Leibniz Universität Hannover

Jahresbericht 2018

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

Inhalt

1 Vorwort.....2
2 Personelle Besetzung des Instituts.....4
3 Lehre.....6
4 Exkursionen und Konferenzen.....12
5 Umbau des Institutes..... 19
6 Forschungsarbeiten..... 25
7 Veröffentlichungen.....113
8 Lageplan und Ausstattung.....117

1 Vorwort

Liebe Freunde des Schering-Instituts,

wie in den letzten Jahresinformationen angekündigt, folgt nach dem kürzeren Newsletter im letzten ungeraden Jahr dieses Mal nun wieder ein umfangreicherer Jahresbericht, der Ihnen einen Überblick über aktuelle Entwicklungen am Schering-Institut geben soll.

Nachdem wir vor 2 Jahren in die renovierten Räumlichkeiten des Hochspannungsgebäudes zurückkehren konnten, sind die Umgestaltungsmaßnahmen bis auf die Modernisierung der Hochspannungshalle weitestgehend abgeschlossen. In 2018 wurden vor allem die Hochspannungszellen auf der Bühne neu aufgebaut und die Erneuerung der Werkstatt abgeschlossen, was in einigen der nachfolgenden Berichte genauer beschrieben ist. Zudem haben wir in der Hochspannungshalle einen neuen Stoßspannungsgenerator in Betrieb genommen und die Steuerungen aller großen Hochspannungsquellen ertüchtigt, die nun alle in einem zentralen Kontrollraum integriert werden, so dass Ende 2019 die Ertüchtigung der Hochspannungshalle abgeschlossen sein soll. Trotzdem stehen uns die meisten Einrichtungen wieder uneingeschränkt zur Verfügung, so dass wir im letzten Jahr unsere weiterhin ansteigenden und vielfältigen Forschungsthemen und Kooperationsprojekte effizient bearbeiten konnten, wobei unser Team zusätzlich um folgende Doktorandin und Doktoranden ergänzt wurde:

- Frau M.Sc. Kristin Homeier, die sich mit der Entwicklung von neuen Interpretationsschemen für in diversen Isolierflüssigkeiten gelösten Gasen und anderen Substanzen beschäftigen wird,
- Herr M.Sc. Henning Schnittker, der anhand eines konkreten Assets neue Methoden im Bereich Asset Management entwickeln, untersuchen und implementieren soll, und
- Herr M.Sc. Cristian Olmo Salas, der als Gastwissenschaftler von der spanischen Universität von Kantabrien Untersuchungen im Bereich von Nanoflüssigkeiten durchführt.

Somit waren in 2018 neben den Gastwissenschaftlern 15 eigene Doktorandinnen und Doktoranden am Schering-Institut tätig, so viele wie seit einigen Jahrzehnten nicht mehr, wobei diese Anzahl auch in Bezug auf die zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten und die Betreuungsmöglichkeiten eine Obergrenze darstellt. Mit Hilfe der anzahlmäßig gestiegenen Mitarbeiterzahl ist es dann auch nicht verwunderlich, dass in 2018 eine Rekordanzahl von mehr als 40 Veröffentlichungen publiziert wurden, wobei wir besonders stolz darauf sind, dass nunmehr im vierten Jahr hintereinander Beiträge des Schering-Instituts besondere internationale Anerkennung fanden (siehe auch separater Bericht). Somit wurde der Beitrag *Investigation on Ageing Parameters of a Thermally Accelerated Aged Paper-Oil-Insulation in a Hermetically Sealed System* von Herrn M.Sc. Tobias Münster auf der *CMD 2018 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis* in Perth, Australien, mit einem CMD IEEE Preis ausgezeichnet und der Artikel *Fundamental Difference of Partial Discharge Phenomena under AC and DC Stresses* von Herrn M.Sc. Hassan Saadati auf der *ICHVE 2018 International Conference on High Voltage Engineering and Application* mit dem *IEEE Caixin Sun and Stan Grzybow Best Student Paper Award* honoriert.

Natürlich wirken sich hier auch die vielen Bachelor- und Masterarbeiten, die am Schering-Institut vergeben werden konnten, unterstützend aus, wobei nach wie vor viele Studierende sich infolge der weltweiten Energiewende für die Energietechnik begeistern. In den Hauptvorlesungen Hochspannungstechnik I und II meldeten sich mehr als 100 Personen an, so dass viele studentische Mitarbeiter/innen für den Bereich der Hochspannungstechnik zur Verfügung stehen. Langfristig gehen wir davon aus, dass sich diese Anzahl sogar noch erhöhen könnte, da wir 2018 das Grundlagenlabor der Elektrotechnik wieder übernehmen konnten und somit die Möglichkeit haben, die Studierenden schon im Grundstudium für den Bereich Hochspannungstechnik und Energieversorgung zu begeistern. Das Grundlagenlabor, welches ab 1927 unter der Leitung von Professor Harald Schering stand und dann Ende der 60er Jahre vom Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik betreut wurde, kommt somit nach mehr als 50 Jahren zurück an das Schering-Institut. Da alle Elektrotechnik-, Maschinenbau- und verwandte Ingenieurstudiengänge dieses Labor durchlaufen müssen, werden pro Semester etwa 600 Studierende betreut, was unter der Leitung unseres Oberingenieurs Herrn M.Sc. Moritz Kuhnke erfolgen wird (siehe auch separater Bericht).

Wie Sie aus diesen einleitenden Worten entnehmen können, liegt somit ein recht arbeitsreiches, ereignisreiches und überaus erfolgreiches Jahr hinter uns, so dass nun eine besinnliche Weihnachtspause zur richtigen Zeit kommt, um dann im neuen Jahr, die vielen Ideen, die wir noch haben, weiterverfolgen zu können.

Abschließend möchten wir uns sehr herzlich für die gute Zusammenarbeit, Förderung und Unterstützung bei unseren vielen Industriepartnern, dem ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) des BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) "Otto von Guericke" e.V. - Projekt GmbH, der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Deutschen Akademischen Auslandsdienst (DAAD) bedanken und freuen uns auf eine Weiterführung dieser Kooperationen im nächsten Jahr.

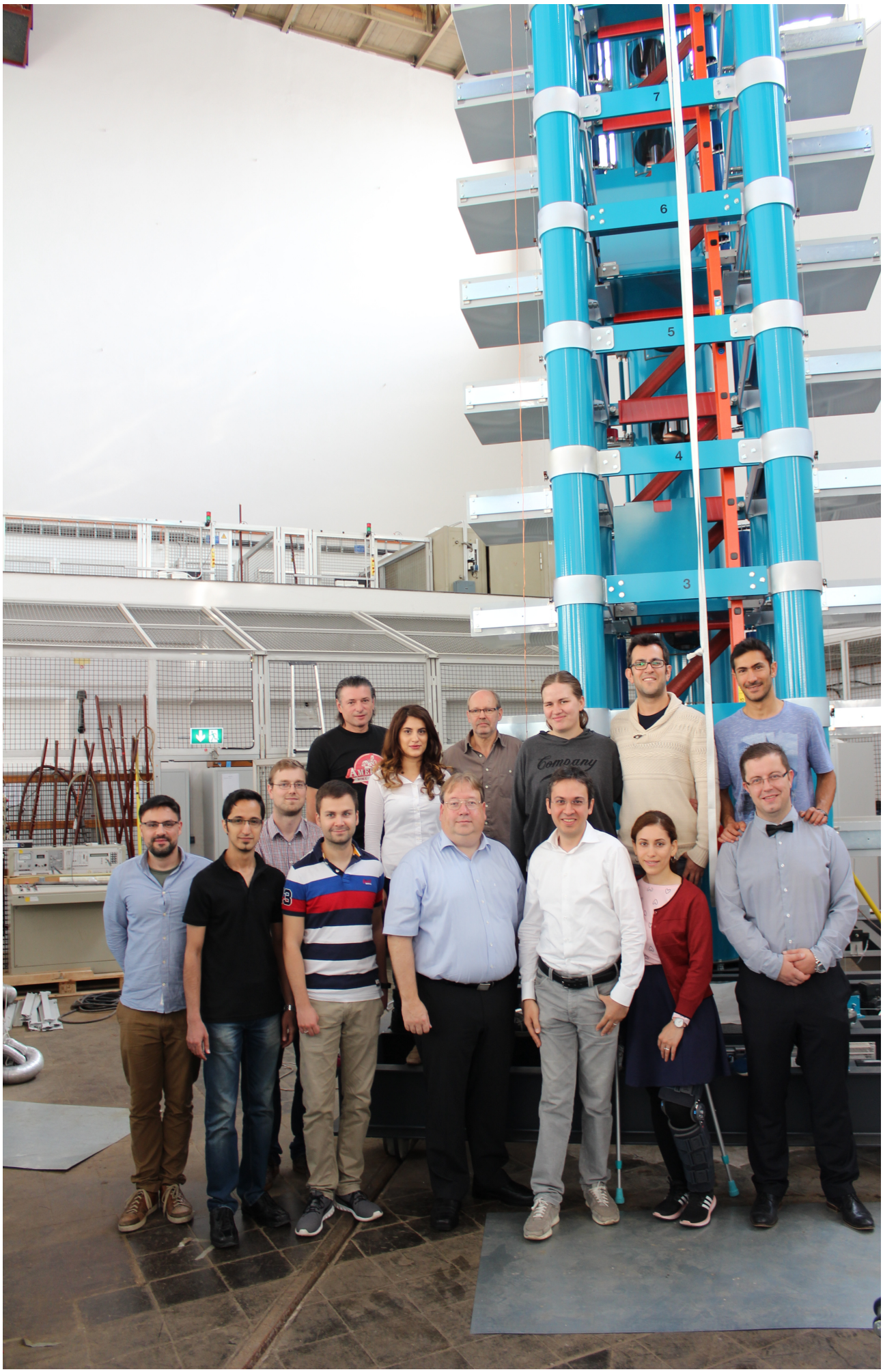
Bis dahin wünscht das Team des Schering-Instituts Ihnen und Ihren Familien ein besinnliches Weihnachtsfest und daran anschließend einen tollen Start ins neue Jahr.

Hannover, im Dezember 2018

Prof. Dr.-Ing. Peter Werle

2 Personelle Besetzung des Institutes

Institutsleiter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Werle
Oberingenieur:	M. Sc. Moritz Kuhnke
Geschäftszimmer:	Hala Ahmi
Werkstatt:	Claus-Dieter Hasselberg
	Erich Semke
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
Doktorandinnen und Doktoranden:	Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović
	M.Sc. Mohamadreza Ariannik
	M.Sc. Mohammad Akbari Azirani
	M.Sc. Kristin Homeier
	M.Sc. Mohammad Taghi Imani
	Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey
	M.Sc. Mahdi Mahdipour
	M.Sc. Tobias Münster
	M.Sc. Younes Norouzi
	M.Sc. Leyla Raeisian
	M.Sc. Mahdi Rahimbakhsh
	M.Sc. Hassan Saadati
	M.Sc. Henning Schnittker
	M.Sc. Sebastian Schreiter
	M.Sc. Sahand Seifi
Gastwissenschaftler:	M.Sc. Cristian Olmo Salas
	Dr. Asghar Akbari


7
6
5
4
3

3 Lehre

Prof. Dr.-Ing. P. Werle

Hochspannungstechnik I
(WS, 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
Elektrostatisches Feld
Messung und Berechnung von Ersatzanordnungen
Durchschlagmechanismen
Durchschlag von Gasen
Polaritätseffekt
Durchschläge in Isolierstoffen

Hochspannungstechnik II
(SS, 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
SF_6-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

Isolierstoffe der Elektrotechnik
(SS, Vorlesung 2 SWS)
Physikalische Grundlagen
Elektrisches und dielektrisches Verhalten von Isolierstoffsystemen
Herstellung, Kenngrößen, Anwendungen, Vor- und Nachteile div. Isolierstoffe
Gläser, Keramiken, Minerale
Kunststoffe, Harze und Silikone
Polymerisate, Polykondensate und Polyaddukte
Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere
Papier und Aramidfaserstoffe
Isolierflüssigkeiten auf Mineralölbasis oder GtL Techniken
Synthetische und natürliche Esterflüssigkeiten
Silikon- und andere Ersatzflüssigkeiten
Isoliergase
Mischdielektrika

Zustandsdiagnose und Asset Management
(WS, Vorlesung 2 SWS, Übung 1 SWS, Studienleistung 1 SWS)
Asset-Management Grundlagen
Normen, ISO, IEC, VDE, IEEE
DIN ISO 55000, 55001, 55002
Energiewirtschaftsgesetz
Aufgaben des Asset Managers
Flottenmanagement
Instandhaltungsstrategien
Risiko-Wichtigkeits-Diagramme
Zustandsanalysemethoden
Ölanalytik, DFR, FRA, TE, Isolationsmessungen, Thermovision
Sensortechniken
Monitoringsysteme
Datenkorrelationstechniken
Zustandsverbesserungsstrategien
Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Hochspannungslaboratorium I
(SS, experimentelle Übungen, 4 SWS)
Erzeugung und Messung hoher Gleichspannungen
Messung hoher Wechselspannungen
Erzeugung von Stoßspannungen und Aufnahme von Stoßkennlinien
Elektrischer Durchschlag in Gasen
Bestimmung der Durchschlagspannung von festen Isolierstoffen
Verlustfaktormessungen an verschiedenen Isolierstoffen
Ausmessung von elektrischen Feldern
Bestimmung der Durchschlagspannung von Mineralöl

M.Sc. M. Kuhnke

Elektrotechnisches Grundlagenlabor I (ET)
(SS, experimentelle Übungen, 2 SWS)
Strom- und Spannungsmessungen
Gleichstrom-Netzwerke
Kennlinien elektrischer Bauelemente
Einfache Wechselstromkreise

Elektrotechnisches Grundlagenlabor II (ET)
(WS, experimentelle Übungen, 3 SWS)
Feldmessungen
Schwingkreise
Leistung bei Wechselstrom
Dreiphasenwechselstrom
Technisches Schreiben

Elektrotechnisches Grundlagenlabor III (ET)
(WS, experimentelle Übungen, 2 SWS)
Schaltvorgänge
Halbleiterschaltungen und Operationsverstärker
Spektralanalyse und-synthese periodischer Signale
Feldeffekttransistor und CMOS-Grundschaltungen
Verlustfaktormessungen an verschiedenen Isolierstoffen

Elektrotechnisches Grundlagenlabor I (MB)
(WS, experimentelle Übungen, 1 SWS)
Strom- und Spannungsmessungen
Gleichstrom-Netzwerke
Kennlinien elektrischer Bauelemente

Elektrotechnisches Grundlagenlabor II (MB)
(SS, experimentelle Übungen, 1 SWS)
Einfache Wechselstromkreise
Kennlinien elektrischer Maschinen

Prof. Dr.-Ing. P. Werle / Prof. Dr.-Ing. habil. L. Hofmann

Labor Energieversorgung und Hochspannungstechnik
(SS, WS, experimentelle Übungen, 4 SWS)
Messung hoher Wechselspannungen
Elektrischer Durchschlag in Gasen
Ausmessung von elektrischen Feldern
Bestimmung der Durchschlagspannung von Mineralöl
Sternpunkterdung & Ausgleichsvorgänge (am IEE)
Kurzschlussstromberechnung mit PC (am IEE)
Windenergieanlage (am IEE)
Kippschwingungen (am IEE)

Hon.-Prof. Dr.-Ing. S. Pöhler

Komponenten der Hochspannungsübertragung
(SS, Vorlesung 2 SWS)
Energiewirtschaftliche Einführung
Hochspannungsschalttechnik
Hochspannungsübertragungstechnik
Fernübertragung elektrischer Energie
Ursachen und Auswirkungen von Instabilitäten im Übertragungsnetz
Flexible AC Transmission Systems (FACTS)
Hochspannungsgleichstrom-Übertragung
Übertragungssysteme für on- und offshore Anwendungen

Hon.-Prof. Dr.-Ing. M. Sturm

Systeme zur zukünftigen Energieoptimierung und -vermarktung
(WS, 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

Geschichte des Grundlagenlabors - eine Traditionslehrveranstaltung kommt zurück ans Schering-Institut

Mit dem Wintersemester 2018/19 übernimmt das Schering-Institut wieder die Betreuung des elektrotechnischen Grundlagenlabors.

Bild 1: Die Laborräume heute

Die Räumlichkeiten in der 10. Etage des Hochhauses Applestr. 9A bieten auf über 500 qm Platz für 72 Versuchsplätze. Dort finden jedes Semester mehrere Lehrveranstaltungen für Studenten der Studiengänge Elektrotechnik und Informationstechnik, Energietechnik, Mechatronik, Nanotechnologie, Wirtschaftsingenieur, Maschinenbau, Produktion und Logistik, sowie Technical Education statt. Jedes Semester wird das Labor von durchschnittlich 600 Studenten besucht.

Die Versuche dienen der Vertiefung und Erweiterung der Kenntnisse aus den elektrischen Gruandlagenvorlesungen, zudem wird die Bedienung und Funktionsweise typischer Messgeräte wie Multimeter und Oszilloskop vermittelt. Die Versuche reichen von der Bestimmung unbekannter Widerstände in Labor 1 bis zum Aufbau von einfachen CMOS-Schaltungen in Labor 3. Für die Maschinenbaustudenten werden ab dem nächsten Semester auch Versuche mit Elektromotoren angeboten. Die Betreuung übernehmen 4 wissenschaftliche Mitarbeiter und ca. 16 studentische Hilfskräfte unter der Leitung von Moritz Kuhnke als Oberingenieur des Schering-Instituts.

Das elektrotechnische Grundlagenlabor ist mit seiner über hundertjährigen Geschichte eine der ältesten kontinuierlich angebotenen Lehrveranstaltungen der Leibniz Universität Hannover. Es wurde in den 1890er Jahren gegründet und geht zurück auf Wilhelm Friedrich Kohlrausch (*1855-†1936), der 1884 auf die erste Professur für Elektrotechnik an der Leibniz Universität berufen wurde, die damals noch Königliche Technische Hochschule hieß. Nach Kohlrauschs Emeritierung ging das „elektrotechnische Anfängerlabor“ an das 1927 neu geschaffene Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Hochspannungstechnik unter der damaligen Leitung von

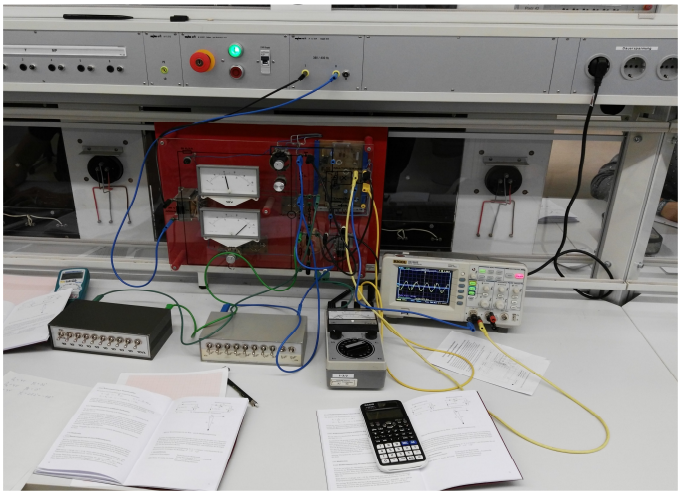


Bild 2: Laborversuch zur Leistungsmessung

Bild 3: Anfängerlabor zur Zeit von Prof. Schering

Prof. Harald Schering. Die Räumlichkeiten des Anfängerlabors lagen damals noch im Welfenschloß.

Unter der Professur von Gerhard Pfestorf wurden diese 1959 renoviert und die technische Ausstattung aufgewertet. Mit der Teilung der Hochspannungstechnik und Grundlagen der Elektrotechnik in zwei Institute im Jahre 1968 gingen die Räumlichkeiten und Ausstattung an das Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik.

Wenige Jahre später erfolgte der Umzug in das neugebaute Hochhaus in der Appelstraße 9A. Nun kehrt nach 50-jähriger Zugehörigkeit zum Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik eine echte Traditionslehrveranstaltung zum Schering-Institut zurück. Damit bekommt das Schering-Institut auch wieder die Möglichkeit in vielen Studiengängen die junge Generation für die Experimentalphysik zu begeistern und ggf. noch mehr Studierende für den Bereich Hochspannungstechnik zu gewinnen.

Bild 4: Nach der Modernisierung 1959

Bild 5: Arbeitsplatz 1959

4 Exkursionen und Konferenzen

Exkursionen

Seit 2015 führt das Schering-Institut wieder regelmäßige Exkursionen mit wechselnden Zielen durch, so dass jeweils ein ganztägiger Ausflug im Winter und im Sommersemester durchgeführt wird.

Im Wintersemester erfolgte am 17.01.2018 ein Ausflug nach Halle (Saale) in das ABB Transformatoren-Servicewerk. Nachdem es einige grundsätzliche Vorträge seitens der ABB gab, wurden von Mitarbeitern des Schering-Instituts Fachvorträge zu Zustandsbewertung und zu Fehlerortung in Leistungstransformatoren präsentiert, um einige aktuelle Forschungsschwerpunkte darzustellen. Danach erfolgte eine Diskussion über transformatorenspezifische Probleme, die während des sich anschließenden Werkrundgangs im Detail am Objekt fortgesetzt wurde. Während des Rundgangs konnte die gesamte Reparatur– und Wartungskette eines Transformators verfolgt werden, wobei unterschiedliche Transformatorentypen betrachtet werden konnten.

Im Sommersemester wurde am 08.06.2018 von TenneT zum Umspannwerk in Emden Ost eingeladen. Der vor der Küste Niedersachsens auf See produzierte Windstrom wird in Gleichstrom umgewandelt und bis zur Konverterstation Emden/Ost transportiert. Hier wird der Strom wieder in Drehstrom umgewandelt und über das neu errichtete Umspannwerk ins Höchstspannungsnetz eingespeist. Nach einem Übersichtsvortrag über die technischen Herausforderungen der Offshore-Windparkanbindung wurde die Station besichtigt. Der spannende und sonnige Tag in Emden endete mit einem Gruppenfoto vor der Konverterstation, welches in Bild 1 dargestellt ist.

Bild 1: Exkursionsteilnehmer der Besichtigung der von TenneT errichteten Konverterstation mit Umspannwerk am Standort Emden/Ost

Teilnahme an Konferenzen

Auch im Jahr 2018 nahm das Team des Schering-Instituts an unterschiedlichen nationalen und internationalen Konferenzen teil. Neben der Vorstellung der eigenen Forschungsergebnisse wird dadurch auch ein Austausch mit Forschern auf der ganzen Welt zu aktuellen Problemstellungen in der Hochspannungstechnik möglich.

Die Beiträge des Schering-Instituts wurden auf insgesamt 7 Fachkonferenzen einem nationalen sowie internationalen Publikum vorgestellt, wobei es auch zwei Auszeichnungen für den jeweils besten Beitrag auf zwei verschiedenen Konferenzen gab.

Zwei Beiträge wurden auf der Fachtagung „*2018 Tagung: Polymere Isolierstoffe in der Elektrotechnik*“ vorgestellt, die vom 17.05 - 18.05.2018 in Zittau stattfand. Das Thema dieser Fachtagung war die Gleichspannungsbeanspruchung, wobei hier das Verhalten, die Alterung sowie Möglichkeiten polymerer Isolierstoffe und ihrer Grenzflächen behandelt wurden.

Die Vorstellung weiterer Beiträge erfolgte auf der „*ICD 2018: International Conference on Dielectrics*“ in Budapest, Ungarn vom 01.07 - 05.07.2018. Auf dieser Konferenz erfolgt die Behandlung von festen Isolierstoffen, wobei seit 2016 eine Erweiterung um gasförmige sowie flüssige Isolierstoffe erfolgte.

Bild 1: Best Student Paper Award für Herrn M.Sc. Hassan Saadati auf der Konferenz ICHVE 2018 in Athen, Griechenland

Bild 2: Best Paper Award für Herrn M.Sc. Tobias Münster auf der Konferenz CMD 2018 in Perth, Australien

Ebenfalls wurden Beiträge auf der „*ICHVE 2018: International Conference on High Voltage Engineering and Application*“ vorgestellt. Die Konferenz fand in Athen, Griechenland vom 10.09 - 13.09.2018 statt. Auf dieser Konferenz erhielt Herr M.Sc. Hassan Saadati für seinen Beitrag eine Auszeichnung. Hierfür bekam er den „IEEE Caixin Sun and Stan Grzybow Best Student Paper Award“ für sein Paper mit dem Titel „Fundamental Difference of Partial Discharge Phenomena under AC and DC Stresses“.

Hieran anschließend fand die Konferenz „*CMD 2018: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*“ in Perth, Australien, in dem Zeitraum vom 23.09 - 26.09.2018, statt. Bei dieser Konferenz stehen die Bereiche der Überwachung von elektrischen Energieanlagen, die Fehlerdiagnose und Asset Management im Vordergrund. Ebenfalls behandelt die Konferenz den globalen Trend zum Aufbau intelligenter Netze mit

intelligenter Online-Überwachung und Selbstheilungstechniken, einschließlich Energie, Kommunikation und Informationstechnologie. Auf dieser Konferenz wurden mehrere Beiträge vorgestellt und Herr M.Sc. Tobias Münster erhielt die Auszeichnung „CMD Prize by IEEE WA Section/ IEEE WA PES-PELS chapter“ für das eingereichte Paper mit dem Titel „Investigation on Ageing Parameters of a Thermally Accelerated Aged Paper-Oil-Insulation in a Hermetically Sealed System“.

Auf der Konferenz „*CEIDP 2018: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*“, die vom 21.10 - 24.10.18 in Cancun, Mexiko stattfand, wurden schließlich vier Beiträge vorgestellt. Das Ziel dieser jährlichen Konferenz war es, Forscher aller Fachrichtungen aus Industrie, Universitäten, Behörden und anderen Laboren zusammenzubringen, um die neuesten Ergebnisse und Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrischen Isolierung und der dielektrischen Phänomene zu diskutieren.

Auf der letzten diesjährigen Konferenz „*VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2018*“ in Berlin, die vom 12.11 - 13.11.18 stattfand, wurden insgesamt 15 Beiträge unter Beteiligung des Schering-Instituts präsentiert, womit das Institut in einem großen Umfang auf dieser Konferenz vertreten war. Ziel dieser VDE-Fachtagung war es, neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik zu vermitteln und zu diskutieren. Dabei sollten die Auswirkungen auf die Bereiche Konstruktion, Herstellungsprozess, Betriebsverhalten, Alterung und Diagnose näher betrachtet werden. Ebenso wie die Betrachtung neuer Werkstoffe und Prüfverfahren von Isoliersystemen.

Bild 3: Gruppenfoto des Schering-Instituts auf der VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2018

Transformer-Life-Management Tagung

Zum 12ten Mal fand 2018 die TLM Konferenz statt, die seit der ersten Tagung in 2007 in einer Kooperation organisiert wird zwischen den Firmen ABB AG, Energy Support GmbH und dem Schering-Institut, welches für den wissenschaftlichen Vorsitz und die Tagesleitung verantwortlich ist. Die an wechselnden Orten in Deutschland jährlich stattfindende Tagung, wurde dieses Jahr in der Stadthalle in Neuss durchgeführt, welche hervorragende Räumlichkeiten für die ca. 200 Teilnehmer und etwa 25 Fachaussteller bietet (siehe Bild 1), so dass Neuss nun zum zweiten Mal als Austragungsort gewählt wurde. Die insgesamt 18 Vorträge waren in 5 Themengruppen aufgeteilt und wurden größtenteils in der Konferenzsprache Deutsch gehalten, wenngleich die TLM seit vielen Jahren eine deutsch-englisch/englisch-deutsch Simultanübersetzung anbietet, da immer mehr Gäste aus dem europäischen Ausland an der wohl inzwischen größten Transformatorenkonferenz teilnehmen wollen. Dies führte dazu, dass sich die Organisatoren vor einigen Jahren entschieden die TLM auch international in anderen Ländern durchzuführen, so dass Tagungen in den Vereinigten Arabischen Emiraten, Thailand und China durchgeführt wurden. Mittlerweile finden nun jährlich eine internationale TLM in der ersten Hälfe des Jahres in wechselnden Ländern und eine nationale TLM in der zweiten Jahreshälfte in Deutschland in wechselnden Städten statt. Die internationale TLM 2018 fand in Suzhou, China (ca. 100 km entfernt von Shanghai) statt (siehe Bild 2) und da insbesondere in China offensichtlich ein besonders ausgeprägtes Interesse an einem internationalen Wissensaustausch besteht, erfolgt auch die dann 8te internationale TLM 2019 im Mai in Nanjing, China, wobei wiederum etwa 400 Teilnehmer erwartet werden. Somit haben die TLM Tagungen in China in der Regel doppelt so viele Teilnehmer wie in Deutschland, was natürlich auf eine höhere Bevölkerungsdichte zurückzuführen ist, aber auch auf die in China deutlich umfangreicher installierten Energiesysteme. Nicht nur, dass in China seit Jahrzehnten Übertragungs-leitungen für AC und DC mit Spannungen von inzwischen mehr als einer Million Volt installiert sind, auch im Bereich der regenerativen Energien sind selbst im Vergleich zu einem Vorreiterland wie Deutschland in China ganz andere Größenordnungen zu finden. Während in Deutschland aktuell basierend auf etwa 30.000 Windenergieanlagen von denen ca. 1200 offshore installiert sind, die installierte Windenergieleistung ca. 56 GW beträgt, so ist diese in China derzeit mit etwa 188 GW mehr als um einen Faktor 3 größer. Ähnliches gilt auch für Photovoltaikanlagen, die in Deutschland derzeit mit einer installierten Leistung von 48 GW zu Buche schlagen, während es in China mittlerweile 130 GW sind. Ein Vergleich der Diskussionen auf den TLM-Tagungen weltweit zeigt daher, wie unter-schiedlich die Thematiken in Bezug auf Leistungstransformatoren in verschiedenen Ländern ausgeprägt sind. Dies beeinflusst die Tagungsthemen auf den TLM Konferenzen durchaus, da auch immer wieder Beispiele aus anderen Ländern gezeigt werden, so dass sich die nationale und internationale TLM gegenseitig befruchten.

In Summe ist das Fazit der Tagungen aber immer wieder, dass die TLM eine herausragende Plattform bietet, auf der sich Experten, Betreiber, Hersteller, Zulieferer, Aussteller und Wissenschaftler austauschen können, um diverse Probleme und Herausforderungen zu diskutieren, aber auch das eigene Netzwerk zu pflegen und zu

erweitern, wobei hierzu sicher auch das immer besonders sorgfältig ausgewählte Rahmenprogramm einen Beitrag leistet. Kein Wunder, dass die Umfragen, die immer auf den TLM Tagungen durchgeführt werden, eine so positive Resonanz aufweisen, so dass auf der letzten TLM in Neuss die Tagung basierend auf dem Schulnotensystem von 1 bis 6 mit insgesamt 1,5 bewertet wurde.

Bild 1: TLM 2018 in Neuss

Bild 2: TLM 2018 in Shuzou, China

Besuch der International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)

Ein besonderes Highlight des Jahres 2018 war die gemeinsame Teilnahme von Mittarbeitern des Schering-Instituts mit den Absolventen des Bandung Institute of Technology an der Konferenz *Condition Monitoring and Diagnostics (CMD)* am 24/25. September 2018 in Perth (Australien), zur wissenschaftlichen Fortbildung und zum gegenseitigen Erfahrungsaustausch.

