektrodenpositionen und beeinträchtigt die Spannungsfestigkeit der Anordnung. Dies konnte außerdem durch Bestimmung des Gewichtes des Probekörper vor und nach der Lagerung bestätigt werden. Da sich Mineralöl als ungeeignet für Langzeitversuche erwies, wurde an der Leibniz Universität Hannover eine synthetische Esterflüssigkeit als Alternative getestet. Ein Lagerungstest zeigte, dass das Silikon in dieser Flüssigkeit nur minimal aufquillt, mit einer Gewichtszunahme von lediglich 0,6 %. Des Weiteren werden Unterschiede in der Versuchstechnik beider Labore verglichen. Auf Basis einer FEM-Berechnung kann gezeigt werden, dass der Aufbau der Prüfgefäße keinen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse hat (siehe Bild 2 links). Hierbei wurde außerdem der Einfluss der Elektrodenradien auf die Feldverteilung im Randbereich untersucht (Bild 2, rechts).

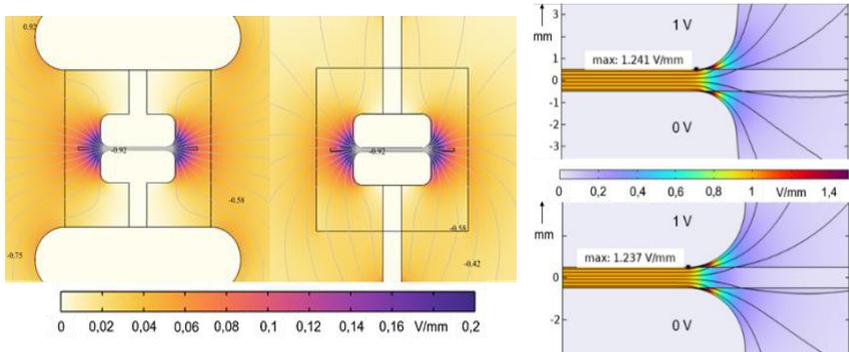


Bild 2: Ergebnisse der durchgeführten FEM-Berechnungen. Links: Unterschiedliche Feldverteilung im Prüfgefäß Hannover (links) und im Prüfgefäß Zittau (rechts). Rechts: Vergleich der unterschiedlichen Elektrodenformen, Hannover (oben), Zittau (unten)

Eine Korrelationsanalyse setzt die genannten Parameter und weitere Faktoren in Bezug zu verschiedenen Bewertungskriterien (siehe Bild 3, je stärker die Farbe dargestellt wird, desto stärker ist auch die Korrelation). Hierbei zeigt sich, dass die Auswahl des Prüfmaterials und der Elektrodenform den größten Einfluss auf die Überschlagsrate hat (Zeile 4 und 5, Spalte 3), was auch durch die Versuchsergebnisse bestätigt wird. Trotz vieler Parameter ist die Bewertungsmatrix zum Teil mit Abstand und ausschließlich in Bezug mit tatsächlichen physikalischen Zusammenhängen zu betrachten. Aufgrund einer teilweise geringen Datenmenge, sind nicht alle Berechnungen auch aussagekräftig. Dennoch konnten einige der tatsächlich beobachteten und zu erwartenden Effekte bei Durchschlagversuchen durch die Berechnung bestätigt werden.

	Signifikanz Korrelation		Signifikanz	Korrelation								
	Durchmesser	Prüfkörper										
Überschlagsrate	0,195	-0,274										
Abweichung von Median	0,837	0,044	0,466	0,156								
Durchschlagsrate Randfeld	0,367	-0,193	0,591	0,115	0,68	-0,089						
Auswahl Prüfmaterial	0,632	0,103	0,139	0,311	0,522	0,137	0	0,687				
Elektrodenanordnung	0,944	0,015	0,049	0,405	0,506	-0,143	0	0,739	0,004	0,569		
Auswahl Vergussmaterial	1	0	0,508	-0,142	0,29	-0,225	0,84	0,044	0,581	-0,119	0,188	0,278

Bild 3: Übersicht über die Versuchsparameter und ihre Korrelation mit verschiedenen Bewertungskriterien

Zusammengefasst zeigt der Beitrag, dass die Kombination aus PE 300 und Plattenelektroden die besten reproduzierbaren Ergebnisse liefert. Diese Ergebnisse sind besonders relevant für weiterführende Untersuchungen bei Gleichspannungsbelastung, wo höhere Durchschlagfeldstärken erwartet werden.

Efficient Voltage Endurance Evaluation of Polymeric Insulating Materials: A Test Setup for Parallel Electrical and Thermal Ageing of Multiple Test Specimens

M.Sc. Sebastian Braun, M.Sc. Henry Hirte

This paper describes the design, construction and commissioning of a test set-up for determining the voltage endurance of polymeric insulation materials at alternating voltage at varying temperatures. The test set-up shown allows five specimens to be aged simultaneously at voltages up to 100 kV and temperatures up to 100 °C. Selective separation of the failed specimen is achieved by disconnectors, which operate on the principle of a fuse. Two different options (grounded measuring impedance and capacitive voltage divider) are investigated and evaluated to detect the breakdown of a sample. The time to breakdown is recorded by a self-built and designed detection unit. The analyzed signal is also used to control a transmitter module or microprocessor, which stores and transmits the time to failure and the corresponding sample number. Figure 1 shows the overall schematic design and provides an illustration of the test set up in the laboratory. The system is equipped with the usual safety devices. After the power supply, the actual test vessels (2), containing the specimens, follow a series resistor and the fuse vessels (1). The measuring impedances (3) for detecting a breakdown are connected to the test vessels on the grounding side. These are connected to the breakdown detection unit located outside the measuring cell. As shown in Figure 1, a total of five of these structures are connected in parallel.

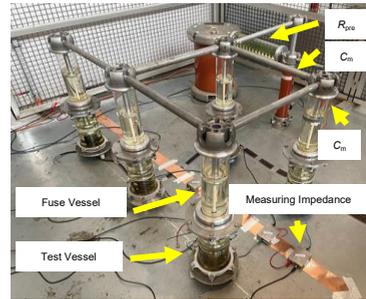
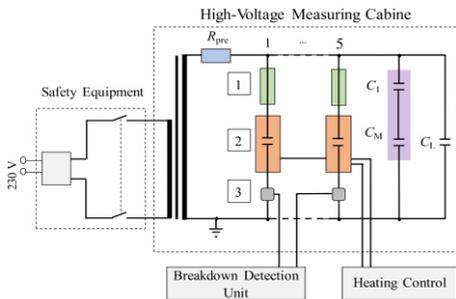


Figure 1: Schematic structure of the test setup (left) and construction of the test setup (right) in the laboratory

The heatable test vessels are connected to a temperature control unit. A temperature sensor is attached to each of the test vessels. The applied test voltage is measured by a capacitive voltage divider connected in parallel with the test vessels. Interrupting the aging tests is undesirable, because the impact of pausing, allowing the test specimens to cool, and then re-exposing them to an electric field on the polymer aging process is unpredictable. Since not all specimens fail simultaneously during the aging process, it is necessary to selectively remove the failed specimens, while the test continues. For this purpose, separation devices based on the principle of a fuse are used.

The detection units for recognizing and transmitting breakdown information were implemented in two different versions. The more reliable but more material intensive solution is to measure the voltage separately on each test specimen. For this purpose, several capacitive voltage dividers have been specially manufactured to detect the voltage (shown in Figure 2- right). Once the fuse has tripped, there is no voltage on the test vessel and the specimen can be considered to have failed. The detection unit is designed as a 19" rack mount unit (Figure 2 – lower left) with plug-in cards (Figure 2 – upper right).

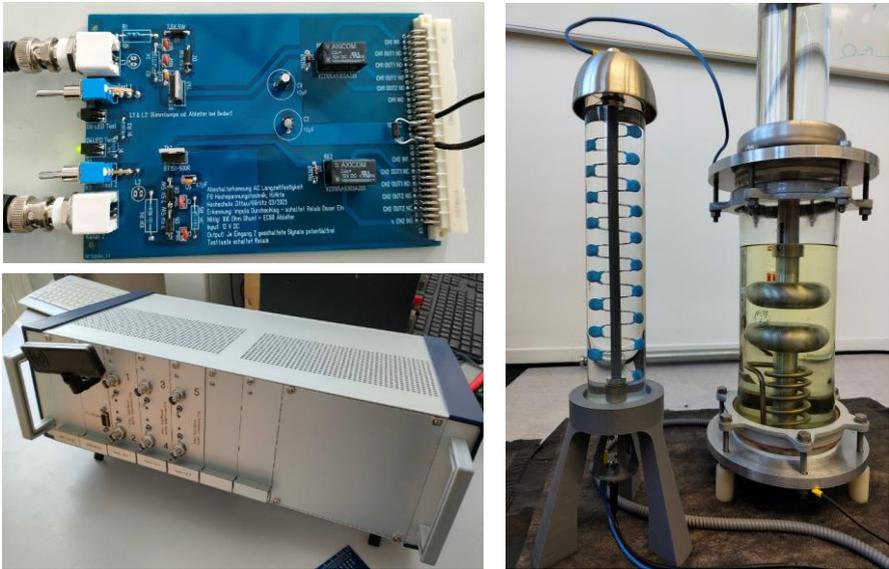


Figure 2: Plug-in cards for analyzing the breakdown (upper left), 19" rack mount unit for breakdown detection and processing (lower left), self-built capacitive voltage dividers for detection breakdown of specimen

The described setup is used at the Zittau University of Applied Sciences and at the Leibniz University, because both institutions have a cooperation in order to conduct long term tests on polymeric insulation materials for comparison purposes. Initial results are shown in Figure 3. The results show a reduction in electrical strength as the service life increases, which can be attributed to electrical aging.

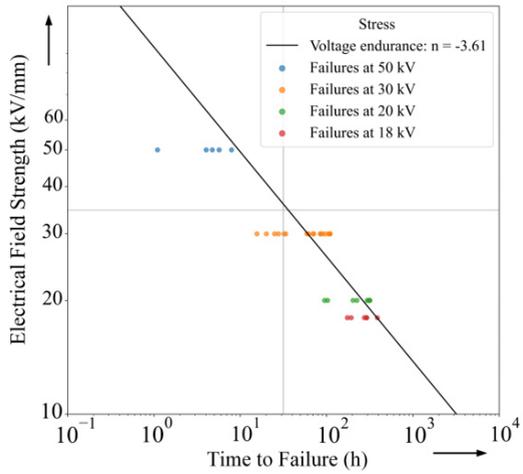


Figure 3: Voltage endurance curve for the analyzed HDPE at room temperature

Development and Comparison of an Optimized Pulsed Electroacoustic (PEA) Measurement System

M.Sc. Sebastian Braun, M.Sc. Christian Kohlsaat

In order to be able to make a statement about the reliability and durability of HVDC components, it is necessary to investigate the space charge density distribution occurring in the insulating material volume. The pulsed electroacoustic method (PEA) has become established for this investigation. Due to the intended investigation of insulating material samples with thicknesses of more than 1 mm and the resulting relatively low electric field strengths, an adequate signal-to-noise ratio is required for the measurement. An optimized version of the PEA system has therefore been developed.

Figure 1 compares the propagation of the acoustic pressure wave in a conventional PEA system (top) and in an optimized system (bottom). The optimization is achieved by replacing the earth electrode with a polymer that acts as an acoustic coupler. Further optimization of the strength of the acoustic signal at the piezoelectric foil is achieved by replacing the absorber with a metallic support electrode. Due to the high difference in acoustic impedances, positive interference is generated.

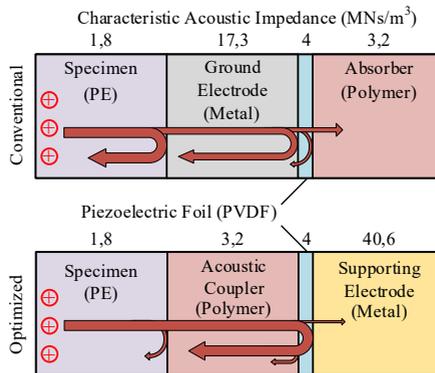


Figure 1: Comparison of the individual layers with regard to the acoustic adaptation of a conventional and the optimized PEA measurement system

Figure 2 shows the assembled measuring system with all its components. The design makes it easy to change the test specimen and, if necessary, the acoustic coupling material.

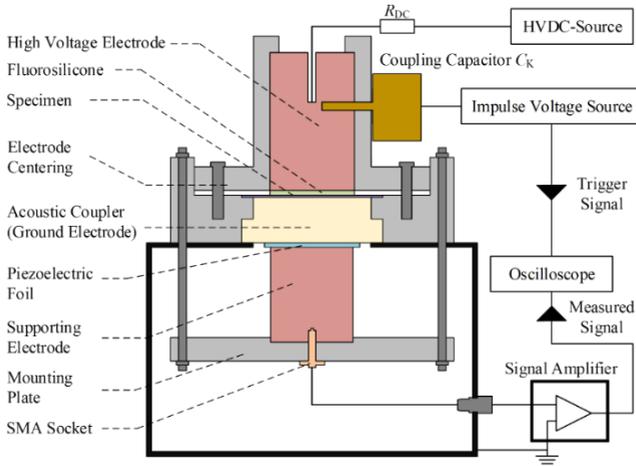


Figure 2: Sectional view of the optimized PEA measurement system

For reliable use of the optimized measuring system, it is necessary to validate the calibration of this system by linearity measurements. For this purpose, a total of three measurements are carried out on the same sample at three different voltages (10 kV, 15 kV and 20 kV). Figure 3 (left) shows the charge distributions calculated from the PEA measurement signals for the aforementioned voltages when examining 0.95 mm thick sheets of high-density polyethylene (HDPE). It is shown that the surface charges at the high voltage and earth electrodes do not yet exhibit any space charges in the volume of the insulating material due to the relatively short polarization time of around 10 minutes. The curves show that they only differ in the level of their amplitudes on the electrode surfaces. This provides the first confirmation of the linearity of the calibration. In addition, the electric field was calculated from the charge distribution in the insulating material. The electric field strengths for the three polarization voltages are shown in Figure 3 (right). It can also be seen that the absence of space charges can be confirmed by the almost constant electric field over the entire thickness of the sample.

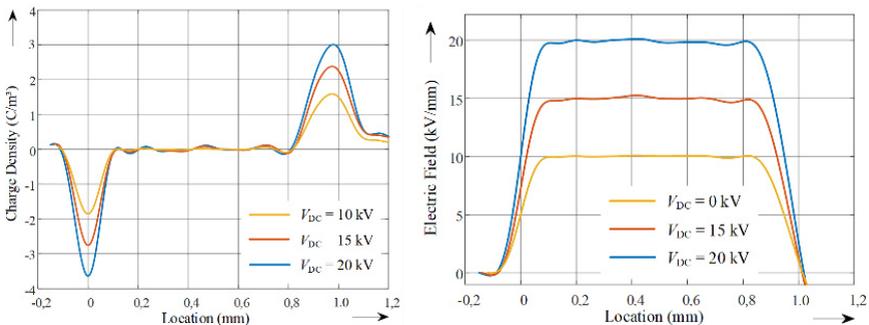


Figure 3: Left: Signal of the space charge density distribution $\rho(x)$ and right: The electric field strength at a polarization voltage of 10 kV (yellow), 15 kV (red) and 20 kV (blue)

Figure 4 and Figure 5 can be used to compare the conventional PEA system with the optimized PEA system. This describes the output voltages of both systems for a 1 mm thick HDPE specimen and a silicone specimen with a thickness of 3 mm, which were polarized with a voltage of 10 kV. For both specimens it can be seen that the signal strength of the optimized system is approx. 3 times higher than that of the conventional system.

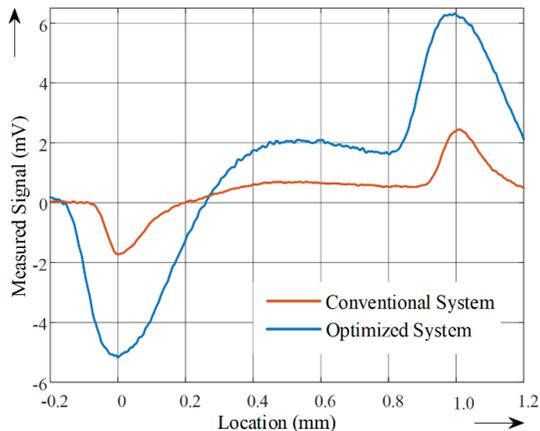


Figure 4: Comparison of the measuring signal strength between the conventional (orange) and the optimized (blue) PEA measuring system for a 0.95 mm thick HDPE specimen

Figure 4 also shows that the measured voltage signal is superimposed by a pronounced system response. This could be due to the poor transmission properties of the amplifier cascade used and the material properties of the HDPE. A different amplifier was therefore used to measure the silicone specimen (Figure 5). Here it can also be seen that the second voltage peak is barely detectable or not detectable at all for the conventional system. This is due to the high attenuation of the material. If the spatial resolution is also calculated using the first stress peak, the result is a value of 3.6 %.

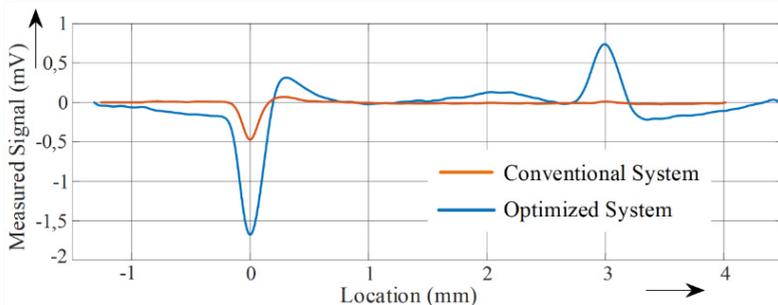


Figure 5: Comparison of the measuring signal strength between the conventional (orange) and the optimized (blue) PEA measuring system for a 3 mm thick silicone specimen

Berührungslose Impulsspannungsmessung

M.Sc. Felix Graff

Betriebsmittel in Übertragungs- und Verteilnetzen sind vielfältigen Belastungen ausgesetzt. Insbesondere Überspannungen, die aus Schaltvorgängen, Kurzschlüssen, Resonanzerscheinungen oder atmosphärischen Einflüssen resultieren, stellen eine außerordentliche Belastung dar. Um die Isolationsfestigkeit und Betriebssicherheit dieser Betriebsmittel zu gewährleisten, sind Stoßspannungsprüfungen gemäß IEC 60060 unerlässlich. Herkömmliche Messsysteme, die zur Erfassung von Spannungsverläufen bei Stoßspannungsprüfungen verwendet werden, sind mit einem hohen Platzbedarf verbunden und führen zu einer zusätzlichen Belastung der Impulsgeneratoren. Die resultierende Belastung beeinträchtigt die Effizienz. Zudem ist die klassische Messtechnologie mit einem hohen Kostenaufwand verbunden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Langzeitgenauigkeit, Linearität und Stoßspannungsfestigkeit der Messsysteme gewährleistet sein müssen. Dazu ist eine Rückführung der Messsysteme auf ein Referenzsystem erforderlich. In Deutschland sind Referenzen bis zu einer Spannung von etwa 1500 kV verfügbar. Sofern die mögliche Spannung des Messsystems die Spannung des Referenzsystems übersteigt, ist gemäß IEC 60060-2 die Durchführung einer Kalibrierung mit dem Referenzsystem bei lediglich 20 % des Messbereichs zulässig. Dabei ist es erforderlich, den gesamten Messbereich des Referenzsystems auszunutzen. Für Spannungen, die die maximale Spannung des Referenzsystems übersteigen, ist eine Prüfung der Linearität mit einem System, dessen Linearität bereits nachgewiesen wurde, im betreffenden Bereich ausreichend. Folglich können bei höheren Spannungen Messfehler auftreten, was eine Überbeanspruchung des Prüflings zur Folge haben kann. In Anbetracht der geschilderten Problematik wird in Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eine Methode zur indirekten Spannungsmessung entwickelt, welche auf der Messung des elektromagnetischen Feldes beruht, das bei Stoßspannungsimpulsen entsteht. Die Zielsetzung dieser Methode besteht in der Entwicklung eines alternativen Verfahrens zur klassischen Messung von Spannungsverläufen, welches ggf. auch eine Kalibrierung für höchste Spannungen ermöglicht. Die Digitalisierung und Miniaturisierung der Messtechnik eröffnet signifikante Vorteile wie eine Platzersparnis, Kostenreduktion und eine erhöhte Flexibilität.

Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau für die berührungslose Impulsspannungsmessung. Die Messung erfolgt sowohl mit dem klassischen Messteiler als auch mit dem berührungslosen Messsystem. Optional kann die Spannung mit einem Referenzsystem erfasst werden.