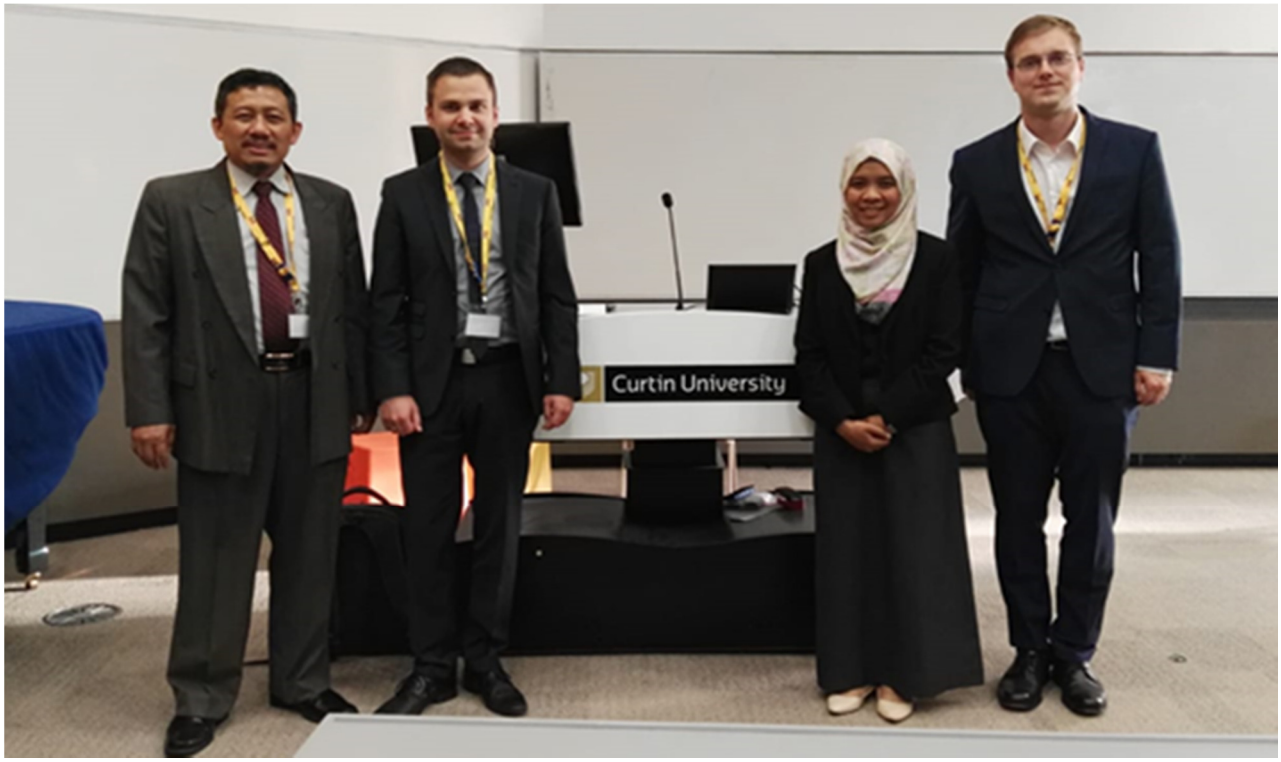


Bild 1: Treffen von Mitarbeitern des Schering-Instituts (SI) und des Bandung Institute of Technology (ITB) auf der CMD, v.l.n.r. Herr Prof. Surwano (ITB), Herr Münster (SI), Frau Sari (ITB) und Herr Kuhnke (SI)

Herr Münster war dort u.a. mit einem Vortrag zum Alterungsverhalten von Öl-Papier-Dielektrika bei luftabgeschlossenen Isoliersystemen, welcher auch prämiert wurde. Darüber hinaus waren auch Herr Prof. Surwano und Frau Ira Sari für das Bandung Institute of Technology Teilnehmer der Konferenz.

Die dort präsentierten Ergbnisse sind das Resultat einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit, welche das Schering-Institut seit November 2017 mit dem Bandung Institute of Technology in Indonesien aufgebaut hat. Die Absicht dieses Austauschprogramms ist nicht nur der wissenschaftliche Know-How-Transfer, sondern auch das Bestreben, interessierten Studenten anderer Universitäten die Möglichkeit zu bieten, die deutsche Kultur und Lebensart während eines sechs monatigen Auslandsaufenthalts kennenzulernen.

Im Rahmen des Auslandsaufenthalts fertigen die Austauschstudenten Masterarbeiten zu aktuellen Themen am Schering-Institut an. Die Studenten sind Mitarbeiter bei dem Energieversorger PLN in Indonesien und haben schon einige Berufserfahrung im Energiesektor gesammelt. Dadurch wird der Einstieg in die Masterarbeit erleichtert und die oftmals theoretischen Fragestellungen der Universitäten können mit Kenntnissen

praktischer Berufserfahrungen zielführender bearbeitet werden.

Als erste Studenten kamen Frau Ira Mardya Sari und Herr Eldi Firmansyah Nasution im November 2017 nach Hannover. Frau Sari beschäftigte sich mit dem Aufbau und Einsatz einer Anordnung, mit der die Zugspannung von Isolierpapier messtechnisch erfasst werden kann. Daneben befasste sich Herr Nasution mit der Formulierung von intelligenten Algorithmen, mit denen der Alterungszustand von Transformatorpapieren anhand von Ölkennwerten abgeschätzt werden kann. Der Aufenthalt der Studenten in Deutschland wird durch ein mehrwöchiges Industriepraktikum bei namenhaften Industriepartnern abgerundet.

Beide Studenten haben wissenschaftliche Publikationen während des Aufenthaltes in Deutschland veröffentlicht, basierend auf den Ergebnissen, die während der Forschungsarbeiten erzielt wurden.

Bild 2: Studenten des Bandung Institute of Technology; v.l.n.r. Ira Mardya Sari, Eldi Firmansyah Nasution, Wind Adiati und Bayu Hadi Nugraha

In einem zweiten Studentenaustausch im Oktober 2018 kamen Frau Wind Adiati und Herr Bayu Hadi Nugraha nach Hannover. Frau Adiati befasst sich aktuell mit den Möglichkeiten zur Erfassung von Säurebestandteilen in Papieren und Herr Nugraha erweitert den Auswertungsalgorithmus zur Zustandsdiagnose für gealterte Papierproben auf weitere Arten von Isolierölen.

Die Betreuung der Studenten im Schering-Institut erfolgt wiederum durch Herrn Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey und für die wissenschaftliche Betreuung besteht eine enge Zusammenarbeit zwischen den Professoren Suwarno und Werle, mit regelmäßigen Berichten über den Fortgang der Arbeiten und der wissenschaftlichen Entwicklung der Studenten.

5 Umbau des Institutes

Werkstatt

Nachdem im Rahmen der Brandschutz- und Berufungsmaßnahmen die Werkstatt neue Räumlichkeiten bezogen hat, wurden sämtliche Maschinen , in enger Zusammenarbeit mit dem Stab für Sicherheit der LUH , sicherheitstechnisch auf den aktuellen Stand der Technik nachgerüstet und teilweise erneuert. Neu angeschafft wurde unter anderem eine zyklengesteuerte Drehmaschine (siehe Bild 1) der Firma Weiler, zur Fertigung u.a. von individuellen Hochspannungselektroden und Gießformen.

Bild 1: Neue zyklengesteuerte Drehmaschine

Des Weiteren ersetzen eine neu erworbene Fräsmaschine, eine neue Tischbohrmaschine und eine neue Bandsäge den alten Bestand, was in Bild 2 dargestellt ist.

Durch diese Investitionen und viele kleinere Umbau- und Anpassungsmaßnahmen kann nun ein Höchstmaß an Sicherheit und Ergonomie, bei gleichzeitig gesteigerter Effizient der Arbeitsprozesse gewährleitest werden.

Bild 2: Neue Fräsmaschine und Bandsäge

Der Unterschied zur alten Werkstatt wird durch die durchgeführten Maßnahmen deutlich, was die vorher-nachher Fotos in Bild 3 bestätigen.

Bild 3: Arbeitsumgebung vorher und nachher

Hochspannungshalle

2018 begann der sukzessive Umbau des Prüffeldes der Hochspannungshalle im Rahmen der Modernisierung des Schering-Institutes. Zunächst wurde die Bühne in der ersten Etage der Hochspannungshalle renoviert. Dabei mussten unter anderem neue Kabel verlegt und der Boden erneuert werden. Bild 1 zeigt die Umbauarbeiten auf der Bühne.

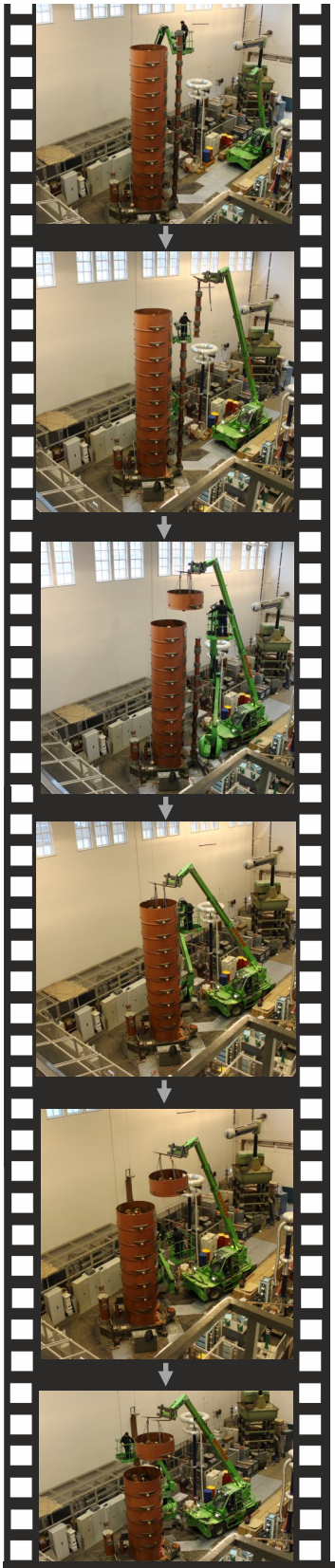
Bild 1: Umbauarbeiten auf der Bühne

Bild 2: Fertiggestellte Messzellen auf der Bühne

Das Resultat des Umbaus zeigt Bild 2. Es sind 4 neue Messzellen entstanden, darunter zwei große, eine kleine, sowie eine neue größere geschirmte TE–Kabine.

Um einen möglichst sicheren und einfachen Umgang für die Hochspannungsmessung zu gewährleisten, wurde die Beschaltung der Messzellen neu konzipiert. Dafür wurde eine Sicherheitsschaltung mit der ABB Pluto Sicherheits-SPS realisiert. Das Anlegen von Hochspannung ist nur möglich, wenn die Tür der Messzelle und die Erdungsstange an deren vorhergesehenen Positionen, bestätigt über die in der Pluto-Software programmierten Sensoren, angebracht wurden. Außerdem schaltet sich die Anlage sofort ab, sobald der Sicherheitskreis unterbrochen wird. Darüber hinaus beinhaltet die Schaltung auch einen Überspannungsschutz und einen Stromwächter, mit dem die maximale Stromstärke eingestellt werden kann, bei der sich die Anlage selbständig ausschalten soll. Das Bedienfeld einer modernisierten Messzelle ist in Bild 3 zu sehen, die nun den Sicherheitsstandard SIL 3 (Safety Integrity Level) erfüllt.

Bild 3: Bedienfeld der Messzelle



Neben dem Umbau der Messzellen auf der Bühne wurde in der Hochspannungshalle ein neuer Impulsgenerator zur Erzeugung hoher Impulsspannungen aufgebaut.

Zur Ermittlung der Impulsfestigkeit von Isoliermaterialen stand dem Schering-Institut bisher der in die Jahre gekommene Marx-Generator zur Verfügung, dargestellt in Bild 4.

Dieser wurde im Jahr 1957 geliefert und errichtet, abgebildet in Bild 5. Im vorangegangenen Jahr wurde dieser schließlich abgebaut, um Platz für einen neuen Impulsgenerator zu schaffen. Im April 2018 wurde dann ein neuer Turm zur Erzeugung hoher Stoßspannung der Firma HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH aufgebaut.

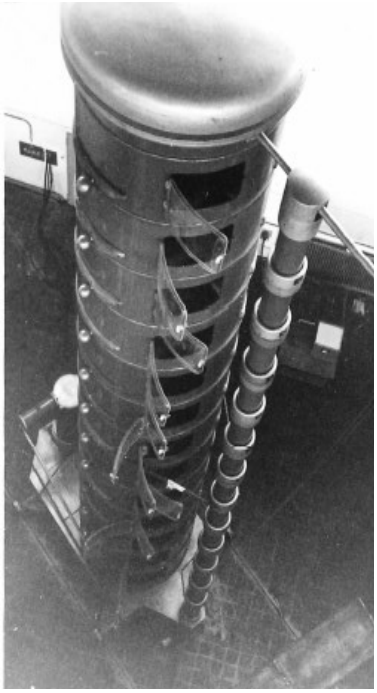


Bild 4: Stoßgenerator in 1957

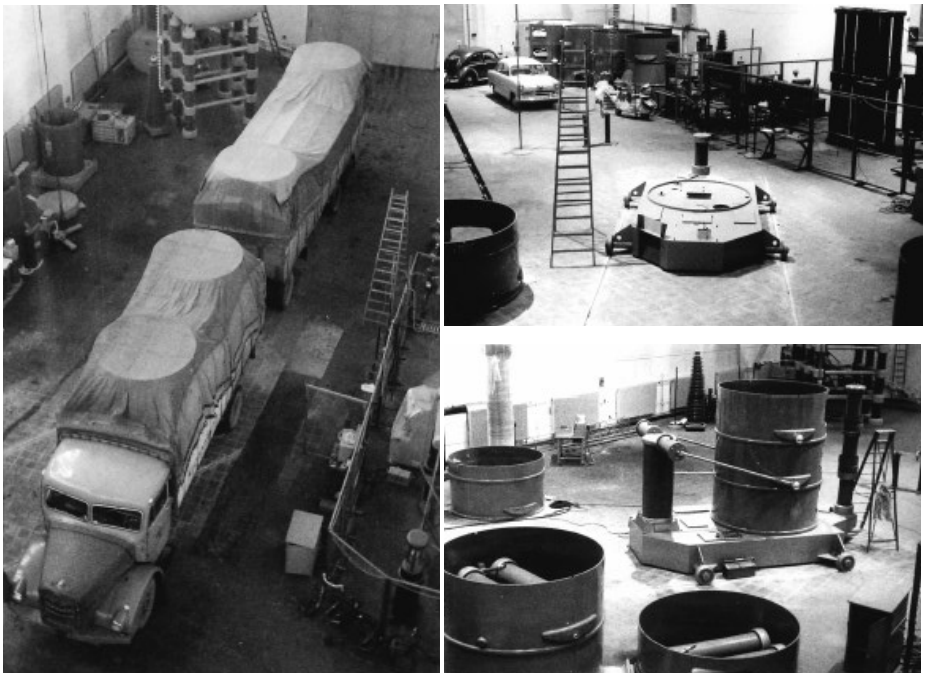
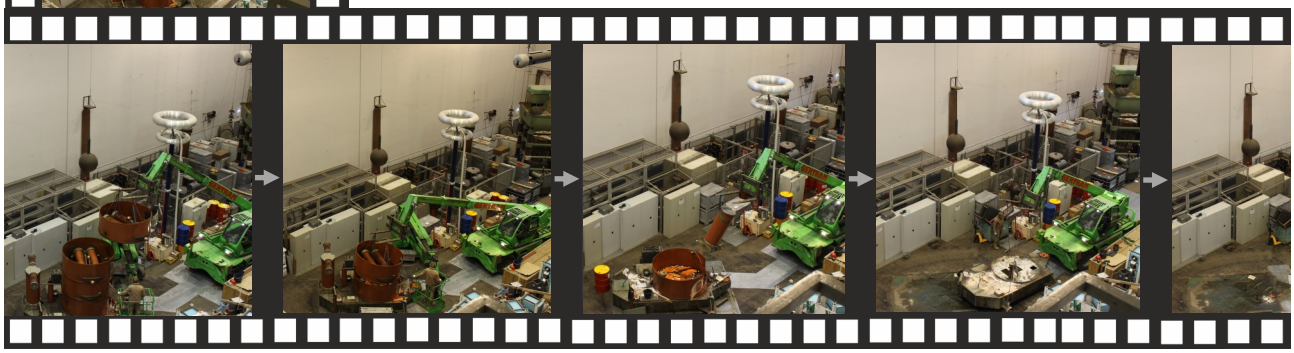


Bild 5: Aufbau des alten Stoßgenerators im Jahre 1957



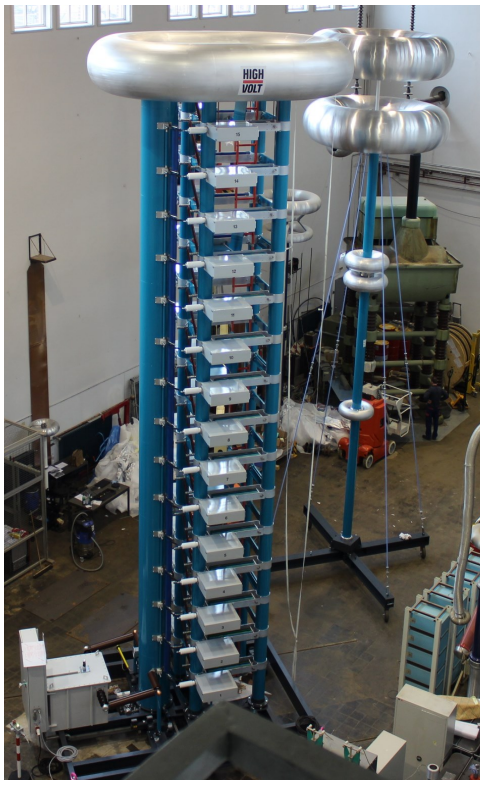


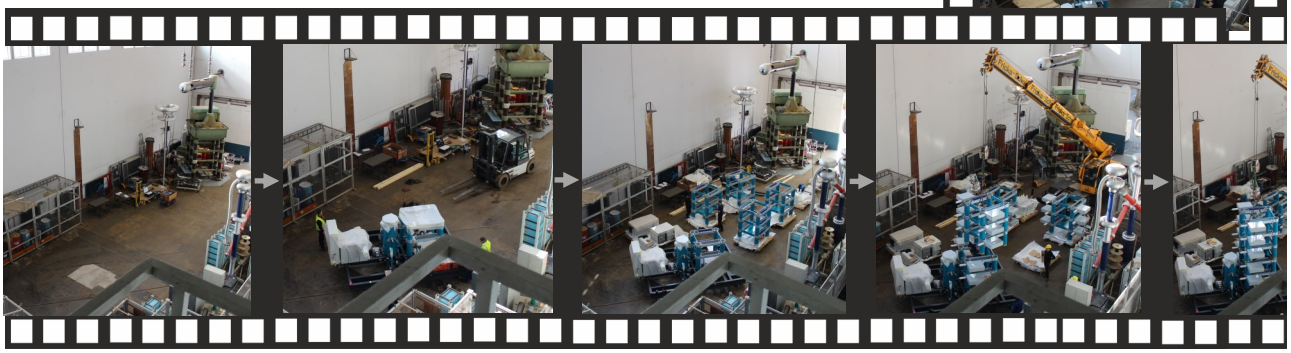
Bild 6: Neuer Impulsgenerator

Der in Bild 6 abgebildete Impulsgenerator erreicht eine Ladespannung von 3 MV bei einer Ladeenergie von 300 kJ bei negativer oder positiver Polarität. Er ist aus insgesamt 15 Stufen modular aufgebaut, sodass ein einfacher Einsatz von der gewünschten Anzahl von Stufen ermöglicht wird. Jede Stufe erlaubt eine Ladespannung von 200 kV, wobei der Zündfunkenstreckenabstand mithilfe eines Motors über das Bedienfeld in der Schaltwarte eingestellt werden kann. Zusätzlich wird der flexible Austausch von den Lade- und Entladewiderständen sowie der Aufbau in Reihen- oder Parallelschaltung ermöglicht, sodass die Prüfobjekte sowohl mit Blitzstoßspannung als auch Schaltstoßspannung beansprucht werden können.

Ferner wurde ein dreistufiger Teiler zum Erfassen der Stoßspannung aufgebaut.

Ein weiteres neues Herzstück des Prüffeldes stellt ein umgebauter Container als Schaltwarte dar, der aktuell mit den Bedienelementen der Betriebsmittel, wie der 800 kV AC-Kaskade, der 800 kV DC-Kaskade, der Stoßstromanalage sowie des Stoßturmes ausgestattet wird. Dieser ist in Bild 7 abgebildet.

Bild 7: Umgebauter Container als Kontrollraum



Das Prüffeld der Hochspannungshalle wird aktuell weiter umgebaut und weitere Betriebsmittel werden überholt.

In einem 3D-Modell wird eine voraussichtliche Version des Endergebnisses des Prüffeldes der Hochspannungshalle vorgestellt. Dieses dient dazu, die optimale Lage der verschiedenen Betriebsmittel, Lagerplätze und auch der Schaltstationen zu finden, vor allem hinsichtlich der elektrischen Isolierabstände. Drei verschiedene Blickwinkel auf das Prüffeld werden in Bild 8, 9 und 10 veranschaulicht. Dabei werden der aktuelle Stand und die mögliche Endversion in dem 3D-Modell dargestellt. Daneben werden auch die Möglichkeiten für den Einsatz von Toroiden betrachtet, um mögliche lokale elektrische Feldüberhöhungen an Ecken und Kanten zu homogenisieren.

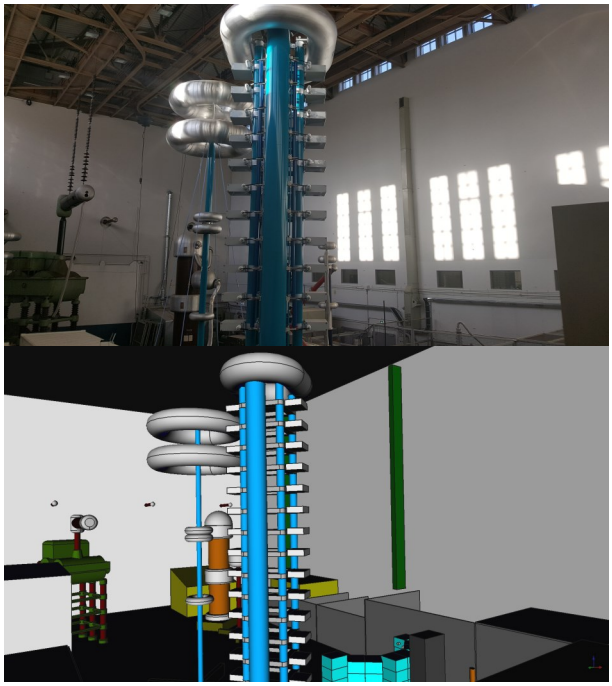


Bild 8: Blick in das Prüffeld der Hochspannungshalle von der Bühne

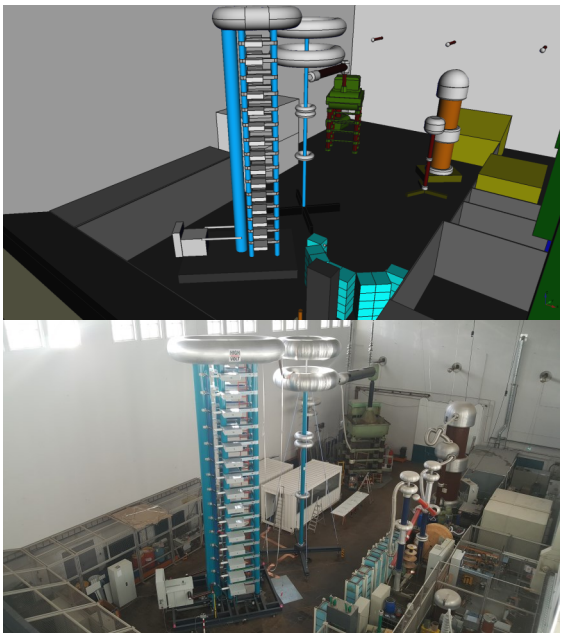


Bild 9: Blick in das Prüffeld der Hochspannungshalle von der 3. Etage

Darüber hinaus sind weitere Umbauten und Modernisierungen in Planung, wie die Überholung der gesamten Sicherheitseinrichtungen in der Hochspannungshalle, die ebenfalls auf SIL 3 ertüchtigt werden soll. Es bleibt also weiterhin spannend!

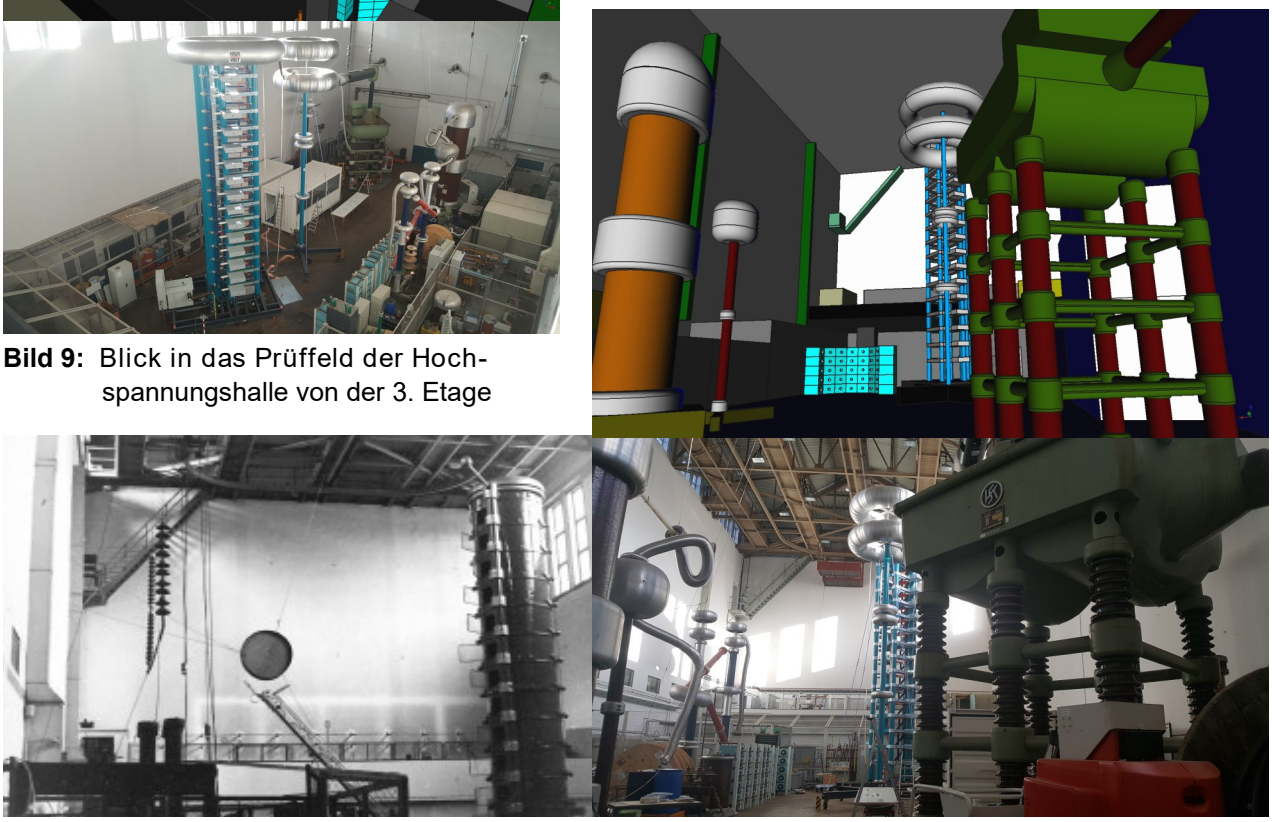


Bild 10: Blick in das Prüffeld der Hochspannungshalle von dem Hallentor aus, links: in 1957

6 Forschungsarbeiten

Research stay in the Schering-Institute

M.Sc. Cristian Olmo Salas

The collaboration between research institutions is, together with the publications in journals and conferences, and the discussions in Commitees, one of the pillars of the knowledge sharing in the academic world. This is why the creation of relationships between local and foreign researchers is promoted by the policies of public institutions in Spain in the form of research stays.

Under the umbrella of this policy, it rose the opportunity to link two institutions involved in the research of dielectric nanofluids for application in power transformers, as they are the Schering-Institut of the Leibniz University Hannover (Germany) and the Research Group in Electric Power Transformers (GITEP) of Cantabria University (Spain), by a stay of a spanish Ph. D. student in Hannover during three months.

The members of GITEP dedicate their investigations mainly to the substitution of traditional mineral oils by more environmentally friendly or/and more efficient alternatives, as they are the vegetal dielectric oils or nanofluids. These are centered in characterizing the properties of these alternatives (Figure 1) and how they evolve with time under work conditions and how do they interact with other transformer components. With this information, computational fluid dynamics (CFD) models of real transformers with these alternatives are tested (Figure 2), whose results are compared with the actual performance of these machines.

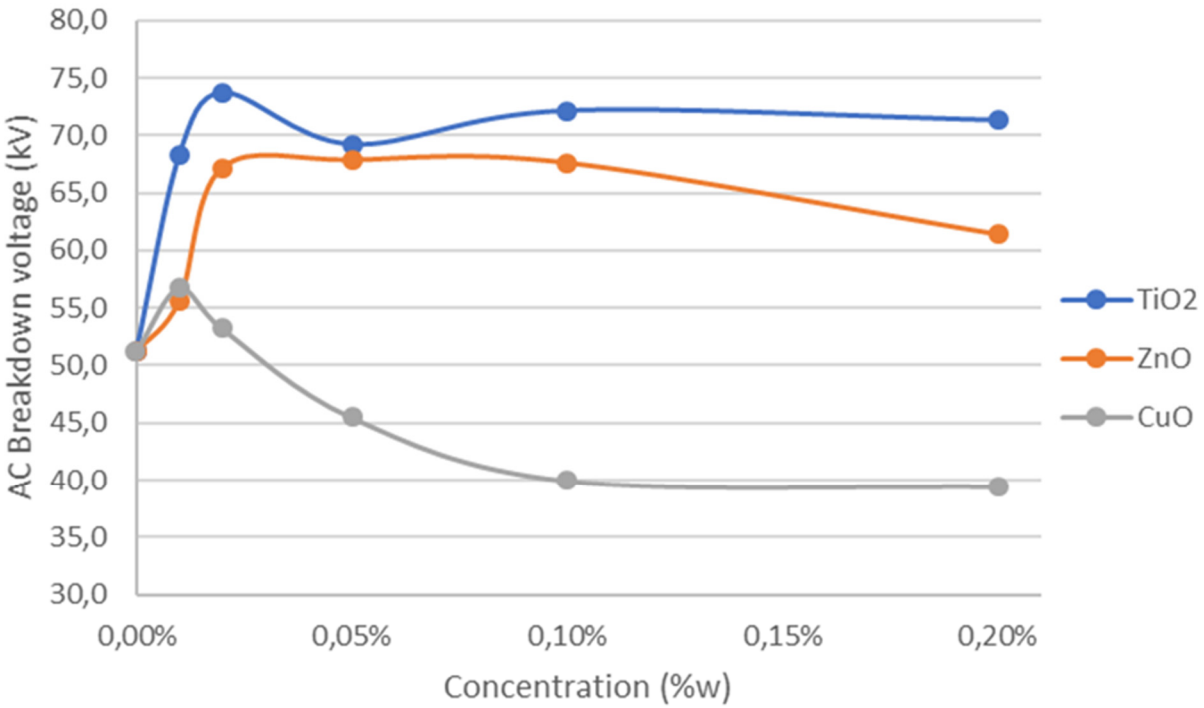


Figure 1: Breakdown voltages of tested vegetal-based nanofluids depending on nanoparticle concentration (RE&PQJ-16)

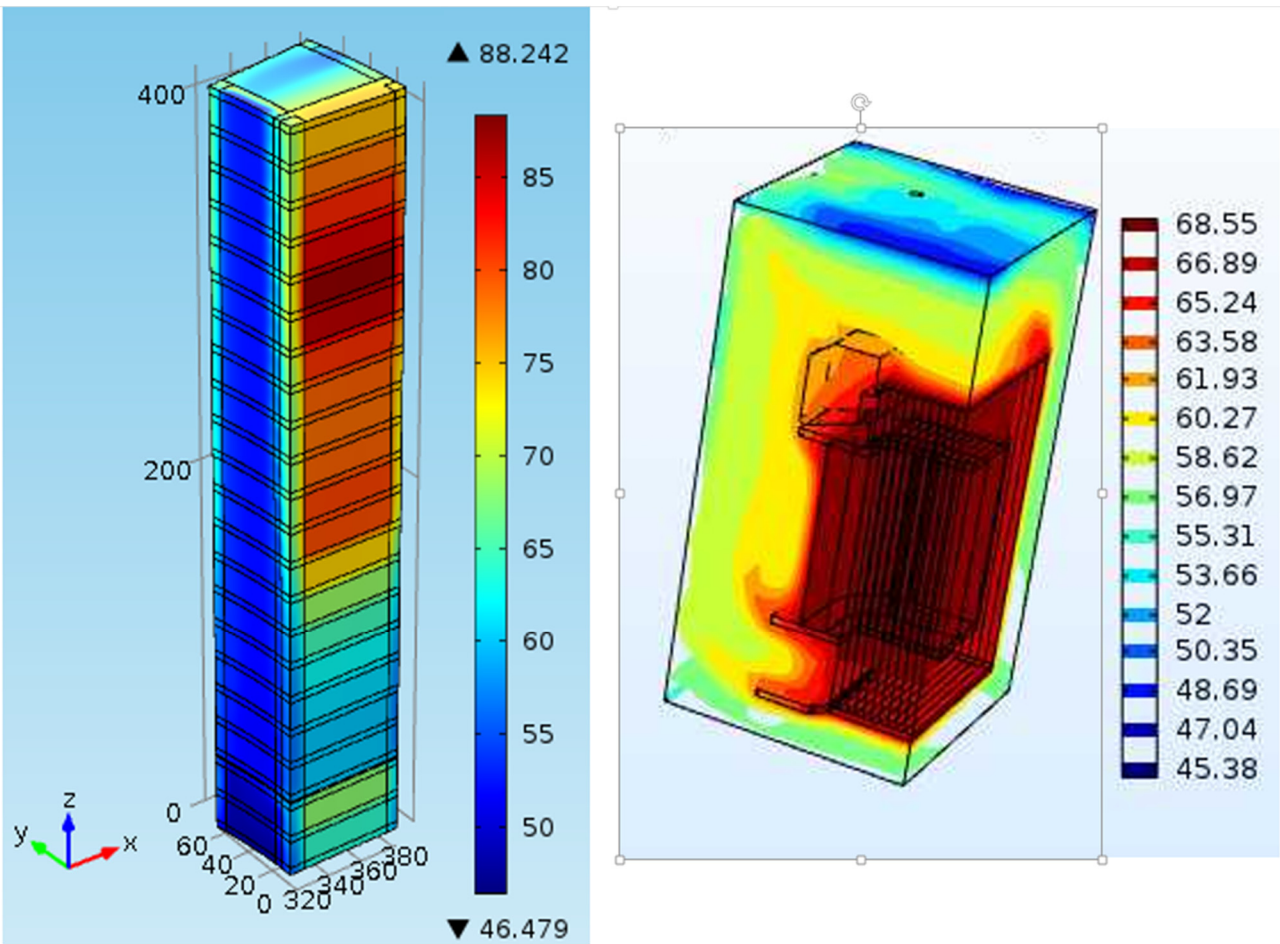


Figure 2: Temperature distributions simulated in transformer sections CFD 3D models

The idea of combining the vegetal oils used by the spanish group with the stable nanoparticles of the german institute to be tested rose naturally, as a try of combining the best aspects of both investigations. This collaboration may suppose the interchange of technical knowledge on this topic and would be helpful to compare and to check the methodologies of work, and to broaden both investigations to more combinations of nanofluids. It is expected to get conclusions about the dependence of the effect of the nanoparticles presence on the main properties of the base fluid and on the composition of this solid fraction.