Die Hardware des berührungslosen Messsystems besteht im Wesentlichen aus einem Feldsensor bzw. einer Antenne, ggf. einer Impedanzanpassung, einem Teiler und dem Analog-Digital-Wandler mit Messdatenerfassung in Form eines „RedPitaya STEMLab 125-14“, welches eine leistungsfähige und kostengünstige Open-Source-Messtechnikplattform ist. In Bild 2 ist der Aufbau der Messdatenerfassung des RedPitaya dargestellt. Der im RedPitaya verwendete Analog-Digital-Wandler besitzt eine Bandbreite von 60 MHz und eine Abtastrate von 125 MS/s bei einer Auflösung von 14 Bit. Damit ist eine ausreichende Zeit- und Amplitudenaufösung für die Stoßspannungsmessung gewährleistet.

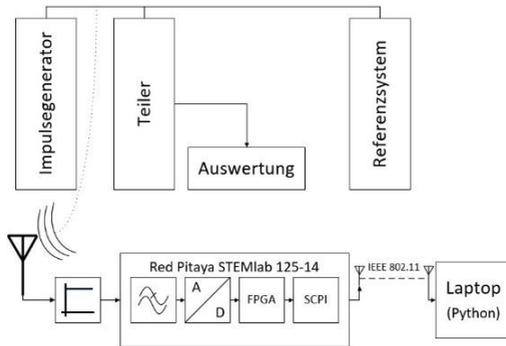


Bild 1: Messaufbau Berührungslose Impulsspannungsmessung

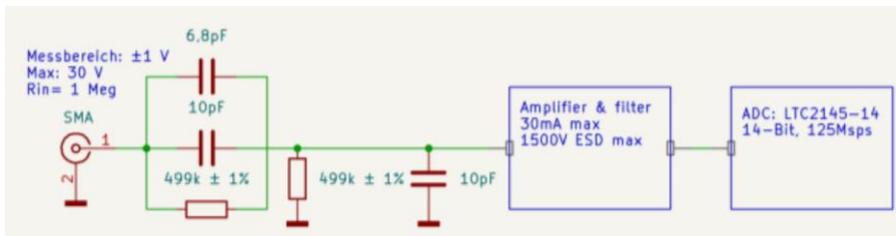


Bild 2: Messeingang des RedPitayas

In Abhängigkeit von der vorgenommenen Konfiguration des RedPitayas ist der Messbereich auf ± 1 V bzw. ± 20 V begrenzt. Um den Messbereich zu erweitern, wird ein Spannungsteiler eingesetzt. Die Funktion des Spannungsteilers besteht in der Anpassung des Messsignals an ein für das RedPitaya geeignetes Niveau bei Beibehaltung der ursprünglichen Spannungsform. Infolge der geringen Leistung des eingekoppelten Signals ist die Verwendung eines BNC-Teilers nicht möglich. Diese Teiler bieten ein sehr lineares Teilungsverhältnis, sind jedoch für den Betrieb an Quellen mit vergleichsweise hoher Ausgangsleistung ausgelegt. Im Rahmen der berührungslosen Impulsspannungsmessung erfolgt beim Einsatz von BNC-Teilern eine Annäherung des Messsignals an das Referenzpotential innerhalb weniger Nanosekunden, sodass keine Aussage über das Ausgangssignal getroffen werden kann.

Für die exakte Messung der Verläufe bei der kontaktlosen Messung mittels Antennen und Feldsensoren erweisen sich gedämpft kapazitive Teiler als vorteilhaft. Eine Anpassung der Konstanten ist mittels Trimpotentiometern und -kondensatoren möglich, sodass die Anforderungen der IEC 60060-2 erfüllt werden können. Zum Schutz des Messequipments erfolgt darüber hinaus die Implementierung eines Überspannungsschutzes basierend auf Gasentladungsstrecken.

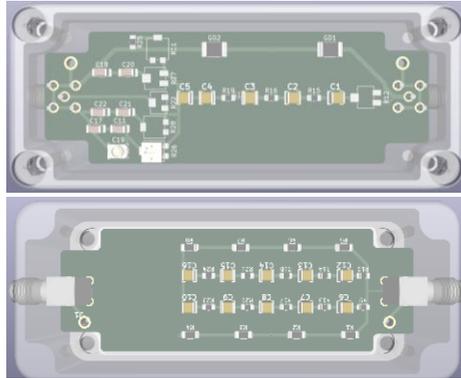


Bild 3: Impulsteiler

In Bild 3 ist das CAD-Modell des Spannungsteilers mitsamt dem Gehäuse zur Abschirmung dargestellt. Das Teilungsverhältnis des Spannungsteilers beträgt etwa 1:300. Allerdings zeigt die hier vorgestellte erste Revision ein nichtlineares Verhältnis über den Frequenzbereich. Dies führt zu Abweichungen in der gemessenen Spannungsform, welche insbesondere bei höheren Zeitkonstanten auftreten.

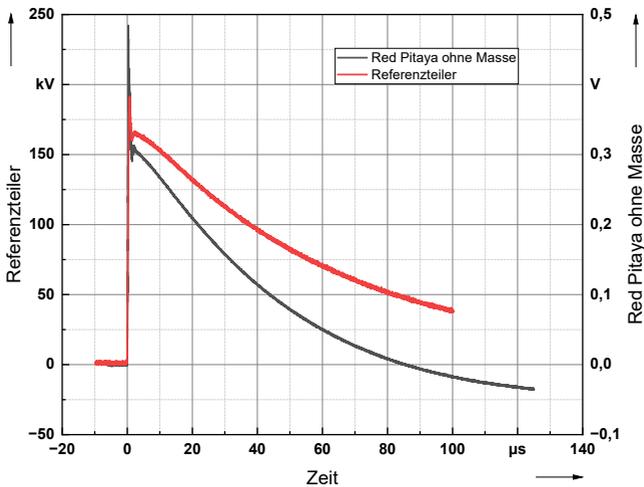


Bild 4: Vergleich des Verlaufs der berührungslos gemessenen Spannung mit dem Referenzteiler

In Bild 4 ist der Verlauf eines Blitzstoßspannungsimpulses dargestellt, der sowohl mit dem kontaktlosen Impulsspannungsmesssystem (in schwarz) als auch mit dem Referenzmesssystem (in rot) am Schering-Institut aufgezeichnet wurde. Im Rahmen der Untersuchung wurde das

kontaktlose Messsystem ohne definierte Spannungsreferenz betrieben, da eine direkte Anbindung an das Erdpotential zu einer Einkopplung des Impulses über den Erdanschluss führt. Der qualitative Verlauf des kontaktlosen Messsystems zeigt eine hohe Ähnlichkeit zum Referenzteiler. Die Abweichungen im quantitativen Verlauf bei Zeitpunkten größer als 10 μs könnten auf Inhomogenitäten im Spannungsteiler zurückzuführen sein.

In Bild 5 ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Spitzenwerten der kontaktlos gemessenen Spannung und denen des Referenzsystems erkennbar. Die erfasste Spannung bewegt sich in einem Bereich zwischen 70 kV und 240 kV. Dies demonstriert, dass nach erfolgter Kalibrierung des kontaktlosen Messsystems eine valide Messung der maximalen Spannungsamplitude möglich ist.

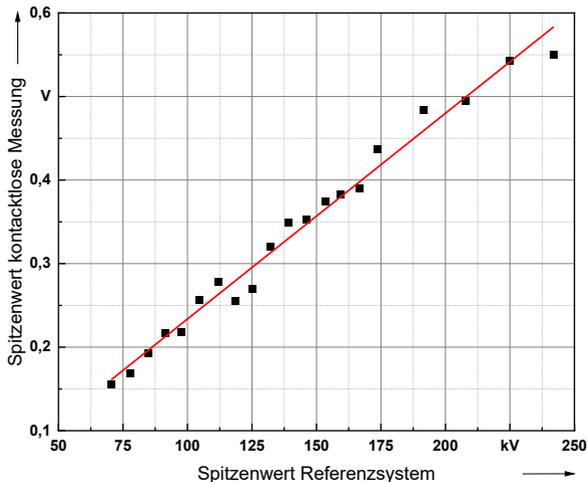


Bild 5: Vergleich des Spitzenwertes der berührungslos gemessenen Spannung mit dem Referenzsystem

Für eine präzise Abbildung der Verläufe sind jedoch weitere Entwicklungsschritte erforderlich. Eine Optimierung des Spannungsteilers wurde bereits vorgenommen, um die Sprungantwort zu verbessern.

Im Rahmen künftiger Untersuchungen sollen zudem Spannungen über 240 kV sowie unterschiedliche Antennen berücksichtigt werden. Des Weiteren ist der Spannungsverlauf beim Durchschlag des Prüfobjekts zu analysieren. Eine Aufbereitung der Messergebnisse gemäß IEC 60060-1 Anhang B wird in einem weiteren Schritt implementiert werden. Dazu ist der Einfluss eines vorgeschalteten Impedanzwandlers mit und ohne Filter auf das Messsignal zu untersuchen.

Comparative Analysis of Aluminum and Brass Electrodes in Laser Induced Pressure Pulse Method for Space Charge Measurements

M.Sc. Henry Hirte, M.Sc. Sebastian Braun, Prof. Dr. techn. Stefan Kornhuber

The Laser-Induced-Pressure-Pulse (LIPP) method measures space charge distribution in polymeric insulating materials by generating pressure pulses with a pulsed laser. This study examines whether aluminum electrodes, which have lower acoustic impedance closer to that of silicone, would result in better signal transmission compared to brass electrodes.

Experimental Setup

The mechanical setup, shown schematically in Figure 1, includes Rogowski-shaped electrodes with a centered hole, which serves as the laser target area and therefore reduces the thickness to 3.8 mm. A Nd:YAG 3.15 J pulsed infrared laser was used to vaporize the target material. Measurements were taken with a transimpedance amplifier with an amplification of 5 kV/A, and the experiments were conducted with an unfilled 1 mm thick silicone sheet sample at room temperature. Signals were filtered and adjusted to remove noise components after measurement.

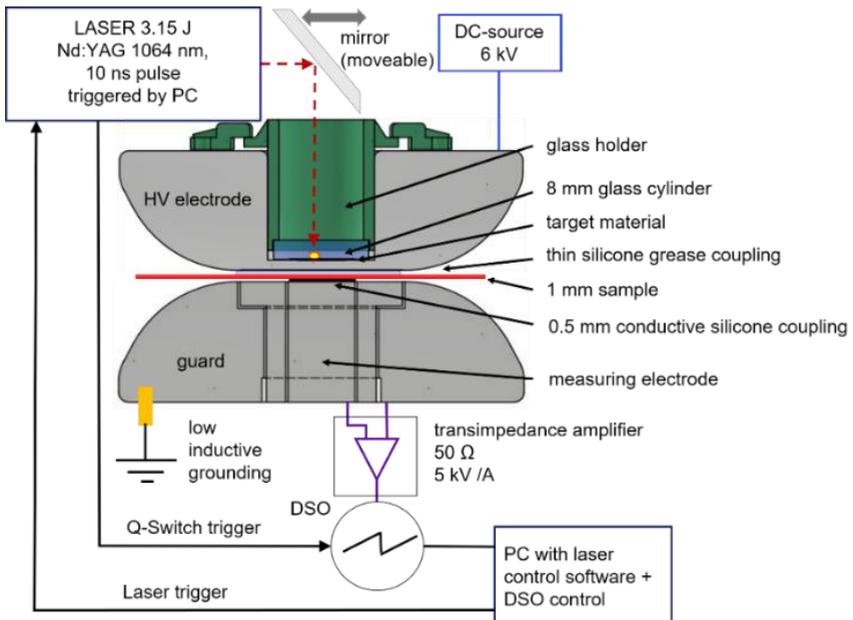


Figure 1: Setup for space charge measurement using the LIPP-method

Methodology

Experiments were conducted using both aluminum and brass as high voltage electrode. Various target materials, including marker ink, black paint, and a mix of ink with isopropanol or water,

were applied to the electrode surface to observe their influence on signal strength. Measurements were repeated twice by student's lab team to ensure reproducibility. A new method, the confinement of the target by covering it with a glass cylinder, as shown in Figure 1, was tested to investigate if trapping the plasma would lead to a more effective pressure wave induction.

Results and Analysis

Measurements with Aluminum electrodes resulted in signals with higher amplitude than brass, particularly when opaque targets were used. The results showed that aluminum's lower impedance allows a higher transmission of the pressure wave into the sample, resulting in signal amplitudes nearly twice as high as with brass. Confining the ink lead as expected to the highest signal amplitude for both metals, but resulted in the least resolution, which can be seen at the orange curve in Figure 2. However, confining the target is suggested to elongate pulse duration, which could reduce resolution.

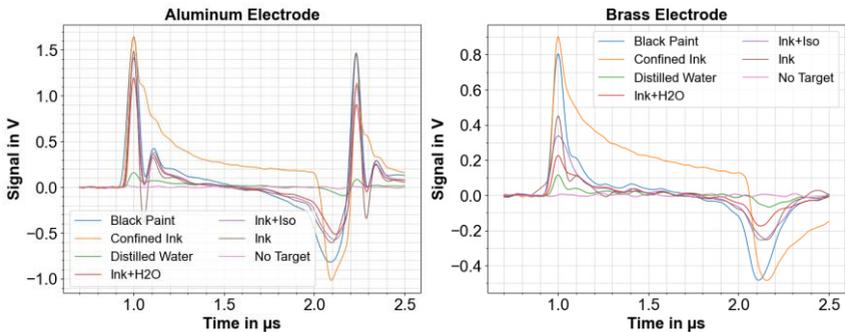


Figure 2: LIPP-Signals for different targets with aluminum (left) and brass electrodes (right)

Conclusions

The study concludes that aluminum electrodes are superior for the LIPP method in generating higher signal amplitudes due to better acoustic impedance matching with silicone samples. Confining target materials like ink also enhances signal strength, but may reduce resolution due to unknown pulse elongation. Further research on pressure propagation with confinement is necessary. These findings underline the importance of electrode material and choice of target material for optimizing LIPP applications. Aluminum electrodes are a way to enhance the whole LIPP-setup, which is easy to realize and low in costs. Thus, the LIPP-method could be more attractive especially in setups with a lower energetic laser used, because the main reason for the low number of LIPP-users compared to those using PEA-method is still the cost of the laser.

Bildung von konventionellen Fehlerngasen und höherwertigen Kohlenwasserstoffen in verschiedenen Isolierflüssigkeiten infolge von verschiedenen Transformatorfehlern sowie der Wassereinfluss auf die Fehlerngasbildung

M.Sc. Kristin Homeier, M.Sc. Lauren Stahl

In Leistungstransformatoren werden heutzutage nicht nur die konventionellen Mineralöle eingesetzt, bei denen bereits ein großer Erfahrungsschatz vorliegt, sondern zudem werden auch alternative Isolierflüssigkeiten wie synthetische und natürliche Esterflüssigkeiten und auch speziell hergestellte Isolierflüssigkeiten auf Mineralölbasis verwendet. All diese Isolierflüssigkeiten bestehen aus verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen. Bei Esterflüssigkeiten liegen nicht nur reine Kohlenwasserstoffverbindungen vor, sondern ebenfalls noch C-O- und C=O-Verbindungen. Auf der einen Seite führen diese polaren Anteile vor allem zu einem deutlich höheren Wasserlösungsvermögen, aber auch zu einem unterschiedlichen Alterungs- und Gasungsverhalten im Vergleich zu Mineralöl. Hauptsächlich die Entstehung von Kohlenoxiden ist hier zu nennen, aber auch andere Alterungsprodukte wie Säuren werden im unterschiedlichen Maß generiert. Die meisten aktuell existierenden DGA-Interpretationsalgorithmen basieren hauptsächlich auf Erfahrungen mit Mineralöl und nur wenige haben deren Interpretationsmethoden auch für Esterflüssigkeiten angepasst. Daneben ist auch noch der Einfluss von Wasser auf die Alterungsmechanismen zu beachten, da die Esterflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl auch im Normalbetrieb des Transformators einen höheren Anteil an Wasser aufweisen und dieses die ablaufenden Alterungsmechanismen beeinflusst.

Im Allgemeinen werden neben den konventionellen Fehlerngasen ebenfalls auch höherwertige Kohlenwasserstoffe gebildet, welche bei zusätzlicher Berücksichtigung in der DGA-Interpretation zur besseren Fehlerklassifizierung führen könnten. Zumal deren Vorteil der hohen Gaslöslichkeit in den Isolierflüssigkeiten berücksichtigt werden muss, wodurch die Gase bevorzugt im Öl verbleiben und somit der Fehler bei Probenentnahme und Transport reduziert wird. Vor diesem Hintergrund wurde in einem Projekt ein Prototyp entwickelt, aufgebaut und getestet, der aus einem modifizierten DGA-System mit Vollvakuumentgasungseinheit besteht. Durch eine optimierte Entgasungseinheit zur Gasextraktion der höherwertigen Kohlenwasserstoffe sowie neuen Säulen und neuen Temperatur- und Schaltprogrammen können mit diesem System C₁ bis C₅-Kohlenwasserstoffe detektiert werden. Bei den Tests wurden neben den kalibrierten n- und i-Butan und n- und i-Pentan noch weitere höherwertige Fehlerngase detektiert, welche mit der folgenden Nomenklatur gekennzeichnet werden:

C_n – i

- n : Kohlenstoffanteil des Gases wird mit Index n gekennzeichnet.
- i : Nummerierung entsprechend der Retentionszeit.

Entsprechend konnten bereits C₃-1 als Propadien und C₃-2 als Propin identifiziert werden.

Teil 1: Gasbildung durch elektrische Fehler

Leistungstransformatoren können in Betrieb durch elektrische Transformatorfehler wie einerseits Teilentladungen (Partial Discharge, PD-Fehler), beispielsweise aufgrund von Gasblasenbildung durch Druckreduktion bei Lastwechseln oder durch Fehlstellen im Isolierstoff, beansprucht werden, wobei es andererseits durch atmosphärische Blitzstoßspannungen oder auch Schaltstoßspannungen zu Durch- oder Überschlägen (Discharge, D-Fehler) kommen kann. Infolge von elektrischen Fehlern kommt es zur Ausbildung von einem Plasmakanal - bei den Teilentladungen nur in einem lokalen Bereich, bei den D-Fehlern über den gesamten Isolierbereich zwischen zwei Potentialen, auftreten. Bei den Alterungsmechanismen wird gemäß Bild 1 (links) unterschieden in:

- Chemische Reaktionen im Plasmakanal selbst: In diesem ionisieren durch die hohe Temperatur und Energie die Teilchen, sodass die kovalenten Bindungen aufgebrochen werden und durch zufällige Sekundärreaktionen vor allem Ethen entsteht, aber auch Methan, Wasserstoff, Ethen sowie freier Kohlenstoff (Ruß) gebildet wird.
- Radikale Kettenreaktion im Bereich neben dem Lichtbogen in der Isolierflüssigkeit, wo die Temperatur erhöht ist: Durch die Zusammenstöße der Moleküle werden Bindungen aufgebrochen und freie Radikale ausgebildet, welche mit den Molekülen in einer lawinenartigen Kettenreaktion reagieren. Hierbei werden vor allem Wasserstoff und Ethen, Ethan, Methan sowie Kohlenoxide generiert.

1. Gasbildung infolge von TE- Fehlern

Zur Nachbildung von Teilentladungen in Transformatoren werden Plattenelektroden verwendet, die konzentrische Rillen aufweisen, um ein geschichtetes Isoliersystem nachzubilden, dargestellt in Bild 1. Zwischen die Plattenelektroden werden zwei 1 mm PTFE-Platten eingesetzt, die gemeinsam mit der verwendeten Isolierflüssigkeit das geschichtete Dielektrikum ausbilden.



Bild 1: Alterungsmechanismen in Plasma (links) Prüfgefäß zur Nachbildung von TE (rechts)

Um reproduzierbare DGA-Ergebnisse bei gleicher Fehlerzuführung zu erhalten, wird auf einen festen Isolierstoff auf Zellulosebasis und damit einhergehende Karbonisierung verzichtet. Mit-

tels TE-Prüfmesskreis, entsprechend der Prüfnorm IEC 60270, wurden die verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit Teilentladungen verschiedener umgesetzter Gesamtenergien für eine Belastungsdauer von 72 h beansprucht.

Die Isolierflüssigkeiten weisen unterschiedliches TE-Verhalten auf. Während die Isolierflüssigkeiten auf Mineralölbasis und das synthetische Ester ein gleichbleibendes bis ansteigendes TE-Verhalten aufweisen, zeigt die natürliche Esterflüssigkeit ein über der Zeit abklingendes Verhalten auf. Selbst beim Nachregeln der Spannung bleiben die TE im niedrigen Niveau beziehungsweise klingen nach kürzester Zeit wieder ab - abgebildet in Bild 2. Dieses Phänomen erschwert den Vergleich des Gasungsverhaltens der Isolierflüssigkeiten, da unterschiedliche TE-Gesamtenergien umgesetzt wurden.

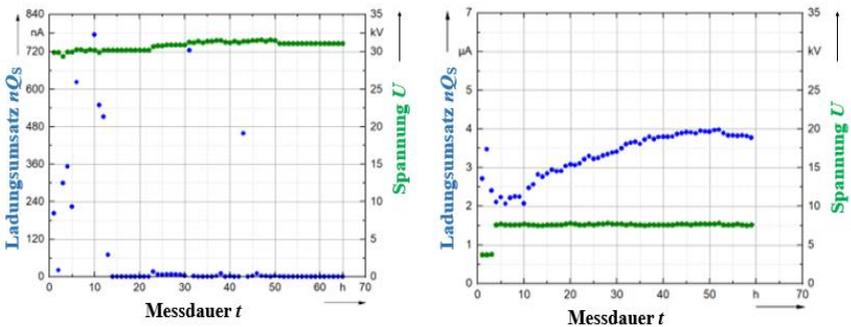


Bild 2: TE-Verhalten in natürlichen Esterflüssigkeiten (links) und Mineralöl (rechts) im Vergleich

In Bild 3 werden die generierten C₃ und C₄ Kohlenwasserstoffe in verschiedenen Isolierflüssigkeiten unter TE-Belastung dargestellt.

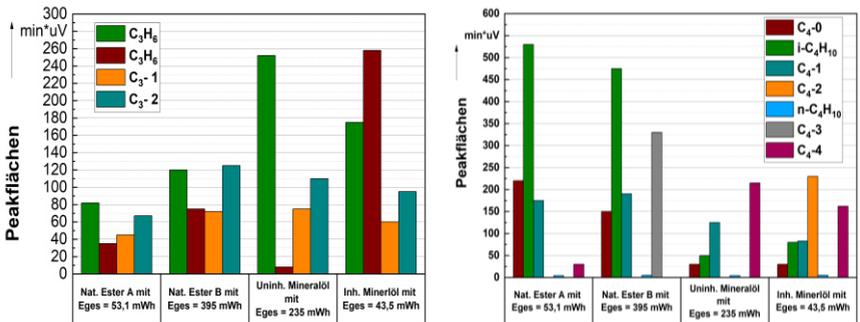


Bild 3: Generierte C₃ und C₄ Kohlenwasserstoffe unter TE-Belastung

Auffallend ist, dass die verschiedenen Isolierflüssigkeiten unterschiedliche C₄-Kohlenwasserstoffe generieren. Zudem weist Mineralöl die höchsten C₃-Kohlenwasserstoffe auf. Bei natürlichen Estern werden vor allem i-Butan und C₄-0, C₄-1 generiert, während bei Mineralölen eher C₄-4 und C₄-2 charakteristisch sind.

Auch der Einfluss von Wasser wurde untersucht und beispielhaft anhand von der natürlichen Esterflüssigkeit mit zwei verschiedenen Startfeuchten die Generation von C₃- und C₄-Kohlenwasserstoffen in Bild 4 dargestellt.

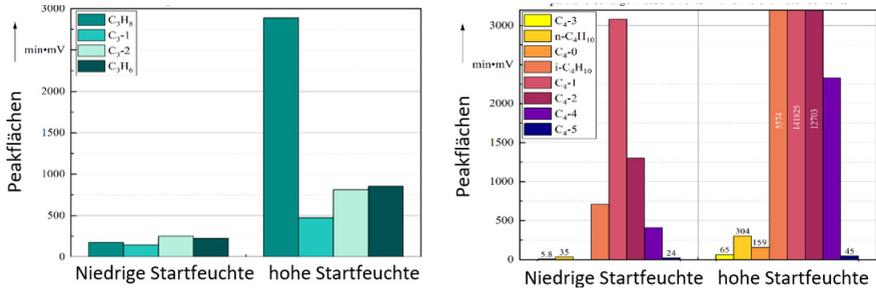


Bild 4: Generierte C₃ und C₄ Kohlenwasserstoffe unter TE-Belastung mit vers. Startfeuchte

Mit erhöhtem Startwassergehalt werden im Allgemeinen signifikant höhere Fehlergaskonzentrationen generiert sowie weitere Fehlergase detektiert.

2. Gasbildung infolge von D-Fehlern

Zur Nachbildung von elektrischen D-Fehlern wurden im Labor umgedrehte PET-Flaschen als Prüfgefäße verwendet, in denen eine Nadel-Kugel-Elektrodenanordnung fixiert ist - abgebildet in Bild 5. Der Flaschenkopf an Erde ist dabei beweglich gelagert, um die hohe Energie bei der Blitzstoßspannungsausladung ausgleichen zu können.

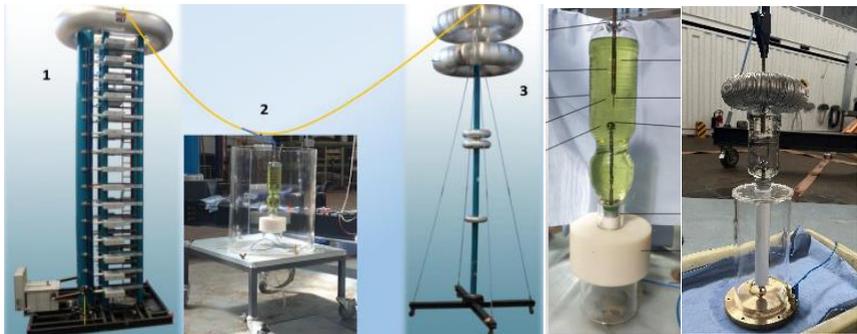


Bild 5: Prüfaufbau zur Nachbildung von D-Fehlern im Labor

In Bild 6 werden die generierten konv. Fehlergase und C₃ und C₄ Kohlenwasserstoffe (KW) in verschiedenen Isolierflüssigkeiten unter Blitzstoßspannung bei 124 kV dargestellt.

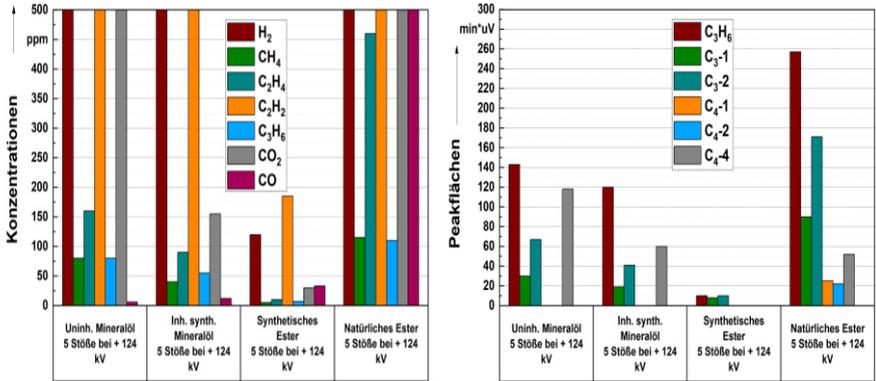


Bild 6: Generierte konv. Fehlerrgase und C₃ und C₄ KWs unter Blitzstoßspannung

Es wird deutlich, dass im natürlichen Ester die höchsten Fehlerrgaskonzentrationen generiert werden. Zudem werden in diesem auch mehrere Fehlerrgase im Vergleich zu den anderen Isoflüssigkeiten detektiert.

Ebenso wurde der Einfluss von Wasser unter Blitzstoßspannungsbeanspruchung untersucht und beispielhaft in Bild 7 anhand von der synthetischen (links) und natürlicher Esterflüssigkeit (rechts) mit verschiedenen Startfeuchten die Bildung von C₃- und C₄-KWs dargestellt.

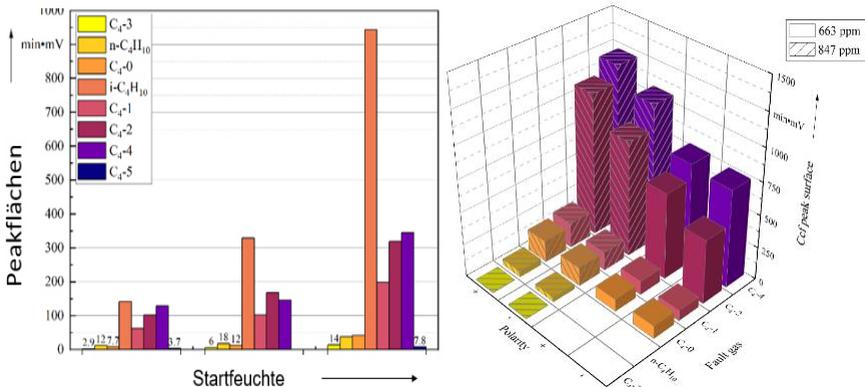


Bild 7: Generierte C₃ und C₄ KWs in synthetischem (links) und natürlichem Ester (rechts)

Wasser scheint einen katalysierenden Effekt auf die Alterungsmechanismen zu haben; da erhöhte Fehlerrgaskonzentrationen generiert werden. Zudem werden auch erst mit erhöhtem Startwassergehalt weitere Fehlerrgase gebildet.

Teil 2: Gasbildung durch thermische Fehler

Erhöhte Temperaturen, wie bei lokaler Öl- und Papieralterung sowie auch bei lokalen Hot-Spots in Transformatoren, erhöhen die kinetische Energie der Moleküle, sodass die Aktivierungsenergie für verschiedene Reaktionen erreicht wird und es zu Alterungsreaktionen kommt. Im Labor wurde die Öl-Papier-Alterung sowie Hot-Spot-Fehler verschiedener Temperaturen nachgebildet und das Fehlergasbildungsverhalten von verschiedenen Isolierflüssigkeiten untersucht.

3. Gasbildung infolge von Hot-Spot-Fehlern

Zur Nachbildung von Hot-Spot-Fehlern wird ein um einen Keramikstab gewickelter Konstantan-Widerstandsdraht verwendet, der mit verschiedenen Strömen beaufschlagt wird und somit unterschiedliche T-Fehler mit verschiedenen Hot-Spot-Temperaturen realisieren kann. Zur Kühlung wird ein doppelwandiges Gefäß verwendet, um die umgebene Isolierflüssigkeit zu kühlen und um sicherzustellen, dass der Fehler an der lokalen Stelle bleibt, was in Bild 8 abgebildet ist.

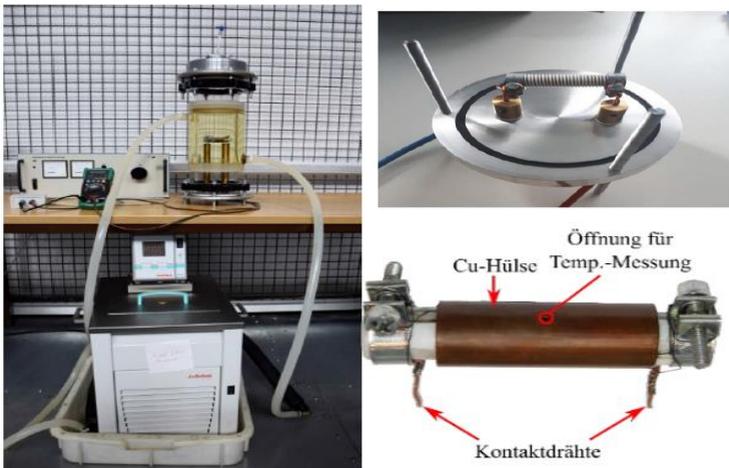


Bild 8: Prüfaufbau zur Nachbildung von Hot-Spot-T-Fehlern im Labor

In Bild 9a, 9b, 10a, 10b und 11a, 11b werden die generierten Fehlergase und C_3 bis C_5 Kohlenwasserstoffe (KW) in natürlicher Esterflüssigkeit sowie in einer synthetisch hergestellten Isolierflüssigkeit auf Mineralölbasis bei verschiedenen Hot-Spot-Strömen und somit Temperaturen sowie verschiedenen Startwassergehalten dargestellt.

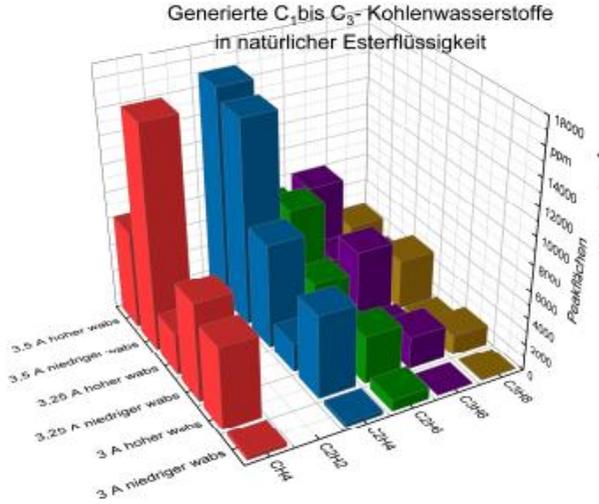


Bild 9a: Generierte C₁ bis C₃- Kohlenwasserstoffe in natürlichem Ester

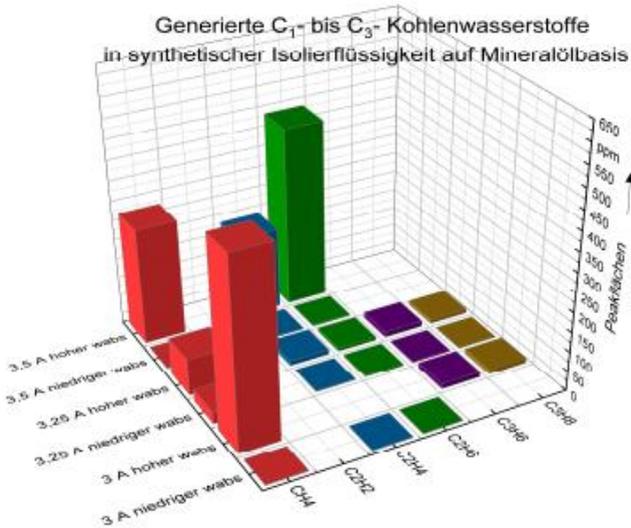


Bild 9b: Generierte C₁ bis C₃- Kohlenwasserstoffe in synthetisch hergestelltem Mineralöl

Es werden große Unterschiede in der Fehlertgasbildung in den beiden Isolierflüssigkeiten erkennbar. In der natürlichen Esterflüssigkeit werden unter Hot-Spot-Belastung signifikant höhere Fehlertgaskonzentrationen generiert. Zudem ist auffallend, dass mit erhöhtem Wassergehalt höhere Fehlertgaskonzentrationen gebildet werden.

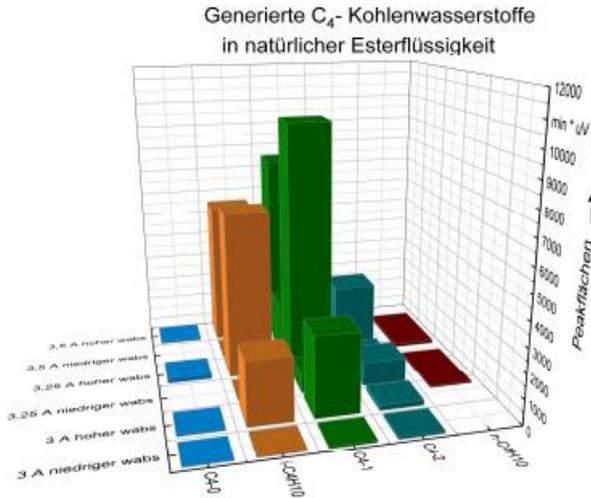


Bild 10a: Generierte C₄- Kohlenwasserstoffe in natürlichem Ester

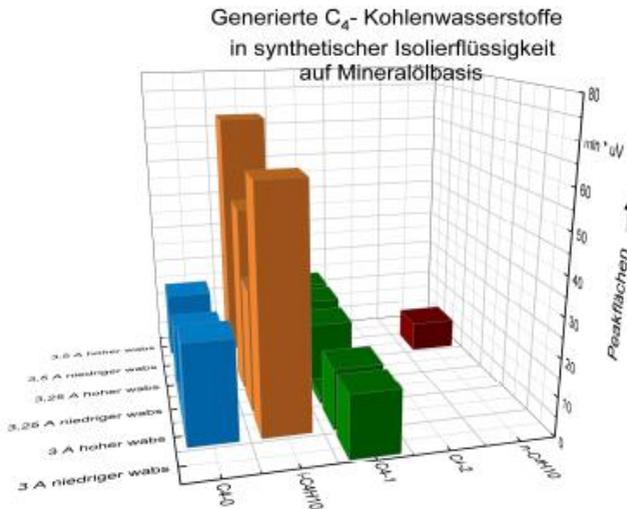


Bild 10b: Generierte C₄- Kohlenwasserstoffe in synthetisch hergestelltem Mineralöl

Bei den C₄-Kohlenwasserstoffen lassen sich ebenfalls Unterschiede erkennen. Hier wird ersichtlich, dass bei der natürlichen Esterflüssigkeit vor allem i-Butan und C₄-1 sowie C₄-2 generiert werden, während bei der synthetisch hergestellten Isolierölen vor allem C₄-0 neben i-Butan und C₄-1 gebildet wird. Auch bei den C₄-Kohlenwasserstoffen wird ein ansteigendes Fehlverhalten bei erhöhtem Startwassergehalt deutlich.

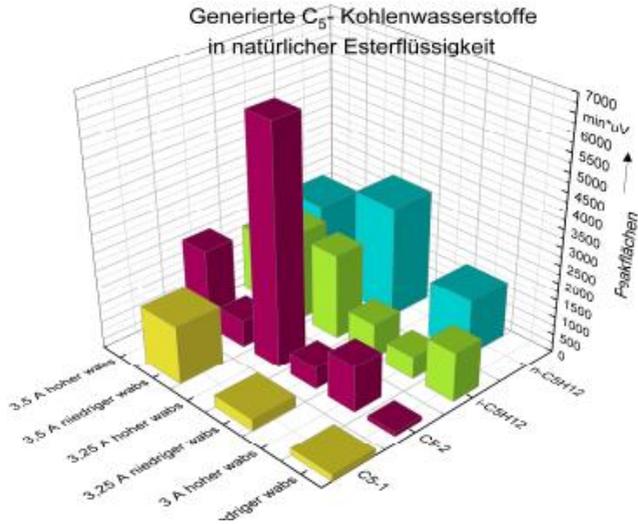


Bild 11a: Generierte C₅- Kohlenwasserstoffe in natürlichem Ester

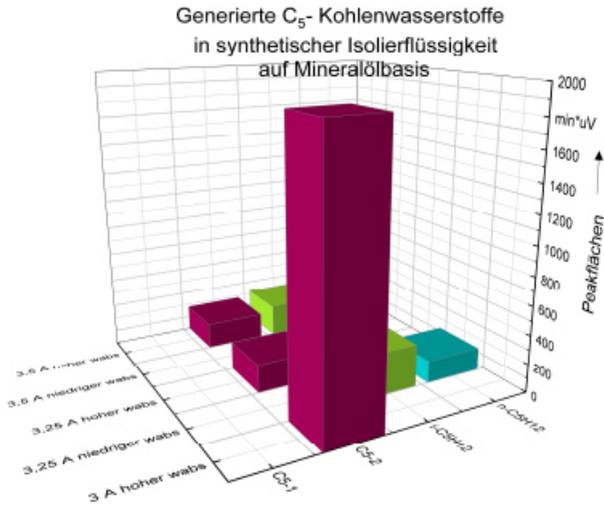


Bild 11b: Generierte C₅- Kohlenwasserstoffe in synthetisch hergestelltem Mineralöl

Dieses Verhalten lässt sich auch bei den C₅-Kohlenwasserstoffen beobachten. Auch hier werden andere charakteristische Fehlgase sowie eine erhöhte Konzentration mit steigender Startfeuchte ersichtlich.

4. Zusammenfassung

Im Isoliersystem von Transformatoren werden infolge von elektrischen und thermischen Fehlern neben den konventionellen Kohlenwasserstoffen auch höherwertige C₃- bis C₅-Kohlenwasserstoffe gebildet. Die Isolierflüssigkeiten weisen verschiedene Fehlergasbildungsverhalten auf, nicht nur in der Konzentration der Gase, sondern auch in der Gasart der höherwertigen Fehlergase.