For the visiting Ph. D. student this was also an opportunity to know the other research branches of the Schering-Institute in high voltage devices and insulating materials.

The collaborative research is still in development during the publication of this report and the obtained results will follow.

Electrical, Dielectrical and Thermo-physical Properties of Magnetite Doped Ester Nanofluids

M.Sc. Mohammad Imani

Mineral oil is the most widely used insulating fluid for high voltage applications. Besides, natural and synthetic esters were introduced as sustainable alternative products to mitigate considerations related to the disadvantages of mineral oils.

Numerous efforts have been made in the past few decades to develop novel approaches for improving the thermo-physical and electrical performance of insulating fluids. Modification of the base fluid with dispersion of fine particles could be such an innovative approach.

This work concerns the electrical and dielectrical properties of synthetic ester reinforced with magnetite nanoparticles for high voltage applications. Moreover, the influence of the dispersed nanoparticles on thermo-physical properties of those fluids was subjected to the investigations.

In this research, nanofluids are prepared by a two-step method as a cost effective technique. Formerly, magnetite nanoparticles are produced through bottom-up approach.

Subsequently, nanoparticles were dispersed in the base fluid. Here, the synthetic ester insulating liquid *Midel 7131* was used as the host medium. The preparation process was followed by submitting the suspension to an ultrasonic treatment. This contributes to break down aggregated clusters resulting from considerable Van der Waals attraction force and a homogenous distribution of nanoparticles will be thereby ensured. It was recognized that supplement of dispersant is necessary to stabilize the binary suspension. No sedimentation was visually detectable 6 months after the production, as seen in Figure 1.

Figure 1: Engineered magnetite nanofluids with increasing concentrations, 0, 0.05 and 0.5 g/l, from left to right

Furthermore, stability of the prepared samples was investigated via dynamic light scattering, which approves the stability of the colloids. Liquid samples were then dried and degassed in a vacuum chamber at the temperature of 70 °C for 72 h to exclude the influence of moisture and dissolved gases on the measuring results. Using the Karl Fischer Titration method complying with the standard *IEC 60814*, a water content less than 17 ppm was measured for all samples after the treatment.

To investigate the impact of suspended nanoparticles on the dielectric withstand strength of the fluid, the breakdown voltages of the liquids were measured according to *IEC 60156*. The measurement was repeated 12 times for each sample. Figure 2 shows the impact of concentration on the breakdown voltage of the insulating liquid. It could be observed that the breakdown voltage increases by ascending filler concentration.

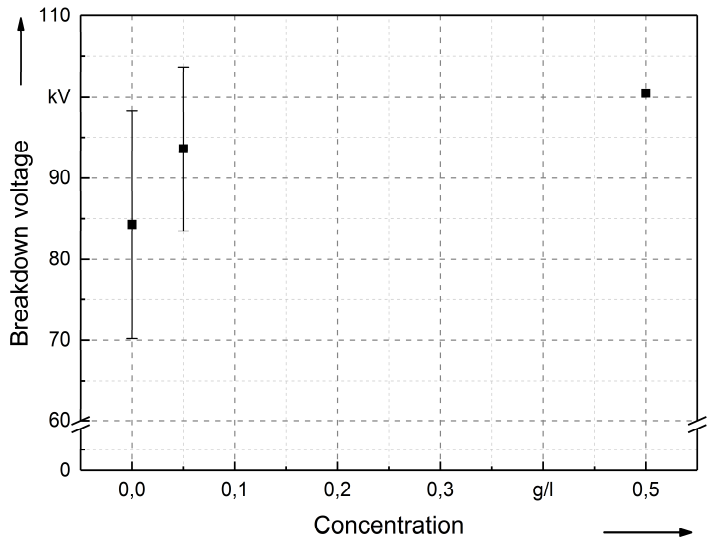


Figure 2: AC breakdown voltage of nanofluids and pure ester fluid

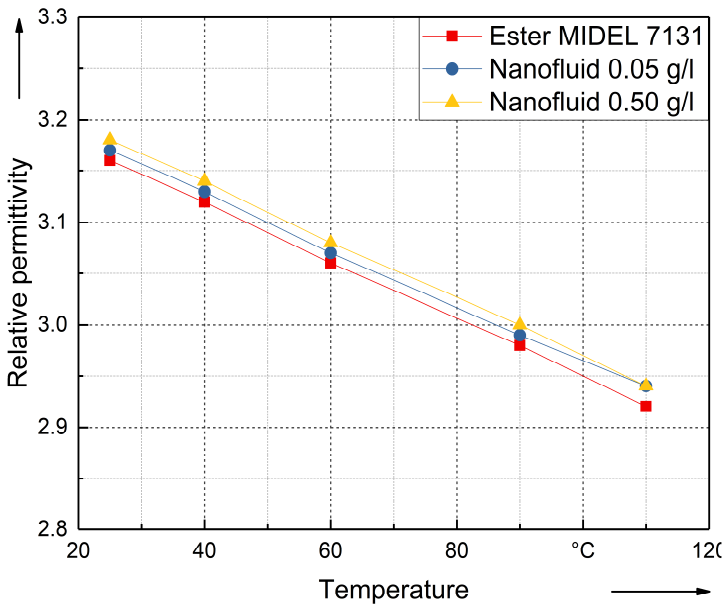


Figure 3: Relative permittivity of the fluids with various concentrations as a function of temperature

Relative permittivity conveys information regarding how far the insulation material can be polarized under applied voltage. This property was measured for developed nanofluids at different temperatures. Figure 3 depicts relative permittivity of the insulating fluids at various filler fractions as a function of temperature.

A moderate reduction of relative permittivity with temperature could be observed. The number of polarizable entities reduces in volume unit with ascending temperature as a result of decrement of the fluid density, which in turn brings about the drop of dielectric constant. Besides, ion orientation under applied field will be impeded at elevated temperatures.

Furthermore, it could be also noticed that the relative permittivity values remains unchanged with increasing concentration.

Furthermore, temperature dependent measurements were carried out to uncover the influence of temperature on the dielectric loss of the samples. Compared in Figure 4 is the dielectric dissipation factor (DDF) of the fluids from room temperature 25 °C up to 110 °C. Dielectric loss factor of all batches of liquids increases with temperature, which could be associated to the dissociation of neutral constituents and accordingly increase of ionic conduction. It should be mentioned that owing to the fact that the dispersed nanoadditives are electrically conductive, this leads accordingly to rise of conduction current and dielectric loss of modified samples. Therefore, this indicates that those nanofluids enriched with magnetite nanofiller could not be employed for applications where a low dielectric dissipation factor is of high concern.

Dynamic viscosity of the liquid samples was measured over a wide temperature range, depicted in Figure 5. A temperature dependent correlation between the viscosity and temperature could be noticed; the viscosity of all samples decreases rapidly when temperature rises.

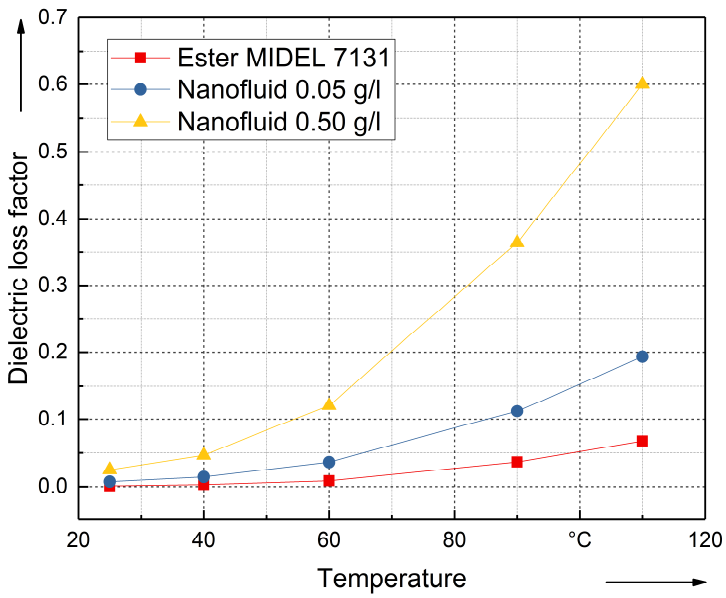


Figure 4: Dielectric loss factor of ester and Fe_3O_4 nanofluids as a function of temperature

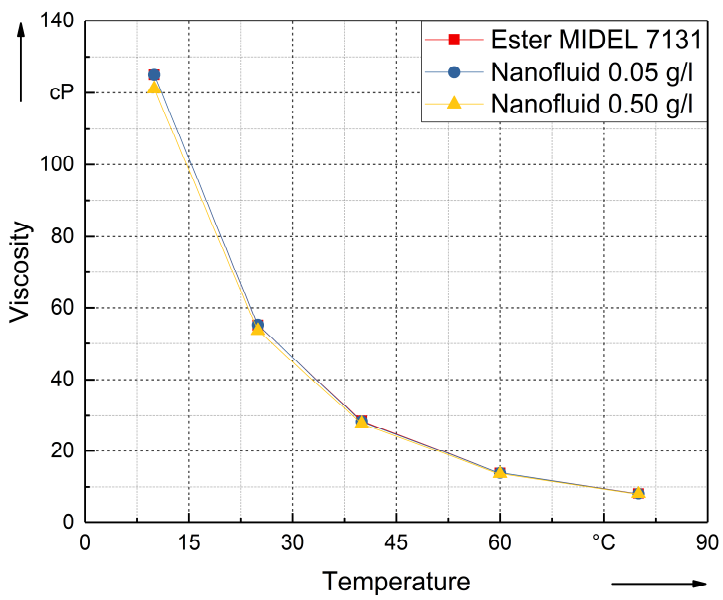


Figure 5: Viscosity of ester and Fe_3O_4 nanofluids as a function of temperature

Moreover, it could be seen that addition of magnetite nanoparticles into ester has no influence on the viscosity.

In this contribution a new class of stable nanofluids with dispersion of magnetite nanoparticles in synthetic ester *Midel 7131* was developed and accordingly investigated. An enhancement of the AC breakdown voltage could be achieved. However, magnetite nanoparticles possess much higher relative permittivity compared to the used working fluid; relative permittivity of the colloid remains unchanged by incorporation of nanofillers. Moreover, the viscosity of the prepared fluids are not influenced by infusion of the nanoparticles.

Further work is in progress in order to achieve an optimized formulation for nanofluids regarding filler size, type, loading and appropriate dispersant as well, which meet demanded thermo-physical and electrical requirements. This should pave the way to manufacture high voltage apparatus at reduced size and ensuing costs.

New Method for Solubility Measurement of Characteristic Gases in Insulation Liquid

M.Sc. Mohammad Imani, M.Sc. K. Homeier

Gas solubility of a liquid shows the affinity of a solvent to dissolve a gas under specified thermo-dynamic conditions. Once a solute gas comes in contact to the surface of solvent liquid, gas molecules diffuse into the liquid until a dynamic equilibrium is established. This property governs gas diffusion from the solvent into the surrounding solute and vice versa; e.g. gas diffusion into the oil and migration from which into the gas cushion in hermetically sealed power transformers. Besides, in the case of free breathing transformers it is important to know how far the key gases could diffuse out to the surrounding atmosphere; or in other words, it indicates the loss of information for a specified gas, which impacts the accuracy of the DGA interpretation.

As a normal situation, power transformers operate under load variation or change of temperature and pressure of the surrounding atmosphere, which unsettles the equilibrium between dissolved gases in oil and gas phase above it. Consequently, it could result in bubble formation in insulating oil, which could initiate partial discharges. Besides, for gas in oil analysis it is necessary to know the solubility of the gas to calculate the dissolved gases based on the extracted gases by using the widely employed headspace method.

Furthermore, comparison of the undissolved trapped gases in the transformer Buchholz relay and those gases dissolved in the oil could deliver wealthy information about transformer health condition or in case of a failure some information concerning the type and intensity of the fault could be achieved. All aforementioned facts emphasize the importance of knowing the solubility of the key gases.

In high voltage apparatus, mineral based oil is the commonly used liquid insulation; however, in the last decades some alternative synthetic and natural products have been emerged; amongst synthetic/natural ester and silicon oils could be mentioned. These unconventional products have inherently different compositions as mineral oil. These alternative liquids possess naturally different physiochemical properties e.g. viscosities, which influence their tendency to dissolve key gases. As these liquids serve not only as insulating and cooling medium, but also as an agent carrying information regarding the condition of the transformer via DGA method, it is necessary to determine the solubility coefficient of gases for the emerging oils.

Therefore this study aims at establishing a new approach to determine the solubility coefficient of the characteristic gases in insulating oil, which could be also applied for other liquids. The appropriateness of this technique along with the optimizing the saturation process is subjected to the investigation. This method is applied for determination of Ostwald coefficient of a mineral oil, whose solubility could be compared with the values provided by corresponding standards.

The standards *IEEE C57.104* and *IEC 60599* have provided Ostwald coefficients of considered gases in mineral oil listed in Table 1. According to *IEEE C57.104*, those values are valid for mineral oil with density of 0.88 kg/m^3 at 25 °C and at the pressure of one atm.

It could be seen from Table 1 that the presented Ostwald coefficient values by two standards for some gases are considerably inconsistent. This significant discrepancy might be traced back to investigating different insulating liquids. Neither *IEEE* nor *IEC* have provided information regarding the test method. As it has been mentioned above, knowing the solubility coefficient of the characteristic gases for DGA based on headspace is necessary. Hereby this different values for Ostwald coefficient results in different DGA interpretations.

Table 1: Ostwald coefficient of different gases in mineral oil

Gas	k (*IEC 60599*)	k (*IEEE C57.104*)	Difference in %
N_2	0.091	0.0745	22.1
H_2	0.056	0.0429	30.5
O_2	0.172	0.138	24.6
CO	0.132	0.102	29.4
CO_2	1.09	0.9	21.1
CH_4	0.429	0.337	27.3
C_2H_6	2.82	1.99	41.7
C_2H_4	1.84	1.35	36.3
C_2H_2	1.24	0.938	32.2

A new set-up was designed and manufactured, which is demonstrated in Figure 1. In order to do the investigations at constant temperature, the whole set-up was placed into a climatic chamber.

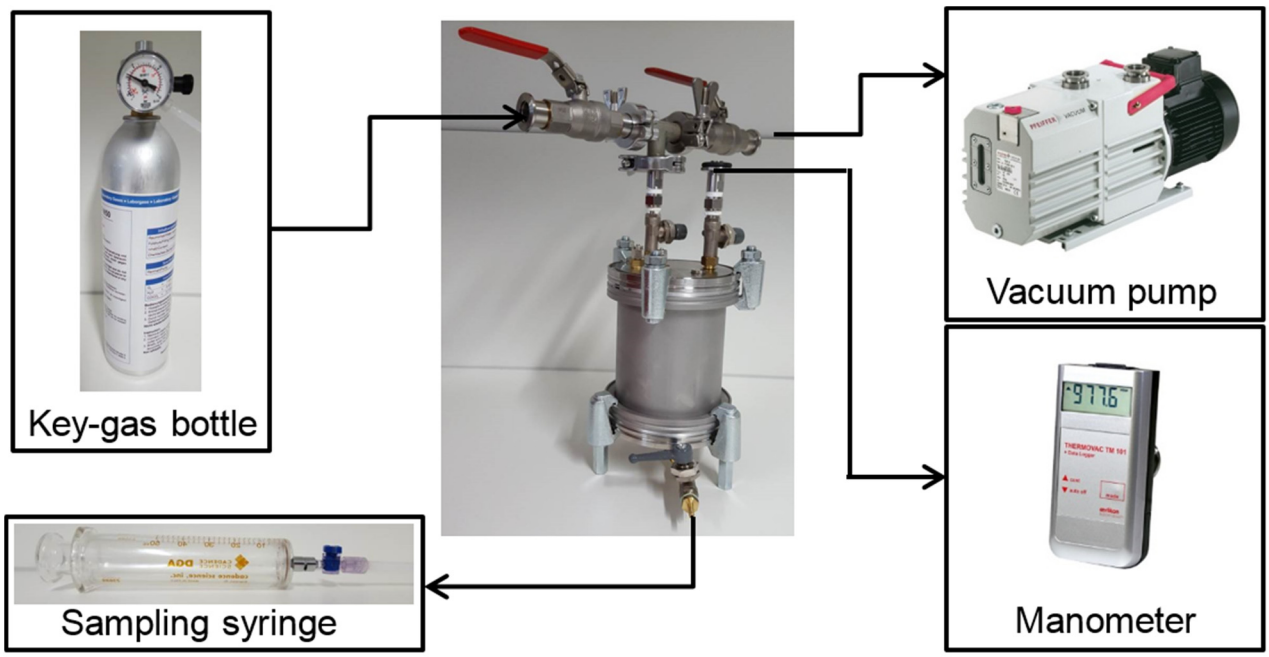


Figure 1: New test set-up for gas saturation in liquid

The vessel was filled with 150 ml of the insulating fluid, which has been degassed and dried beforehand. Afterwards, the liquid was treated at room temperature again. This process has been done at a vacuum level of 0.05 mbar for 180 min to ensure the removal of gas traces dissolved in the investigated oil.

Following this, the key gas was fed into the equilibrium chamber. The pressure of the key gas was regulated at 1020 mbar and at the temperature of 25 °C. During the whole saturation process, the gas pressure was monitored and adjusted at the determined level. Owing to the fact that the solution of the gas in liquid results in a pressure drop of the gas phase over the investigation time, the characteristic gas was injected until a pressure of 1020 mbar was reached. Concurrently, in order to accelerate the diffusion of gas in oil and facilitate the saturation process, a magnetic stirrer enlarged the effective interface between the gas and the liquid phase. Thereupon, the oil sampling was performed through the bottom valve using a glass syringe. The analysis of the dissolved gases was performed by *TOP TOGA GC* from *Energy-Support* GmbH. In contrast to the headspace method, this device is equipped with a full vacuum degassing unit to extract the dissolved gases.

The Ostwald coefficients of the investigated gases and the ensuing standard deviation are depicted in Figure 2. It could be seen that the measured values have a quite low standard deviation, which indicates the reasonable reproducibility of the obtained results and applicability of this method. Furthermore, it could be recognized that the investigated gases exhibit relatively similar solubility with those mentioned in the standard *IEEE C57.104*.

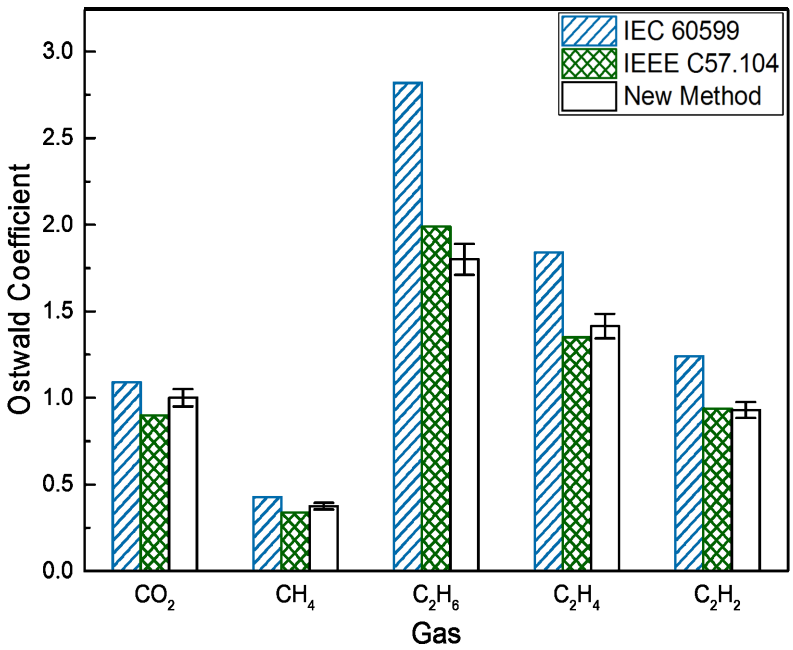


Figure 2: Ostwald coefficients of key gases in the mineral oil *Shell Diala S2 ZU-I* in comparison with the solubility coefficient values presented in *IEEE C57.104* and *IEC 60599*

In comparison, these values deviate in some cases to a large degree from the provided Ostwald coefficient values given in *IEC 60599*. Since neither *IEEE* nor *IEC* standards provide any information regarding the employed test method, it is not clear what the reason for this discrepancy is. This inconsistency may be traced back to investigating different fluids. However, in this contribution it has been turned out that the new proposed method could be satisfactorily employed to quantify the solubility of characteristic gases in a mineral oil; verification of this approach should be subjected to a round robin test, to establish a new standard for determination of Ostwald coefficients, which could substitute the former standard *ASTM D2780-92* being already withdrawn.

Furthermore the impact of other parameters beside temperature - such as water content, aging status of the oil and additives - is not yet thoroughly investigated. Notably, there are no general-accepted values regarding the solubility coefficients of ester and silicon fluids. Our future investigations will address those abovementioned issues.

Furane als Alterungsindikatoren für die Zustandsbestimmung der Zellulose in ölgefüllten Transformatoren

M.Sc. Kristin Homeier, M.Sc. Mohammad T. Imani

Der Zustand eines Transformators wird maßgeblich von dem Zustand der Zellulose bestimmt. Zur Bestimmung des Depolymerisationsgrades (DP-Wert) der Zellulose hat sich die Ermittlung der entstandenen Furankonzentrationen bewährt. Zu den typischen Furanderivaten zählen 2-Furfural (2FAL), 2-Furfurylalkohol (2FOL), 2-Acetylfuran (2ACF), 5-Methyl-2-Furfural (5MEF) und 5-Hydroxymethyl-2-Furfural (5HMF). Aufgrund der weit höheren Konzentration und Stabilität von 2FAL gegenüber anderen Furanderivaten wurde es jedoch in den meisten Untersuchungen besonders berücksichtigt. Trotz langjähriger Erfahrung gibt es in der Furananalyse und einer genormten Messmethodik noch kein standardisiertes Interpretationsschema, um die 2FAL Konzentrationen mit dem DP-Wert zu korrelieren.

Zur Untersuchung verschiedener Einflussgrößen auf die thermische Alterung wurden Öl- und Papierproben unter Variation verschiedener Systemparameter gealtert. Es wurden die folgenden Einflussgrößen untersucht: Geometrie der Zelluloseanordnung, Langzeituntersuchungen bei Imprägnierung der Zellulose mit verschiedenen Isolierflüssigkeiten sowie der Vergleich des freiatmenden mit dem geschlossenen System. Dabei erfolgt die Analyse über die entstandenen Konzentrationen der Furane nach der Probenentnahme der Isolierflüssigkeit nach definierten Zeitintervallen.

Bild 1: Prüfgefäß

Für die thermische Alterung wurden Erlenmeyerkolben als Prüfgefäße verwendet. Für die verschiedenen Messreihen wurden die Messparameter weitestgehend konstant gehalten und lediglich einzeln die Parameter verändert, deren Einfluss untersucht werden soll. Zur Nachbildung des Öl-Papier-Isoliersystems eines Leistungstransformators wird die imprägnierte Zellulose mit der Zugabe eines Kupferrohrs in je ein Prüfgefäß eingebracht, welche die Wicklungen des Leistungs-transformators nachbildet. Die Alterung erfolgte bei einer Temperatur von 130 °C in einem Wärmeschrank für zuvor definierte Zeitintervalle, in einem Bereich von über 2000 Stunden.

Die Ermittlung der Furankonzentrationen erfolgte in Anlehnung an die Prüfnormen *IEC 61198* und *ASTM D5837-15* mittels eines Hochleistungsflüssigkeitschromatographen (HPLC), der mit einem Massenspektrometer (MS) gekoppelt ist. Die Nachweisgrenze liegt bei <0,01 ppm für die verschiedenen Furanderivate nach Extraktion der Furane aus der Isolierflüssigkeit mithilfe der Feststoffphasenextraktion.

Neben der Geometrienachbildung durch Zellulosestreifen wird das Öl-Papier-Isoliersystem eines Leistungstransformators mit einem Zellulosewickel auf einem Kupferrohr nachgebildet bei einem Papier-Öl-Gewichtsverhältniss von 1:10. Als Ergebnis dieser Untersuchung ergab sich, dass lediglich 2FAL und 5HMF mit einer Nachweisgrenze von 0,01 ppm detektierbar sind, wobei eine deutlich höhere Konzentration an 2FAL im Vergleich zu 5HMF ermittelt wurde. Erklären lässt sich dieser Zusammenhang damit, dass 5HMF zumeist durch die Hydrolyse gebildet wird, dann aber

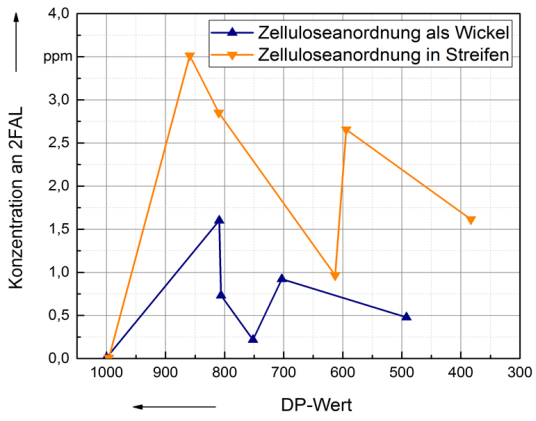


Bild 2: 2FAL Konz. bei unterschiedlichen Zelluloseanordnungen

mit Wasser zu den Produkten 2FAL und Methanal reagiert. Die Konzentrationen an 2FAL (Bild 2) und auch 5HMF liegen bei den Zellulosestreifen höher als bei der thermischen Alterung mit den Wickeln. Dieses Verhalten lässt sich damit erklären, dass im Fall der gewickelten Zellulose eine niedrigere Oberfläche zu der Isolierflüssigkeit und somit geringere Reaktions-fläche aufweist. Erwartet wurde ein über dem DP-Wert exponentiell ansteigender Wert, der in der Literatur beschrieben wird und mit dem eine Relation zwischen DP-Wert und Konzentration von 2FAL ermittelt werden kann. Es ist ein sinkender Verlauf von den 2FAL-Konzentrationen erkennbar, sodass sich bei dem Einsatz von uninhibierten Mineralöl kein eindeutiger Zusammenhang ableiten lässt. Es gibt verschiedene Erklärungsansätze für dieses Verhalten: Die Furanderivate haben sich verflüchtigt oder diffundieren in das Papier und werden absorbiert oder haben sich bei hoher Alterungstemperatur von 130 °C umgewandelt. Da im Allgemeinen die Messresultate der 2FAL-Konzentrationen keine eindeutigen Kurvenverläufe aufweisen, wurde die Eignung des entwickelten Messverfahrens über das Einsenden einiger Proben zu einem externen Prüflabor überprüft. Deren Resultate bestätigten die dargestellten Messergebnisse.

Darüber hinaus wurde der Einsatz drei verschiedener Isolierflüssigkeiten überprüft: uninhibiertes und inhibiertes Mineralöl und GtL-Öl. Verwendet wurden dazu die Zelluloseanordnung in Streifen. Bild 3 und 4 zeigen die Messergebisse. Erkennbar ist ein moderates aber stetiges Ansteigen der 2FAL-Konzentrationen über die Alterungsdauer bei der inhibierten Isolierflüssigkeit und dem GtL-Öl. Bei der uninhibierten Isolierflüssigkeit ist zunächst ein steigender Verlauf der Konzentration an 2FAL ersichtlich, welche dann aber wieder signifikant absinkt. Daneben wird für das inhibierte Mineralöl und GtL-Öl eine moderat ansteigende Menge über die Alterungsdauer deutlich. Auch über den DP-Wert lässt sich eine Korrelation zu den 2FAL-Konzentrationen ableiten.