Bei der Beanspruchung mit elektrischen Fehlern ist zumeist eine Plasmabildung beteiligt, welche lokal auftritt oder durch einen Lichtbogen ein komplettes Isoliergebiet zwischen zwei Potentialen überbrückt. In dem Plasma werden die Moleküle ionisiert und simultan wird durch die hohe Temperatur des Lichtbogens die umgebene Isolierflüssigkeit erwärmt, wodurch durch die Zusammenstöße der Moleküle, Ionen und Radikale Kettenreaktionen einsetzen. Diese ablaufenden Alterungsmechanismen bestimmen maßgeblich die Entstehung der Fehlergase. Zu den charakteristischen Fehlergasen für elektrische Fehler zählen neben den konventionellen Fehlergasen Ethin, Wasserstoff, Methan, Ethen vor allem C₄-4, C₄-1, C₄-2, i-Butan und Propadien und Propin. Allerdings werden große Unterschiede in dem Auftreten der charakteristischen Fehlergase der Isolierflüssigkeitsart deutlich, sodass die Entwicklung von isolierflüssigkeitsspezifischen DGA-Interpretation-Algorithmen unerlässlich erscheint.

Bei thermischen Fehlern wird die kinetische Energie der Moleküle angehoben, sodass die Aktivierungsenergie bestimmter Reaktionen überschritten wird und somit zufällige Sekundärreaktionen eintreten. Daneben kommt es zur unvollständigen oder vollständigen Verbrennung, wobei Kohlenoxide generiert werden. Als charakteristische höherwertige Fehlergase können hier i-Butan, C₄-0, C₄-1 und n-Butan sowie C₅-1, n- und i- Pentan gekennzeichnet werden. Auch hier werden große Unterschiede in dem Fehlergasbildungsverhalten der verschiedenen Isolierflüssigkeiten ersichtlich.

Ferner wird auch ein signifikanter Einfluss von Wasser im Ausgangszustand der Isolierflüssigkeiten auf die Fehlergasbildung erkennbar. Mit erhöhtem Startwassergehalt werden erhöhte Mengen an Fehlergasen generiert. Zudem werden auch weitere Fehlergasarten gebildet, sodass ein hohes Wassermilieu zu anderen Sekundärreaktionen zu führen scheint. Der Wassereinfluss wird aktuell noch weiter untersucht.

Mithilfe dieser Ergebnisse könnte sich ein neuer DGA-Interpretationsalgorithmus für elektrische und thermische Transformatorfehler in Abhängigkeit von den Einflussparametern Energie, Temperatur und Feuchte unter Berücksichtigung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen als vielversprechende Möglichkeit zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der DGA-Interpretation ableiten lassen.

Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des Säuregehalts von Isolierpapier

M.Sc. Büsra Özdemir

Einer der Hauptgründe für den Ausfall von Transformatoren ist die Alterung der Wicklungsisolierung aus Kraftpapier, das zu 75 – 85 % aus Zellulose, 2 - 6 % aus Lignin und 10 - 20 % aus Hemicellulose besteht [1]. Das Isolierpapier kann sich zersetzen und seine isolierenden Eigenschaften verlieren, wenn es Sauerstoff, Feuchtigkeit und hohen Temperaturen ausgesetzt wird. Zur Bestimmung des Zustands des Papiers wird die Isolierflüssigkeit hinsichtlich der physikalisch-chemischen Eigenschaften untersucht. Durch die Papier-Öl-Alterung bilden sich Zersetzungsprodukte wie Feuchte und verschiedene Gase, die sich in der Isolierflüssigkeit anreichern können [2]. Diese Eigenschaften bzw. Ölparameter geben indirekt Aufschluss über den Papierzustand. Eine direkte Zustandsbestimmung des Papiers kann derzeit nicht durchgeführt werden, da keine direkten Überwachungsmethoden zur Verfügung stehen.

Einer der in der Isolierflüssigkeit untersuchten Parameter ist der Säuregehalt. Es bilden sich neben hochmolekularen Säuren auch niedermolekulare Säuren. Die hochmolekularen Säuren bilden sich in der Isolierflüssigkeit und sind aufgrund der geringen Dissoziationstendenz nicht signifikant schädlich für das Isolierpapier. Im Vergleich dazu sind die niedermolekularen Säuren bekanntermaßen schädlich und auch verantwortlich für die säurekatalysierte Hydrolyse des Isolierpapiers. Der Prozess der säurekatalysierten Hydrolyse findet statt, wenn ein H^+ -Ion mit dem Sauerstoffatom der glykosidischen Bindung der Zellulose reagiert und die Bindung aufricht. Zellulose ist zwar resistent gegenüber der Hydrolyse; die Reaktion kann aber durch hohe Temperaturen und Drücke sowie durch saure Katalysatoren beschleunigt werden [1, 3]. Lundgaard et al. erklärten außerdem, dass die Hydrolyse ein katalytischer Prozess ist, der durch die Anwesenheit von H^+ -Ionen signifikant beeinflusst wird [5]. Zudem ist laut Forschungsergebnissen die Hydrolyse für Kraftpapier schädlicher als die Oxidation [3,4].

Der Papierabbau führt zur Bildung saurer Komponenten mit niedrigerem Molekulargewicht. Dies bedeutet, dass die Bildung niedermolekularer Säuren in einem direkten Zusammenhang mit dem Polymerisationsgrad des Papiers steht. Für die Zustandsdiagnose ist es wichtig, den Säuregehalt des Papiers – und nicht der Isolierflüssigkeit – zu bestimmen. Zusätzlich betont [1] die Notwendigkeit eines Lebensdauermanagementsystems für Leistungstransformatoren, insbesondere die Überwachung des Säure- und Wassergehaltes im Isolierpapier. Daher wurde am Schering-Institut ein Sensorsystem zur Quantifizierung von Säuren im Papier entwickelt.

Zu diesem Zweck wurden Papierproben gealtert und einem Extraktionsprozess nach [6] unterzogen, um die sauren Bestandteile aus dem Papier zu lösen. Der Säuregehalt des Papiers wird mit dem Funktionsmuster des Sensors korreliert, so dass der Säuregehalt des Papiers auf der Grundlage der Sensorwerte vorhergesagt werden kann. Der Sensor untersucht hierbei die C=O-Bindungen, die in den Carbonsäuren vorkommen. Mit zunehmendem Papieralter nimmt die Menge an C=O-Bindungen und sauren Bestandteilen zu. Die C=O-Bindungen sind IR aktiv, weshalb zur Untersuchung die Transmissionsspektroskopie herangezogen wird. Hierbei wird die Papierprobe mit infraroter Strahlung durchstrahlt, während die C=O-Bindungen diese Strahlung absorbieren. Durch die zunehmende Absorbanz mit dem Papieralter trifft weniger Strahlung auf den Detektor, der die infrarote Strahlung in ein Spannungssignal umwandelt. Dieser

Wert wird 'Säureverhältnis' genannt. Das Bild 1 zeigt die Sensorwerte über den Säuregehalt im Papier. Es wurden Papierproben unterschiedlicher Dicken (75 μm und 100 μm) sowie verschiedener Anfangsfeuchten in Isolieröl (C) über einen Zeitraum von 14 Wochen bei einer Temperatur von 130 °C gealtert. Hierbei steht *sf* für sehr feuchtes Papier und *t* für trockenes Papier.

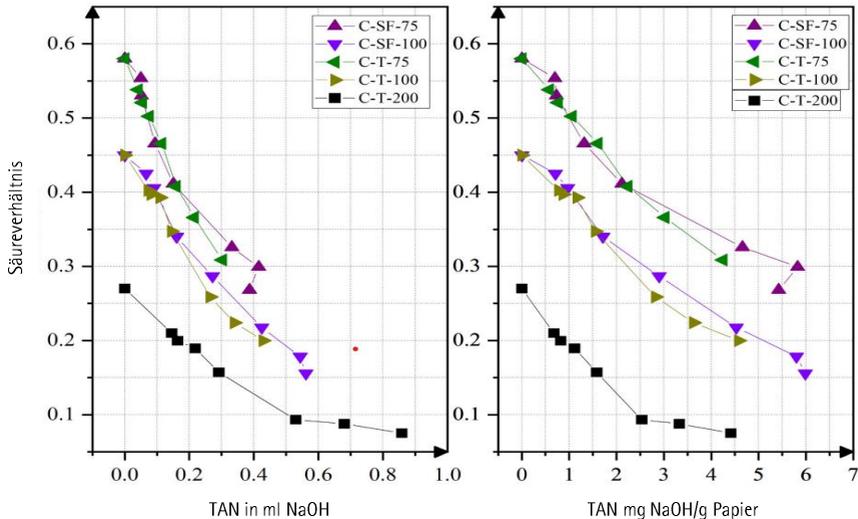


Bild 1: Säuregehalt von Isolierpapier in ml NaOH/g Öl (links) und in mg NaOH/g Papier (rechts)

Grundsätzlich zeigen die Untersuchungen, dass das entwickelte Funktionsmuster zur Beurteilung des Zustands von Papierisierungen verlässliche Informationen über deren Säuregehalt liefern kann. Die Säurezahl umgerechnet in mg NaOH/g Papier liefert systematische Säurewerte für die jeweiligen Papierdicken. Da der Säurewert des Isolieröls keine ausreichende Information über den Zustand der Papierisolation gibt und nicht in allen Fällen direkt mit diesem korreliert, bietet das Funktionsmodell einen neuen Ansatz für die Transformatorendiagnostik.

Referenzen:

- [1] Cigré, Working Group D1.53: 'Aging of Liquid impregnated cellulose for power transformers' Cigré, 2018
- [2] Saha, T. K., & Purkait, P. (Eds.): 'Transformer ageing: monitoring and estimation techniques', John Wiley & Sons, 2017, pp. 35-70.
- [3] Lundgaard, E. L., Hansen, W., Linhjell, D., et al.: 'Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers', IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2004, 6, (1), pp. 230 - 239.
- [4] Kouassi, K. D., Fofana, I., Cissé, L., Hadjadj, Y., Yapi, K. M. L., & Diby, K. A.: 'Impact of low molecular weight acids on oil impregnated paper insulation degradation', Energies, 2018, 11 (6), pp. 1465.
- [5] Lelekakis, N., Wijaya, J., Martin, D., & Susa, D.: 'The effect of acid accumulation in power-transformer oil on the aging rate of paper insulation', IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30 (3), pp. 19 - 26.
- [6] Ese, M. H. G., Liland, K. B., Lesaint, C., & Kes, M.: 'Esterification of low molecular weight acids in cellulose', IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (2), pp. 662 - 665

Untersuchungen eines Filtersystems zur Reduktion von Sauerstoff in Transformatorölen

M.Sc. Büsra Özdemir

Die Pyrolyse, Hydrolyse und Oxidation des organischen Isoliermaterials in Transformatoren führt zur Entstehung verschiedener Substanzen, die von der Isolierflüssigkeit aufgenommen werden. Dies kann die Alterung des Transformators fördern und zu Ausfällen führen. Um dem entgegenzuwirken, werden externe Systeme zur Isolierölbehandlung eingesetzt. Um die Effizienz der Gegenmaßnahmen zu erhöhen, müssen Filtersysteme entwickelt werden, die sowohl eine effektive Entwässerung als auch eine Reduzierung des gelösten Sauerstoffs für verschiedene Isolierflüssigkeiten gewährleisten. Ziel ist es, in Zukunft ein System zu entwickeln, das neben Wasser und schlammartigen Alterungsprodukten erstmals auch Sauerstoff aus der Isolierflüssigkeit entfernen kann, ohne dabei die ggf. vorhandenen Fehlgerüche zu entfernen, welche mittels DGA (Dissolved Gas Analysis, Gas in Öl Analyse) ausgewertet werden können. Dazu wurden verschiedene Materialien auf Eignung für ein solches Filtersystem untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass Eisenoxidpulver gemischt mit verschiedenen Katalysatoren als Filtermaterial besonders geeignet ist. In der Folge wurden verschiedene Sättigungsversuche durchgeführt, um die Betriebsparameter einer solchen Filteranlage zu ermitteln.

Statisches Filtersystem

Zur Ermittlung der erforderlichen Menge an Filtermaterial wurden zunächst verschiedene Sättigungsversuche in einem statischen System durchgeführt. Ziel war es, das Filtermaterial zur Sättigung zu bringen. Dazu wurden verschiedene Mengen der Eisenoxidmischung in Isolieröl gealtert und der Sauerstoffgehalt des gealterten Öls bestimmt. Zunächst wurde ein mit dem Filtermaterial gefüllter Beutel in einer Metallflasche in 325 ml Isolieröl bei drei verschiedenen Temperaturen, 20 °C, 40 °C und 60 °C, gealtert. Nach jeweils 3 Tagen wurde das Öl gewechselt und das gealterte Öl auf seinen Sauerstoffgehalt untersucht. Dieses Verfahren wurde mehrmals wiederholt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Sauerstoffreduzierung

Filtermaterial	Probe	O ₂ [ppm]
	<i>Nullprobe</i>	36492
20°C	3 Tage	20714
	6 Tage	23755
	9 Tage	29176
	15 Tage	25902
40°C	3 Tage	14972
	6 Tage	11952
	9 Tage	13730
	15 Tage	2481
60°C	3 Tage	7347
	6 Tage	-
	9 Tage	8722
	15 Tage	4723

Der Sauerstoffgehalt in den Ölproben nach allen Ölwechseln zeigt eine deutliche Reduzierung gegenüber dem Ausgangssauerstoffgehalt der Nullprobe. Beispielsweise kann der Sauerstoffgehalt nach 15 Tagen mit insgesamt 3 Ölwechseln um ca. 30000 ppm reduziert werden. Somit ist auch nach 2 Wochen noch keine Sättigung des Filtermaterials eingetreten. Aus diesem Grund wurde die Filtermaterialmenge auf 3 g reduziert und die Ölmenge auf ein Verhältnis von 1:10 erhöht, um eine schnellere Sättigung des Filtermaterials zu erreichen. Außerdem wurden die Ölwechselintervalle auf drei und acht Tage verlängert. Zusätzlich wurde dieser Versuch auch mit einem Verhältnis von 1/20, d.h. 1,5 g Filtermaterial pro 3 l Öl wiederholt. Auch bei diesen beiden Reduzierungen des Filtermaterials war kein Sättigungsverhalten erkennbar. Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass dieses fehlende Sättigungsverhalten auf eine mangelnde Durchmischung des Öls zurückzuführen ist. Dadurch wird das gealterte Öl nicht vom Filter weg transportiert und es findet keine ausreichende Durchmischung von gealtertem und frischem Öl statt. Aufgrund dieser Annahme wurde der Versuch entsprechend modifiziert.

Die Probenflaschen mit einem Mischungsverhältnis von Filtermaterial und Öl von 1:10 wurden während des Alterungsprozesses auf einem Magnetrührer gelagert, um eine ständige Zirkulation des Öls in der Flasche zu gewährleisten. Auch in diesem Versuch wurde das Öl regelmäßig kontrolliert und gewechselt. Nach einer Woche war der Sauerstoffgehalt um ca. 12000 ppm und nach 2 Wochen um ca. 18000 ppm reduziert. Trotz dieser hohen Reduktion ist bei ständiger Durchmischung kein Sättigungsverhalten des Filtermaterials erkennbar.

Dynamisches Filtersystem

Um eine zuverlässigere Durchmischung des Filtermaterials mit dem Isolieröl zu erreichen, wurde ein dynamisches Filtersystem entwickelt, bei dem sich das Filtermaterial, gemischt mit Zellulose, in einer Fritte befindet. Diese Fritte ist an einen Ölkreislauf mit insgesamt 2,8 l Öl angeschlossen, so dass das Öl mittels einer Pumpe kontinuierlich durch den Filter gepumpt wird. Dadurch wird das an dem Filtermaterial befindliche Öl ständig ausgetauscht. Zusätzlich wird das Öl erwärmt. Durch das Mischen des Filtermaterials mit Zellulose wird die Kontaktfläche zwischen Filtermaterial und Öl vergrößert. Die Versuchsdauer wurde variiert. Dabei wurde der Sauerstoffgehalt des Öls nach einem, zwei und drei Tagen untersucht. Bereits nach einem Tag war eine deutliche Reduktion des Sauerstoffgehaltes zu erkennen. Nach zwei und drei Tagen stieg der Sauerstoffgehalt wieder an. Das Filtermaterial ist hier also bereits nach einem Tag gesättigt. Der Zeitpunkt der Sättigung wurde genauer untersucht, indem das Öl nach zwei, vier, acht und 24 Stunden analysiert wurde. Bei dieser Anordnung ist das Filtermaterial nach etwa acht Stunden gesättigt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Kontaktfläche des Filtermaterials mit dem Öl untersucht. Dazu wurde in der bestehenden Anlage die bisherige Fritte mit 3 g Eisenoxidpulver und 0,6 g Zellulose durch zwei Fritten mit jeweils 1,5 g Eisenoxidpulver und 0,6 g Zellulose ersetzt. Dadurch fließt das Öl bei gleicher Menge durch eine größere Oberfläche des Filtermaterials. Der Vergleich dieser beiden Filtersysteme zeigt keine schnellere Reduktion des Sauerstoffgehaltes im Öl.

Fazit

Zur Bestimmung der erforderlichen Menge an Filtermaterial wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Es zeigte sich, dass ein statisches Filtersystem nicht geeignet ist, um Sauerstoff aus dem Öl zu filtern. Ein dynamisches Filtersystem ist dagegen geeignet und kann den Sauerstoffgehalt in gesättigtem Isolieröl auf wenige 1000 ppm reduzieren ohne die anderen gelösten Gase signifikant zu beeinflussen.

Fast Arc Detection in Power Transformer Using Fiber Optic Sensor

M.Sc. Aref Sharifi

Arc is one of the most dangerous faults in transformers, because it can increase the internal pressure of the transformer tank within milliseconds, resulting in serious consequences such as explosion. Transformers are equipped with Buchholz relays (BHR) to detect faults, enabling circuit breakers (CB) to disconnect the transformer. The time duration between the internal fault occurrence and the disconnection of the transformer is typically around 100 milliseconds. Due to the intensity of the arc energy and the sudden increase in pressure inside the transformer, the power interruption cannot be performed fast enough in some cases, leading to a tank rupture. Therefore, the objective of this investigation is to develop a method for detecting arcs before the rapid increase in pressure. To achieve this objective, a novel sensor is designed using fiber optic cable to recognize the visible light emitted by the arc. In this study, the sensor and its operation are tested in different conditions such as different oils, temperature variations, reflecting housing, and oils with different degrees of aging. According to the results, the method presented in this study shows a high potential for fast arc detection. Moreover, this patented sensor is well optimized for application inside the transformer.

The fiber optic sensors are positioned at two distinct distances (7 cm and 22 cm) from the arc source within a glass container filled with oil, all enclosed within a reflective tank. When the signal is received by the sensor, it is transferred through an optical cable to another chamber, containing the detector and oscilloscope. The entire measurement system, including the oscilloscope and detector, is located in a separate aluminum housing. Due to the fact that the arc creates intense EMI and light waves at the moment of occurrence, the main goal of this project is to study light detection. Only optical cables enter the chamber, and since the cables are non-conductive, it does not affect the performance of the system against EMI noises. Figure 1 shows all the details.

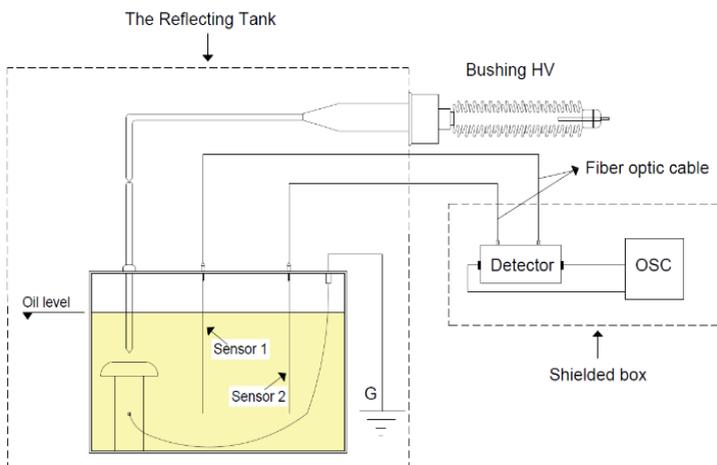


Figure 1: Set-up for arc detection using 2 fiber optic sensors

When the fiber optic sensor receives the signal from the light, it is transferred through the fiber optic cable into a specially designed electric circuit. This circuit is integrated with various active and passive components to detect arc light and convert it into a voltage signal. It characterizes as a transimpedance circuit and special semiconductor device is used to produce current from the received light, which is referred to as a photodiode. Figure 2 shows the complete schematic of the circuit. Initially, the generated current I_{Ph} is converted to voltage using the feedback resistance R_f , and at the same time, this voltage U_A is calculated as the output voltage.

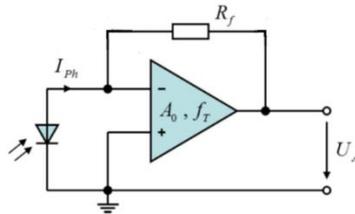


Figure 2: The Transimpedance circuit

In Figure 3, the signal resulting from the arc is shown when a pressboard is placed around the electrode at the moment of occurrence. The threshold level is set at a value higher than the internal noise level of circuit, which is around 20mV. In the first few milliseconds, the signal intensity is higher, and during the time, the signal intensity decreases. Due to the ionization of the mineral oil surrounding the arc, bubbles result. The intensity of light is reduced due to the bubbles. During an arc, light rays are emitted rapidly inside the oil at less speed than the air. Light beams entering the sensor are absorbed by fiber optics immediately after the light hits it. The oil absorbs light produced by the arc when the distance increases, which makes the signal intensity decrease at a distance of 22 cm.

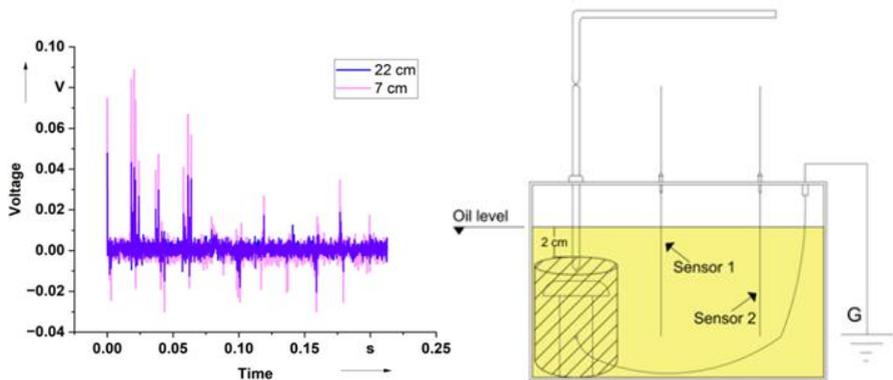


Figure 3: The signal is in the case of electrodes surrounded by a cylindrical barrier

Investigation of Sensor Response During Arc Occurrence Using Finite Element Method Simulation in ANSYS SPEOS

M.Sc. Aref Sharifi

In this study, the main objective is to simulate and analyze the sensor's real-time functioning when an electrical arc occurs, utilizing the FEM simulation capabilities of ANSYS. The study uses ANSYS SPEOS's design and sketch tools to create an accurate model reflecting the experimental setup (Figure 1).



Figure 1: Working with Ansys Speos

Figure 2 illustrates a glass container designed with the specified dimensions of 30 cm in width and 20 cm in height. Additionally, an arc was created 4.5 cm from the right side of the glass container. Two optical fiber sensors, each with a diameter of 1 mm, were also designed. The first optical fiber sensor is positioned 7 cm from the arc, while the second optical fiber sensor is placed 22 cm from the arc.

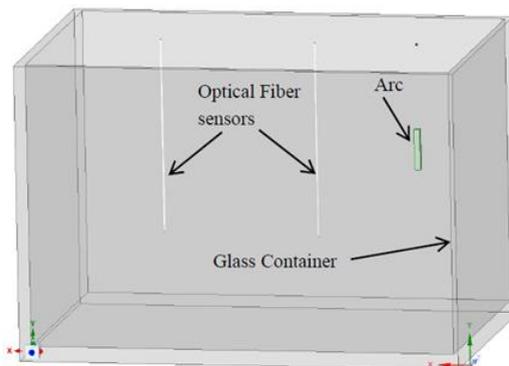


Figure 2: Simulation set-up

The next process step is to create material and surface properties for the designed objects. It is important to define the optical property settings of materials and surfaces, which are involved in the simulation as precisely as possible in order to ensure simulation accuracy. As shown in Figure 3, light rays emitted from the arc source in the oil are refracted upon hitting the surface of the sensor and remain inside.

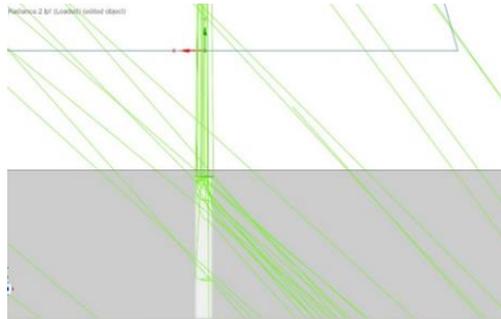


Figure 3: Light rays coming out from the first fiber

Light traveling in a given direction is measured as luminance, which is a photometric measure of the intensity of light per unit area. In Figure 4, the luminance measured in the first optical fiber sensor, which is positioned in close proximity to the arc source, exhibits a significantly higher value of 12,848 Cd/m^2 compared to the second optical fiber sensor, which records a luminance of 7,091 Cd/m^2 . According to the simulation results, the intensity of light rays emitted from the first optical fiber sensor, located near the source of the arc, is greater than that from the second optical fiber sensor. This indicates that the light sensing performance is highly dependent on the spatial positioning of the optical fiber sensor relative to the arc source. However, the simulation results fit to the measured ones, thus using the simulation results it is now possible to determine the maximum distance between a certain light source and a sensor, that still is able to detect the emitted light from the source.

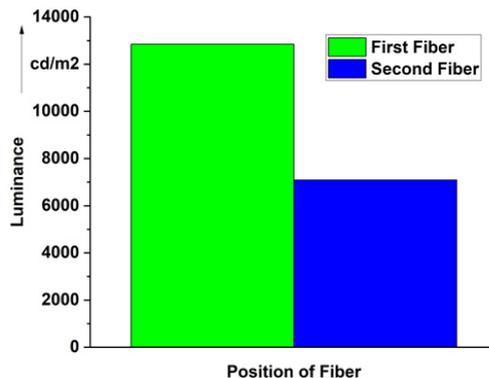


Figure 4: Comparison of results of first fiber vs second fiber sensor

PDIV und AC Durchschlagspannungsverhalten von isoliertem Lackdraht in verschiedenen Einbettungsmedien

M.Sc. Laureen Stahl

Die effiziente Nutzung von Energie ist eine der wichtigsten Herausforderungen der modernen Welt. Die zunehmende Elektrifizierung und der technologische Fortschritt treiben die Nachfrage nach Elektromotoren an, da diese in Autos, aber auch Rollstühlen, Fahrrädern, Robotern und in der Luftfahrt verwendet werden. Steigende Anforderungen und Nachfrage erfordern zur Erreichung der politischen Ziele im Zusammenhang mit dem Klimawandel Fortschritte in der Produktionstechnologie und Qualitätskontrolle.

Ein Stator ist durch den Aufbau der Isolierung und der Wicklung ein komplexes Bauteil. Bei einer Niederspannungsmaschine wird auf die Isolierung in der Nut eine Wicklung aus Lackdraht platziert. Anschließend wird der Stator mit Lack besprenkelt, in Lack getaucht oder beispielsweise mit Epoxidharz unter Vakuum imprägniert. Demnach sind die Bauteile eines Stators das Blechpaket, die Nutisolierung und die Wicklung mit Imprägnierung. Die Kenntnis über die Alterungsmechanismen des elektrischen Isoliersystems eines Elektromotors ist unabdingbar, da dies zukünftige Entwicklungen in Bezug auf die Qualität und Lebensdauer von Elektromotoren beeinflusst. Die Alterung des Isoliersystems wird durch die elektrischen, thermischen, mechanischen und umweltbedingten Belastungen hervorgerufen, die wiederum Alterungsmechanismen fördern. Es wird zwischen rotierenden Maschinen mit einer Bemessungsspannung unter 700 V, diese werden als teilentladungsfreie Maschinen bezeichnet, und über 700 V, diese werden als teilentladungsresistente Maschinen bezeichnet, unterschieden. Teilentladungen treten in luftgefüllten Hohlräumen innerhalb des Isoliersystems auf. Durch das Auftreten von Teilentladungen in elektrischen Maschinen kann das Isoliersystem innerhalb kurzer Zeit versagen und dies kann zum Ausfall der Maschine führen. Aus diesem Grund ist die TE-Einsatzspannung (PDIV) ein entscheidender Parameter, der bei der Auslegung berücksichtigt werden muss. Bei teilentladungsfreien Maschinen ist die thermische Belastung ein entscheidender Alterungsfaktor.

In der Vergangenheit wurde bereits Wasser als Gegenelektrode eingesetzt, indem zunächst Untersuchungen an verdrehten Drähten erfolgten, wobei beide Drähte an Spannung angeschlossen und das Wasser als Gegenelektrode verwendet wurde, um die Funktionalität des Prüfverfahrens zu überprüfen. Nun erfolgte ein Vergleich zwischen den Einbettungsmedien Luft und Wasser, weshalb ein Draht an Spannung gelegt wird, während der andere Draht als Gegenelektrode verwendet wird. Die Messung der PDIV und der Durchschlagspannung erfolgt auf zwei verschiedene Arten. Zunächst in dem Einbettungsmedium Luft und anschließend in dem Einbettungsmedium Wasser. Wasser weist eine wesentlich höhere Permittivität auf als Luft. Die hohe Permittivität bewirkt eine Feldverdrängung in den festen Isolierstoff, wodurch kleinste Qualitätsmängel und Schwachstellen erkannt werden können.

Es werden verdrehte Drähte gemäß der Norm *IEC 60851-5* hergestellt und anschließend thermisch gealtert. Da der nach Norm hergestellte Prüfkörper aus einem durchgehenden Draht besteht und an einer Seite aufgeschnitten wird, würde es bei Verwendung von Wasser als Gegenelektrode zu einem Kontakt zwischen dem Wasser und dem Draht kommen. Da die hohe Leit-

fähigkeit von Wasser einen Kurzschluss zwischen der Spannungsseite und der Erde verursachen würde, muss der Messaufbau modifiziert werden. Diese Schnittkanten sind irrelevant, wenn gemäß der Norm in Luft oder einer Isolierflüssigkeit gemessen wird. Um einen besseren Vergleich zwischen beiden Einbettungsmedien zu haben, wird jedoch für beide Einbettungsmedien der modifizierte Messaufbau verwendet.

Es wurden die Auswirkungen der thermischen Alterung auf die Durchschlagspannung und die PDIV von Lackdrähten ermittelt. Anstatt thermisch vorkonditioniert zu werden, wurden die verdrehten Drähte direkt im Ofen gealtert. Dies erklärt den Anstieg der PDIV und der Durchschlagspannung nach 125 h im Gegensatz zum nicht gealterten Zustand (0 h). Das Material könnte möglicherweise ausgehärtet beziehungsweise getrocknet sein, da das Material vor der Alterung bei Raumtemperatur und Umgebungsfeuchte gelagert wurde. Bei den Messungen der PDIV in Luft ist eine geringfügige Alterung mit der Zeit zu erkennen, während die PDIV der Lackdrähte in Wasser nahezu konstant bleibt. Im direkten Vergleich der Umgebungsmedien wird deutlich, dass die PDIV der verdrehten Twiste in Wasser niedriger ist, als die PDIV der in Luft gemessenen Lackdrähte. Nach einer Alterungszeit von 125 h erreicht die Durchschlagspannung der verdrehten Twiste, gemessen in Luft, das Maximum und beginnt anschließend zu sinken. Im Verlauf der Alterung ist keine konstante Abnahme der Durchschlagspannung erkennbar. Bei einer Alterungszeit von 1000 h wurde ein deutlich niedrigerer Mittelwert der Durchschlagspannung im Vergleich zu den anderen Alterungszeiten festgestellt. Dies ist auf zwei Twiste zurückzuführen, deren Durchschlagspannung deutlich unterhalb der restlichen Durchschlagspannungswerte lag. Ein möglicher Grund hierfür ist die im Datenblatt angegebene Hochspannungsfehlerzahl von weniger als 7 pro 100 m. Bei den Untersuchungen der Durchschlagspannungen der Lackdrähte in Wasser ist nach der anfänglichen Erhöhung keine Alterung der Lackdrähte zu erkennen. Es ist ebenfalls auf zwei verdrehte Twiste zurückzuführen, dass die Durchschlagspannung nach 500 h Alterung geringfügig geringer ist als nach 125 h, 250 h, 1000 h und 1500 h.

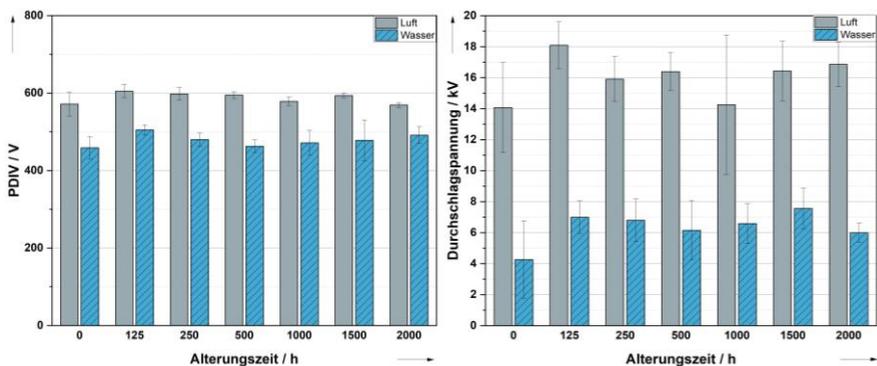


Bild 1: PDIV (links) und Durchschlagspannung (rechts) der verdrehten Twiste gemessen in Luft und Wasser

Ein Vergleich der in den beiden Einbettungsmedien getesteten verdrehten Twiste zeigt, dass die Durchschlagspannungen in Wasser deutlich geringer sind als die Durchschlagspannungen der

in Luft getesteten Lackdrähte. Bei der Prüfung der Lackdrähte in Luft liegt an den Kontaktpunkten der beiden Drähte ein erhöhtes elektrisches Feld vor. Im Gegensatz zu Luft hat Wasser eine hohe Permittivität. Wie in Bild 2 dargestellt, findet infolge der hohen Permittivität eine Feldverdrängung in den festen Isolierstoff statt. Die Oberflächen der verdrihten Drähte sind nicht glatt, sondern weisen Unebenheiten auf. Diese Unebenheiten werden bei der Anwendung von Wasser als Gegenelektrode mit Wasser gefüllt, weshalb ein starkes divergentes elektrisches Feld erzeugt wird. Dies kann zu einem frühzeitigen Durchschlag führen. In der Simulation wird deutlich, dass selbst kleine Unregelmäßigkeiten erhebliche Auswirkungen haben.

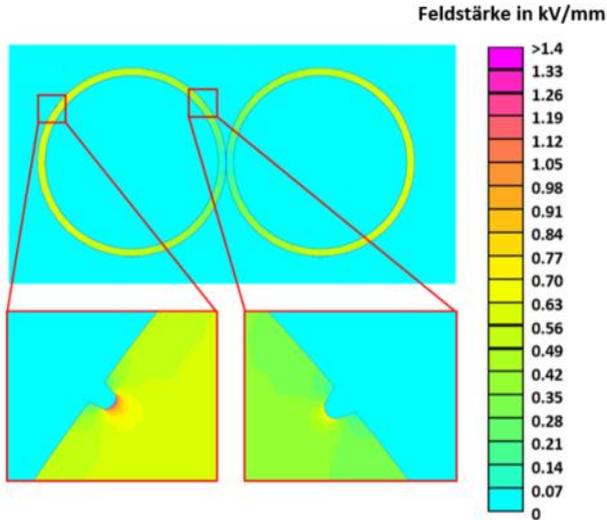


Bild 2: Elektrische Feldverteilung im Isoliersystem von verdrihten Twisten mit Unebenheiten im Einbettungsmedium Wasser

Demnach sind die im Einbettungsmedium Wasser gemessenen Werte der PDIV und der Durchschlagspannung der Lackdrähte niedriger als in Luft. Die Permittivität des verwendeten Lacks ist höher als die von Luft. Dies bedeutet, dass die Isolierung in Luft von außen zerstört wird, da das elektrische Feld im verdrihten Bereich vorherrscht, wo die beiden Drähte den geringsten Abstand haben. Umgekehrt wird das Feld in das Innere des Lacks, den Isolierstoff, verdrängt, wenn Wasser – eine Flüssigkeit mit hoher Permittivität – als Einbettungsmedium verwendet wird. Die Tests der Durchschlagspannung und der PDIV zeigen, dass die Verwendung von Wasser als Ersatztestmethode selbst kleinste Isolationsfehler detektieren kann, beispielsweise in der Produktion zur Qualitätskontrolle. Daher scheint der Test in Luft günstig zu sein, um die Festigkeit der verdrihten Bereiche zu überprüfen, während der Test in Wasser ein Qualitätstest des gesamten Isoliermaterials ist.

Thermische Alterung von Kühlflüssigkeiten für den Einsatz in elektrischen Maschinen der Luftfahrtindustrie

M.Sc. Laureen Stahl

Um den Treibstoffverbrauch und die Betriebskosten zu senken, die Treibhausgasemissionen zu begrenzen und die Nachhaltigkeit in der Luftfahrtindustrie zu fördern, ist die Elektrifizierung von Flugzeugen eine Schlüsselstrategie, die sowohl vollelektrische als auch hybridelektrische Technologien umfasst. Derzeit ist der Luftverkehr für etwa 3 % der weltweiten Kohlendioxidemissionen verantwortlich, wobei ein Großteil der verkehrsbedingten Kohlendioxidemissionen auf die Zivilluftfahrt entfällt. Experten der Europäischen Union, der Mitgliedsstaaten und der Luftfahrtbranche sind im europäischen Forschungsbeirat für Luft- und Raumfahrt (ACARE) vertreten. Diese haben eine strategische Forschungsagenda mit konkreten Zielen bis zum Jahr 2050 erarbeitet. Im Strategiepapier „Flightpath 2050“ sind die ehrgeizigen Ziele festgelegt. Demnach sollen bis zum Jahr 2050 die Kohlenstoffdioxidemissionen um 75 % und die Stickoxidemissionen um 90 % pro Passagierkilometer gegenüber dem Jahr 2000 reduziert werden. Effizientere Flugzeuge, alternative Treibstoffe und alternative Antriebe sind Möglichkeiten, diese Ziele zu erreichen. Durch den Einsatz von hybridelektrischen und vollelektrischen Antriebstechnologien besteht die Möglichkeit, fossile Brennstoffe insbesondere auf Kurz- und Mittelstreckenflügen teilweise oder vollständig aus der Luftfahrt zu verdrängen. Aufgrund der geforderten hohen Leistungsdichte des Antriebssystems treten hohe Spannungsbelastungen und hohe Wärmeverluste u.a. in Motor, Umrichter und Batterie auf. Diese stellen hohe Anforderungen an die Technologien des vollelektrischen und hybridelektrischen Fliegens sowie an die entsprechenden Kühl- und Isoliermedien.

Die direkte Ölkühlung von elektrischen Maschinen ist insbesondere für vollelektrische und hybridelektrische Flugzeugantriebe vielversprechend, da diese eine hohe Kühlwirkung ermöglicht. In der Literatur werden die Herausforderungen an das Wärmemanagement und die Strategien für das Kühlsystem in Verbindung mit einem direkt flüssigkeitsgekühlten Motor beschrieben, aber auch die Forschung an möglichen alternativen Flüssigkeiten sollte berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund werden die Einflüsse der thermischen, katalytisch beschleunigten Alterung auf verschiedene Eigenschaften der Kühlmedien, welche möglicherweise für den Einsatz in elektrischen Maschinen mit Direktkühlung geeignet sind, untersucht, um Erkenntnisse über die thermische Stabilität und die Lebensdauer der ausgewählten Kühlflüssigkeiten zu gewinnen. Hierzu wurden vier Flüssigkeiten, ein für die Luftfahrtindustrie entwickeltes Schmiermittel (S1), zwei für die Luftfahrtindustrie entwickelte synthetische Ester (E1 und E2) und ein Transformatorenöl auf Mineralölbasis (M1), untersucht. Durch die Zugabe von verschiedenen Materialien, die in Kühlsystemen und Elektromotoren verwendet werden, wird die katalytische Wirkung dieser Materialien berücksichtigt. Die dargestellten Mittelwerte der Ergebnisse einzelner dielektrischer, elektrischer und thermophysikalischer Eigenschaften sind auf den maximalen gemessenen Mittelwert bezogen. Es wird deutlich, dass die Durchschlagspannungen (Bild 1) der beiden synthetischen Ester, sowie die des Transformatorenöls auf Mineralölbasis über den betrachteten Zeitraum trotz erhöhter thermischer Belastung annähernd konstant bleiben, während die Durchschlagspannung des Schmiermittels abnimmt. Für die Proben der beiden synthetischen Ester waren ab einer Alterungszeit von 1500 h Partikel in den Flüssigkeiten zu erkennen, weshalb die geringfügige Abnahme der Durchschlagspannungen auch darauf zurückzuführen sein

könnte. Insbesondere für die beiden synthetischen Ester, welche ein hohes Wasserlösungsvermögen aufweisen, kann aufgrund der recht ähnlichen absoluten Wassergehalte der relative Wassergehalt als konstant angenommen werden.