Im Folgenden werden Messungen bezüglich des Einflusses einer Transformatorbauweise als hermetisch geschlossen oder freiatmend vorgestellt. Dadurch wird der Einfluss der Luftzufuhr als Untersuchungsgegenstand berücksichtigt. Bei den Messungen mit der Nachbildung eines hermetisch geschlossenen Transformators wurden neben den beiden Furanen 2FAL und 5HMF zusätzlich noch 2ACF und 5MEF detektiert. Der Umstand,

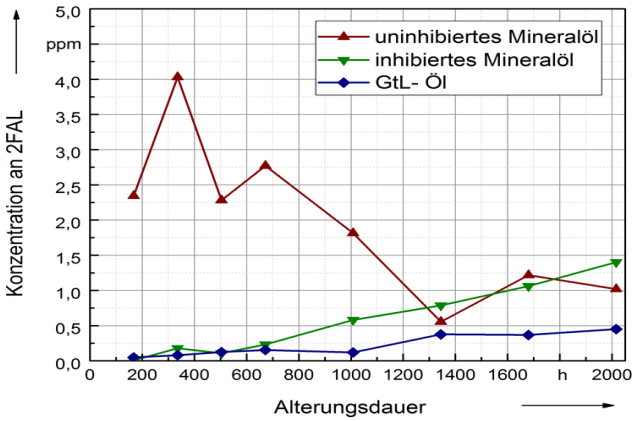


Bild 3: 2FAL bei verschiedenen Isolierflüssigkeiten über die Alterungsdauer

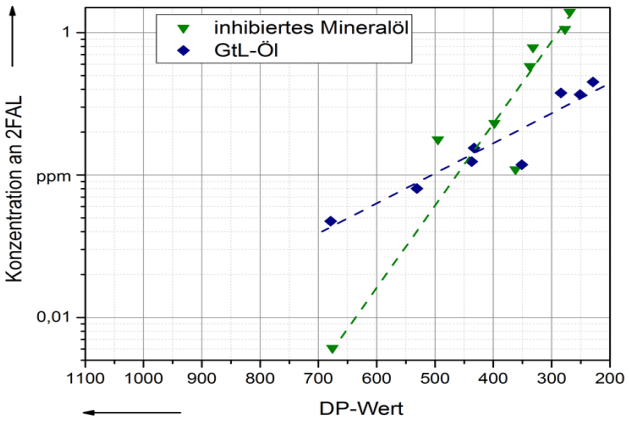


Bild 4: 2FAL bei verschiedenen Isolierflüssigkeiten über dem DP-Wert

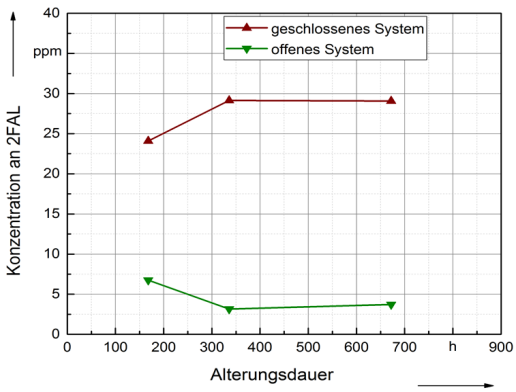


Bild 5: 2FAL-Konz. unter unterschiedlichen Systemen

dass im geschlossenen System diese beiden Furane zusätzlich auftreten, liegt an der geringeren Sauerstoffzufuhr und damit verbunden einer geringeren Reaktions-freudigkeit, sowie der geringeren Möglichkeit der Verflüchtigung. Es wird deutlich, dass bei dem geschlossenen System die Konzentrationen der beiden Furanderivate signifikant überwiegen (Bild 5). Dies bestätigt den fehlenden Diffusionsaustausch der flüchtigen Furane mit der Umgebungsluft.

Abschließend wird die Diffusion der Furanderivate in die Zellulose untersucht. Dies soll die erläuterten Zusammenhänge bzgl. der Adsorption von Derivaten in die Zellulose unterstützen. Dazu werden 2 Prüfgefäße mit Papierwickel und uninhibierten Mineralöl bei einem Papier-Öl-Verhältnis von 1:10 vorbereitet. Der Isolierflüssigkeit wurde zuvor 2FAL und 5HMF hinzugegeben, sodass beide mit je 500 ppm in der Isolierflüssigkeit vorliegen. Die Prüfgefäße werden ohne Gaspolster verschlossen und 2 Wochen bei einer Temperatur von 80 °C gelagert. In Tabelle 1 sind die ermittelten Restkonzentrationen der Furane aufgelistet. Erkennbar ist eine recht gute Reproduzierbarkeit der verbleibenden Konzentration der beiden Furane. Auffällig ist zudem, dass 5HMF deutlich mehr von der Zellulose absorbiert wird als 2FAL. Dies lässt sich durch ein höheres Anhaftungsvermögen von den 5HMF-Molekülen an die Zellulose und deren erhöhter Löslichkeit im gebundenen Wasser der Zellulose aufgrund der Hydroxy-Gruppe in 5HMF erklären. Generell kann die Verringerung nur durch eine Adsorption der Furane von der Zellulose erklärt werden, da bei Verwendung des geschlossenen Systems die Verflüchtigung der Furane eher vernachlässigt werden kann. Zudem ist die Umwandlung dieser zwei Komponenten bei der gewählten Temperatur von 80 °C unwahrscheinlich.

Tabelle 1: Vergleich der Restkonzentrationen

	5HMF in Prüfgefäß 1	2FAL in Prüfgefäß 1	5HMF in Prüfgefäß 2	2FAL in Prüfgefäß 2
Konz. nach 2 Wochen	71,9	332,9	87,1	339,9

Es konnte gezeigt werden, dass keine eindeutige Korrelation zwischen Furankonzentrationen und dem DP-Wert besteht, aufgrund der Verflüchtigung der Furane sowie der Diffusion der Furane aus der Isolierflüssigkeit in die Zellulose und umgekehrt. Diese Studie zeigt, dass Rückschlüsse auf den Zustand der Zellulose in einem Transformator basierend auf den Konzentrationen der Furanverbindungen nicht eindeutig möglich sind. Es müssen neben der Furananalyse noch weitere Alterungsindikatoren in Betracht gezogen werden. Lediglich eine signifikante Erhöhung der Konzentrationen an 2FAL kann ein Hinweis auf die thermische Alterung von Papier sein. Allerdings ist der DP -Wert der Zellulose mithilfe der 2FAL-Konzentrationen nicht eindeutig bestimmbar und insbesondere hängt die Menge an sich bildenden Furanderivaten von der Art des Isolieröls ab. Damit ist nachgewiesen, dass generelle Verfahren, die einen Zusammenhang zwischen DP-Wert und Furanderivaten auswerten, ohne die Art der Isolierflüssigkeit zu berücksichtigen, fehlerhaft sein müssen.

Untersuchung eines beschleunigten Alterungsverhaltens einer Öl-Papier-Isolierung unter Verwendung verschiedener Isolieröle

M.Sc. Tobias Münster, Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey

Die Öl-Papier-Isolierung stellt auch in der heutigen Zeit eine der wichtigsten Isolationssysteme für Hochspannungsgeräte dar, wie z.B. Transformatoren. Dabei unterliegt diese Form der Isolierung einer permanenten Belastung durch elektrische, thermische und mechanische Beanspruchungen, wodurch die Isolierung einem stetigen Alterungsprozess ausgesetzt ist. Der Depolymerisationsgrad (DP-Wert) gibt die durchschnittliche Anzahl von Glucoseringen in jeder Zellulosekette an, wobei dieser Wert aktuell die verbreiteste Methode ist, um den Zustand der Papierisolierung zu bestimmen. Die Grenze der Betriebssicherheit liegt bei einem DP-Wert von 150 bis 200, welcher als Erfahrungswert angesehen werden kann, da die Zellulose hierbei makroskopisch brüchig und spröde ist. Für die Messung des DP-Werts ist eine Papierprobe notwendig, so dass sich die Erfassung des Alterungszustands der Papierisolierung von Transformatoren im Betrieb als schwierig erweist, da eine Probennahme des Papiers für gewöhnlich nicht möglich ist. Die Erfassung des Alterungszustands der Papierisolierung erfolgt deshalb generell indirekt über die Messung von Abbauprodukten der Papieralterung, die sich innerhalb des Isolieröls befinden, da eine Probennahme von Isolierölen unproblematisch ist.

Für die Laboruntersuchung wurde ein Transformatormodell zur Erfassung des Alterungszustandes der Papier-Öl-Isolierung in einem offenen System (mit ständigem Luftkontakt) entwickelt. Um auch einen Unterschied zwischen verschiedenen Isolierölen feststellen zu können, wurden drei verschiedene Isolierflüssigkeiten getestet. Für die Proben kamen das nicht inhibierte Isolieröl *Öl A*, das inhibierte Isolieröl *Öl B* sowie ein weiteres inhibiertes Isolieröl *Öl C* zum Einsatz. Die Isolieröle wurden vor Beginn der Alterung in einer Ölaufbereitungsanlage getrocknet und entgast. Als Papier wurde getrocknetes Kraft-Papier mit einer Stärke von 0,1 mm, wie es auch in Transformatoren Anwendung findet, verwendet. Die Alterung der Proben erfolgte in offenen Gefäßen, welche aus je 1600 g Isolieröl, 160 g Papierstreifen und einem Kupferstab mit einem Gewicht von 66 g als Katalysator bestanden. Die beschleunigte Alterung erfolgte über 15 Wochen in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 130 °C.

Um eine exakte Ermittlung der Kenngrößen zu erhalten, wurden die Ölproben in chemisch inerten Aluminiumflaschen abgefüllt und hermetisch verschlossen, womit äußere Einflüsse vermieden wurden. Die Aufbewahrung der Papierproben geschah

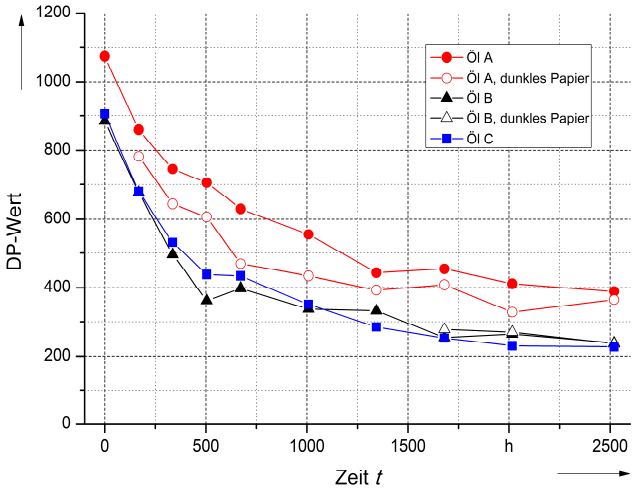


Bild 1: DP-Werte für imprägniertes Papier mit *Öl A, Öl B* und *Öl C* über der Alterungszeit

dabei in LDPE-Probenbeuteln. Die Ermittlung des Depolymerisationsgrades des Papiers führte hierbei ein akkreditiertes Analysenlabor durch. Die Erstellung der Proben, als auch die Entnahme erfolgte stets nach dem gleichen Schema, um vergleichbare Kennwerte zu erhalten. Die Ermittlung der Messwerte wurde nach geltenden Normen durchgeführt.

Das untersuchte Isolieröl *Öl A* wurde ohne alterungshemmende Stoffe hergestellt. Hierbei zeigte sich im Vergleich zu dem ebenfalls untersuchten *Öl B* und *Öl C* vor allem bei Kenngrößen, welche durch Oxidationsvorgänge beeinflusst werden, zum Teil deutliche Unterschiede während der Alterung. Der Zusatz eines Inhibitors im Isolieröl *Öl B* steigert die Festigkeit des Öls gegenüber Reaktionen mit Sauerstoff. Das inhibierte *Öl C* ist aufgrund der Herstellung aromaten- und schwefelfrei, was Auswirkungen in Bezug auf die elektrische Festigkeit sowie gegenüber physikochemischen Einflüssen hat.

Die Untersuchung der Alterungsgrößen über der Zeitdauer von 15 Wochen zeigte Unterschiede zwischen den Isolierölen auf. Bei der Untersuchung des DP-Werts konnte gezeigt werden, dass die inhibierten Isolieröle einen schnelleren Abbau im Vergleich zu *Öl A* bewirken. Die exponentielle Annährung an ein Lebensdauerende der Papierisolierung verläuft dabei unabhängig von der Zusammensetzung des Isolieröls (Bild 1).

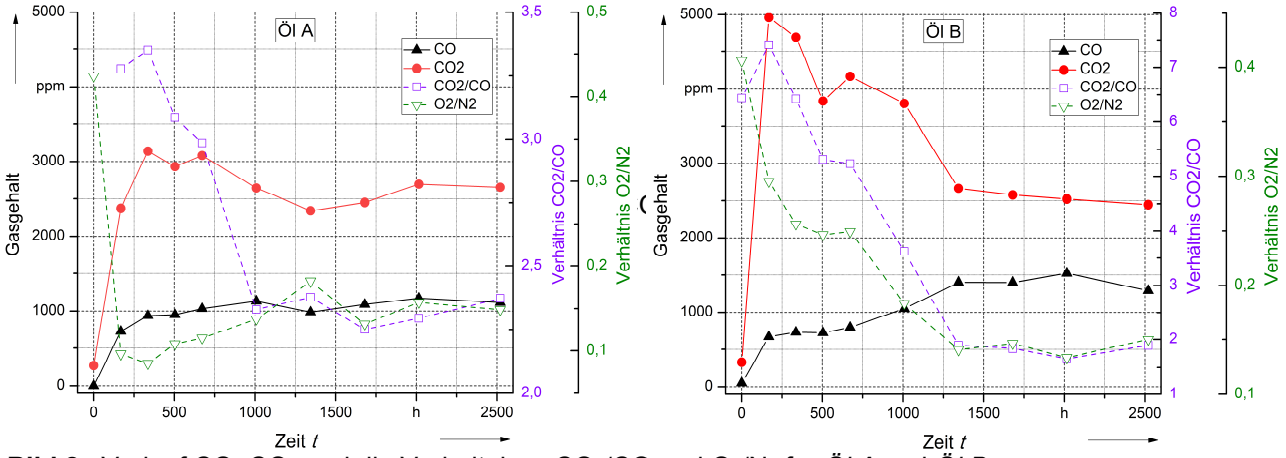


Bild 2: Verlauf CO, CO_2 und die Verhältnisse CO_2/CO und O_2/N_2 für *Öl A* und *Öl B*

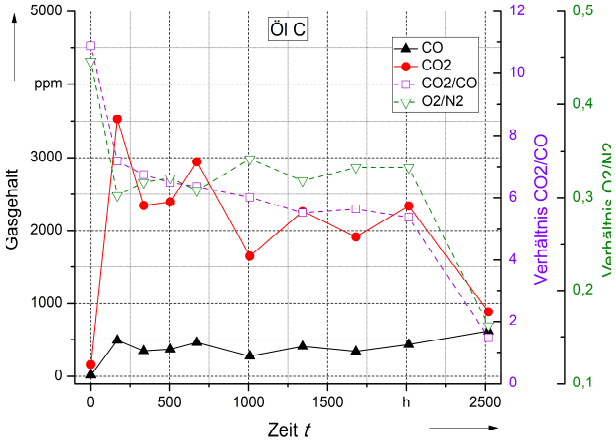


Bild 3: Verlauf CO, CO_2 und die Verhältnisse CO_2/CO und O_2/N_2 für *Öl C*

Die Ermittlung der Gasgehalte CO und CO_2 sowie der Gasquotienten CO_2/CO und O_2/N_2 können neben Rückschlüssen auf Fehler im Isoliersystem auch Hinweise geben, welche Alterungsmechanismen in der Papier-Öl-Isolierung überwiegen. Durch die Analyse des O_2/N_2-Verhältnisses konnte gezeigt werden, dass im nicht inhibierten Isolierstoff bereits nach einer Woche Alterungsdauer ein übermäßiger Sauerstoffverbrauch durch Oxidation vorherrscht (Bild 2, Bild 3).

Die Betrachtung der Ölmesswerte in Bezug auf die DP-Werte des Papiers ergaben zudem Erkenntnisse über mögliche Alterungsmarker für die Papierisolierung. Das Ende der Papierfestigkeit wird bei einem

DP-Wert von 200 angesehen. Das inhibierte *Öl B* zeigt eine Korrelation zwischen dem Sauerstoffgehalt und dem Fortschreiten der Papieralterung. Fällt der Gehalt rapide ab, könnte dies als Indikator für einen DP-Wert kleiner als 350 stehen und somit auch das Ende der Papierfestigkeit anzeigen. Bei *Öl C* ist hierbei ein ähnlicher Zusammenhang feststellbar. Durch den Gasquotienten von CO_2/CO, welcher unter den Schwellwert 3 fällt, wird für *Öl A* ein DP-Wert von 600 signalisiert, welcher als Alterungsmarker angesehen werden könnte. Die Untersuchung des Verlustfaktors und der relativen Permittivität zeigte (Bild 4), dass der Verlustfaktor abhängig von der Temperatur und den Verunreinigungen im Isolieröl ist. Bei dem synthetischen Isolieröl konnte nahezu keine Veränderung dieser dielektrischen Eigenschaften nachgewiesen werden. Bei der Permittivität konnte bei *Öl A* und *Öl B* ein linearer verlaufender Anstieg bei den Mineralölen erkannt werden, während bei *Öl C* ein Anstieg zum Ende der Alterungszeit zu erkennen war. Bei hohen Temperaturen ist bezüglich des DP-Werts ein sprunghafter Anstieg der relativen Permittivität erkennbar, welcher den Zustand des Papiers für einen DP-Wert von 550 für *Öl A* und für einen DP-Wert von 350 für *Öl B* anzeigt.

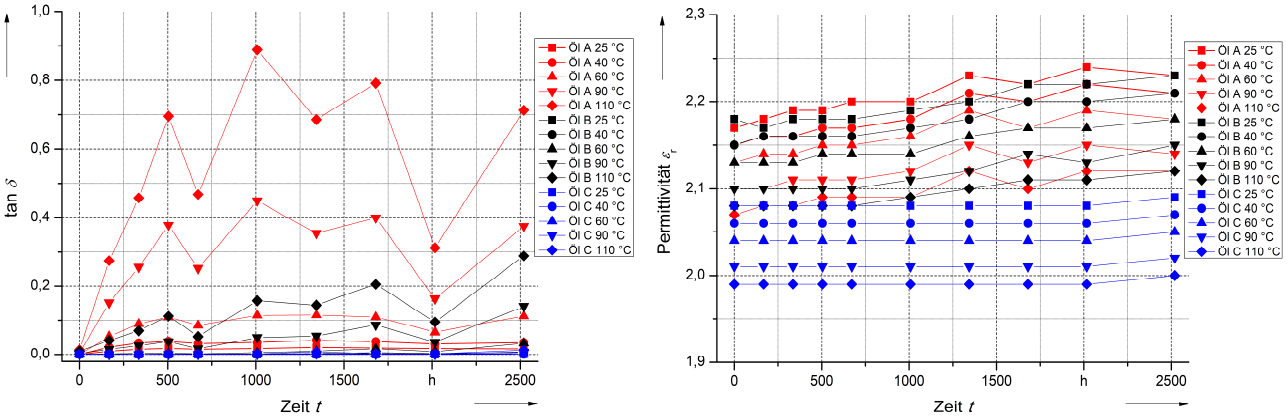


Bild 4: Verlauf des dielektrischen Verlustfaktors und der relativen Permittivität in Abhängigkeit der Alterungszeit

Durch Verunreinigungen und eine hohe Anzahl an polaren Gruppen in einem Öl sinkt die Grenzflächenspannung (Bild 5), welche auch einen Indikator für die Alterung des Papiers sein kann. Hinsichtlich des Säuregehaltes wurde deutlich, dass trotz alterungshemmender Stoffe ein Zugewinn von sauren Bestandteilen in inhibierten Ölen durch

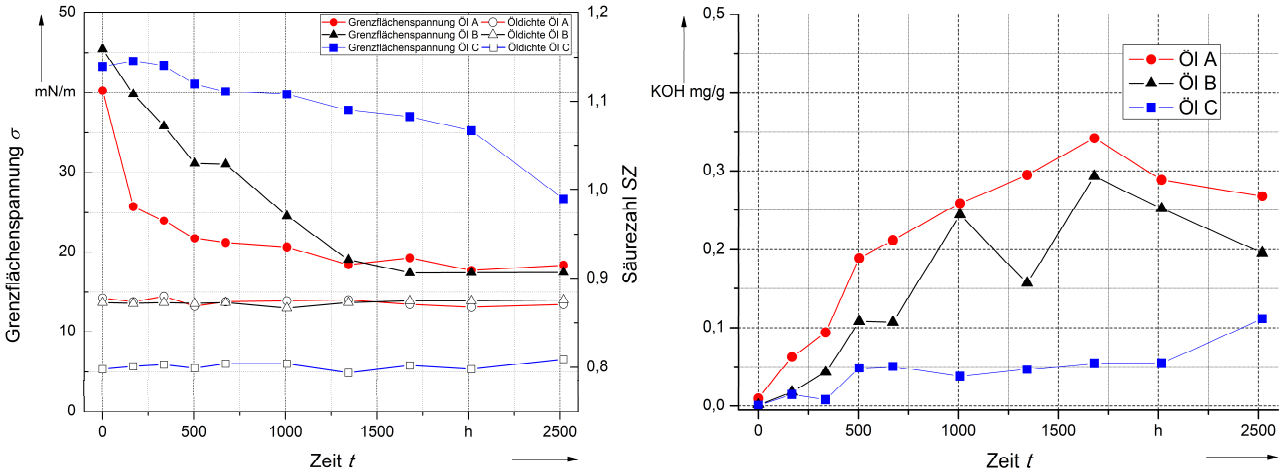


Bild 5: Verlauf der Grenzflächenspannung und des Säuregehalts in Abhängigkeit der Alterungszeit

pyrolytische Zersetzung zu verzeichnen ist (Bild 5). Das synthetische Öl zeigte sich im Verlauf der Untersuchung resistent gegenüber der Bildung von sauren Produkten im Öl.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten und demzufolge die Zusammensetzung der Öle einen Unterschied im Alterungsverhalten der Papierisolierung hervorrufen. Somit ist eine Bestimmung der Papieralterung nur möglich, wenn diese auch in Abhängigkeit des verwendeten flüssigen Isolierstoffs durchgeführt wird, so dass generelle, indirekte Methoden zur Bestimmung der Papieralterung, die für alle Flüssigkeiten gleich sind, fehlerbehaftet sein müssen.

Untersuchung von Alterungsparametern einer thermisch beschleunigt gealterten Öl-Papier-Isolierung in einem hermetisch verschlossenen System

M.Sc. Tobias Münster, Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey

Bereits in dem Beitrag „*Untersuchung eines beschleunigten Alterungsverhaltens einer Öl-Papier-Isolierung unter Verwendung verschiedener Isolieröle*“ wurde über die Wichtigkeit der Öl-Papier-Isolierung berichtet. Diese Form der Isolierung wird vor allem in Transformatoren und Messwandlern verwendet. Während der Betriebszeit kommt es hierbei zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Isolierung durch permanente Belastungen in Form von elektrischen, thermischen, mechanischen als auch chemischen Beanspruchungen. Die Alterung wird dabei vorwiegend durch drei Alterungsformen hervorgerufen. Der Oxidation, durch die Anwesenheit von Sauerstoff, der Hydrolyse, durch vorhandene Feuchtigkeit im Isoliersystem und der Pyrolyse, durch hohe Temperaturen. Durch diese Alterungsprozesse kommt es zu einem stetigen Umwandlungsprozess der Isolierung und der Bildung von Alterungsprodukten. In dieser Untersuchungsreihe soll ein geschlossenes System untersucht werden, um den Einfluss der Oxidation auf den Alterungsprozess der Öl-Papier-Isolierung beurteilen zu können, welcher in Gegenüberstellung zu den Ergebnissen aus dem o.g. Beitrag zu sehen ist, da es sich hierbei um ein offenes System handelte. Bei dieser Untersuchungsreihe soll ebenso die Erfassung des Alterungszustands der Papierisolierung erfolgen und zwar indirekt über die Messung von Abbauprodukten der Papieralterung, die sich innerhalb des Isolieröls befinden, erfolgen, da eine Probennahme von Isolierölen aus Transformatoren unproblematisch ist.

Für die Laboruntersuchung wurde ein Transformatormodell zur Erfassung des Alterungszustandes der Papier-Öl-Isolierung in einem geschlossenen System, unter Abschluss gegenüber der Außenluft, entwickelt. Um auch einen Unterschied zwischen verschiedenen Isolierölen feststellen zu können, wurden drei verschiedene Isolierflüssigkeiten getestet. Für die Proben kamen das nicht inhibierte Isolieröl *Öl A*, das inhibierte Isolieröl *Öl B* sowie ein weiteres inhibiertes Isolieröl *Öl C* zum Einsatz. Die Isolieröle wurden vor Beginn der Alterung in einer Ölaufbereitungsanlage getrocknet und entgast. Als Papier wurde ein getrocknetes Kraft-Papier mit einer Stärke von 0,1 mm, wie es auch in Transformatoren Anwendung findet, verwendet. Die Alterung der Proben erfolgte in geschlossenen Gefäßen, die jeweils 1600 g Isolieröl, 160 g Papierstreifen und einen Kupferstab, mit einem Gewicht von 66 g als Katalysator, enthielten. Die Gefäße wurden während der Alterung mit Stopfen aus Silikongummi abgedichtet. Die beschleunigte Alterung erfolgte über 15 Wochen in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 130 °C.

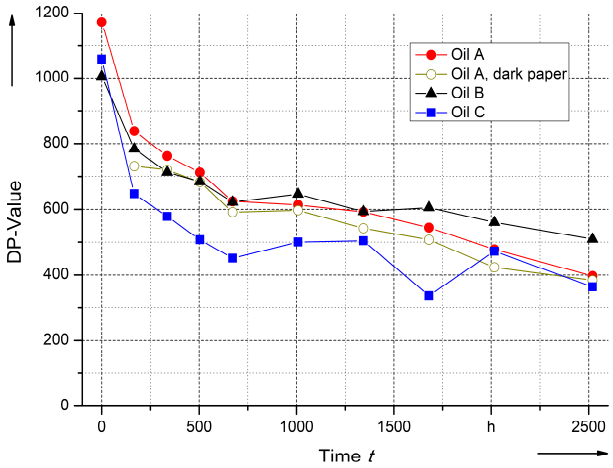


Bild 1: DP-Werte für imprägniertes Papier mit *Öl A*, *Öl B* und *Öl C* über der Alterungszeit

In Bild 1 ist der Verlauf des DP-Werts über der Zeit für die verschiedenen Isolierflüssigkeiten zu sehen. Auch hier ist zu erkennen, dass der DP-Wert am Anfang der Alterung für das Papier, welches mit den inhibierten Flüssigkeiten imprägniert wurde, etwas geringer ist, im Vergleich zur Papierprobe mit dem uninhibierten *Öl A*.

Ebenfalls zeigt sich im Vergleich zur vorherigen Untersuchung, dass der DP-Wert für *Öl C* wieder den geringsten Wert aufweist und erst nach 12 Wochen einen Wert wie das Papier mit *Öl A* erreicht. Auch bei dieser Untersuchung wurde das Isolierpapier für *Öl A* in helle und dunkle Streifen unterteilt. Die hellen Streifen bildeten den Großteil der Probenmenge, während die dunklen Streifen vorwiegend auf dem oberen Teil des Papierstapels im Gefäß gefunden wurden. Durch die größere Kontaktfläche mit dem Isolieröl bildeten sich somit dunklere Streifen. Es zeigt sich, dass die dunklen Streifen einen niedrigeren DP-Wert aufweisen, im Vergleich zu den hellen Streifen. Interessant ist auch, dass der DP-Wert für *Öl B* ab Woche 4 den größten Wert bis zum Ende der Alterung aufweist. Generell verläuft die Alterung aber deutlich langsamer im Vergleich zum offenen System.

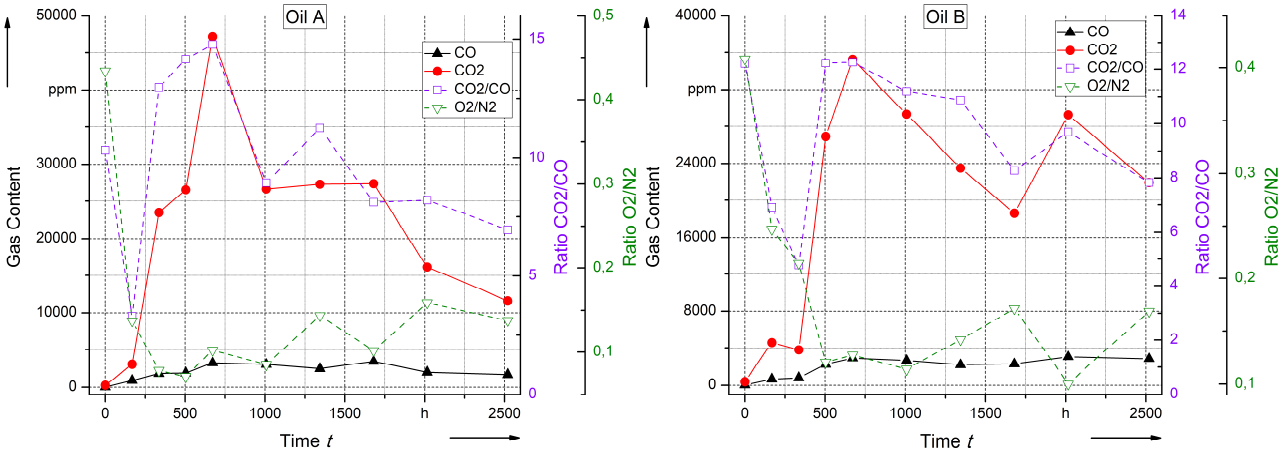


Bild 2: Verlauf von CO, CO_2 und die Verhältnisse CO_2/CO und O_2/N_2 für *Öl A* und *Öl B*

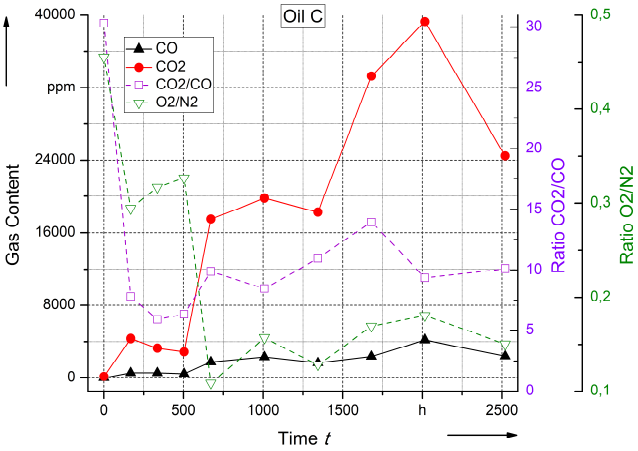


Bild 3: Verlauf von CO, CO_2 und die Verhältnisse CO_2/CO und O_2/N_2 für *Öl C*

Die Untersuchung der Alterungsgrößen, über der Zeitdauer von 15 Wochen, zeigte auch hier Unterschiede zwischen den Isolierölen auf. Die Ermittlung der Gasgehalte CO und CO_2 sowie der Gasquotienten CO_2/CO und O_2/N_2 können neben Rückschlüssen auf Fehler im Isoliersystem auch Hinweise geben, welche Alterungsmechanismen in der Papier-Öl-Isolierung überwiegen. Durch die Analyse des O_2/N_2-Verhältnisses konnte gezeigt werden, dass im Isoliersystem ein übermäßiger Verbrauch an Sauerstoff, durch Oxidationsvorgänge, stattfand. Für *Öl A* und *Öl B* liegt das Verhältnis bereits nach einer Woche deutlich unter einem Wert von 0,3 während der Wert bei *Öl C* 0,3 erreicht (Bild 2, Bild 3). Bei CO kann ein kontinuierlicher Anstieg über der Alterungszeit für alle drei Isolieröle beobachtet werden. Nur bei *Öl A* und *Öl C* kommt es

zum Ende der Alterungszeit zu einem leichten Abfallen des Wertes. Für den Verlauf von CO_2 kann beobachtet werden, dass die Verläufe bei *Öl A* und *Öl B* ähnlich sind. Beide erreichen einen maximalen Wert nach 4 Wochen. Bei *Öl C* liegt dieser maximale Wert hingegen bei 12 Wochen. Allerdings erreichen sowohl *Öl B* und *Öl C*, welche beide inhibierte Öle darstellen, einen ähnlichen maximalen Wert von 40000 ppm. Nach Erreichen dieser Maxima kommt es dann zu einer Abnahme des CO_2-Gehalts. Im Vergleich zu dem offenen System werden hier viel höhere Konzentrationswerte gemessen, wobei die Werte zum Teil mehr als das zehnfache betragen.