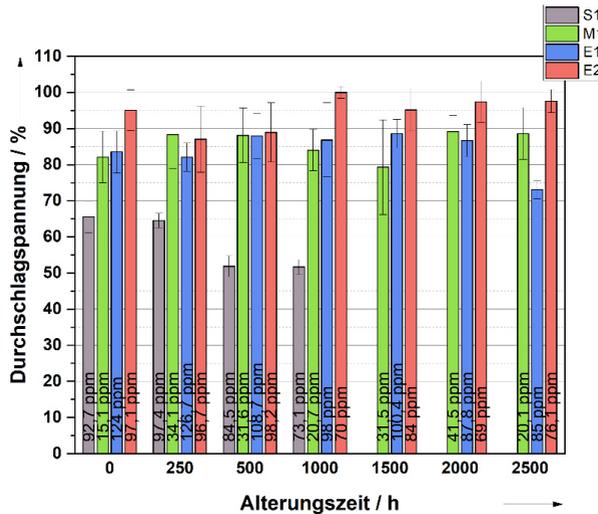


Bild 1: Vergleich der Durchschlagspannung der verschiedenen Flüssigkeiten

Im Vergleich der Flüssigkeiten zueinander wird deutlich, dass das Schmiermittel, im Gegensatz zu den restlichen Flüssigkeiten einen signifikant höheren dielektrischen Verlustfaktor aufweist, der mit zunehmender Alterungszeit zunimmt (Bild 2). Die beiden synthetischen Ester haben aufgrund deren teilweise polaren Struktur, im Vergleich zu dem Transformatoröl auf Mineralölbasis mit rein unpolare chemischer Struktur, bereits im ungealterten Zustand einen höheren Verlustfaktor. Für den synthetischen Ester E2 und das Transformatoröl auf Mineralölbasis ist mit zunehmender Alterungszeit eine Zunahme des Verlustfaktors zu erkennen. Zudem wird deutlich, dass der dielektrische Verlustfaktor des synthetischen Esters E1 oberhalb dessen von E2 liegt. Die erhöhten Werte des Verlustfaktors des synthetischen Esters E2 nach 500 h und 2500 h sind möglicherweise auf die in der Flüssigkeit vorhandenen Partikel zurückzuführen, welche den dielektrischen Verlustfaktor beeinflussen könnten.

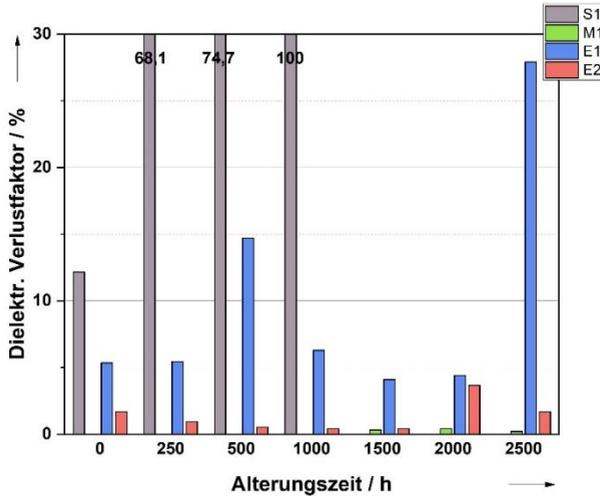


Bild 2: Vergleich des dielektrischen Verlustfaktors der verschiedenen Flüssigkeiten

Die dynamische Viskosität ist für die vier ausgewählten Flüssigkeiten in Bild 3 dargestellt. Hierbei sind zur besseren Vergleichbarkeit alle Diagramme auf den höchsten gemessenen Wert der dynamischen Viskosität des synthetischen Esters E2 nach einer Alterung von 2500 h bei einer Temperatur von 10 °C bezogen. Aus vorherigen Untersuchungen ist bekannt, dass die Viskosität von Mineralöl niedriger ist, als die von synthetischen Estern für Transformatorenanwendungen, da diese direkt von der chemischen Struktur abhängt. Bei den durchgeführten Untersuchungen kann dies lediglich teilweise beobachtet werden, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die synthetischen Ester speziell für die Luftfahrtindustrie entwickelt wurden. Die Viskosität kann durch Veränderung der chemischen Struktur aufgrund ablaufender Alterungsmechanismen oder das Hinzufügen von Additiven, die einerseits die Alterung katalysieren können, und somit weitere Alterungsprodukte generieren, und andererseits bereits rein durch das Vorliegen in der ungealterten Isolierflüssigkeit, reduziert werden. Es wird deutlich, dass die dynamische Viskosität des synthetischen Esters E2, im Vergleich zu den restlichen Flüssigkeiten deutlich erhöht ist. Insbesondere aufgrund des möglichen Einsatzes der Flüssigkeit bei Minustemperaturen und der in diesem Temperaturbereich höheren dynamischen Viskosität ist diese Flüssigkeit möglicherweise nicht für den späteren Anwendungsfall geeignet. Für alle Flüssigkeiten wird deutlich, dass die dynamische Viskosität, insbesondere im niedrigen Temperaturbereich, mit der Alterung zunimmt. Dies ist auf die Oxidation der Flüssigkeiten und die entstehenden Alterungsprodukte zurückzuführen.

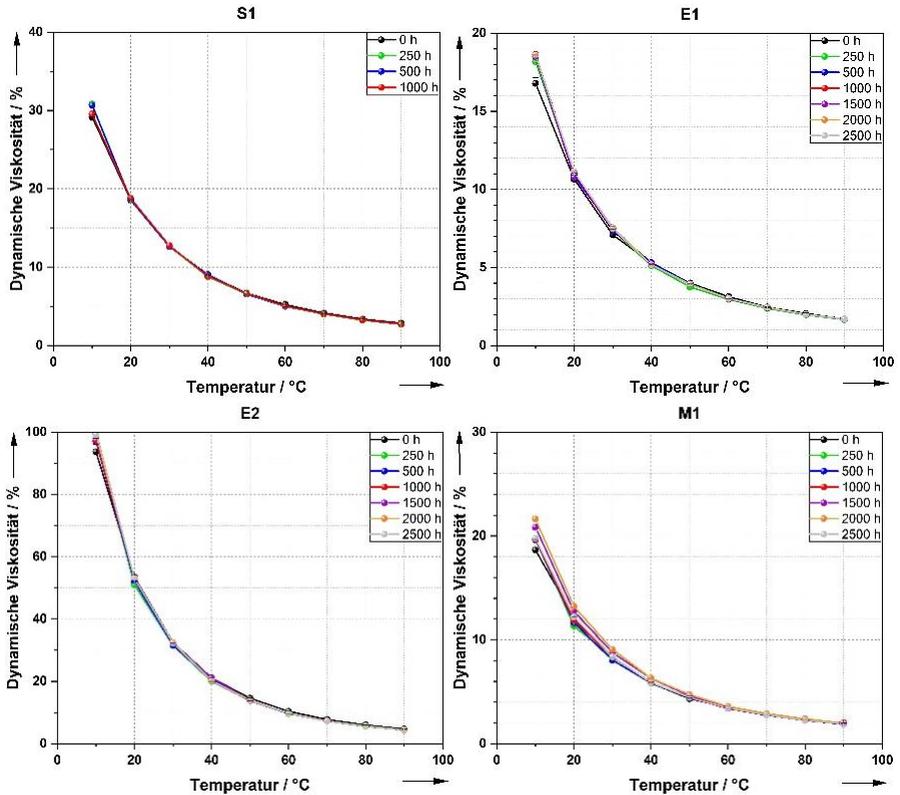


Bild 3: Dynamische Viskosität der verschiedenen Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Alterungszeit

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die dynamische Viskosität möglicherweise bei Minustemperaturen deutlich ansteigt, was ein Ausschluss der Flüssigkeiten für die spätere Anwendung in einem hybridelektrischen oder vollelektrischen Flugzeug bedeuten könnte. Vor diesem Hintergrund werden weitere Untersuchungen mit Messungen der dynamischen Viskosität im niedrigeren Temperaturbereich notwendig.

Neben der dynamischen Viskosität ist die Wärmeleitfähigkeit eine wichtige physikalische Größe für den späteren Anwendungsfall zur Kühlung.

Die Wärmeleitfähigkeit ist bezogen auf den maximalen Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit des synthetischen Esters E2 dargestellt. Im Ausgangszustand ist die Wärmeleitfähigkeit des Schmiermittels ähnlich der des Transformatoröls auf Mineralölbasis und der des synthetischen Esters E2, während die Wärmeleitfähigkeit des synthetischen Esters E1 geringer ist. Lediglich bei dem Schmiermittel kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Reduktion der Wärmeleitfähigkeit und der Alterung hergestellt werden. Für die restlichen Flüssigkeiten kann

hingegen lediglich eine tendenzielle Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Alterung erkannt werden, da die Ausgleichsgeraden einzelner Alterungszeiten Ausnahmen darstellen. Dies ist möglicherweise wiederum auf die sichtbaren Partikel, insbesondere ab einer Alterungszeit von 1500 h zurückzuführen.

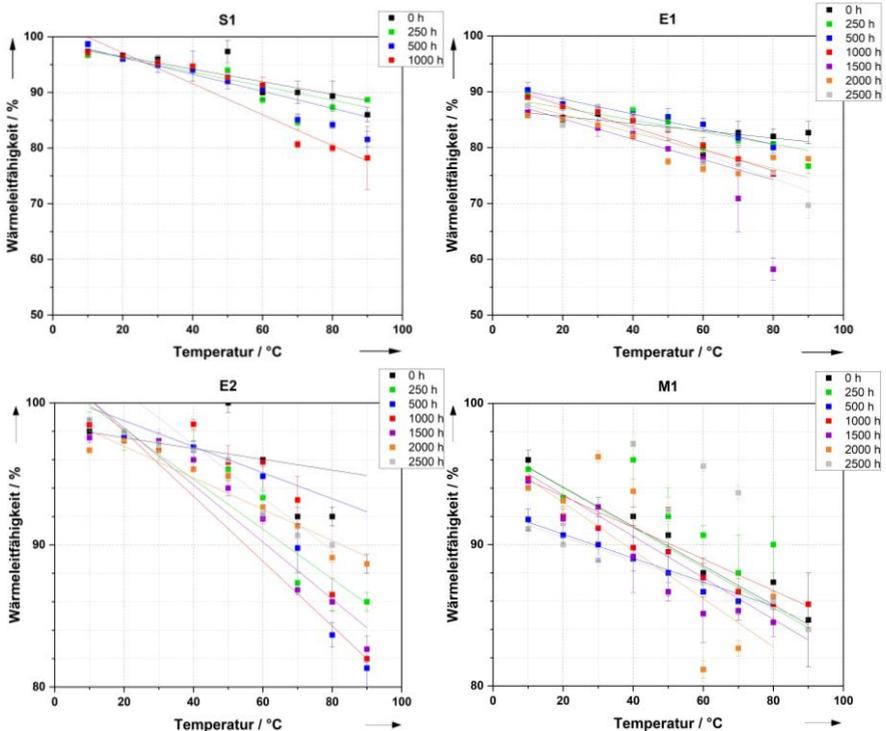


Bild 4: Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Alterungszeit

Die Ergebnisse zeigen, dass die elektrischen, dielektrischen und thermophysikalischen Eigenschaften infolge der beschleunigten thermischen und katalytischen Alterung der verschiedenen Kühlfüssigkeiten verändert werden. Insbesondere die Durchschlagsspannung des Schmiermittels nimmt nach der Alterung deutlich ab, während die Durchschlagsspannung der beiden betrachteten Ester über die Alterungszeit nahezu unverändert bleibt. Auch auf die thermophysikalischen Eigenschaften hat die Alterung für den betrachteten Zeitraum und die betrachteten Temperaturbereiche einen Einfluss. Dieser ist gering bzgl. der dynamischen Viskosität, bei der ein geringer Anstieg im niedrigen Temperaturbereich zu beobachten ist, während die Wärmeleitfähigkeit sich bei Alterung signifikanter verändert.

Eine Möglichkeit zur Ansteuerung von leistungselektronisch basierten Hochspannungsschaltern zur Erzeugung von Spannungsimpulsen hoher Flankensteilheit

M.Sc. Javier Torres

Der sichere und zuverlässige Betrieb des Energieversorgungssystems, insbesondere auf der Hoch- und Mittelspannungsebene, ist von besonderer Relevanz. Gerade in diesem Netzbereichen kommt es jedoch zu umfangreichen Änderungen infolge der Energiewende.

Die Natur der erneuerbaren Energiequellen erfordert die Anwendung von Umrichtern, um die damit erzeugte Energie ins Netz einzuspeisen. Aus diesem Grund werden immer mehr leistungselektronische Komponenten ins Netz eingeführt, welche den Wechselspannungsverlauf mittels Elektronikschaltungen nachbilden. Parallel erfolgt eine Technologieveränderung im Bereich der Leistungselektronik, welche das Ziel verfolgt, schnellere Schaltvorgänge zu ermöglichen. Dieses Verhalten ist erwünscht, wenn es um die Reduzierung der Oberschwingungen geht. Mit höheren Schaltgeschwindigkeiten werden höhere Pulsfrequenzen ermöglicht und somit kann der sinusförmige Spannungsverlauf besser nachgebildet werden. Dadurch verringert sich der Bedarf an kostenintensiven Filtern. Allerdings steigt dabei auch die Spannungsflankensteilheit einzelner überlagerter Impulse an. Die Kombination aus wegfallenden oder kleiner dimensionierten Filtern, der steigenden Flankensteilheit und höheren Wiederholrate der Impulse wird die Belastung der Isoliermedien erheblich erhöhen.

Das Ausmaß, in dem solche Spannungsbeanspruchungen die Qualität von Isolierstoffen beeinflussen, ist aktuell nur unzureichend bekannt. Die Alterungsmechanismen und die Geschwindigkeit, mit der sich die Eigenschaften der Isolationsmaterialien verändern, werden erst in Ansätzen verstanden. Eines der Haupthindernisse für die experimentelle Forschung ist der Mangel an geeigneten Spannungsquellen, welche die notwendigen Spannungsamplituden erreichen können.

Die Norm IEC62068:2013 beschreibt Prüfbedingungen für wiederkehrende Impulsbelastungen. Allerdings sind normkonforme Prüfgeräte für wiederkehrende Impulsbelastungen im heutigen Markt selten zu finden. Die Kosten dieser Anlagen schränken auch den Zugang zu diesem Forschungsbereich ein. Außerdem, erzeugen aktuelle Wide-Bandgap-SiC-Halbleiter Schaltflanken, die bereits die in der Norm beschriebenen Prüfbedingungen übertreffen.

Um die Belastungen von Isoliermedien an Umrichtern nachzubilden, kann ein Rechteckimpulsgenerator genutzt werden. Mit dem Rechtecksignal lassen sich die Pulsdauern und Frequenzen besser variieren als bei einem aus Pulsen erzeugten Sinussignal. Die generierten Rechtecksignale können mit Sinussignalen überlagert werden, um realistischere Betriebsbedingungen nachzubilden. Diverse Arbeiten zeigen die Effektivität dieser Art von Generatoren, um schnelle Schaltvorgänge bei hohen Spannungen auszuführen.

Eine bekannte Schaltungstopologie, welche den Aufbau eines Hochspannungsrechteckimpulsgenerators ermöglicht ist die Superkaskode. Bei der Superkaskodenschaltung werden Hochspannung-JFETs (in diesem Fall 1,2 kV) in „Reihe“ über den Drain-Source-Kanal

geschaltet und über einen MOSFET (metall oxid semiconductor field effect transistor) gesteuert, was in Bild 1 dargestellt ist.

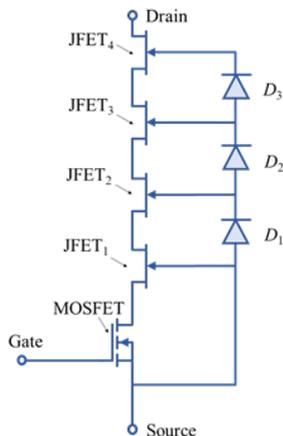


Bild 1: Superkaskodenschaltung

Die Steuerung über den MOSFET ermöglicht die Kontrolle über das Schalten der gesamten Anlage über eines herkömmlichen Gate-Treibers, welcher die Aufgabe hat, einen Stromimpuls ausreichender Amplitude in das Gate des MOSFETs einzuspeisen und den Schaltvorgang einzuleiten. Ein Ausgleichnetz ist notwendig, um das synchrone Schalten aller Transistoren zu gewährleisten.

Bei der räumlichen Auslegung der Anlage sind mehrere Faktoren von entscheidender Bedeutung, insbesondere wenn das Ziel ist, so schnell wie möglich zu schalten. Eine räumlich ausgedehnte Anordnung erhöht die Länge der notwendigen Leitbahnen und somit auch die Gesamtinduktivität der Anlage, was die Schaltgeschwindigkeit verringert. Eine kompakte Bauweise dagegen ist inkompatibel mit den Dimensionen der notwendigen Transistoren, erhöht die Gefahr eines Überschlags, wenn die Transistoren sperren und erhöht die parasitären Kapazitäten, was eine Steigung der kapazitiv gekoppelten Spannungen außerhalb der Betriebsgrenzen der Steuerungselektronik verursacht.

Der Dauerbetrieb einer Anlage dieser Art ist bisher kaum dokumentiert und stellt eine Herausforderung bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit dar. Aufgrund der relativ hohen Energie der Anlage und der schnellen Schaltvorgänge ist die Emission elektromagnetischer Strahlung hoch. Insbesondere sind diese Emissionen gefährdend für die Anlage selbst.

Ein erster zweistufiger Prototyp wurde aufgebaut. Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. U_{DD} ist ein Funktionsgenerator, der eine rechteckförmige Spannung erzeugt, welche die Schaltvorgänge einleitet. Hierbei ist wichtig, dass der Funktionsgenerator schnell genug schalten kann. Die Superkaskodenschaltung ist im Prinzip ein Spannungsverstärker. Der Schaltvorgang kann nicht schneller als die der Eingangsspannung

sein. $R_{V,G}$ ist der Eingangswiderstand des Gate-Treibers, $R_{V,D}$ ist der Lastwiderstand, deren korrekte Dimensionierung von besonderer Bedeutung bei der elektrischen Auslegung der Anlage ist. C_K ist ein Zwischenkreiskondensator und dient auch als Schutz gegen Überströme für die Gleichspannungsquelle U_{SC} , welche die Hochspannung im System bereitstellt.

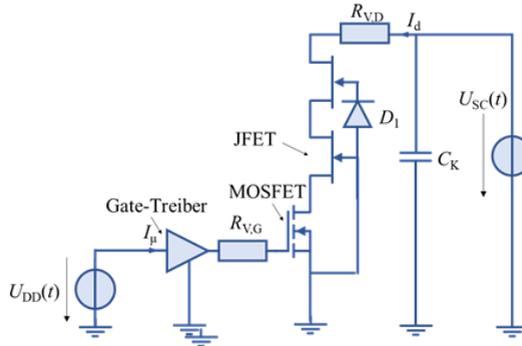


Bild 2: Versuchsanordnung

Die Schaltung wurde mit einer Schaltspannung von 1^okV getestet. Bild 3 zeigt die gemessene Spannung zwischen dem Drain des oberen JFETs und Erde, wobei die Flankensteilheit -74 kV/ μ s beträgt.