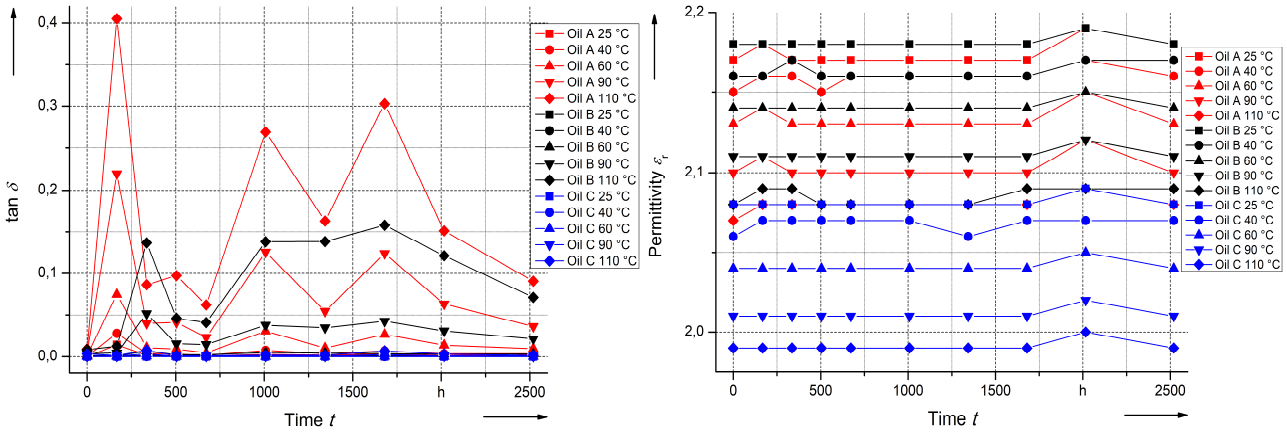


Bild 4: Verlauf des dielektrischen Verlustfaktors tan δ und der relativen Permittivität ε_r in Abhängigkeit der Alterungszeit

Um auch die Unterschiede zum offenen System zu zeigen, werden hier die Verläufe des tan δ und der relativen Permittivität ε_r gezeigt (Bild 4). Zu erkennen ist, dass der tan δ die höchsten Werte für *Öl A* erreicht, gefolgt von *Öl B* und *Öl C*. Zu sehen ist auch, dass der tan δ eine steigende Tendenz über der Alterungszeit aufweist. Interessant ist ferner, dass ε_r während der Alterung praktisch konstant bleibt, was in einem Gegensatz zum offenen System steht, da beim offenen System ein kontinuierlicher Anstieg des ε_r zu verzeichnen war.

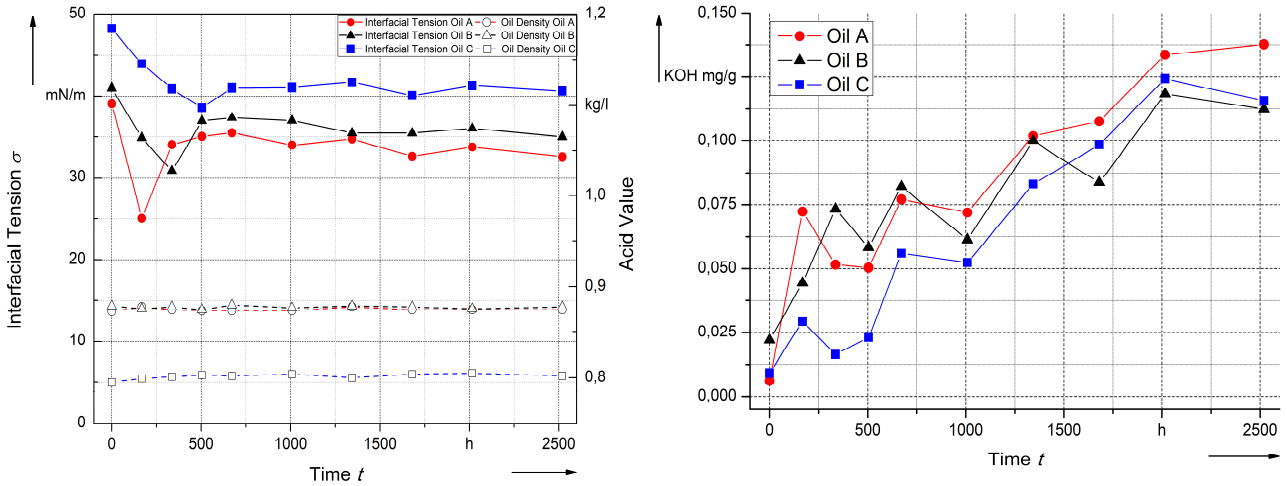


Bild 5: Verlauf der Grenzflächenspannung σ und des Säuregehalts in Abhängigkeit der Alterungszeit

In Bild 5 sind schließlich die Verläufe der Grenzflächenspannung und des Säuregehalts über der Alterungszeit zu sehen. Auffällig ist, dass die Änderung der Grenzflächenspannung für alle drei Öle exponentiell verläuft. Die Änderung ist im Vergleich zum offenen System deutlich geringer. Dabei liegen die Werte für *Öl C* über

denen von *Öl A* und *Öl B*. Bei der Säure ist ein annährend linearer Anstieg mit der Alterungszeit erkennbar. Bis zur achten Woche liegen die Säurewerte von *Öl C* unter denen von *Öl A* und *Öl B*. Auch hier hat sich gezeigt, dass die Werte geringer sind als bei dem offenen System. Nur für *Öl C* lagen die Säurewerte etwa im gleichen Bereich, wie bei dem offenen System.

Somit könnte sich die Messung der Grenzflächenspannung als auch des Säuregehalts sowie die Konzentration von CO im Isolieröl besonders eignen, um den aktuellen Alterungszustand des Isolierpapiers zu bestimmen, da sich diese Werte nahezu kontinuierlich über der Alterungszeit ändern ohne große Schwankungen aufzuweisen.

Bestimmung des Depolymerisationsgrades der Öl-Papier-Isolierung von Transformatoren mittels eines Fuzzy-Logik-Algorithmus

Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey, M.Sc. Tobias Münster

Die Lebensdauer eines Transformators wird hauptsächlich durch die Qualität der Papierisolierung bestimmt. In der Literatur hat sich der DP-Wert als ein Kriterium für die Quantifizierung der Qualität der Papierisolierung etabliert. Es wird angenommen, dass das Ende der Lebensdauer der Papierisolierung durch einen DP-Wert im Bereich von unter 200 ausgedrückt werden kann. Die Probennahme einer Papierprobe aus einem Transformator im laufenden Betrieb ist jedoch üblicher Weise nicht möglich, da hierzu der Transformator aus dem Betrieb genommen und geöffnet werden müsste. Dies wäre aber mit einem wirtschaftlich nicht vertretbaren Aufwand verbunden. Es ist aber gleichwohl üblich im Rahmen von Routinemäßigen Inspektions- und Wartungsarbeiten eine Ölprobe zu nehmen und diese labor-analytisch zu untersuchen. Dabei werden Alterungsindikatoren wie beispielsweise Furane oder die im Öl gelösten Gase überprüft. Bisher wurde der DP-Wert vor allem basierend auf Furanderivaten approximiert, was jedoch in der Vergangenheit aus unterschiedlichen Gründen auch zu erheblichen Fehlern geführt hat. Somit stellt sich die Frage, ob nicht anhand anderer erfassbaren Ölkenndaten ebenso ein Rückschluss auf die Qualität der Papierisolierung möglich ist, so dass durch eine weitere, indirekte Methode der DP-Bestimmung eine höhere Zuverlässigkeit bei der Ermittlung der Papieralterung erreicht werden kann.

Im Schering-Institut wurde daher zur Betrachtung dieser Problematik eine umfangreiche Alterungsuntersuchung von Papier-Öl-Dielektrika unter laborbedingungen durchgeführt, bei der neben den Öl- und Gaskennwerten auch die zeitliche Entwicklung des DP-Wertes erfasst wurde. Aufbauend auf den generierten Messdaten wurde ein Zustands-bestimmungsalgorithmus, basierend auf einem Fuzzy-Logik-Modell entwickelt.

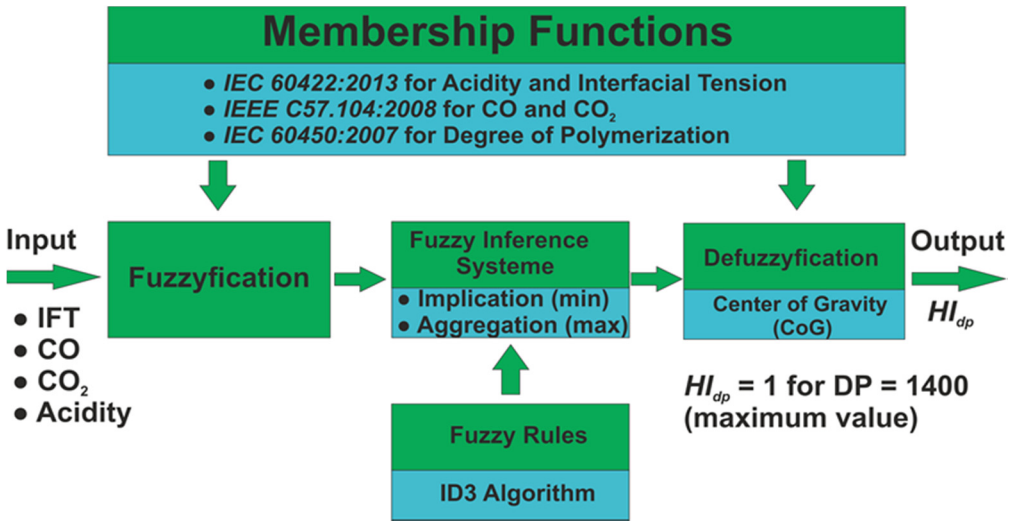


Bild 1: Struktur des Fuzzy-Algorithmus

Das Bild 1 zeigt den grundsätzlichen schematischen Aufbau des Berechnungs-algorithmus mit den Gas- und Ölkennwerten als Eingangsparameter und dem DP-Wert als Ausgangsgröße.

Anhand einer Korrelationsanalyse nach *Pearson* konnte gezeigt werden, dass bezüglich der Entwicklung des DP-Wertes die Säurezahl, sowie die Gase CO und CO_2 und die Grenzflächenspannung die höchste Korrelation besitzen.

Aufbauend auf diesen Eingangsparametern wurde unter Anwendung eines ID3-Algorithmus ein hierarischer Zustandsbaum entwickelt. Dabei wird die Zustandsvariable mit der größten Auswirkung auf den DP-Wert als erstes Betrachtungskriterium gesetzt und die nachfolgenden Zustandsgrößen mit Auswirkung auf den DP-Wert als Unterbäume angeordnet, solange bis alle Messereignisse (DP-Werte) mindestens einmal einer Klasse zugeordnet wurden. Den anhand der Messdaten generierten Entscheidungsbaum zeigt Bild 2.

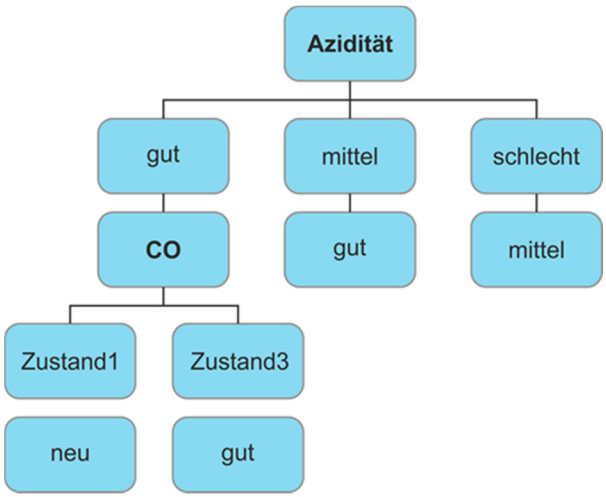


Bild 2: Zustandsbaum für eine Alterungsuntersuchung eines uninhibiertes Isolieröls

Weiterhin wurden zur mathematischen Verarbeitung der Eingangsparameter Fuzzy-Sets in Anlehnung der Grenzwerte der Norm *IEC 60422* für die Ölkennwerte, der *IEEE C57.104* für die Gaskennwerte und *IEC 60450* für die DP-Grenzwerte der Papiere definiert. Es erfolgte die Ermittlung der Zugehörigkeitsfunktion zu den jeweiligen Klassen der Eingangsparameter unter Anwendung der mit dem Entscheidungsbaum definierten Regeln, was Bild 3 repräsentativ zeigt.

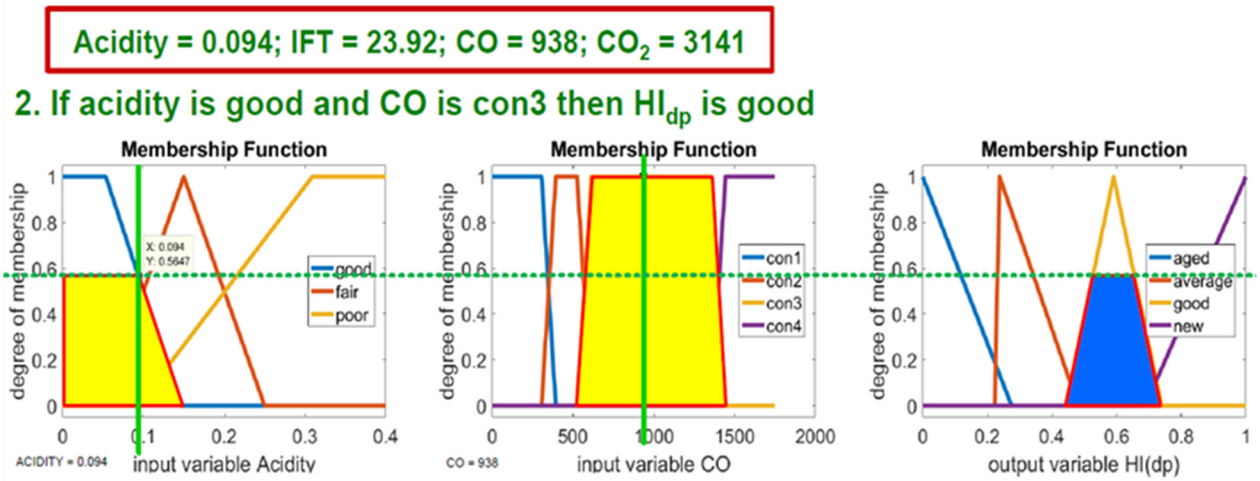


Bild 3: Regelgestützte Ermittlung der Zugehörigkeit zur Ermittlung des DP-Wertes

Bei der Auswertung des Fuzzy-Inferenz-Systems wurde zunächst für jede Regel die min-Implikation zur Ermittlung der Zugehörigkeit der Eingangsmesswerte zum DP-Wert genutzt.

Im Anschluss wurde aus den ermittelten Zugehörigkeitsgraden mittels Anwendung der max-Aggregation eine Gesamtzugehörigkeit gebildet und diese Menge über die Anwendung der Schwerpunktmethode in einen physikalischen DP-Wert zurückgerechnet.

Dieses Auswerteschema wurde anhand realer Transformatorendaten auf die Anwendbarkeit hin überprüft. Die herangezogenen Transformatordaten stammen von einem großen Energieversorger. Die DP-Werte dieser Vergleichsflotte wurden anhand einer Furanmessung und der Nutzung der Formel nach *Chendong* ermittelt. Die Tabelle1 zeigt einen Ausschnitt zum Vergleich der mit dem Fuzzy-Algorithmus (FIS) ermittelten und den nach *Chendong* ermittelten DP-Werten.

Tabelle 1: Anwendung des FIS auf eine reale Transformatorenflotte

Nr.	Berechnung			FIS		
	DP	HI_{dp}	Zustand	DP	HI_{dp}	Zustand
1	860.571	0.6147	gut	700.00	0.5000	gut
2	777.992	0.5557	gut	633.780	0.4527	mittel
3	518.797	0.3706	mittel	1259.440	0.8996	neu
4	1112.406	0.7946	neu	1259.440	0.8996	neu
7	392,296	0,2802	mittel	439,460	0,3139	mittel
8	192,865	0,1378	gealtert	142,380	0,1017	gealtert
.....						
66	693.664	0.4955	gut	439.460	0.3139	mittel
67	1255.787	0.8970	neu	886.200	0.6330	gut
68	274.960	0.1964	gealtert	735.420	0.5253	gut
69	269.324	0.1924	gealtert	751.800	0.5370	gut

Es ist zu sehen, dass der FIS-Algorithmus eine korrekte Klassifizierung über alle Alterungsstadien (neu, gut, durchschnitt und gealtert) ermöglicht.

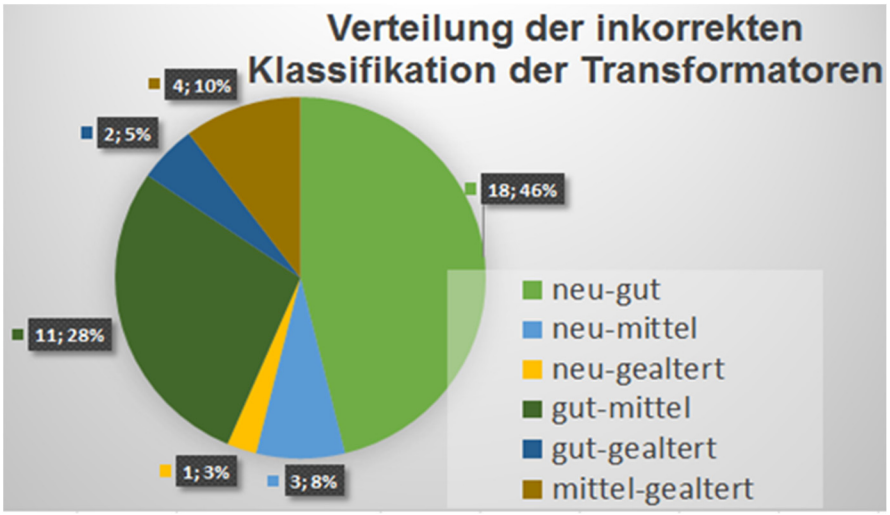


Bild 4: Verteilung der Fehlklassifikationen

Die nicht korrekt klassifizierten Assets sind hauptsächlich im Grenzbereich zwischen zwei Klassen und daher der Klasse neben der korrekten Klasse zugeordnet, was aber durch die scharfe Klassenabgrenzung begründet werden kann, wie das Bild 4 zeigt.

Die Optimierung der Klassifikation mittels des Algorithmus ist Gegenstand der aktuellen Forschungen im Schering-Institut.

Entwicklung einer Prüfanordnung zur Erfassung der Zugfestigkeit von Papierproben

Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey, M.Sc. Tobias Münster

Eine der Herausforderungen für die zukünftige Energieversorgung ist die Sicherstellung der Zuverlässigkeit der im Energieversorgungsnetz installierten Komponenten (Assets), wobei die Zuverlässigkeit bei Hochspannungssystemen insbesondere vom Zustand der Isolierung abhängt. Bei Transformatoren wird die Öl-Papier-Isolierung im Betrieb durch thermische, elektrische, mechanische und chemische Beanspruchungen permanent belastet. Dadurch ist die Papierisolierung einem stetigen Alterungsprozess ausgesetzt, der zu einer Schädigung des Zellulosegefüges führt, wodurch die Papierisolierung spröde und somit die mechanische Stabilität verringert wird.

In der Praxis hat sich der so genannte Depolymerisationsgrad (DP-Wert) als ein Kriterium für die Quantifizierung der Qualität der Papierisolierung etabliert. Während sich neues Papier durch einen DP-Wert von ca. 1000 bis 1200 auszeichnet, wird angenommen, dass das Ende der Lebensdauer der Papierisolierung bei einem DP-Wert im Bereich von ca. 200 erreicht ist. Da in Bezug auf den Isolierungszustand aber insbesondere auch deren mechanische Festigkeit von Bedeutung ist, stellt sich die Frage, ob ein chemischer Parameter, wie der DP-Wert, die geeignetste Größe zur Lebensdauerabschätzung eines Transformators ist.

Zur näheren Betrachtung dieser Problematik wurde die mechanische Festigkeit von gealterten Papierproben unter Verwendung einer selbst konstruierten Messanordnung untersucht. Die Prüfanordnung wurde als eine Zuganordnung in vertikaler Ausrichtung konstruiert. Dabei sollte das Papier so lange in vertikaler Richtung gedehnt werden, bis das Zerreißen der Probe eintritt. Das Aufbringen der notwendigen Zerreißkraft erfolgte dabei durch einen Linearmotor vom Typ *DSZY1*. Der Motor hat die Aufgabe die zwei parallel gegenüberliegenden Klemmen auseinanderzuziehen und somit das eingespannte Papierstück zu zerreißen. Als notwendige Kraft wurde ein Bereich von etwa 200 N angenommen, was durch die Spezifikation des Motors mit maximal 800 N ausreichend abgedeckt wird. Die Steuerung der Geschwindigkeit des Motors erfolgte über die feste Vorgabe der Spannung für den Motor. Eine Spannung von ca. 2 V entsprach dabei einer Geschwindigkeit von 20 mm/min, was in der Norm *ISO 1924-1/2* als Vortriebsgeschwindigkeit vorgegeben ist. Die Bewegungsrichtung des Motors kann über die Polarität der Spannungsquelle vorgegeben werden.

Der Kraftaufnehmer wurde mittels eines S-Sensors vom Typ *KD40s* mit einem Messbereich bis 500 N realisiert. Das Wirkprinzip des Sensors beruht auf der Umwandlung der Kraftbelastung des Sensors in ein Spannungssignal. Der Sensor wurde auf eine Genauigkeit von 0,1 % im angestrebten Messbereich bis 500 N kalibriert. Er wurde in einer Tragekonstruktion aus Aluminium eingebaut und bildete den gegenüberliegenden Kraftangriffspunkt zum Motor. Die Weiterverarbeitung des Ausgangssignals des S-Sensors in ein digitales 16-Bit-Signal erfolgte über einen Messwertverstärker, der auch die USB-Schnittstelle für einen Laptop bereitstellte.

An der Motorseite und der Sensorseite wurden weiterhin Backenklemmen zur Einspannung der Papierprobe vorgesehen. Die Klemmen sind aus Edelstahl gefertigt und haben eine Breite von 25 mm, was genau der Breite der zu prüfenden Papierproben entspricht. Den vollständigen Aufbau der Zugkonstruktion zeigt das nachfolgende Bild 1.

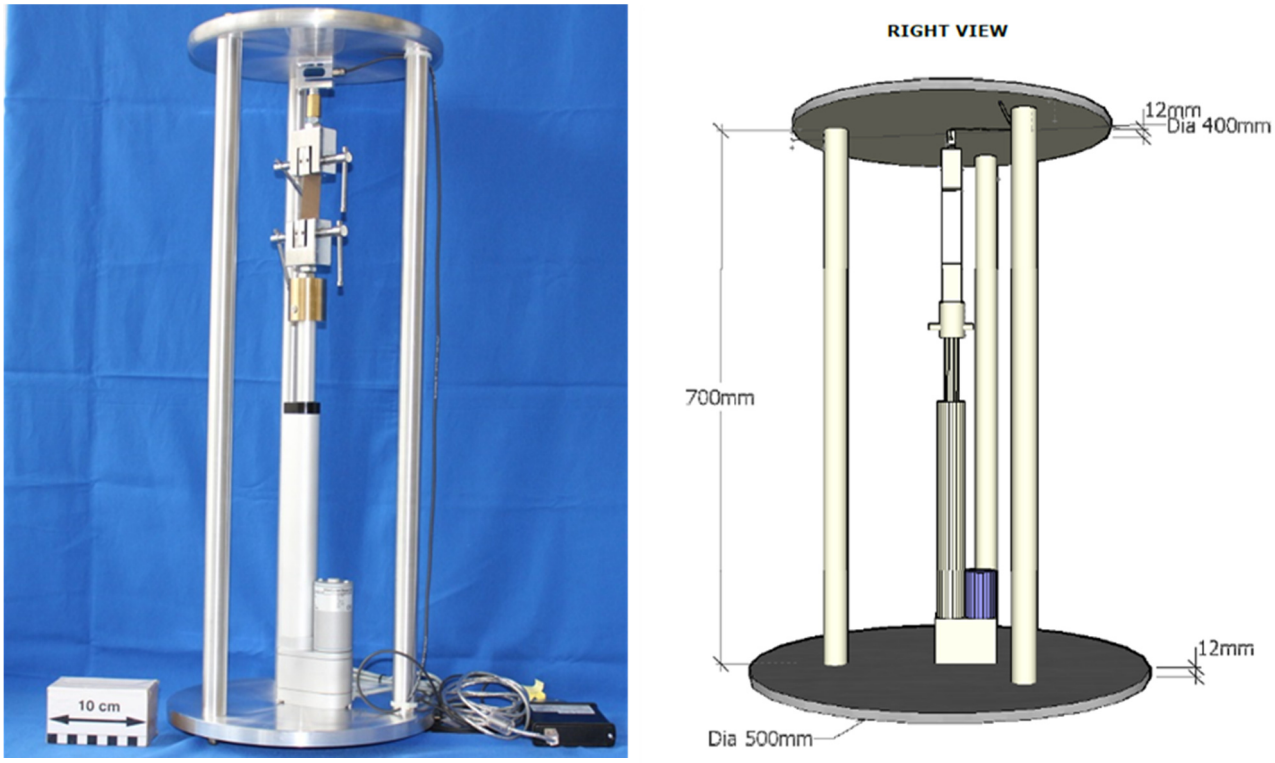


Bild 1: Darstellung der selbstkonstruierten Zugmaschine

Mit dieser Messanordnung sollten nun Probenstücke von Papier, welches in einem separaten Versuch beschleunigt gealtert wurde, hinsichtlich der Zugspannungsfestigkeit vermessen werden. Die Papierproben bestanden aus Kraft-Papier vom Typ *Grade K 5A2* und wiesen eine Breite von 25 mm, bei einer Stärke von 0,1 mm, auf. Die Alterung der Probenstücke erfolgte bei einer Temperatur von 130 °C für eine Zeitdauer von 15 Wochen. Die gealterten Papierproben wurden dann im sogenannten *Wide-Span*-Versuch mit der Zuganordnung vermessen. Bei diesem Prüfverfahren werden die Probenstücke in einem Abstand von etwa 10 cm in die Anordnung eingespannt und es wird an den Enden bis zum Zerreißen, Kraft in das Papier eingeleitet. Dabei ist in besonderem Maße darauf zu achten, dass das Papier ohne seitlichen Versatz eingespannt wird, damit die Kraft über die gesamte Breite des Papiers konstant wirkt. Der Versuch ist gültig, wenn der Riss innerhalb des freien Bereichs im Papier auftritt und die Probe nicht aus der Einspannung herausreißt. Als Zeitraum für das Reißen der Papierprobe schreibt die *ISO 1924-1/2* einen Zeitbereich von 30 Sekunden vor, welcher mit der von der Prüfanordnung vorgegebenen Geschwindigkeit eingehalten werden konnte.

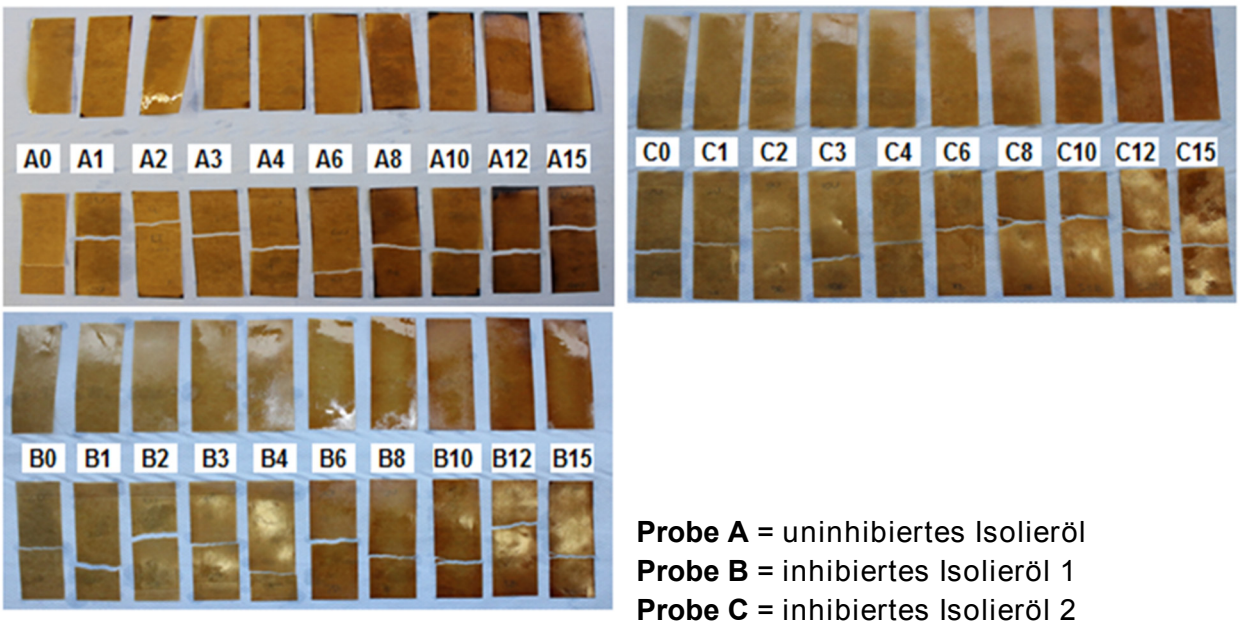


Bild 2: Gegenüberstellung von Papierproben verschiedener Alterungsstufen vor und nach dem Zugversuch

Für die Untersuchung wurden jeweils 10 Proben pro Messpunkt benötigt, wobei zur Ermittlung der mittleren Zugspannung als Messgröße die Kraft herangezogen und diese durch die Breite des Papiers dividiert wurde.

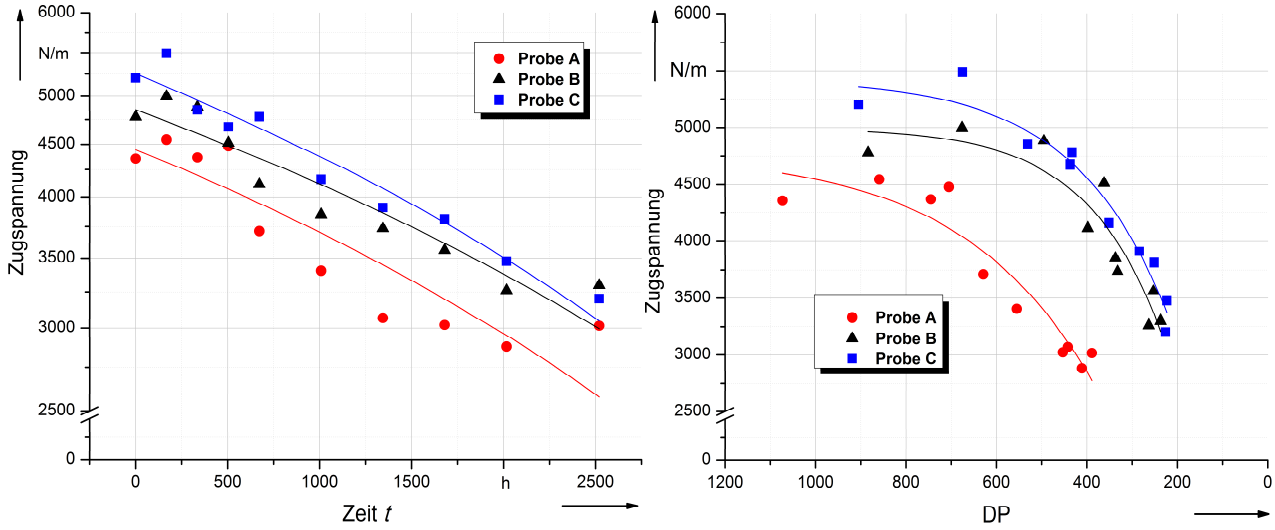


Bild 3: Verlauf der Zugspannung über der Zeit und dem DP-Wert für drei verschiedene Isolieröle

Wie aus der Darstellung zu entnehmen ist, verringert sich die Zugspannung generell mit zunehmender Alterungszeit, wobei es deutliche Unterschiede gibt zwischen den Papieren, die mit inhibierten Isolierölen imprägniert wurden und Papieren, die mit uninhibierten Mineralölen imprägniert und gealtert wurden. Wird die Zugfestigkeit in Abhängigkeit des DP-Wertes dargestellt, so gilt generell dass eine sinkende Zugfestigkeit mit sinkendem DP-Wert einhergeht, jedoch sind auch hier signifikante Unterschiede in Bezug auf das verwendete Isolieröl zu erkennen, was in weiteren Versuchen detaillierter untersucht werden soll.