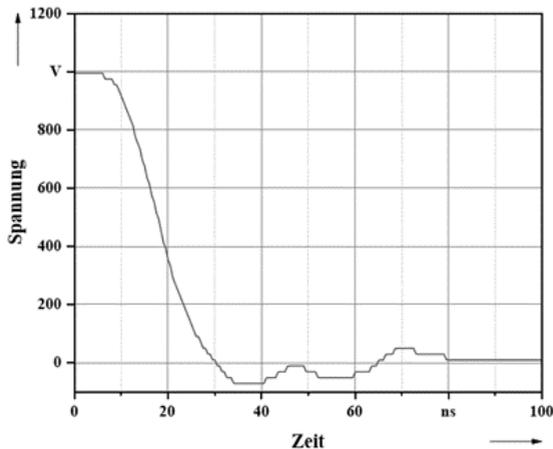


Bild 3: Spannungsverlauf am oberen Drain der Kaskodenschaltung

Allerdings zeigten sich nach wenigen Minuten Betrieb Ausfälle der Anlage, weshalb basierend auf einer Ursachenanalyse ein revidierter Schaltplan mit Filtern und Abschirmung erstellt wurde. Dabei wird die Spannungsversorgung mit zweistufigen Filtern (innerhalb und außerhalb eines Schirms) ausgestattet. Zusätzlich werden TVS-Dioden für den Leistungsteil und ESD-Schutz-

ICs für den Logikteil des Gate-Treibers verwendet. Bild 4 zeigt die schematische Darstellung der implementierten Lösung.

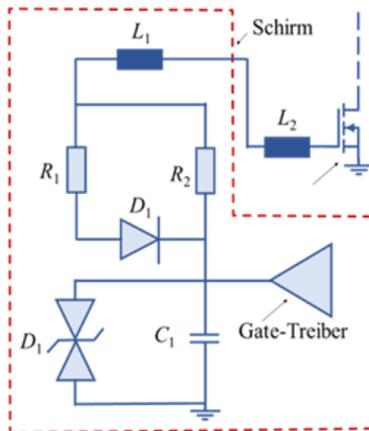


Bild 4: Implementiertes Abschirmungskonzept für den Gate-Treiber

Zusätzlich zu dem Filter am Gate des Treibers wird dieser in eine Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen integriert. Dazu wird die Ansteuerung des Treibers sowie die Stromversorgung modifiziert und aus SMD-Bauteilen aufgebaut. Der verwendete Schirm besteht aus einem lötbaren Rahmen und einem separaten Deckel. Die Rückseite der Leiterplatte in Bild 5 wird unter der Abschirmung mit einer durchgehenden Kupferschicht versehen.

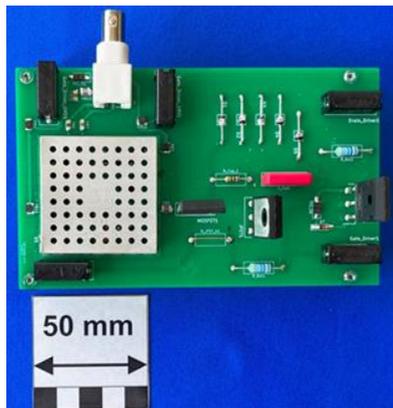


Bild 5: Schaltung mit Steuerung und Abschirmung

Bei einer Prüfspannung von 1 kV zeigt die Anlage ein stabiles Verhalten. Ein Vorteil der Superkaskodentopologie ist die Modularität des Aufbaus. Diese ermöglicht theoretisch Schaltspannungen bis 50 kV mit einem stabilen Verhalten. Um die Variabilität dieses Ansatzes

zu verifizieren, wurde ein Modul mit neun JFETs und einer maximalen Schaltspannung von 9,9 kV gebaut und zu dem 2,2 kV-Modul mit Steuerung zusammenschaltet, was in Bild 6 visualisiert ist.

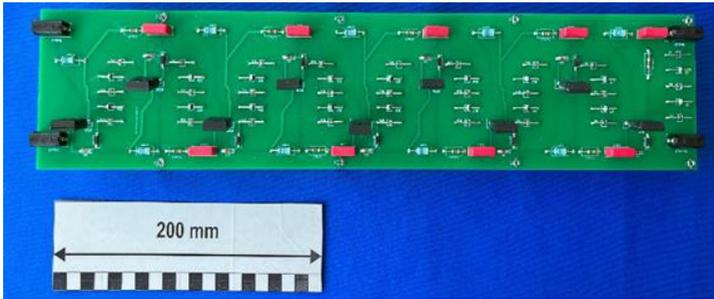


Bild 6: 9,9 kV Modul der Superkaskodenschaltung

Die Anlage wurde im Betrieb genommen und zeigte ein stabiles, ausfallloses Verhalten. Bild 7 zeigt den Spannungsverlauf zwischen dem Drain der Superkaskode und dem Erdpotential. Es wurde eine Spannung von 11 kV angelegt, wobei die Spannung am Drain der Kaskode nach dem Einschalten von 11 kV auf einen Wert von -470 V fällt und dann innerhalb der nächsten 80 ns wieder auf 1 kV ansteigt, bevor diese auf null abfällt, was in Bild 7 gezeigt ist. Der Einschaltvorgang dauert circa 39 ns. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Flankensteilheit (90% bis 10% der Amplitude) von $dU/dt \approx -221 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Die maximale Steilheit beträgt $dU/dt (\text{max}) \approx 275 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

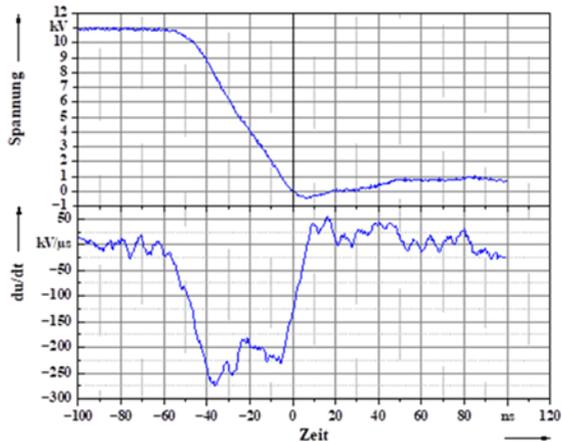


Bild 7: Einschaltvorgang: Spannungsverlauf und Spannungsänderung bei 11 kV mit 11-Stufen

Die vorgestellte Schaltung bietet eine Möglichkeit zur Ausführung von Alterungsversuchen in Isolierstoffen unter wiederholender Impulsbelastung mit hoher Flankensteilheit.

Einfluss von Oberschwingungen auf die Durchschlagsspannung eines Verbundstoffes für den Einsatz in Trockentransformatoren

M.Sc. Javier Torres

In diesem Beitrag wird der Einfluss von Spannungen mit unterschiedlichen THDs (total harmonic distortion, engl. Gesamtoberschwingungsgehalt) auf die elektrische Festigkeit eines Verbundstoffes untersucht, der als Isolierstoff in Trockentransformatoren verwendet werden soll. Die Prüfkörper wurden mit einer speziellen Anordnung hergestellt, die den Herstellungsprozess des Materials nachbildet. Diese Proben wurden verschiedenen Spannungswellenformen ausgesetzt und die Durchschlagsspannung wurde gemessen.

Das untersuchte Material basiert auf einem Filament-Wicklungsverfahren. Die mit diesem Verfahren hergestellten Verbundstoffe bestehen aus Filamenten, die nach einem vorherigen Harzbad als Bündel um einen zylindrischen Körper gewickelt und ausgehärtet werden. Verbundstoffe, die mit dieser Technik hergestellt werden, sind anisotrope Werkstoffe mit einer besonderen Geometrie, die durch die Richtung und die Faltung der Fasern gegeben ist. Diese Geometrie ist für das dielektrische Verhalten des Materials von Bedeutung. Bei der Analyse solcher Materialien ist es notwendig, diese Eigenschaften zu berücksichtigen und den realen Herstellungsprozess so realistisch wie möglich nachzubilden. Die für die Herstellung der Probekörper entwickelte Anordnung bestand aus zwei Messingplatten, die durch Abstandshalter aus Polytetrafluorethylen (PTFE) mit einer Dicke von 1 mm getrennt waren.

Die verwendete Prüfanordnung bestand aus einem Prüftransformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 230 V auf 100 kV, der über eine programmierbare Spannungsquelle eingespeist wurde. Um Überschläge zu vermeiden, wurden die Proben in eine natürliche Esterflüssigkeit getaucht. Als Elektrodenkonfiguration wurde eine Kugel-Kugel-Anordnung gewählt. Die Spannung wurde mit einem kapazitiven Teiler gemessen

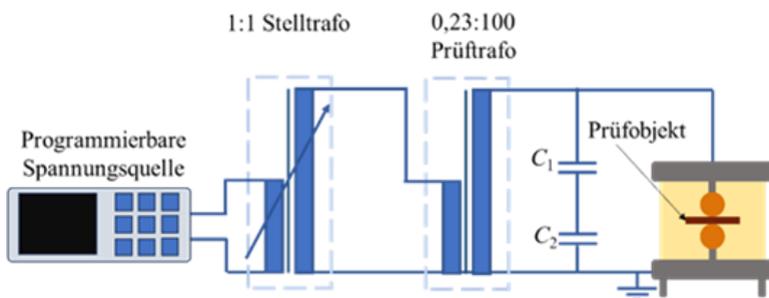


Bild 1: Versuchsanordnung

Insgesamt wurden sechs Spannungsformen auf die Prüfkörper appliziert. Die Zusammensetzung jeder Wellenform basiert auf der Überlagerung einer Grundwellenform mit einer Frequenz von 50 Hz und diverser Oberwellen. Die Oberwellen sind definiert als sinusförmige Wellenformen, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Frequenz der Basis- oder Grundwellenform ist. Der Anteil der Oberwellen an der endgültigen Wellenform wird als Prozentsatz des

Effektivwert der Grundwellenform angegeben. Die Zusammensetzung der für diese Studie verwendeten Wellenformen ist in Bild 2 angegeben. Diese Spannungswellenformen stellen die an der Niederspannungsseite des Prüftransformators angelegte Spannung unter Verwendung der programmierbaren Spannungsversorgung dar.

Tabelle 1: Applizierte Spannungsformen

Ordnung	Verhältnis der Oberschwingung zur Grundschwingung in %					
	THD1	THD2	THD3	THD4	THD5	THD6
3	0,7	10	5	16	25	31
5	1,3	10	16	20	25	31
7	0,7	5	1	7	15	20
11	0,9	5	2	7	15	20
13	0,4	1	1	6	5	10
15	0,4	1	1	4	5	10
THD	2,0	15,9	17,0	28,4	41,8	54,1

Da – wie in der Realität – die Oberschwingungsbelastete Spannung auf der Unterseite des Transformators eingespeist wird, erfolgt eine nichtlineare Verzerrung beim Übertragen der Spannung von der Unterspannung auf die Oberspannung. Diese Tatsache lässt sich anhand der Veränderungen der gemessenen Spannungswellenform bei steigender Spannung beobachten. Bild 3 zeigt zum Beispiel die gemessenen Spannungen auf der Oberspannungsseite für zwei verschiedene Effektivwerte, 10 kV und 30 kV, bei der Wellenform THD6.

Bei einem Spannungsanstieg von 2 kV/mm wurden fünf Prüfkörper mit jeder Wellenform beansprucht und die Durchschlagsspannung sowie die spezifische Probendicke für jeden Prüfkörper zur Berechnung der Durchschlagfestigkeit bestimmt. Bild 4 zeigt den normierten Mittelwert des Effektivwerts der Durchschlagfestigkeit (bezogen auf Wellenform THD1), gemessen an fünf Proben für jede Wellenform, sowie die Standardabweichungen dargestellt.

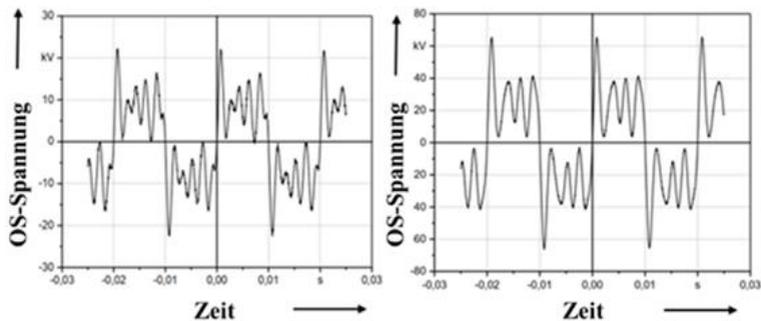


Bild 3: Gemessene Spannungswellenform für einen RMS-Wert von 10 kV (links) und 30 kV (rechts) für die Wellenform THD6

Der Effektivwert der Durchschlagspannung bei den Wellenformen mit höherem THD ist niedriger. Insbesondere bei der Wellenform THD5 beträgt die Durchbruchspannung etwa 60 % der Durchbruchspannung für die Wellenform THD1, die im Prinzip fast sinusförmig ist. Es lässt sich ein Trend beobachten, bei dem die Durchschlagspannung mit zunehmendem THD abnimmt.

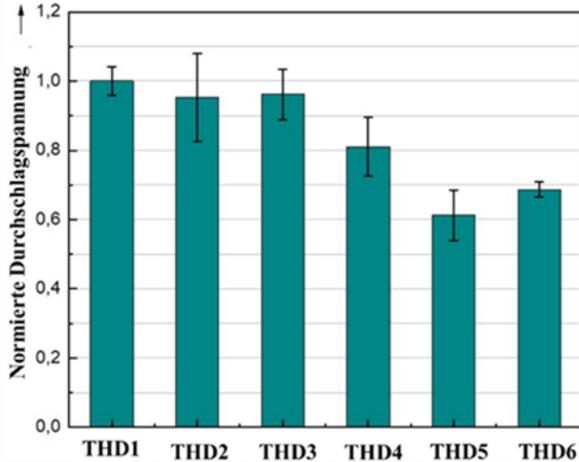


Bild 4: Mittelwerte des Effektivwertes der Durchschlagspannung

In Anbetracht dieser Tatsache ist es besonders relevant, bei der Auslegung des Isolationssystems Szenarien zu berücksichtigen, in denen die Spannung eine Wellenform mit hohem Oberwellengehalt aufweist, da der Einsatz von Umrichtern und das Vorhandensein nichtlinearer Lasten in Stromnetzen mit der Änderung der Netztopologie zunimmt.

7 Konferenzen und Exkursionen

Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)

Die diesjährige Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) fand vom 20. bis 24. Oktober 2024 in Gangwon-do, Korea, statt. Die CMD 2024 bot eine ideale Plattform für den freien Austausch und die Diskussion des aktuellen Stands und der zukünftigen Trends der wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Zustandsüberwachung und -diagnose. Auf der CMD 2024 wurde ein breites Spektrum an Themen behandelt. Insbesondere die Überwachung elektrischer Geräte, die Fehlerdiagnose und das Asset Management. Abgerundet wurde die Konferenz durch ein Bankett und eine Technical Tour zu einem 765 kV Umspannwerk in Shintaebaek, die eine weitere Möglichkeit zum Networking bot.

Auf der 5-tägigen Konferenz wurde das Schering-Institut durch Frau Özdemir, Herrn Braun, Herrn Kuhnke und Herrn Balali mit jeweils einem Konferenzbeitrag vertreten (siehe Bild 1). Frau Özdemir und Herr Braun stellten ihre neuesten Ergebnisse zu ihren Forschungsthemen „Development of a Measuring Technique to Determine the Acidity of Insulating Paper“ und „Development and Comparison of an Optimized Pulsed Electroacoustic (PEA) Measurement System“ im Rahmen eines Posters vor, während Herr Balali einen Vortrag zum Thema „Improving Sensitivity and Detection Frequency of Special UHF Partial Discharge Sensors for Power Transformer Monitoring Systems“ hielt, wobei der Beitrag zusammen mit Herrn Kuhnke erstellt wurde.

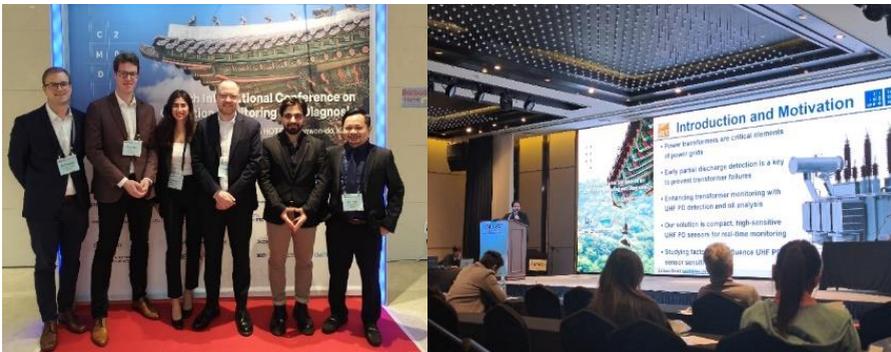


Bild 1: Konferenzteilnehmer (links) und Vortrag von Herrn Balali (rechts)

International Conference on Electrical Machines (ICEM)

Die International Conference on Electrical Machines (ICEM) fand vom 01.09 – 04.09.2024 in Turin, Italien, statt. Die ICEM wurde 1974 ins Leben gerufen und ist die einzige große internationale Konferenz, die sich ausschließlich mit elektrischen Maschinen beschäftigt. Schwerpunkte der Konferenz sind rotierende Maschinen, elektrische Antriebe, sowie deren Diagnostik und Zustandsüberwachung.



Bild 1: ICEM 2024 in Turin

Es nahmen über 600 Teilnehmer aus 40 Ländern mit 432 Beiträgen an der Konferenz teil. Das Programm beinhaltet neben den Fachvorträgen, Tutorials, Vorträge aus der Industrie, sowie eine Fachaustellung. Das Gala Dinner fand im MAUTO, Museo dell'Automobile di Torino, statt, wobei zuvor das Museum besichtigt werden konnte. Frau Stahl stellte den Beitrag „Investigation on Insulation Failure Mechanisms of Stators used for E-Mobility“ im Rahmen eines Vortrages vor.

International Conference on Dielectrics (ICD)

Die fünfte ICD fand in diesem Jahr vom 30.06.2024 – 04.07.2024 in Toulouse, Frankreich, statt.



Bild 1: Konferenzteilnehmer:Innen der ICD vor dem Hauptgebäude der Paul Sabatier University in Toulouse

Die ICD wurde 2016 in Montpellier erstmals ausgetragen und ist aus der International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (ICDS) hervorgegangen. Damit bietet die Konferenz eine Plattform für Diskussionen und Austausch von Ideen und Ergebnissen, sowie praktischen Erfahrungen zur Anwendung von festen Dielektrika, aber auch flüssigen und gasförmigen Isolierungen. Es werden Themen auf dem Gebiet der Isoliermaterialien und dielektrischen Phänomenen, sowie zum Verhalten und zu den Eigenschaften der elektrischen Isolierung in Geräten unter Betriebsbeanspruchung behandelt. Neben den Präsentationen gab es Workshops und verschiedene Exkursionen, wie beispielsweise zu dem Aeroscopia Museum Blagnac. Auf der Konferenz wurde das Schering-Institut durch Herrn Torres und Frau Stahl mit jeweils einem Konferenzbeitrag vertreten. Herr Torres stellte seine Ergebnisse zum Thema „Influence of Harmonic Distortion on the Breakdown Voltage of a Composite Material for the Use in Dry Type Transformers“ vor, während Frau Stahl einen Beitrag hatte zum Thema „PDIV and AC Breakdown Behavior of Magnet Wire in Different Embedded Media“.

IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)

The 2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2024) took place in Berlin from August 18 to August 22, 2024. Organized by the Technische Universität Berlin (TU Berlin) and endorsed by the IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, this conference marked a significant return after eight successful iterations held in various countries, establishing itself as a crucial platform for sharing advancements in high voltage and power engineering. The program featured a comprehensive array of topics, including: High Voltage Insulation Systems, High Voltage Testing and Monitoring, Electromagnetic Fields, Transients, and EMC, Grounding Systems, Energy and Industrial Applications, Aging and Diagnostics, Space Charge.

During the conference, Behnam Balali, and Aref Sharifi have presented following latest research findings during their investigation in the Schering-Institute: Aref Sharifi with the title of “Fast Arc Detection in Power Transformers Using Fiber Optic Sensors” and Behnam Balal with the title of “Development of Multidimensional Monitoring Systems for Power Transformers by Integrating Special UHF Partial Discharge Detectors”.



Figure 1: Aref Sharifi presenting his research on fast arc detection technique for power transformers

Additionally, the participants had a technical visit to Siemens Energy in Berlin, to visit their high voltage laboratory. This visit offered invaluable insights into the latest advancements in high voltage technology and research initiatives, showcasing the practical applications of the theories discussed during the conference. The conference included keynotes from experts who shared

their valuable experiences and perspectives on high voltage engineering, enriching our understanding of the current challenges and innovations in this area.



Figure 2: Behnam Balali engaging in a discussion about his research contribution

In conclusion, ICHVE 2024 was a resounding success, facilitating valuable exchanges of knowledge and ideas that will significantly contribute to the ongoing development in high voltage engineering. We look forward to future conferences and continuing the dialogue initiated during this event.