Online-Überwachungssystem für Hermetiktransformatoren

M.Sc. Mohammad Akbari Azirani, M.Sc. Moritz Kuhnke

Fehler im Isolationssystem von Transformatoren erzeugen spezifische Gase. Bei größeren Fehlern in Leistungstransformatoren ist die Erzeugung einer beträchtlichen Menge ungelöster Gase zu erwarten, die aus der Isolierflüssigkeit austreten und bei Hermetiktransformatoren mit Gaspolster in dieses Gaspolster diffundieren.

Als kostengünstige und kompakte Alternative zur Gaschromatographie wurde im Rahmen eines Projektes zusammen mit der Firma Energy-Support GmbH ein Online-Überwachungssystem für ungelöste Fehlergase entwickelt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Gassensoren hinsichtlich Eignung und Genauigkeit in rauen Umgebungen, wie diese in einem Transformator vorkommen, untersucht. Das entwickelte Überwachungssystem für hermetisch verschlossene Transformatoren basiert auf einem Satz integrierter Sensoren, welche die Konzentration von Fehlergasen kontinuierlich verfolgen, wodurch Auffälligkeiten im Isolationssystem frühzeitig erkannt werden können. Darüber hinaus werden Hilfsgrößen wie Druck, Temperatur und relative Feuchte durchgehend aufgenommen und gespeichert.

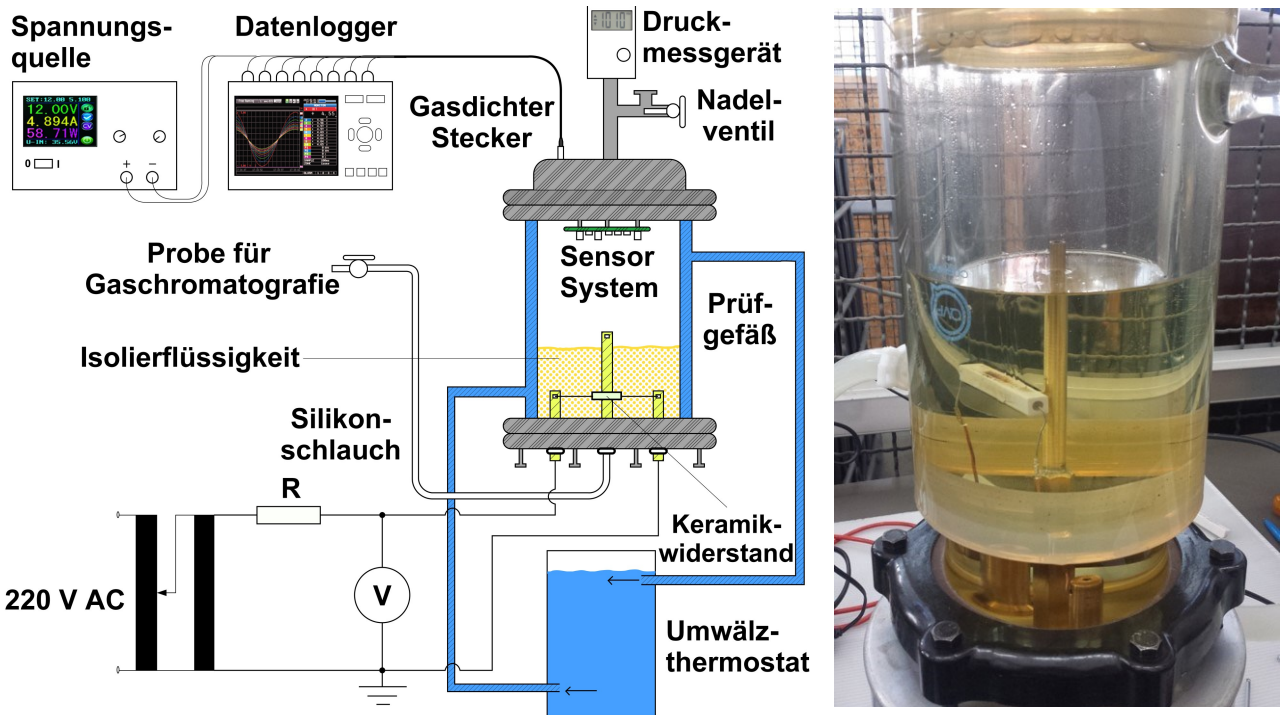


Bild 1: Übersicht des Messaufbaus (links) und des Prüfgefäßes (rechts)

Dieses Online-Überwachungssystem besteht, neben den Sensoren für physikalische Größen wie Druck, Temperatur und relative Feuchte, aus speziellen Gassensoren für die Erfassung von Fehlergasen und für die Bestimmung des Sauerstoffgehalts. Um das Sensorsystem unter betriebsnahen Umgebungsbedingungen zu testen, wurden der Messaufbau und das Prüfgefäß in Bild 1 verwendet. Das Prüfgefäß besteht aus einem doppelwandigen Glaszylinder, dessen Enden über zwei Flansche gasdicht an die Aluminiumbodenplatte und dem Aluminiumdeckel befestigt sind. Auf der Bodenplatte sind drei Stiftelektroden befestigt. Die mittlere Elektrode verfügt über eine Schlaucholive, die unten aus dem Prüfgefäß hinausragt. An diese Schlaucholive ist eine Verbindung mit einem Silikonschlauch und einem Zweiwegeventil montiert, über welches die Einleitung des Stickstoffpolsters sowie die Probenentnahme für die gaschromatographischen Konzentrationsbestimmungen der einzelnen Fehlergase erfolgt. Die zwei verbleibenden

Elektrodenhalter werden für die Erzeugung eines nachgebildeten thermischen Fehlers eingesetzt. Hierfür wird das Gefäß bis zur oberen Öffnung der mittleren Elektrode mit Isolierflüssigkeit befüllt. Ein Keramikwiderstand wird zwischen den beiden übrigen Elektrodenhaltern befestigt und es wird eine Wechselspannung konstanter Amplitude angelegt. Der stromdurchflossene Keramikwiderstand wird durch thermische Verluste temperiert. Somit werden durch die punktuelle Erhitzung des Öles aus diesem Fehlergase freigesetzt. Diese gelösten Gase diffundieren mit der Zeit aus dem Öl in das Gaspolster und werden von der am Deckel befestigten Sensorik erfasst. Um die Erhitzung des Öles auf einer lokalen Stelle zu begrenzen bzw. um zu verhindern, dass das restliche Öl miterhitzt wird, wird der Testaufbau indirekt durch einem Umwälzthermostat gekühlt. Um die Genauigkeit der Fehlergassensorwerte zu bestimmen, erfolgt ein Vergleich mit den Werten, die mittels Gaschromatographie ermittelt werden, in welchem Gasproben aus dem Prüfgefäß stündlich analysiert wurden. Es wurden zwei spezielle Fehlergassensoren eingesetzt, wobei ein Sensor mit einer Standardmethode und der andere mit einer selbstentwickelten optimierten Methode gesteuert wird. Als erstes wurde das Prüfgefäß mit Stickstoff gespült. Eine erste Gasprobe wurde aus dem Gefäß für die Gaschromatographie entnommen. Das Ergebnis zeigte, dass das Gasgemisch im Gefäß zu 98,7 % aus Stickstoff und 1,3 % aus Restsauerstoff bestand. Somit war die typische sauerstoffarme Umgebung, wie es in Stickstoffgaspolstern von Hermetiktransformatoren der Fall ist, erschaffen. Es wurde eine stündliche Gasanalyse mit dem Gaschromatographen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messung ist im Bild 2 (links) dargestellt. Die Bildungsrate der einzelnen Fehlergase ist nahezu konstant. Die Messung läuft über eine Zeitdauer von neun Stunden. Die Ausgangsspannung der Fehlergassensoren wird im Bild 2 (rechts) dargestellt. Es ist ein kontinuierlicher Spannungsanstieg sowie eine Korrelation zwischen den beiden Messkurven zu sehen. Die Sensoren können die Änderungsrate der Fehlergase anzeigen.

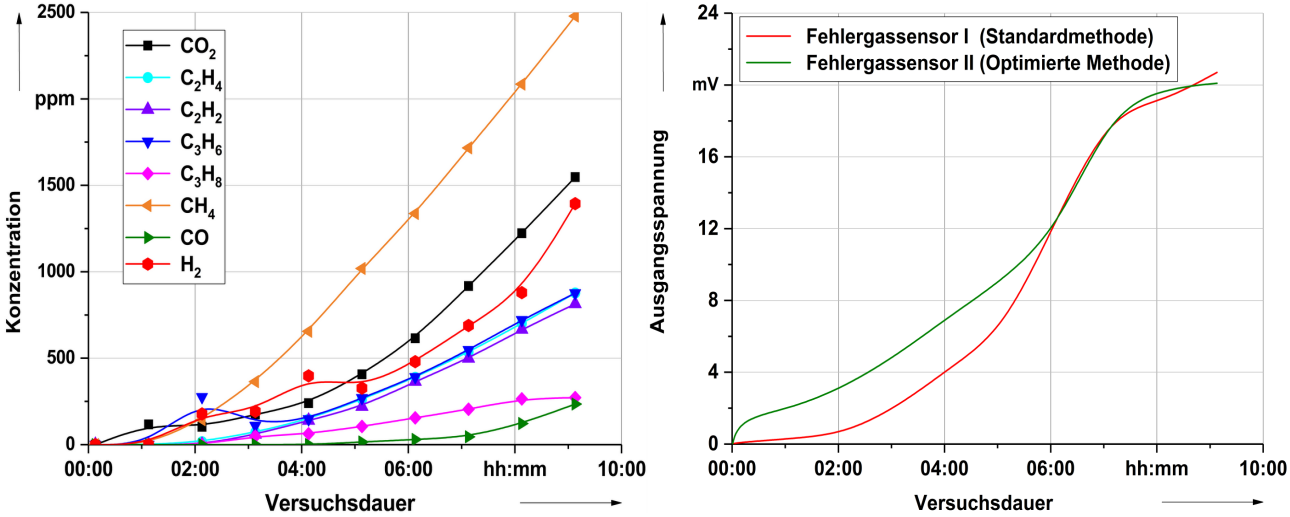


Bild 2: Konzentration der Fehlergase mittels Gaschromatographie (links) und Ausgangsspannung der Sensoren (rechts)

Es wurde ein Funktionslabormuster erstellt. Dafür wurde das Sensorsystem mit einer entsprechenden Auswerteeinheit samt Verstärkungsschaltungen für die Ausgangssignale der Sensoren ausgestattet. Das gesamte System wird in einem Gehäuse eingebaut, welches aus Aluminiumdruckguss hergestellt ist und die Schutzart IP66 erfüllt. Der Deckel des Gehäuses wird über eine gasresistente Dichtung mit dem Rest des Gehäuses verschraubt. Zusätzlich wurde am Gehäuse ein Kleinflanschadapter (KF)

Bild 3: Hermetiktransformator mit installiertem Funktionslabormuster

angebracht, der eine leichte Installation an Transformatoren ermöglicht. Um das Sensorsystem unter realen Umgebungsbedingungen zu testen, wurde dieses an einem im Windparkbereich typischen Hermetiktransformator im Labor installiert, was in Bild 3 dargestellt ist. Der Transformator wurde über seine Niederspannungsklemmen selbsterregt und über einen Handstelltransformator geregelt. Das dazugehörige elektrische Ersatzschaltbild ist im Bild 4 skizziert. Dabei

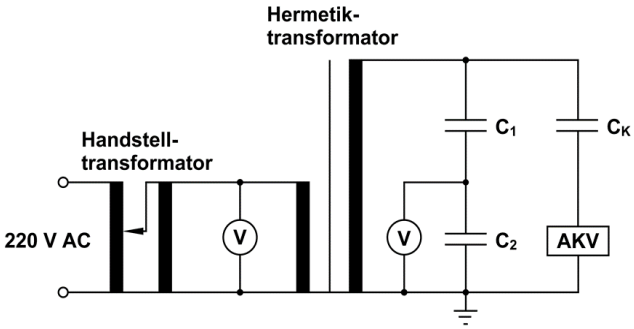


Bild 4: TE-Messung an Hermetiktransformator

befindet sich der Hermetiktransformator parallel zu einer typischen TE-Messschaltung. Ferner wird die Spannung auf der Oberspannungsseite mit einem kapazitiven Spannungsteiler erfasst. Dadurch, dass der Füllprozess mit Isolierflüssigkeit nicht unter Vakuum erfolgte, erzeugen Luftblasen entsprechende Teilentladungen, deren Intensität mittels Spannungsregelung variabel ist. Für die Überprüfung des Gesamtsystems wurde das Funktionslabormuster einem Langzeitversuch unterzogen. Dabei wurde der Hermetiktransformator über eine Zeitdauer von ca. 23 Tagen unter Hochspannung betrieben. Die Entstehung von Fehlergasen, ist mit dem installierten Funktionslabormuster erfasst worden. Es wurde eine regelmäßige Gasanalyse mit dem Gaschromatographen durchgeführt. Die Bildungsrate der Fehlergase war über die Gesamtzeit des Versuchs nahezu konstant. Die Ergebnisse sind im Bild 5 dargestellt. Bei

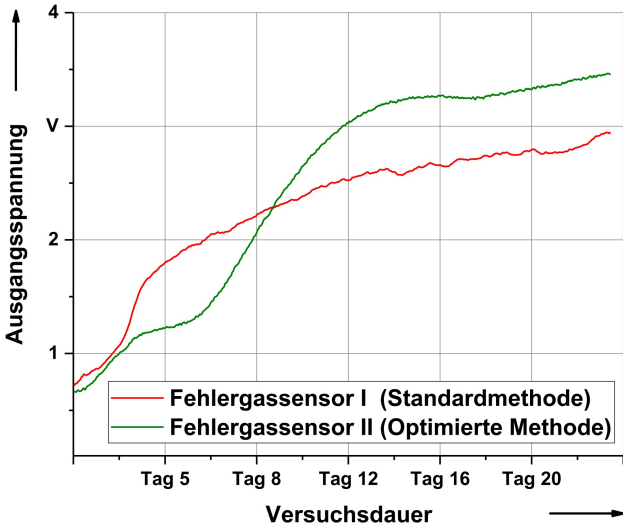


Bild 5: Ausgangsspannung der Fehlergassensoren

den Fehlergassensoren ist ein kontinuierlicher Spannungsanstieg sowie eine Korrelation zwischen den beiden Messkurven zu sehen. Des Weiteren zeigen beide Sensoren eine hohe Empfindlichkeit zu Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen. Beide können die Änderungsrate der Fehlergase anzeigen.

Für das entworfene und neu entwickelte Online-Überwachungssystem gibt es bereits erste Anfragen. Erste Testinstallationen sollen folgen, damit die bisher ausgearbeiteten Auswerteverfahren konkretisiert und verfeinert werden können.

Thermal Management of Distribution Transformers

M.Sc. Leyla Raeisian

The purpose of this work is the study of the transformer from thermal point of view in order to help the transformer to work in more safe and secure conditions and meet their operational standards. In this regard, this project was carried out in 3 sections.

In the first section, the main object was to simulate one distribution transformer three dimensionally to examine the value and location of the hotspot temperature by numerical simulations. For this purpose, firstly the 3D geometry of a whole transformer including active part, oil channels, tank and hollow fins with their exact dimensions according to the dimension of a 200 kVA distribution transformer according to the figure 1 was generated.

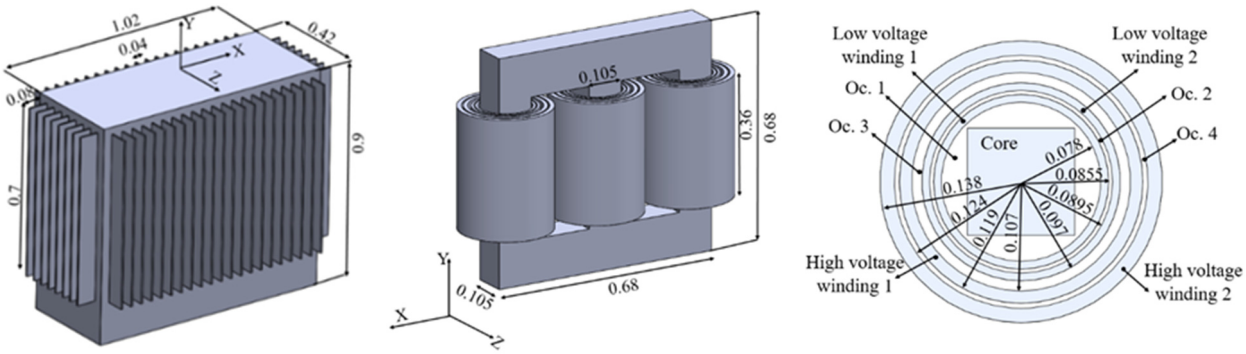


Figure 1: Specification of simulated geometry of (a) tank and hollow fins, (b) active part (c) oil channels

In studied transformer, oil as cooling media circulates among active part and tank in order to absorb heat from core and windings and rejects it to surrounding air via tank and fin surfaces. Therefore, in this study oil flow was modelled and simulated as the main domain. Moreover, the mesh generation of computational domain was carried out in ANSYS ICEM and according to the geometry a combination of tetragonal and hexagonal meshes was employed to achieve an appropriate mesh with a reasonable degree of accuracy. The governing equations system was solved by employing the commercial software of ANSYS FLUENT using the control volume method and convective heat transfer of oil inside the mentioned transformer was simulated. Then, the numerical model was validated with the experimental data. It was found that the oil channels of active part are the most critical region from thermal point of view as it can be seen in figure 2. Furthermore, the hotspot temperature could be calculated and located in the top section of oil channel of the low voltage winding.

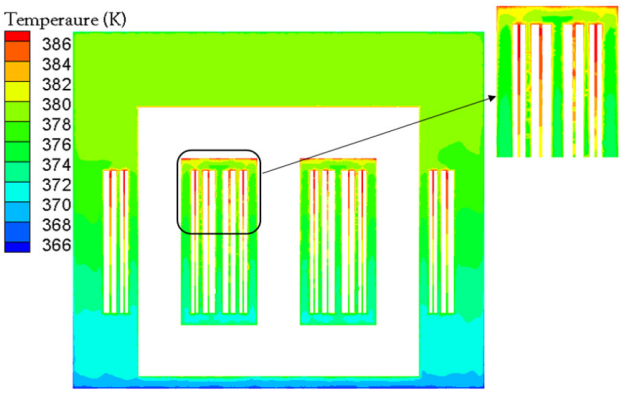


Figure 2: Temperture contours and HST of transformer of Z = 0 plan

In second section, the effect of different geometrical parameters was numerically investigated and an optimized geometry was generated by employing the response surface method (RSM) and using the recognized effective parameters. In this regard, the geometrical parameters include of active part vertical position, oil channel width, fin width, fin height, fin length, fin vertical position and fin spacing was selected and a parametric study was performed to determine the most effective parameters among these seven parameters. Therefore, considering the base case of geometrical specifications, several values for each parameter were assigned, and for each set of the geometrical specifications with the help of numerical simulation the hotspot temperature was determined. According to the obtained results, the three parameters of fin height, length and spacing was chosen as the more influential parameters on the hotspot temperature and the following ranges of the parameters were selected based on the geometry of the actual transformer for them:

- Fin height: (0.5 m ≤ H ≤ 0.9 m)
- Fin length: (0.06 m≤ L ≤ 0.1 m)
- Fin spacing: (0.032 m ≤ S ≤ 0.048 m)

Five levels were considered for these three parameters in mentioned ranges and 20 run cases were generated by RSM according to table 1.

Table 1: Values of independent variables generated by RSM along with their responses

Run	H(m)	L(m)	S(mm)	Response: HST (K)
1	0.6	0.09	36	381.49
2	0.8	0.07	44	387.33
3	0.7	0.08	40	386.40
4	0.7	0.08	32	378.61
5	0.8	0.09	36	370.67
6	0.6	0.09	44	390.61
7	0.6	0.07	36	392.47
8	0.7	0.08	40	386.40
9	0.8	0.09	44	377.37
10	0.8	0.07	36	379.60
11	0.9	0.08	40	372.81
12	0.7	0.08	40	386.40
13	0.6	0.07	44	402.85
14	0.5	0.08	40	401.25
15	0.7	0.08	40	386.40
16	0.7	0.08	40	386.40
17	0.7	0.08	40	386.40
18	0.7	0.08	48	389.57
19	0.7	0.06	40	397.96
20	0.7	0.1	40	376.55

According to table 1, run number 5 with the H = 0.8 m, L = 0.09 m and S = 0.036 m, presented the minimum hotspot temperature, which is 16 degree lower then conventional design. So, this combination was selected as the optimum design of desired transformer. This reduction is very significant, since it has been reported that the rate of the Loss-of-Life of transformers exponentially increase with the temperature raise.

In last section, wasted cooking oil (WCO) as a vegatable oil was experimented and compared with conventional mineral oil (MO) in order to determine its suitability as a substitude of mineral oil. In this regard, the quality of wasted cooking oil was examined through the measuring of important properties include of density, heat capacity, viscosity, thermal conductivity, breakdown voltage, flashpoint and comparing with those of mineral oil. The Experimental tests showed that break down voltage of WCO is 48 % greater than MO, which provide a higher level of reliable operational conditions. Furthermore, WCO showed a higher thermal conductivity compared to the MO with an average difference of about 33 % in studied temperature range. The viscosity of WCO was considerable lower than MO in temperature range of 20 °C to 80 °C, as it was about 29 % lower in 80 °C. The value of viscosity and thermal conductivity of WCO make the cooling efficiency of WCO superior than MO as cooling media in transformers. Considering the safety issues particularly in confined area, WCO due to its higher flash point is a more trusty choice. In following, the thermal behaviour of considered transformer in section 1 when immersed by wasted cooking oil and mineral oil was simulated by ANSYS FLUENT and temperature and velocity patterns, was studied and compared. According to the simulation result, the hotspot temperature of WCO was 110 °C, while the hotspot temperature of MO was 113 °C.

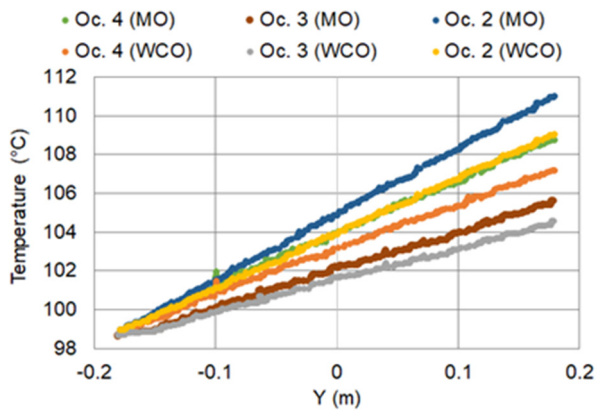


Figure 3: Temperature of a vertical line in oil channels of windings

Thus, since transformer filled WCO experiences a lower hotspot temperature in compare to MO, it works in a more reliable and safe condition. Moreover, the oil channels of LV-windings in both case experience the highest temperature in transformer and is recognized as the most critical region from thermal point of view. According to figure 3, in all oil channels of windings, WCO have a lower temperature compare to MO and consequently the damage of insulation in transformer immerse by WCO is less than MO.

In the figure 4a, b the velocity contours of MO and WCO is demonstrated on Z = 0 plane, respectively. The velocity of both oils inside the transformer due to natural circulation is rather low, 10^{-3} to10^{-2} m/s order of magnitude. Besides, the lower viscosity of WCO eases and improves its flow inside the transformer and makes its velocity 10% higher than MO.

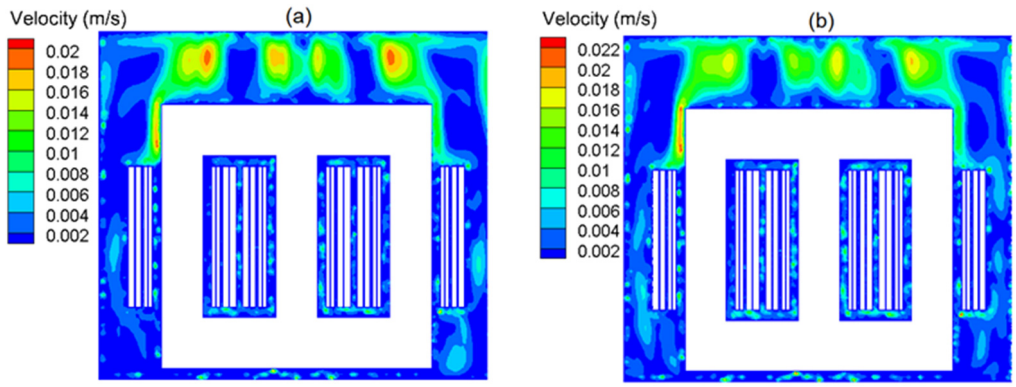


Figure 4: Velocity contours of Z = 0 plan a) mineral oil b) wasted cooking oil

Thermal Management of Transformer with Nanofluid

M.Sc. Leyla Raeisian

Since the last decade, nanofluids, which consist of a carrier liquid dispersed with tiny nano-scale particles known as nanoparticles, have been utilized as a new method in increase of the heat transfer of cooling media by modifying the thermophysical properties. It is broadly reported that nanofluids possess a higher thermal conductivity in comparison with the base fluid, therefore it is becoming as a common way of increasing heat transfer performance of cooling systems. It also is possible to use this new technology in transformers industry in order to increases the heat transfer rate and decreases the maximum and overall temperature of the transformer.

In this regard, the aim of this study is to evaluate the performance of oil base nanofluid as cooling media in a transformer. Accordingly, this project will be decomposed in two experimental and numerical sections. In the first part, a down-scaled transformer as shown in figure 1 will be built with three cylindrical heaters inside, which will be used as the active part inside the transformer to generate the heat. It also should be mentioned that several thermocouples will be mounted on the wall of heaters and tank in order to measure the temperature of the different parts in the transformer and make it possible to compare the temperature of nanofluids with mineral oil. In the next step, various type of nanofluids like hBN-oil (hexagonal boron nitride), Fe_3O_4-oil and Al_2O_3-oil will be prepared in three proper mass concentration with appropriate methods to produce the homogeneous and stable mixture.

In the next stage, the essential electrical and thermophysical properties including breakdown voltage, dissipation factor, thermal conductivity and viscosity of the nanofluids will be measured and analyzed. Finally, the experimental transformer will be filled up with nanofluids and oil and their temperature will be compared in order to evaluate the performance of nanofluids.

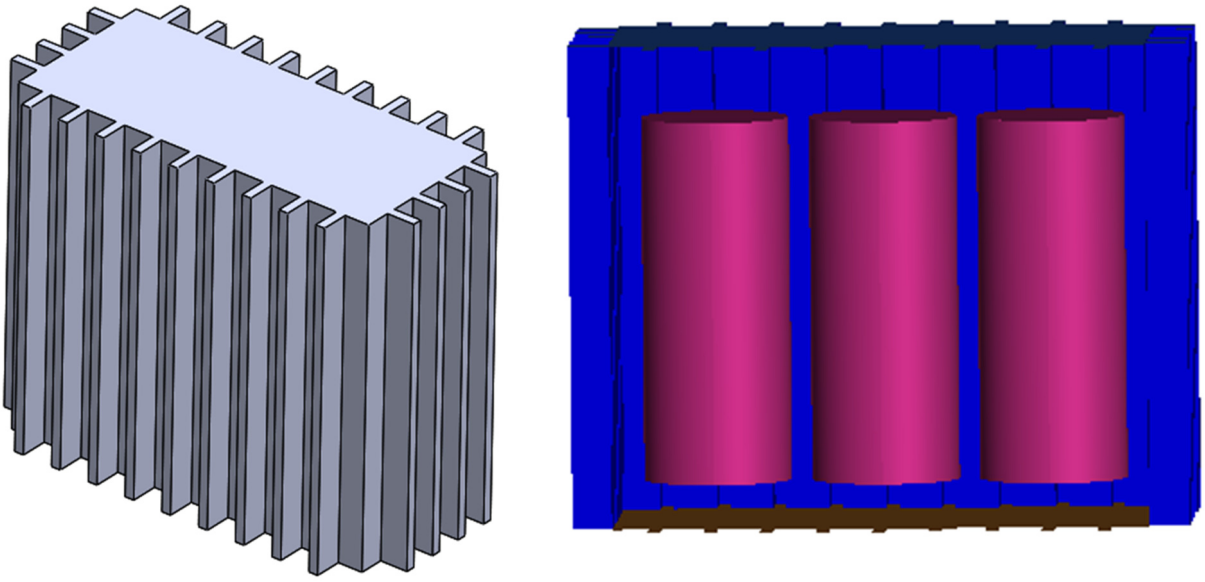


Figure 1: Schematic of down-scaled transformer

In the second section, the aim is to evaluate the cooling performance of the nanofluids and mineral oil in the down-scaled transformer as well as a real transformer employing CFD simulations. In the simulation of nanofluids, two approaches will be persuade. In the first one, the nanofluid will be simulated as a single phase flow using the temperature dependent thermophysical properties measured in the experimental section, where in the second approach the nanofluid will be simulated as a two phase flow and a comparison between these two approaches would lead to interesting results. Then, the thermal behavior and the temperature distribution of the nanofluids and mineral oil will be compared via temperature contours and lines inside the transformer.

Optimierte Bestimmung der Ankunftszeiten von UHF Signalen

M.Sc. Mohammad Akbari Azirani, M.Sc. Mohamadreza Ariannik

Die Messung von Teilentladung (TE) gehört zu den wichtigsten Diagnosemethoden, um den Isolationszustand einer Hochspannungskomponente zu bestimmen. Vor-Ort-Messungen sind jedoch oft mit limitierenden elektrischen Störsignalen behaftet. Daher wurden in den letzten Jahren an alternativen Techniken geforscht. Andere Aspekte der TE, die für die Charakterisierung herangezogen werden können, wie chemische Reaktionen, Licht, Wärme, akustische Signale und die Emission von EM-Wellen aufgrund von hochfrequenten Stromimpulsen sind verschiedene Nebenerscheinungen der TE. Die Lokalisierungsmethode, die sich auf die Ausbreitung von elektromagnetischen (EM) Wellen im ultrahochfrequenten (UHF) Bereich durch TE fokussiert, ist Gegenstand dieses Beitrags. Hierbei wird der Einfluss von fehlerhaft bestimmten Ankunftszeiten auf den Lokalisierungsfehler mit einem zweidimensionalen Analogiemodell untersucht. Darüber hinaus wird eine neuartige Methode vorgeschlagen, welche auf die Detektion von abrupten Änderungen einer bestimmten statistischen Eigenschaft des Signals für die Bestimmung der Ankunftszeiten beruht.

Eine schematische Darstellung des für die Untersuchung verwendeten TE-Messsystems und des Transformatortankmodells sind im Bild 1 visualisiert. Zur Erzeugung von TE-Impulsen wird ein speziell konstruiertes Korona-Fehlermodell verwendet. Die parallel zu den UHF gemessene TE-Intensität nach Norm wurde im Bereich von 200 pC gehalten. Das für die Experimente verwendete luftgefüllte Transformatortankmodell ist ein spezielles Design und hat keinen Aktivteil. Es verfügt über sechs DN 80 Ölablassventile, die zum Einschieben der UHF Sensoren in den Kessel eingesetzt werden können. Der Tank, die Position der Sensoren und die hypothetischen Achsen eines kartesischen Koordinatensystems sind ebenfalls in Bild 1 dargestellt. Das Korona Fehlermodell zur Erzeugung von TE wurde in der Mitte des Transformatorkessels positioniert.

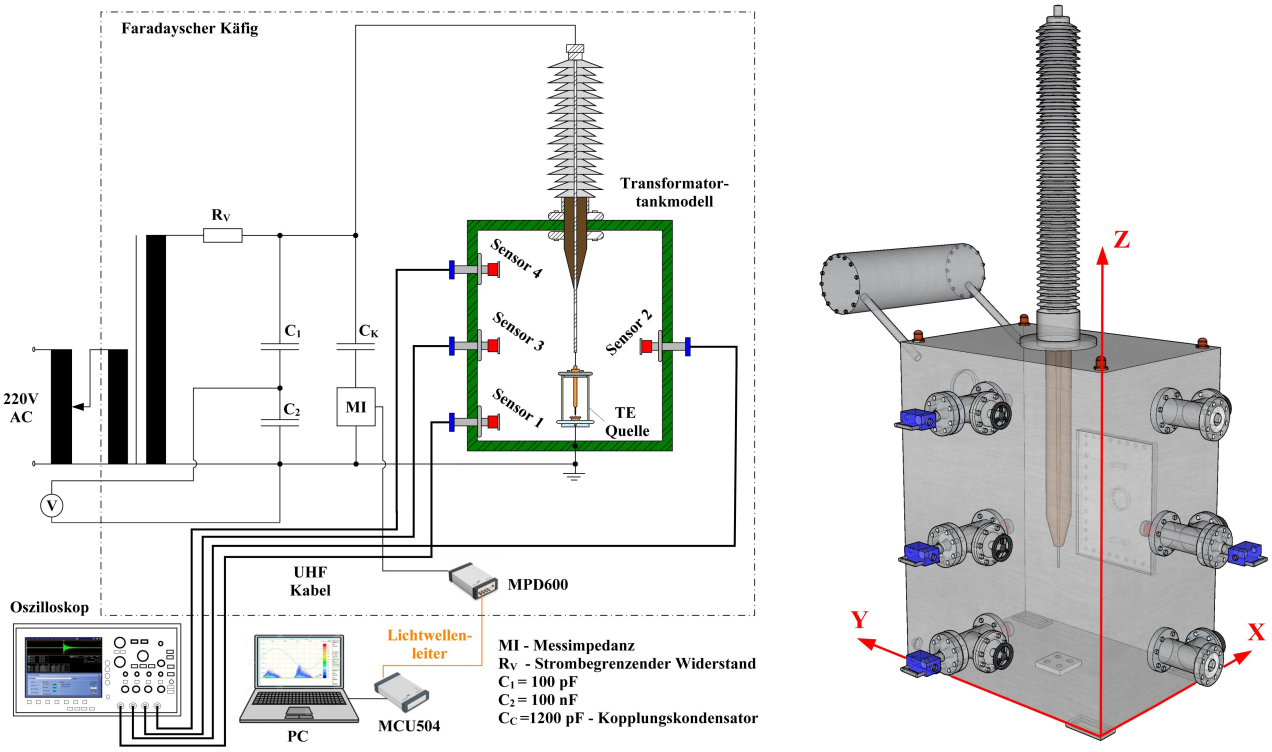


Bild 1: Schematisierter Aufbau des Messsystems zur TE-Messung (links) und schematische Darstellung des Transformatorkessels mit vier UHF Sensoren (rechts)

Um die Grenzen der UHF-Lokalisierungsmethode zu verdeutlichen, ist in Bild 2 ein zweidimensionales Analogiemodell dargestellt. Unter der Annahme, dass die TE-Anfangszeit bekannt ist, kann bei einer korrekten Bestimmung der Ankunftszeiten der UHF-Signale, der Abstand zwischen dem Ort der TE und jeder der Sensoren berechnet werden. Wenn die Spitze des Sensors als Mittelpunkt betrachtet wird, können beispielsweise der grüne und der rote Kreis in Bild 2 ermittelt werden. Die Schnittpunkte dieser Kreise sind die Punkte P_S und P_1. Da die Dimensionierung des Transformators bekannt ist, und P_1 außerhalb des Kessels liegt, ist der TE-Ort eindeutig P_S. Parameter wie externe Störsignale, geringe Leistungsdichte sowie geringe Flankensteilheit der UHF-Signale, begrenzte Abtastrate des Oszilloskops, Messunsicherheiten usw. führen jedoch zu einem bestimmten Fehler in den ermittelten Ankunftszeiten der Signale. Für die Analyse des Einflusses fehlerbehafteter Ankunftszeiten wird angenommen, dass die TE-Anfangszeit bekannt ist und die Ankunftszeit des von dem Sensor 1 erfassten Signals korrekt bestimmt wurde. Durch Addieren eines bestimmten Fehlers zu der Ankunftszeit des mit dem Sensor 2 gemessenen Signals werden mögliche Fehlerszenarien nachgebildet. In der Praxis kann die ermittelte Ankunftszeit einen zeitlich positiven oder negativen Fehler enthalten. Bild 3 zeigt den Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit von falsch bestimmten Ankunftszeiten des mit dem Sensor 2 empfangenen Signals. Die markierten Punkte P_S und P_1 bis P_7 entsprechen den Punkten in Bild 2. Für Messfehler von etwa -1000 ps bis +1600 ps steigen die Lokalisierungsfehler näherungsweise linear mit den Ankunftszeitenfehlern an. Der rote V-förmige Abschnitt des Diagramms in Bild 3 liegt näher an der Fehlerstelle und daher enthalten Punkte auf diesem Abschnitt einen vergleichsweise kleineren Lokalisierungsfehler. Punkte auf dem blauen Abschnitt hingegen führen zu einem größeren Lokalisierungsfehler, da diese fast alle außerhalb des Transformatorkessels liegen. Des Weiteren wachsen die Lokalisierungsfehler in diesem Abschnitt nichtlinear, bis an den beiden Lokalisierungsgrenzen unendlich große Steigungen erreicht werden und bei Überschreitung einer der beiden Grenzen keine Lokalisierung mehr möglich ist.

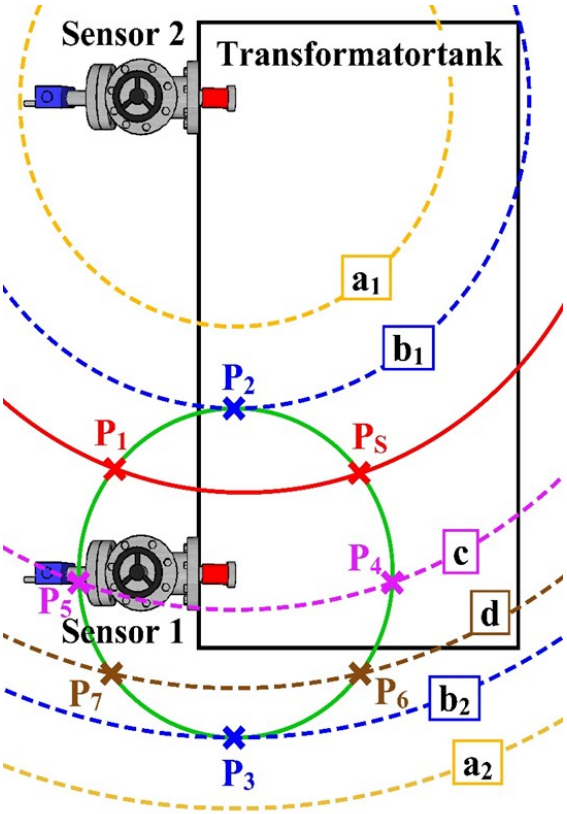


Bild 2: Zweidimensionales Analogiemodell zum Transformatorkessel mit zwei UHF-Sensoren

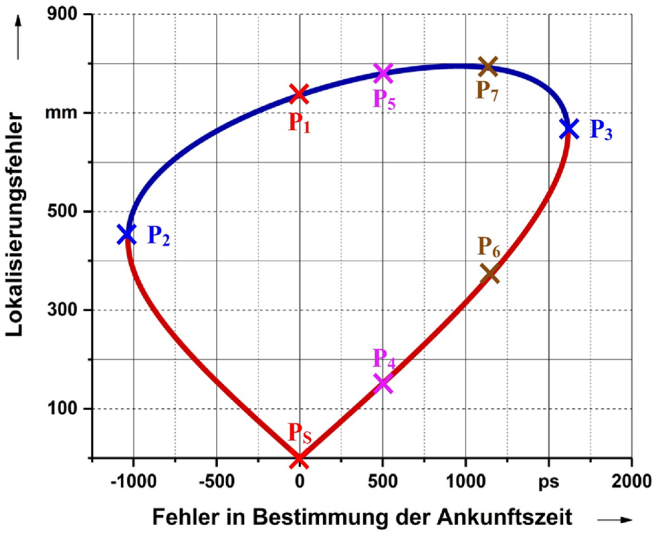


Bild 3: Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit von fehlerhaft bestimmten Ankunftszeiten

Der dominierende Faktor bei der Lokalisierung der TE-Quelle ist die genaue Bestimmung der Ankunftszeiten der Signale. In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz verwendet, der auf Penalized Contrasts (bestrafte Kontraste) basiert, um die Ankunftszeiten zu bestimmen. Zunächst wird das Signal in zwei Abschnitte unterteilt. Eine statistische Eigenschaftsfunktion, basierend auf z.B. dem Mittelwert, dem Effektivwert, der Varianz etc. wird für beide Abschnitte in Bezug auf die Marginalverteilungen übernommen und berechnet. Wenn die Punkte innerhalb des Abschnitts eine große Ähnlichkeit aufweisen, wird der Unterschied zwischen der optimierten Eigenschaftsfunktion und dem Signal am geringsten. Die Abweichung der Punkte innerhalb jedes Abschnitts von der erhaltenen statistischen Eigenschaft wird als ein Fehlermaß berechnet. Die Summierung der Fehler führt zu einer Kontrastfunktion. Der Haltepunkt für die Zweiteilung des Signals wird entlang des Signals verschoben. Der Punkt, an dem die Kontrastfunktion minimal ist, ergibt die Ankunftszeit des Signals. Die Penalized Contrasts Methode wurde für die Bestimmung der Ankunftszeit des im Bild 4 dargestellten Signals verwendet. Ferner wird die Penalized Contrasts Methode mit einem Zeitfenster (Time Window, TW) erweitert. Dieses wird mit dem Signal überlagert. Anstatt das vollständige Signal zu betrachten, wird zuerst das Zeitfenster bestimmt, in dem sich die Ankunftszeit befindet. Die Länge des Zeitfensters entspricht der Zeit, welche die EM-Wellen benötigen, um die Diagonale des Kessels zurückzulegen. Der Durchschnitt der absoluten Werte der Datenpunkte in jedem Zeitfenster wird berechnet. Durch Berechnen des Verhältnisses zwischen zweier aufeinander folgenden Fenster wird das Zielfenster bestimmt. Durch Begrenzen des Suchbereichs auf die selektierte Zone wird die Genauigkeit der Penalized Contrasts Methode maximiert. Des Weiteren wird der Einfluss externer Störsignale, die den Signalen überlagert sind, reduziert. Der erweiterte Algorithmus mit dem Zeitfenster wird als TWPC (Time Window Penalized Contrasts) Methode bezeichnet.

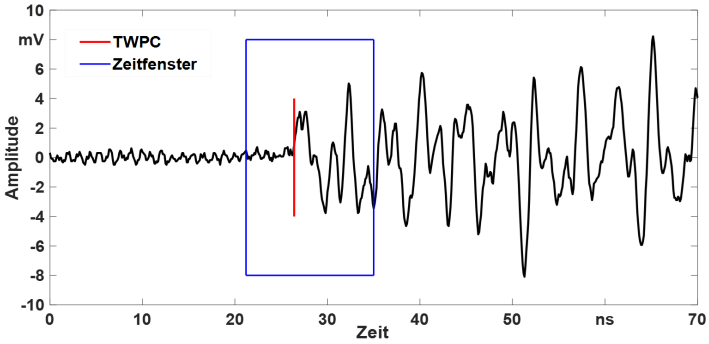


Bild 4: Ermittlung der Ankunftszeit eines entrauschten Signals mit der Penlized Constrasts Methode

Die Ankunftszeiten der vier von den Sensoren empfangenen Signale werden mit den Methoden Penalized Contrasts und TWPC ermittelt. Das Ergebnis ist in Bild 5 dargestellt. Die Ankunftszeit des von Sensor 3 empfangenen Signals wird durch die TWPC Methode trotz der Schwankungen, die vor der tatsächlichen Ankunftszeit zu sehen sind, korrekt bestimmt. Die mit der TWPC Methode bestimmten Ankunftszeiten wurden verwendet, um den Ort des TE-Fehlers zu berechnen. Der Lokalisierungsfehler betrug 11,81 cm. Die Penalized Contrasts Methode ergab ungefähr einen gesamten Lokalisierungsfehler von ca. 32 cm. Basierend auf diesen Ergebnissen und anderen Messungen führt die Anwendung der TWPC Methode zu einer optimierten Bestimmung der Ankunftszeiten und somit einer höheren Genauigkeit der TE-Lokalisierung mit der UHF-Methode.

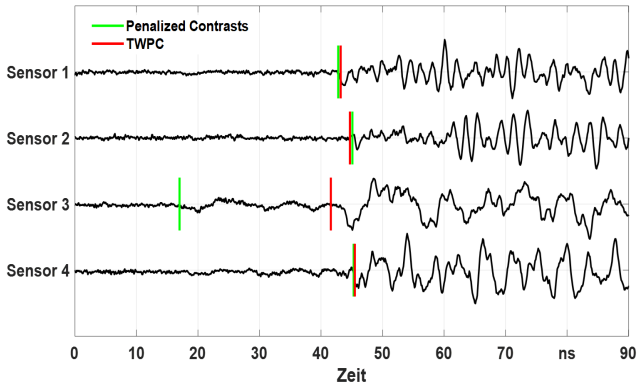


Bild 5: Ankunftszeiten bestimmt durch Penalized Contrasts und TWPC Methode

Localization of Partial Discharges in Power Transformers Using UHF Measurement Technique

M.Sc. Mohamadreza Ariannik, M.Sc. Mohammad Akbari Azirani

Partial discharges (PDs) in power transformers are of significant importance due to their progressive nature. Detecting and localizing PDs in early stages of their occurrence enables the operators to have a maintenance plan for the transformer and to extend the lifetime. To date, various methods are introduced to detect and localize PDs inside a transformer; however, the ultrahigh frequency (UHF) measurement technique is a prominent method among them due to advantages such as possibility of PD localization, higher robustness against environmental noises as well as its applicability for both online and offline (using external excitation) PD measurements. The principle of this localization method is described briefly in the following.

A three-dimensional Cartesian coordinate system is defined with an arbitrary origin, which can be considered on one of the transformer tank corners. This tank is required to be equipped with four UHF probes to receive the electromagnetic (EM) waves emitted by the PD. The propagation velocity of the EM waves inside the transformer tank, the arrival time (AT) of the first received signal, i.e., trigger signal, and the difference in ATs of the remaining signals compared to the AT of the trigger signal are the key parameters to set up an equation system for localizing the PD. Note that the insulating medium of the transformer, namely its permittivity and permeability, has to be taken into account for calculating the EM waves velocity. Given location of the four probes, the coordinates of the PD source are obtained using a geometric triangulation algorithm.

In this project, a specially designed transformer tank model is used for the PD localization measurements. This air-filled tank is equipped with four UHF probes that are inserted through DN 80 oil drain valves. The tank, location of the UHF probes, and hypothetical axes of a Cartesian coordinate system are depicted in Figure 1(a). A needle-plane structure that is produced to generate repetitive PD pulses inside the tank is shown in Figure 1(b). All probes have an insertion depth of 9 cm except for probe 3, which is 6 cm.

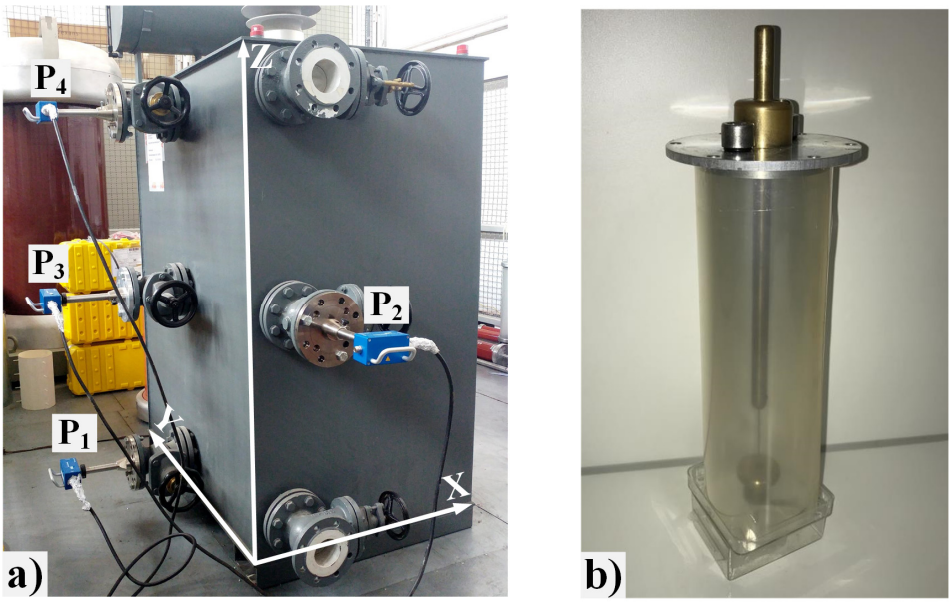


Figure 1: Test setup; (a) transformer tank, (b) corona PD source

The probes are connected to an oscilloscope with a sampling rate of 10 GS/s for all four channels. Investigating the frequency range and quality of the signals emitted from the PD source is one of the main goals of this contribution prior to the PD localization. In this regard, the PD source was placed at middle of the bottom plane of the tank and a signal was captured by probe P_1 (Figure 1(a)). In order to differentiate the frequency components of the PD signal from that of the signals usually available in the environment, another signal was captured by the same probe, while there was no PD source inside the tank. Note that the EM waves in the environment can reach inside the tank through the vent dedicated for the bushing. The amplitudes of fast Fourier transform (FFT) of the two signals are compared in Figure 2. The main frequency component of the PD signal is highlighted by a green oval, which is at 237 MHZ. The main frequency component for this specific PD source lies within very high frequency (VHF) range. As it can be seen in Figure 2, the other components with a rather high amplitude are common in the FFT results of both signals. Therefore, they cannot be considered as the components caused by the PD source.

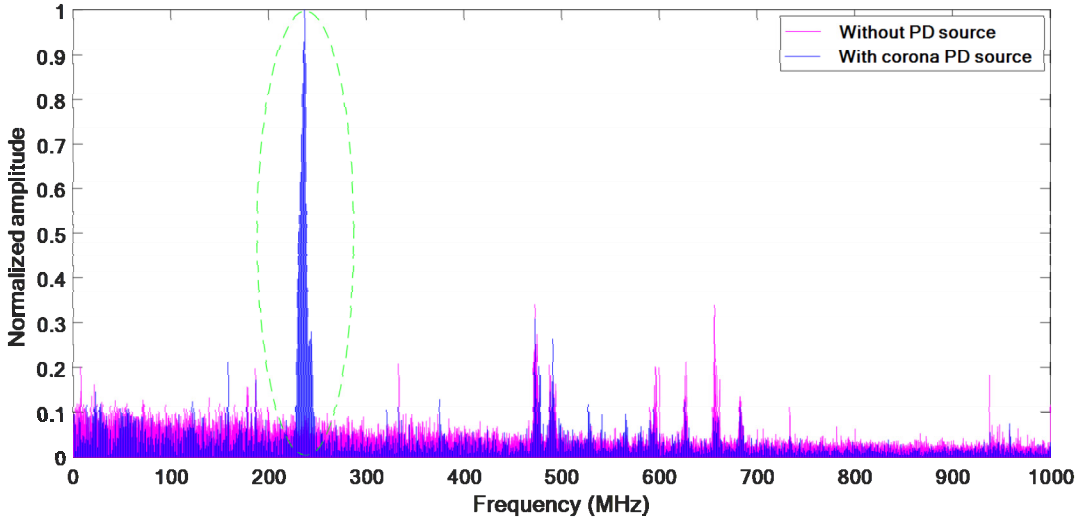


Figure 2: Frequency components of a PD signal

The signal sets captured by the UHF probes during the measurements may be affected by interferences that reveal themselves in form of fluctuations in the signals. This results in a deviation in the AT, and therefore a reduction in the localization accuracy. A measurement is performed to compare various signals generated by the same PD source and at the same PD level from the power and noise point of view.

The PD generator shown in Figure 1(b) is positioned at the center of the tank and 1000 signals are received by probe P_1. Histogram plots of the power and signal to noise ratio (SNR) of the signals are depicted in Figures 3(a) and 3(b), respectively. Considering Figure 3, the diversity in the power as well as the SNR of the signals causes a high degree of variation among the ATs of the signals related to the same PD source position. Consequently, if several signal sets are recorded, a portion of them may not even provide an admissible location for the PD source and the remaining yield locations that are scattered inside the transformer tank. In response to this, the proposed algorithm for PD localization is based on receiving and analyzing 1000 signal sets. Generally, the possibility as well as the accuracy of the localization is improved by increasing the number of the captured signals. The dominant factor that causes limitation in accuracy of the PD source localization is determining AT of the signals received by the UHF probes.

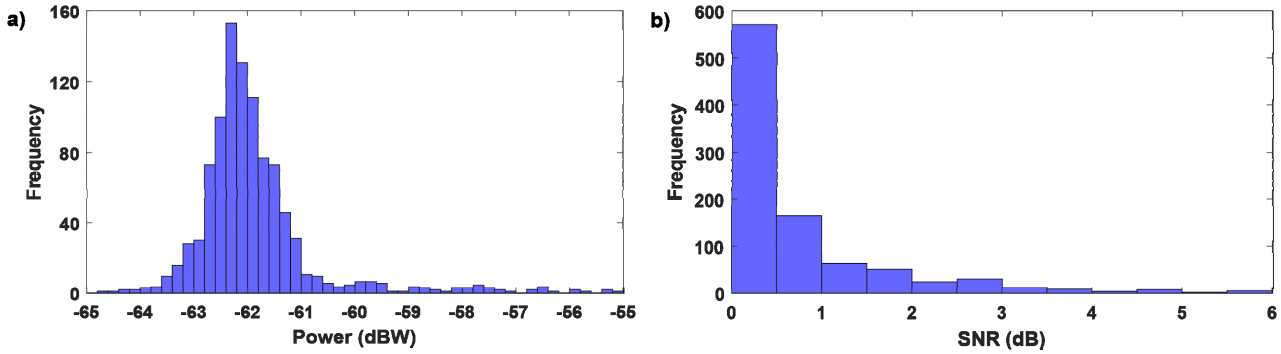


Figure 3: Histogram plots for properties of 1000 signals; (a) power of the signals, (b) SNR of the signals

In the proposed approach, instead of searching through the signal, only a part of the signal is investigated to detect the AT. In other words, a time window is defined and the search range for the AT is limited to the samples lie within this window. The window width in time domain is twice the time required for a signal to pass across the longest straight route inside a transformer tank, which is the diagonal of the tank. Half of this width is added to both sides of the window as a marginal range. The window that AT occurs within is determined by tracking significant variations in average of absolute values of consecutive samples. Given the window, the signal is divided into two sections at several points inside the window, and then a probability distribution function (PDF) is fitted to each section. The breakpoint where the square of differences between samples and their estimated values obtained by the corresponding PDF reach the global minimum is considered as AT of the signal. This method is applied to a set of signals received by the UHF probes and the results are shown in Figure 4.

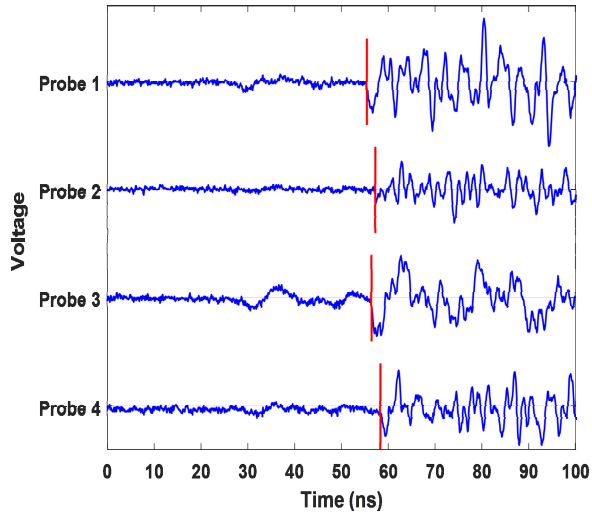


Figure 4: AT of signals received by the four probes

The algorithm of PD localization is shown in Figure 5. The acceptable PD locations provided by the analyzed signal sets are scattered inside the transformer; therefore, two methods are proposed to distinguish the outlier data. The first method is to ignore the signal sets that have a different sequence in ATs compared to the target AT sequence. Note that having four UHF probes, 24 possibilities can be defined for the arrival sequence of the signals. The AT sequence with the highest repetition rate among the signal sets that provided admissible PD coordinates is considered as the target AT sequence.

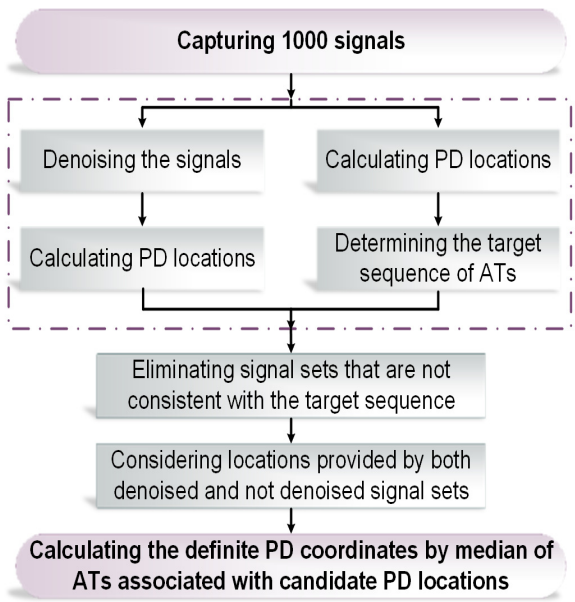


Figure 5: PD localization algorithm

In the second proposed method, the signal sets that provided an acceptable location for the PD source are denoised using a wavelet transform. If the denoised signals are not capable of providing acceptable coordinates for location of the PD source, the original signal set is ignored in the further analyzes.

Three types of experiments are conducted to evaluate accuracy of the localization algorithm. The first experiment is concerned with no barrier around the PD source, while the PD source is surrounded by a combined metal lattice and pressboard barrier and by a cylindrical metal barrier for the second and third measurements, respectively (Figure 6). Each experiment comprises three different locations for the PD source, and the lowest localization accuracy for the worst case of each experiment is listed in Table 1. Considering the real obstacles that the EM waves encounter in a power transformer, a localization accuracy of less than 15 cm is achievable in practice. A schematic of the tank including the cylindrical metal barrier and locations provided by the localization algorithm is shown in Figure 7. However, results of these investigations demonstrate that even though an optimized data processing is used, the localization error cannot be improved up to a value less than 10 cm, which seems to be the actual limit for accuracy of this technology.

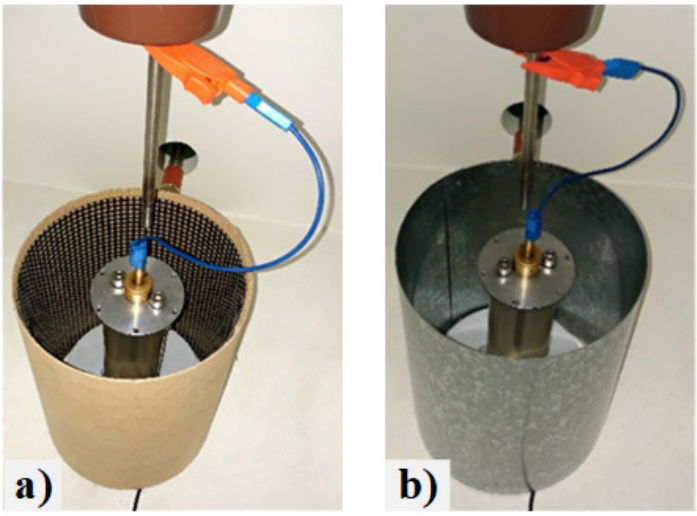


Figure 6: Barriers around the PD source; (a) combined metal lattice and pressboard barrier (b) metal barrier

Table 1: Localization accuracies

Localization accuracy (cm)		
No barrier	Metal lattice and pressboard barriers	Metal barrier
13.9	14.5	21.0

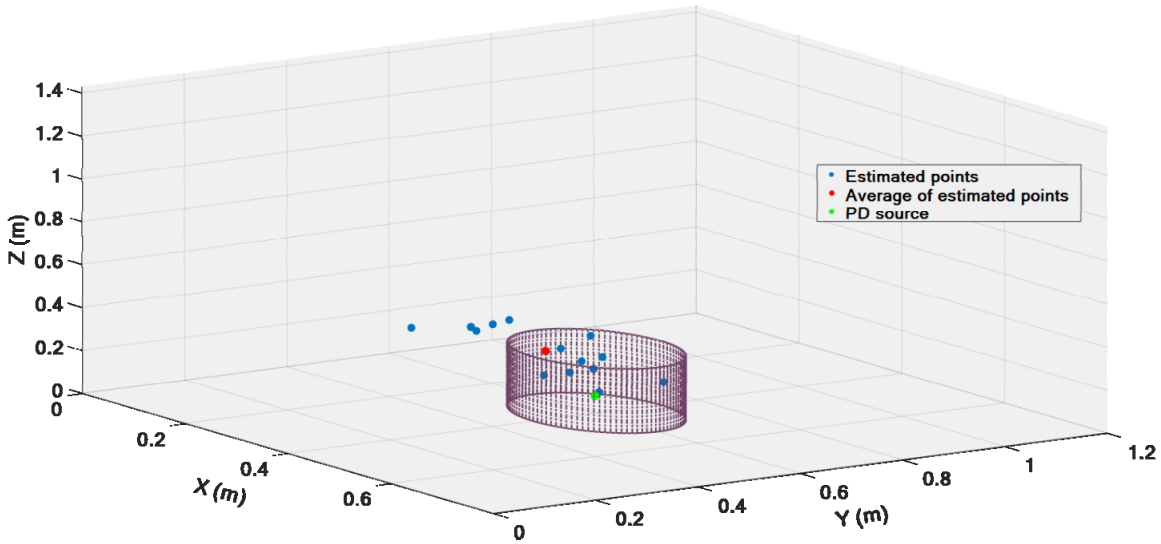


Figure 7: 3D illustration of the tank along with the metal barrier

Feasibility of Partial Discharge Localization in Power Transformers based on a Novel Curve Fitting Method

M.Sc. Mahdi Rahimbakhsh

Power transformers are one of the most important and expensive components installed in electric power systems. Their health is a key for power quality and reliability of the power system. It is important to assess the condition of the transformer using a suitable monitoring method to ensure its reliability. Partial discharges (PD) in a power transformer degrade the dielectric insulation and affect the lifespan of the transformer. PD in a power transformer could be critical depending on the amount of charge and especially on the location of the PD source inside the power transformer. Several researches have attempted to improve monitoring of transformers by proposing failure detection methods. This contribution focuses on feasibility of PD localization based on a novel curve fitting coefficient method in power transformers. The measurements have been done on a winding of a model transformer.

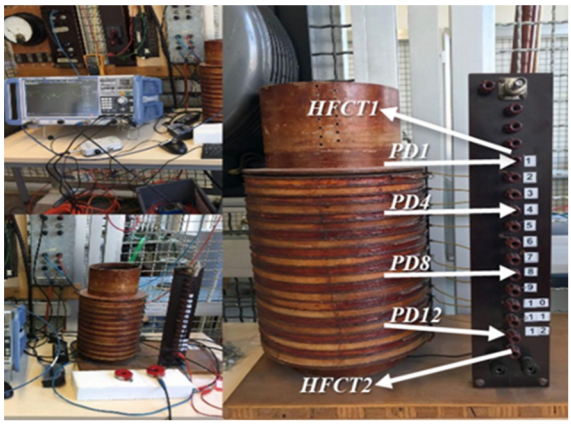


Figure 1: Investigated sample and test setup

As shown in Figure 1, the investigated winding has 12 inputs. The purpose of this contribution is not about reviewing the details of winding design, but rather it investigates the PD behavior at different points on the winding model and localizing this signals through received signals from two sides of the winding. In this contribution, only the experimental data of 100 pC partial discharge signals will be presented and only the following points presented in Table 1 will be considered.