International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)

Die ICPADM 2024 fand dieses Jahr vom 04.08.2024 bis 07.08.2024 in Phuket, Thailand statt. Sie war die 14. ICPADM Konferenz seit diese das erste Mal im Jahr 1985 ausgetragen wurde. Bei dieser internationalen Konferenz standen vor allem Isoliermedien im Vordergrund mit den untergeordneten Themenschwerpunkten der Zustandsdiagnose, den elektrischen Isoliersysteme (HVDC, Hochspannungsbetriebsmittel und Kabel) und dielektrischen Phänomenen sowie auch neuen Isoliermedien, wie bio-based Isoliermedien oder Nanofluide.



Bild 1: Konferenzteilnehmer:Innen des Schering-Instituts (v.l.n.r.: Kuhnke, Homeier, Torres)

Es nahmen ungefähr 200 Teilnehmer an der Konferenz teil, bei der rund 130 Beiträge präsentiert wurden. Neben den Fachbeiträgen wurden auch noch verschiedene Keynote-Beiträge vorgestellt. Von unserer Seite nahmen Herr Torres, Herr Kuhnke und Frau Homeier an der diesjährigen ICPADM 2024 teil. Frau Homeier stellte ihren Beitrag zum Thema „Determining of Gas Solubility in Mineral Oils and Various Alternative Insulation Liquids in New and Aged Condition“ vor, während Herr Torres seinen Beitrag zum Thema „Influence of Manufacture Process Parameters on the Partial Discharge Behavior of a Composite Material for the Use in Dry Type Transformers“ vortrug.

Transformer-Life-Management Konferenz (TLM)

Dieses Jahr fand am 16. und 17. September die 17. Transformer-Life-Management (TLM) Konferenz statt. Die Veranstaltung wurde in Kooperation von der Energy Support GmbH, Hitachi Energy und dem Schering-Institut organisiert, welches den wissenschaftlichen Vorsitz innehat und für die Tagungsleitung verantwortlich ist. Im Mittelpunkt der Konferenz stand die Optimierung der Wartung und der Zuverlässigkeit von Leistungstransformatoren.

Als Veranstaltungsort wurde in diesem Jahr das Bio-Seehotel in Zeulenroda gewählt. Dieses bot den etwa 25 Fachausstellern, 18 Referenten, 10 Posterautoren und mehr als 200 Teilnehmern erstklassige Räumlichkeiten für Vorträge, Fachausstellungen, Workshops und die Postersessions.



Bild 1: TLM 2024 in Zeulenroda

Die Konferenz zog viele internationale Teilnehmer an. Die 17 Vorträge waren in fünf Themenblöcke unterteilt. Besonderes Interesse weckte der neue Themenblock „Schadensfälle“. In diesem Themenblock wurden zentrale Herausforderungen bei der Qualitätskontrolle und Schadensbewältigung von Leistungstransformatoren thematisiert. Der Block beleuchtete sowohl die Risiken durch mangelnde Qualitätssicherung als auch die strukturierten Vorgehensweisen bei der Begutachtung und Behebung von Schäden. Zudem wurden praxisnahe Lösungsansätze für die Streitbeilegung in Schadensfällen vorgestellt, die insbesondere die rechtlichen und organisatorischen Aspekte von Schiedsverfahren behandeln. Insgesamt lieferte der Themenblock damit den Teilnehmern wertvolle Einblicke in die effektive Handhabung und Prävention von Schadensfällen. Die Vorträge wurden hauptsächlich in deutscher und vereinzelt auch in englischer Sprache gehalten. Dank einer KI-Echtzeitübersetzung hatten die Teilnehmer die Möglichkeit der Konferenz in ihrer bevorzugten Sprache zu folgen.

Somit lässt sich wieder einmal feststellen, dass die TLM eine hervorragende Plattform darstellt, auf der sich Experten, Betreiber, Hersteller, Zulieferer, Aussteller und Wissenschaftler austauschen können, um die vielfältigen Probleme und Herausforderungen in diesem Bereich zu diskutieren. In Verbindung mit dem sorgfältig ausgewählten Rahmenprogramm ist es nicht verwunderlich, dass das Tagungshotel bis auf das letzte Zimmer ausgebucht war.

Fachtagung VDE Hochspannungstechnik

In diesem Jahr fand die „VDE Hochspannungstechnik“ in Berlin vom 11.11.2024 bis zum 13.11.2024 statt. Der erste Konferenztag bot mehrere Tutorials zum aktuellen Stand verschiedener CIGRÉ Arbeitsgruppen zu den Themen Asset Management, HVDC isolierte Kabel sowie Zuverlässigkeitsanalyse von Transformatoren und Höherauslastung von Betriebsmitteln im Netz. Abgeschlossen wurde der Tag mit einem abendlichen „get together“. Nach einer kurzen Begrüßung und einleitenden Vorträgen in Form von Keynotes am zweiten Tag, gab es über den Tag verteilt mehrere parallele Vortragssessions zu den Themen Energiekabel, Freileitungen, Simulation, Leistungstransformatoren, Generatoren, Asset Management, Teilentladungsmesstechnik sowie Werkstoffe und Isoliersysteme. Nach dem Mittag fand zudem eine geführte Postersession statt, bei der Herr Graff, Herr Braun sowie Frau Stahl jeweils einen Beitrag ihrer Arbeit vorstellten.



Bild 1: Posterpräsentationen von Herrn Graff, Herrn Braun und Frau Stahl

Nach einem sehr informativen zweiten Konferenztag mit vielen fachlichen Diskussionen haben alle den Abend in der Arminiusmarkthalle ausklingen lassen.

Der letzte Konferenztag bot erneut mehrere wissenschaftliche Vorträge zu Themen des Vortages sowie zusätzlich zu den Bereichen Prüfen, Messen, Diagnose, Schaltanlagen, Maschinelles Lernen und Vakuumschalter. Dabei gab es seitens des Schering-Instituts zwei Präsentationen. Der Vortrag von Herrn Torres zum Thema „Eine Möglichkeit zur Ansteuerung von leistungselektronisch basierten Hochspannungsschaltern zur Erzeugung von Spannungsimpulsen hoher Flankensteilheit“ wurde stellvertretend von Herrn Graff gehalten.



Bild 2: Schering-Team bei der Abendveranstaltung in der Arminiusmarkthalle

Frau Stahl wiederum hat anstelle von Frau Homeier einen Vortrag zum Thema „Bildung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen in verschiedenen Isolierflüssigkeiten unter elektrischen Transformatorfehlern“ gehalten. Der dritte Tag und damit auch die Konferenz endeten mit der Preisverleihung und Verabschiedung.



Bild 3: Herr Graff beim Vortrag zum Thema „Eine Möglichkeit zur Ansteuerung von leistungselektronisch basierten Hochspannungsschaltern zur Erzeugung von Spannungsimpulsen hoher Flankensteilheit“

Exkursion zum Avacon Umspannwerk in Lehrte

Im Sommersemester erfolgte am 22.05.2024 eine Exkursion nach Lehrte zum Umspannwerk von Avacon, wobei seit der Covid-19-Pandemie erstmals wieder Studierende teilnehmen konnten. Das Umspannwerk Lehrte war dafür ein interessantes Ziel, da dort aktuell eine Erweiterung und Modernisierung des alten Umspannwerks stattfindet. Nach einer herzlichen Begrüßung seitens der Avacon Mitarbeiter wurde zuerst das Unternehmen Avacon vorgestellt. Anschließend wurde die Funktionsweise des Umspannwerks sowie dessen Bedeutung für Hannover und das Umland erläutert und daraufhin die bereits durchgeführten sowie noch geplanten (Um-) Bauarbeiten erklärt. Aufgrund der freundlichen und aufgeschlossenen Atmosphäre hat sich dabei ein detailreiches Gespräch entwickelt, wobei sich ebenfalls über Probleme und Schwierigkeiten ausgetauscht wurde. Dem Regenwetter zum Trotz fand anschließend eine Führung durch das alte und das teilweise noch im Bau befindliche neue Umspannwerk statt, bei der besonders der Entwicklungssprung in der Schalttechnik beobachtet werden konnte. Der Höhepunkt der Führung war eine Livedemonstration des Schaltvorgangs eines Leistungsschalters. Die Exkursion wurde mit einer abschließenden Gesprächsrunde bei Getränken und Snacks abgeschlossen.

8 Umbau des Instituts

Erweiterung des Isolierflüssigkeitslabors

Durch den stetig zunehmenden Bedarf an Isolier- und Kühlflüssigkeiten in der Industrie, hat die Erforschung neuer Flüssigkeiten, sowie deren thermische Alterung am Schering-Institut deutlich an Relevanz zugenommen. Neben klassischen Isolierflüssigkeiten, wurde durch Untersuchungen von Spezialflüssigkeiten das Tätigkeitsfeld der E-Mobilität neu erschlossen und im Institut etabliert. Dazu war es notwendig das bestehende Isolierflüssigkeitslabor auszubauen, so dass 2 weitere Räume hinzugekommen sind, was im nachfolgenden Bild 1 dargestellt ist.



Bild 1: Übersicht über die beiden neuen Laborräume

Der Umbau begann im vergangenen Jahr und konnte dieses Jahr fertiggestellt werden. Das neue, zusätzliche Labor besteht aus zwei miteinander verbundenen Räumen, wobei - wie in Bild 2 zu sehen ist - vier Wärmeschränke im größeren Laborraum integriert wurden, um thermische Alterungsversuche von verschiedensten Isolierflüssigkeiten und Isolierpapieren durchzuführen.

Das neue Labor bietet somit ein großes Repertoire an dielektrischen, physiko-chemischen und mechanischen Parametern, die im Hinblick auf die Isolierflüssigkeiten und das Isolierpapier untersucht werden können. Dazu zählen unter anderem:

- Durchschlagsspannung (auch mit DC, Stoßspannung, langen Schlagweiten, etc.)
- Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$
- Permittivität
- Viskosität
- Dichte
- Grenzflächenspannung
- Relative Feuchte
- Absolute Feuchte in der Flüssigkeit und im Papier
- Wasserlösungsvermögen
- Säuregehalt im Öl und im Papier
- Farbzahl
- Inhibitorgehalt
- Nanopartikelanalyse und Beimengung
- Gas-in-Öl Analyse inkl. C₃, C₄ und C₅ Verbindungen
- Begasung der Isolierflüssigkeit mit ausgewählten Einzelgasen oder simulierten Transformatorfehlern
- Untersuchungen des Gasungsverhaltens bei Druck- und Temperaturvariation
- Wärmeleitfähigkeit
- Kompatibilitätstests
- Mischbarkeitstests
- Imprägnierverhalten
- DP-Wert von Isolierpapier
- Zugfestigkeit von Isolierpapier
- TE-Untersuchungen
- Brennbarkeitstests
- Alterungsversuche alle Art
- Entgasung, Sauerstoffreduzierung, Trocknung



Bild 2: Wärmeschränke für thermische Alterungsversuche

Weiterhin gibt es mehrere Möglichkeiten zur Trocknung und Aufbereitung von Isolierflüssigkeiten sowie zur Imprägnierung von Prüflingen.

Insgesamt bietet das neue Labor zudem viel Arbeitsfläche und ermöglicht somit ein übersichtliches und strukturiertes Arbeiten für die Studierenden und Promovierenden. Ferner können Sondereinzelexperimente im Nebenraum aufgebaut werden, so dass auch genügend Platz für spezielle Untersuchungen vorhanden ist.

9 Veröffentlichungen

Fachtagung Polymere Isolierstoffe und ihre Grenzflächen, 25.01. – 26.01.2024, Zittau, Deutschland

Zur Bewertung der Einflüsse auf die Prüfung der Durchschlagfestigkeit polymerer Isolierstoffe
S. Braun, H. Hirte, P. Werle, S. Kornhuber

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 31, Issue: 2, pp. 997 – 1002, April 2024

On Investigating the Effect of DC Biased Ripple Voltages Over the Insulation of Bus Capacitor of Power Inverters: Possibility and Limitations
R. Sargazi; P. Werle; A. Akbari; A. Apelsmeier

International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 14.05. – 16.05.2024, Theran, Iran

Design and Implementation of an RF Module for UHF PD Measurement
V. Javandel, A. Akbari, M. Ardebili, P. Werle

IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), 30.06. – 04.07.2024, Toulouse, France

PDIV and AC Breakdown Behavior of Magnet Wire in Different Embedded Media
L. Stahl, B. Özdemir, J. Torres, P. Werle

Analysis of the Degradation of Five Esters and the Effect of the Cellulose on Their Properties
C. Méndez; B. Oezdemir; P. Werle; C. Olmo; P. Quintanilla; A. Ortiz

Influence of Harmonic Distortion on the Breakdown Voltage of a Composite Material for the Use in Dry Type Transformers
J. Torres, K. Homeier, L. Stahl, P. Werle

IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 04.08. – 07.08.2024, Phuket, Thailand

Determining of Gas Solubility in various Insulation Liquids in new and aged Conditions
K. Homeier, M. Kuhnke, P. Werle

Influence of Manufacture Process Parameters on the Partial Discharge Behavior of a Composite Material for the Use in Dry Type Transformers
J. Torres, L. Stahl, P. Werle

IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 18.08. – 22.08.2024, Berlin, Deutschland

Development of Multidimensional Monitoring Systems for Power Transformers by Integrating Special UHF Partial Discharge Detectors
B. Balali, M. Kuhnke, I. Zidny, P. Werle, A. Akbari

Fast Arc Detection in Power Transformer Using Fiber Optic Sensors
A. Sharifi, M. Kuhnke, P. Werle, A. Akbari

CIGRE 2024, 25.08. – 30.08.2024, Paris, France

A new method for health index calculation using power transformers as an example

M. Moh'd, H. Schnittker, P. Werle

International Journal on Electrical Engineering & Informatics, Volume: 16, Issue: 3, pp 407-423, September 2024

Design and Testing Small Printed Antennas as Internal UHF Sensors of Partial Discharge for High Voltage Transformers

I. Zidny, B. Balali, M. Kuhnke, P. Werle, Suwarno

International Conference on Electrical Machines (ICEM), 01.09. – 04.09.2024, Torino, Italy

Investigation on Insulation Failure Mechanisms of Stators used for E-Mobility

L. Stahl, J. Torres, P. Werle

Transformer Life Management Konferenz (TLM), 16.09. – 17.09.2024, Zeulenroda, Deutschland

Einfluss von Wasser bei der Bildung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen infolge von verschiedenen Transformatorfehlern

K. Homeier, P. Werle, D. Wilke, M. Hahn

Einfluss der Oberschwingungsverzerrung auf die Durchschlagfestigkeit eines Verbundstoffs für den Einsatz in Trockentransformatoren

J. Torres, K. Homeier, L. Stahl, P. Werle

Entwicklung eines Filtersystems zur Reduzierung von Sauerstoff in Transformatorenölen

B. Özdemir, P. Werle, O. Schmidt, W. Sorgatz

Entwicklung mehrdimensionaler Überwachungssysteme für Leistungstransformatoren durch die Integration spezieller UHF-Teilentladungssensoren

B. Balali, M. Kuhnke, I. Zidny, P. Werle, A. Akbari

Explosion Prevention Potential for Transformers by Using Fiber Optic Sensors to Detect Arcs Fastly

A. Sharifi, M. Kuhnke, P. Werle, A. Akbari

IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 06.10. – 09.10.2024, Auburn, USA

Comparative Analysis of Aluminum and Brass Electrodes in Laser Induced Pressure Pulse Method for Space Charge Measurements

H. Hirte, S. Braun, S. Kornhuber, P. Werle

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 20.10. – 24.10.2024, Gangwon-do, Korea

Development and Comparison of an Optimized Pulsed Electroacoustic (PEA) Measurement System

S. Braun, C. Kohlsaas, P. Werle, H. Hirte, S. Kornhuber

Development of a Measuring Technique to Determine the Acidity of Insulating Paper

B. Özdemir, B. Balali, P. Werle

Improving Sensitivity and Detection Frequency of Special UHF Partial Discharge Sensors for Power Transformer Monitoring Systems

B. Balali, M. Kuhnke, I. Zidny, P. Werle, A. Akbari

Design of a Small Antenna for Detecting UHF Partial Discharges in Power Transformers

I. Zidny, B. Balali, M. Kuhnke, P. Werle, Suwarno

Comparison Of Modified Camera Prototypes For The Detection Of Corona Partial Discharges

P. Elfers, S. Azer, M. Kuhnke, P. Werle

Fachtagung VDE Hochspannungstechnik, 11.11. – 13.11.2024, Berlin, Deutschland*Auswirkung der thermischen Alterung auf die Eigenschaften von Kühlflüssigkeiten für den Einsatz in elektrischen Maschinen mit Direktkühlung*

L. Stahl, P. Werle

Untersuchungen zur berührungslosen Impulsspannungsmessung

F. Graff, M. Kuhnke, F.-Th. Ullmann, J. Meisner, P. Werle

Efficient Voltage Endurance Evaluation of Polymeric Insulating Materials: A Test Setup for Parallel Electrical and Thermal Ageing of Multiple Test Specimens

S. Braun, H. Hirte, P. Werle, S. Kornhuber

Bildung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen in verschiedenen Isolierflüssigkeiten unter elektrischen Transformatorfehlern

K. Homeier, P. Werle, D. Wilke, M. Hahn

Eine Möglichkeit zur Ansteuerung von leistungselektronisch basierten Hochspannungsschaltern zur Erzeugung von Spannungsimpulsen hoher Flankensteilheit

J. Torres, F. Graff, K. Homeier, L. Stahl, P. Werle

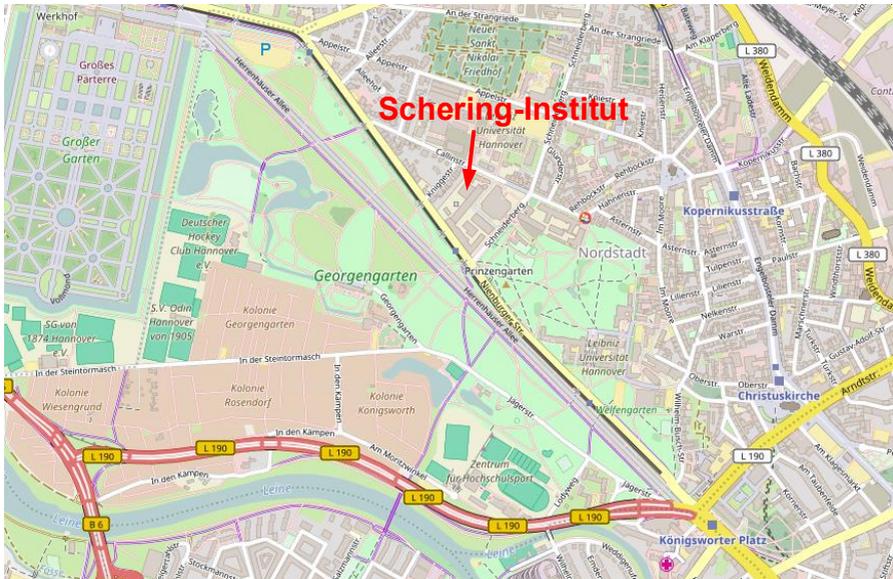
Vergleich modifizierter Kameraprototypen für die optische Detektion von Korona-Teilentladungen

P. Elfers, S. Azer, M. Kuhnke, P. Werle

IEEE 7th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), 22.11. – 24.11.2024, Kolkata, India*Preventing Transformer Explosions with Fast Arc Detection by Fiber Optic Sensors*

A. Sharifi, M. Kuhnke, P. Werle, A. Akbari

10 Lageplan und Ausstattung



Ausstattung

- Prüfquellen:
 - Stoßspannung 3 MV, 300 kJ
 - Wechselfspannung 800 kV, 1 A, 50 Hz
 - Gleichspannung 800 kV, 100 mA
 - Stoßstrom 200 kA, 300 kW
- Geschirmte Räume für Teilentladungsmessung und Teilentladungsortung
- Klimatisierte Messzellen für dielektrische Untersuchungen an flüssigen und festen Isolierstoffen
- Verlustfaktormesseinrichtungen für Hochspannung (50 Hz) und Niederspannung (10 Hz – 100 kHz)
- Nachbildung direkter und indirekter Effekte von Blitzentladungen
- Dauerversuchsstände für Materialuntersuchungen mit hohen Losgrößen
- Anlagen zur Herstellung von Prüfkörpern mit Kunststoffpressen, Extrudern und Harz-Gießanlage
- Umfangreiches Labor zur Analyse von Isolierflüssigkeiten
- Systeme zur hochwertigen Aufbereitung von Isolierflüssigkeiten
- Umfangreich ausgestattete Werkstatt zur Herstellung diverser Elektrodenkonfigurationen und zum Aufbau komplizierter Versuchseinrichtungen

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.ifes.uni-hannover.de
schering@ifes.uni-hannover.de