Table 1: List of abbreviations

Abbreviation	*Description*
HFCT1	high frequency current transformer no. 1 is connected to the top of the winding
HFCT2	high frequency current transformer no. 2 is connected to the end of the winding
PD1	PD is injected to input no. 1
PD4	PD is injected to input no. 4
PD8	PD is injected to input no. 8
PD12	PD is injected to input no. 12

All injected PDs are from a partial discharge calibrator, which can generate 20 pC, 50 pC and 100 pC PD signals. The generated PD signals have been injected at 12 different points of the winding and received through the HFCTs, which have been installed on two sides of the winding. In this report, only the experimental data of 100 pC partial discharge signals will be presented and only the following points presented in Table 1 will be considered.

The used curve fitting (CF) methods includes the Exponential Method, the Fourier series Method and the Gaussian Method. The selected CF-methods are based on the characteristics of the PD signals. The Gaussian method fits the peaks very well, the exponential method can represent the damping ratio and the Fourier series gives the most similar equation to the signals. The received signals from two sides of winding should be de-noised and smoothed with double the threshold method, the quadratic regression has been applied on the original signals to obtain the suitable signals, which could be applied for all mentioned curve fitting methods.

Table 2: Selected ranges for CF processing

Range No.	*Time Period*
Range1	0-200ns
Range2	0-300ns
Range3	0-400ns
Range4	0-500ns
Range5	0-600ns
Range6	0-700ns
Range7	0-800ns
Range8	0-1000ns

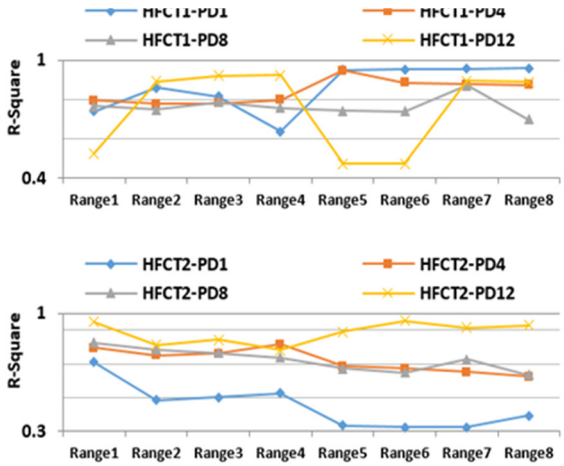


Figure 2: Calculated R-square via Gaussian method

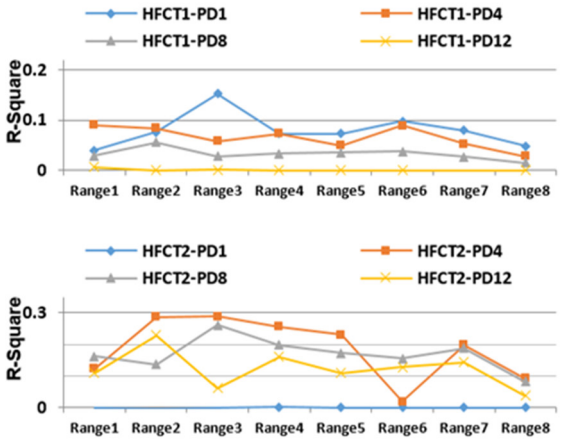


Figure 3: Calculated R-square via exponential method

The most important part of the evaluation section is finding the suitable range of signals to reach the best fitting quality and also to make sure that the extracted equation has all characteristics of the original signals. For this reason, 8 ranges of time have been computed for all CF-methods and all processes have been done to determine the best range as shown in Table 2. The Gaussian model fits the peaks very well. As shown in the following figures the amount of R-square after applying the Gaussian method can show the location of the PD.

Generally, when the PD source is nearer to the signal receiver then the quality of fitting for all models will be increased. This fact can be used inversely for localization based on signals, which have received from two sides of winding to specify, which receiver is closer to PD source. The range of the time, which is used for CF should be selected based on results of three part of models. For HFCT2 for all ranges, it obviously shows that the location could be found based on R-square with Gaussian model. Higher amount of R-square shows a nearer PD source to the receiver.

Based on CF via exponential method, the farthest PD source to receiver can be recognized from CF results. For example, for HFCT1, the minimum amount of R-square belongs to PD12, where PD is injected to farthest point to receiver no. 1. (Figure 3)

Nearest PD source could be recognized based on Fourier series method. It obviously shows that PD source could be localized based on R-square with Fourier series method as shown in Figure 4.

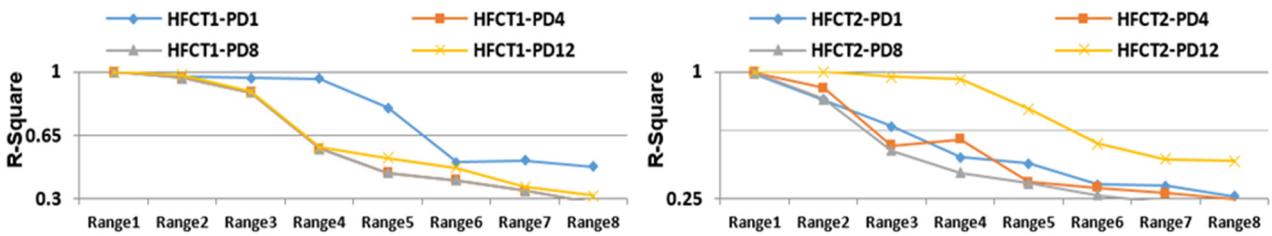


Figure 4: Calculated R-square via Fourier series method

There is a logical relation between the result of CF methods and location of the PD. Some mathematical process and statistical methods can be used to extract the location of the PD based on the CF results.

The extracted equations have been analyzed to find the possibility of localization based on coefficients. Three CF methods are applied on PD1, PD4, PD8 and PD12 via HFCT1 and HFCT2. The Gaussian method fits the peaks very well, the exponential method can represent the damping ratio better than other methods and the Fourier series to reach the best R-square (fitting quality factor) among all CF methods. By analyzing the extracted coefficients ai always shows the location of the PD. The following figures shows the relation between calculated ai and the location of the PD.

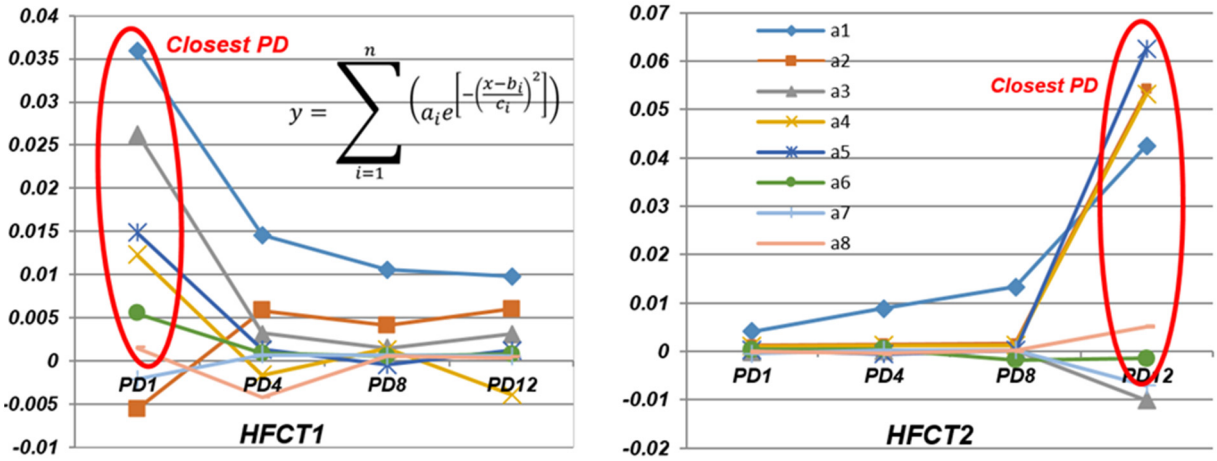


Figure 5: Relation between coefficients and location of PD via Gaussian method

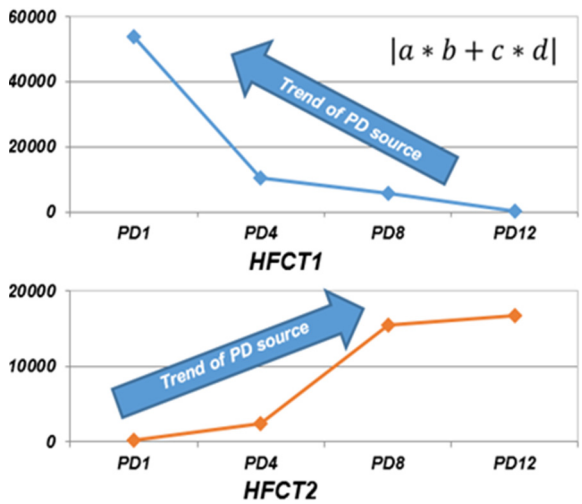


Figure 6: Relation between coefficients formula and location of PD via exp. method

The curve fitting via exponential method is chosen because this method only can recognize the farthest PD source. This method can represent the damping ratio of the PD signal better than the other CF methods. It is obviously clear that this method could not fit the original signal well, but it can provide a useful factor for finding the farthest PD source. By analyzing the extracted coefficients, it could be seen that the trend of |a*b+c*d| always shows the location of the PD as shown in Figure 3 based on the mentioned formula.

The Fourier series method $$y = a_0 + \sum_{i=1}^{n} (a_n \cos(n\omega x) + b_i \sin(n\omega x))$$

is also used, because it is clear that there is a relation between quality of fitting and PD location. It means that the goodness of fits factors like the sum of squares due to error (SSE), R-square, adjusted R-square and root mean squared error (RMSE) can help to find the closest PD source via Fourier series method. The following figures shows that the

quality of CF via Fourier series method is high when the location of PD is closer. For the left series of figure, the PD is injected in point 1 and for right ones is injected in point 12.

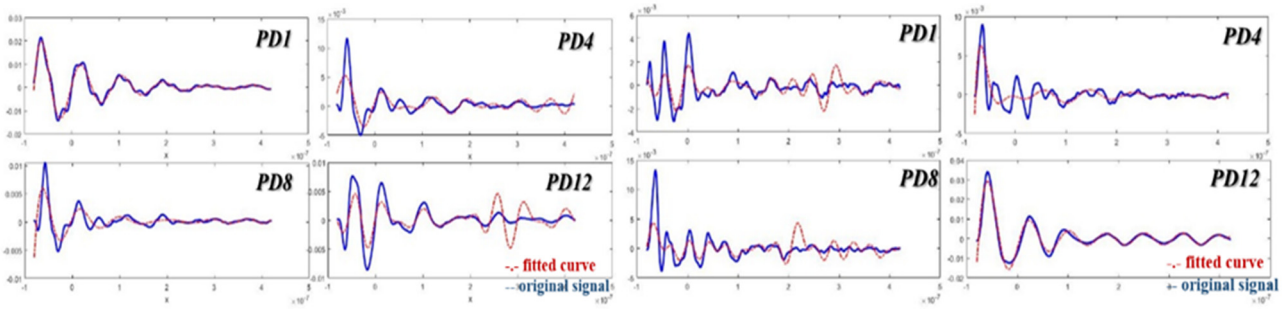


Figure 7: Fourier series method to HFCT1 signals (left) and to HFCT2 signals (right)

Sensitivity Analysis of RLC Transformer Winding Model used for PD localization

M.Sc. Sahand Seifi

PD measurement is one of the known methods for assessing the insulation system of power transformers. Using a PD measurement, a fault in the insulation system could be detected before a serious damage of the transformer happen. Besides, it is a powerful tool in order to detect the type and severity of the damage in an insulation system. On the other hand, because of the complex structure of power transformers, in many cases, finding the location of fault in the insulation system is not straightforward even after removing the active part from the transformer tank and dismantling. Therefore, a precise PD localization can also significantly reduce the time and cost of troubleshooting and repair. Different methods are employed to localize PDs; UHF and acoustic techniques are two of them. One of the alternative methods for localization of PD is the electrical method, which already is widely applied for detecting the PDs.

The electrical method for PD localization has been established based on SWTFs (Sectional Winding Transfer Function). In this method, PD signals are measured at two ends of the winding. A transfer function can be assigned between each point along the winding and one of the two terminations. The division of measured PD signals by corresponding sectional winding transfer functions in frequency domain results in two calculated signals at each section. The actual source of the PD is the point or section, where the similarity of these two calculated signals is maximal.

One major difficulty in this method is to obtain the precise SWTFs, which are usually based on a winding model. Regardless of the method used to find the winding model, there is always an error in determining values of the winding parameters. In order to investigate the effect of this error on the PD localization, a sensitivity analysis has been conducted on an RLC model of a transformer winding. Moreover, in the cases that the winding parameters values are found using FRA measurements, there is a possibility to measure FRA with different connections or transfer functions, which each of them is sensitive to some specific parameters more than other. This study also could help to choose appropriate configuration in FRA measurements to find the winding model for SWTFs calculation.

In this study, a detailed model of a real coil has been considered as a reference model. A simulated PD signal is injected to one point of the reference model, and the voltages of two ends of it are considered as two measured PD signals, which could be measured in a real transformer for the localization. These two PD signals are employed for the localization algorithm. In the next step, one parameter of the model is slightly changed step by step, and the localization procedure is repeated for each change and the corresponding localization error is registered. This sequence is repeated for all parameters considered in the RLC model to find the sensitivity of PD localization to different parameters of the winding model. All of the mentioned sequences are repeated again for PDs in all other points along the winding to recognize the most sensitive point for a PD localization.

For this study an RLC model shown in Figure 1 has been chosen as a detailed model of transformer winding, which consist of series resistance, self-inductance, mutual inductance, and series and ground capacitances and conductances. The circuit is solved based on mesh analysis and by creating the Z-matrix using *MATLAB*.

The RLC model is obtained based on the information of a real coil, which is an ordinary disk type winding with 64 disks and 6 turns per disk. Each disk of the coil is modelled as one section in the simulated circuit; therefore, this RLC circuit has 64 sections. The parameters values of the circuit are calculated using design data. These values are the same for all sections of the circuit. R_s, C_s and G_s are series resistance, series capacitance and series conductance of one disk respectively; keeping in the mind that R_s is frequency dependent. C_g and G_g are the ground capacitance and ground conductance between disk and ground. The L_s and M_{ij} are self-inductance and mutual inductances. Electrical PD localization method uses PD signals measured at two ends of the winding to localize the original PD along the winding.

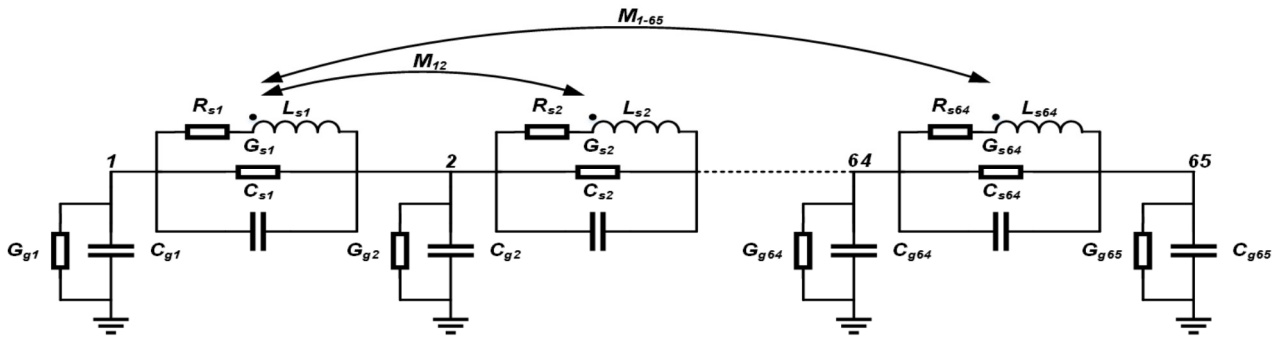


Figure 1: RLC model of a transformer winding

It has been tried to simulate the original PD and apply it to the reference circuit. The voltages of points 1 and 65 of the reference circuit in Figure 1 are the measured signals in a real case used for PD localization. The simulated PD signal is a 1/50 µs impulse signal similar to the PD of a cavity. As mentioned above, two PD signals measured at two ends of the winding are employed for localization. It should be mentioned that using the detailed model of the winding, the transfer functions of each point along the winding to two ends of it is available. The division of measured PD signals in the frequency domain by transfer functions of each point along the winding results in some pairs of calculated signals. The point along the winding that its pair of calculated signals is more similar to each other is the location of the original PD. The frequency range exerted for calculation of the pair of calculated PDs was chosen to 10 kHz-1 MHz, because it is a valid frequency range for FRA measurements, which was used in order to check or find the RLC model of the winding.

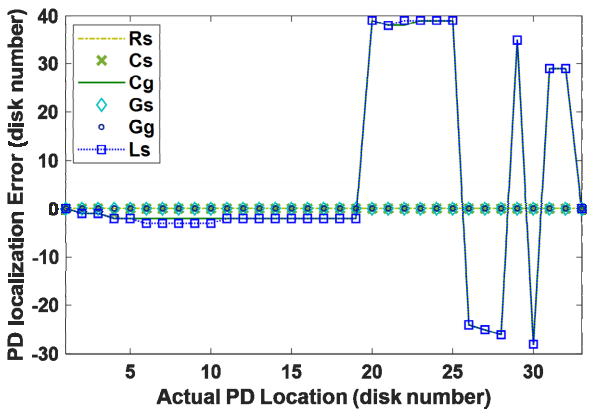


Figure 2: Localization errors for a -10% estimation inaccuracy of different parameters

Figure 2 and 3 show the localization errors for all points along the winding for

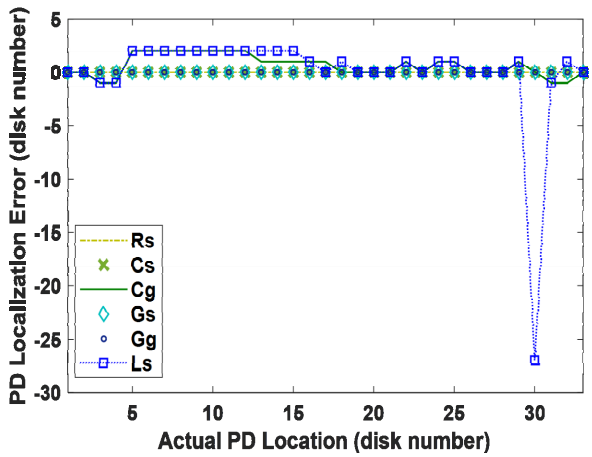


Figure 3: Localization errors for a +10% estimation inaccuracy of different parameters

-10% and +10% change at each parameter of the model. As the winding is a symmetrical winding, the localization errors of two points that are in a same distance from the center of winding are equal. Thus, the figures show errors of points 1 to 33 from 65 points of the winding. The results reveal that the localization is very sensitive to the series inductance of the winding. A -10% inaccuracy in the inductance estimation make almost 40 disks error, which is more than 50%.

The grounding capacitance is also as important as series inductance and makes almost the same localization error for a same estimation inaccuracy. The other parameter is series capacitance. This parameter just makes a small error. The other parameters do not show any error for the defined estimation inaccuracy.

The study indicates that the localization is not dependent on the series resistance accuracy and any change of resistance in the range of 0.01 to 100 of the reference value does not cause any localization error. Investigation of the voltage transfer function of the winding reveals that these changes of resistance do not also induce an observable difference in the transfer function of the winding; even deviation of their values 100 times higher than the reference value yields a minor change in the transfer function; whereby, it causes no error in localization. In this case, the dominant part of circuit damping is due to the ground and series conductances of circuit; therefore, these resistance changes could not influence the winding transfer function. In the frequency range below 1 MHz, the ground conductance is the main part of circuit damping, but over 1 MHz, the circuit damping is under the influence of series conductance. For this reason, as it is shown in Figure 4, the sensitivity of PD localization to ground conductance is higher than the series conductance.

Figure 5 shows that large errors in the PD localization start with smaller parameter inaccuracy in comparison the series resistance and the series and ground conductances. It means that the series conductance is more important. Figure 6 shows that the series inductance is the most important parameter and after that ground capacitance.

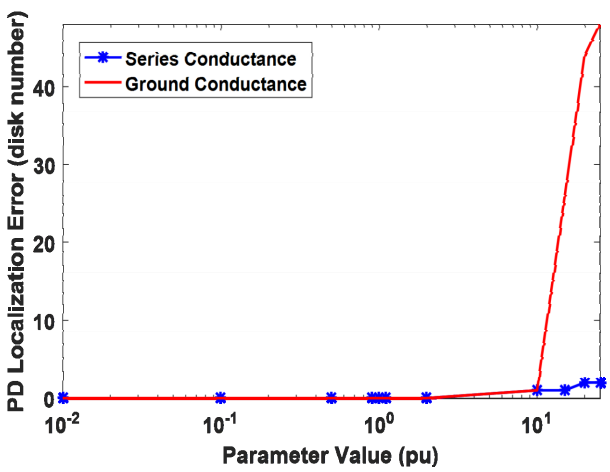


Figure 4: PD localization error to different conductances values

All of this simulation has been repeated for two different PD signals. One of them is a 1/50 µs impulse signal, and the other one is a 0.25/2 µs impulse signal, in order

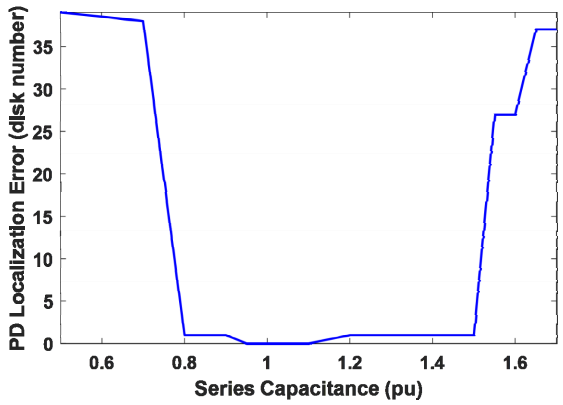


Figure 5: PD localization error to different series capacitance values

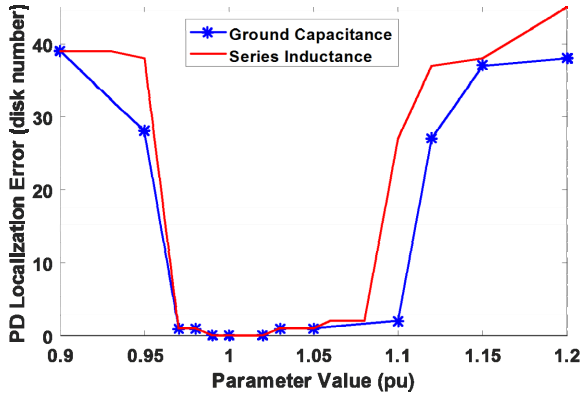


Figure 6: PD localization error to different series inductances and ground capacitances values

to consider different band-widths of the signals. A next step is the investigation of the localization error if the band-width is reduced, thus finally a model can be achieved, in which only the important parameters need to be estimated. Developing this new model will show, how sensitive a PD localization can be performed in simulation, thus a last step is finally the transfer from the simulation results to a real case.

Investigation of a Special Transformer Winding Model for the Interpretation of FRA Measurements

M.Sc. Sahand Seifi

Frequency Response Analysis (FRA) measurements of a transformer is a common method to detect the deformation of the windings. Many publications have obtained a detailed model of the winding using the FRA measurement to assess the occurrence, type and severity of a deformation. Furthermore, some efforts have been conducted to localize the PD inside transformers. One of them is the electrical method, in which, sectional winding transfer functions (SWTFs) are applied for the localization. The SWTFs can also be obtained using a detailed model of the winding, which is found via FRA measurements. Therefore, obtaining a detailed model of the winding can be useful in both the detection and localization a winding deformation or a PD source. Moreover, some parameters of transformer detailed model for PD localization are more important than others, which is shown and discussed in this contribution.

Furthermore, a study on the sensitivity of various parameters of the transformer detailed model is conducted. For this purpose, a RLC model for a single phase transformer consisting of low and high voltage windings is considered as the reference circuit. Then FRA reference measurements are performed for all possible connections and transfer functions are calculated for the reference circuit. Thereafter, one parameter of the circuit is altered and all previous FRA measurements are repeated. Afterwards their differences are compared with the reference measurements and described by a defined index. Hence, the effect of each parameter of the detailed model on various types of FRA measurements is investigated. Therefore, the FRA measurement, which has the highest difference due to changes in a single parameter, is declared as the most suitable arrangement to estimate that parameter in a detailed model.

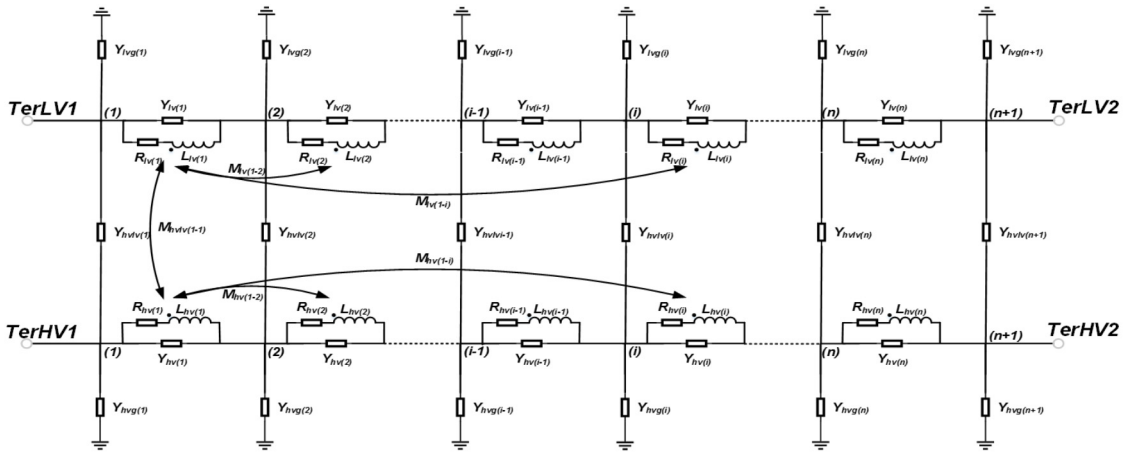


Figure 1: The RLC model of transformer windings

For this study an RLC model of Figure 1 has been considered as a detailed model of a single phase transformer, which consists of series resistance, self-inductance, mutual inductance, and series and ground capacitances and conductances. In this figure, R_{hv} and R_{lv} are series resistances of HV and LV windings, L_{hv} and L_{lv} are series inductances of HV and LV windings, $M_{hv(i\text{-}j)}$ and $M_{lv(i\text{-}j)}$ are mutual inductances between sections *i*-th and *j*-th of each HV and LV windings, $M_{hvlv(i\text{-}j)}$ is mutual inductance between *i*-th section of HV winding with *j*-th section of LV winding, Y_{hv} and Y_{lv} are equivalent admittances of series

capacitance of HV and LV windings with their conductances, Y_{hvg} and Y_{lvg} are equivalent admittances of ground capacitance of HV and LV windings with their conductances, and Y_{hvlv} is equivalent admittance of capacitance between HV and LV windings with its conductances.

Table 1: Different transfer functions and connections arrangement

Transfer Function	R_{TerHV1} (Ω)	R_{TerHV2} (Ω)	R_{TerLV1} (Ω)	R_{TerLV2} (Ω)	Source Terminal	Response Terminal
$H_{V\text{-Open}}$	50	50	floating	floating	TerHV1	TerHV2
$H_{V\text{-Short}}$	50	50	grounded	grounded	TerHV1	TerHV2
$H_{V\text{-Inductive}}$	50	grounded	50	grounded	TerHV1	TerLV1
$H_{V\text{-Capacitive}}$	50	floating	50	floating	TerHV1	TerLV1
$H_{I\text{-Open}}$	50	grounded	floating	floating	TerHV1	TerHV2
$H_{I\text{-Short}}$	50	grounded	grounded	grounded	TerHV1	TerHV2
$Z_{Gr\text{-Open}}$	floating	grounded	floating	floating	TerHV1	TerHV1
$Z_{Gr\text{-Short}}$	floating	grounded	grounded	grounded	TerHV1	TerHV1
$Z_{Fl\text{-Open}}$	floating	floating	floating	floating	TerHV1	TerHV1
$Z_{Fl\text{-Short}}$	floating	floating	grounded	grounded	TerHV1	TerHV1

The circuit is solved based on mesh analysis and by creating the Z-matrix using MATLAB software. The RLC model has 20 sections and it is tried to be based on the information of a single phase transformer and the parameter values of the circuit are analytically calculated. This circuit with these parameters is considered as the reference model of the transformer.

In order to perform a FRA measurement, a voltage signal is applied between one terminal of transformer winding and ground, which is a sweep frequency or an impulse signal. The response signal is a voltage signal measured at one of the other terminals of the transformer. The voltage transfer function (H_V) is the ratio of these two signals defined as

$$H_{\mathrm{V}} = 20\log_{10}\left(\frac{V_{\mathrm{o}}}{V_{\mathrm{i}}}\right)$$

in which V_i is injected voltage and V_o is response signal. Beside H_V which is the common transfer function in FRA measurements, there are also current transfer function (H_I) and the driving point impedance function (Z).

$$H_{\mathrm{I}} = 20\log_{10}\left(\frac{I_{\mathrm{o}}}{V_{\mathrm{i}}}\right) \qquad Z = \log_{10}\left(\frac{V_{\mathrm{i}}}{I_{\mathrm{i}}}\right)$$

in which I_o is current of the grounded end of the winding and I_i response signal is the current of the source. As it has been mentioned, for quantifying the difference between frequency response traces, some indices need to be used. In this study, two of the most common and recommended indices are used, which are the correlation factor (CC) and the standard deviation (SD).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{N} TF_{ref}(i)TF_n(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[TF_{ref}(i)\right]^2 \sum_{i=1}^{N}\left[TF_n(i)\right]^2}} \qquad SD = \sqrt{\mathrm{var}(\Delta)};\Delta(i) = \frac{\left|TF_n(i)\right| - \left|TF_{ref}(i)\right|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|TF_{ref}(i)\right|}$$

Considered elements to find the most sensitive transfer function are series and ground capacitance of HV and LV winding, the capacitance between HV and LV winding, and also same conductances. Moreover, resistance and inductance of HV and LV

winding are changed for this study. These parameters are varied from 50 % to 150 % of their reference value by 10 % steps.

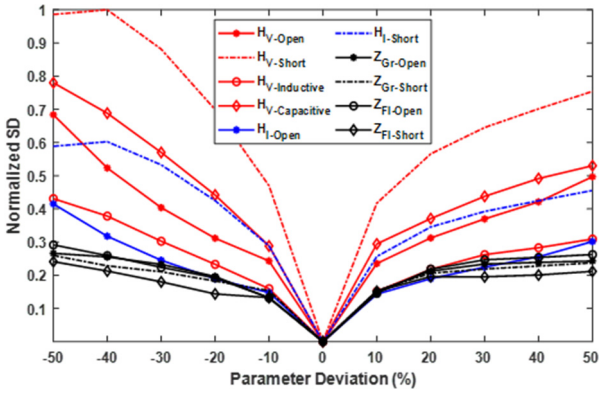


Figure 2: The value of normalized SD for 50-150% change in series HV capacitance

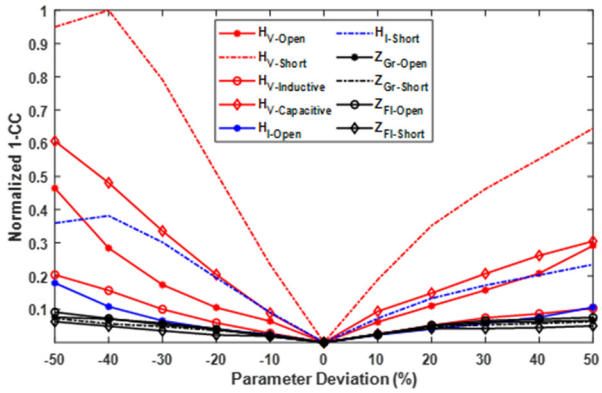


Figure 3: The value of normalized 1-CC for 50-150% change in series HV capacitance

Figure 2 and Figure 3 show the normalized value of SD and 1-CC for changes of series capacitance of high voltage winding (C_{HV}). They indicate that $H_{V\text{-Short}}$ is the most sensitive transfer function to find the C_{HV}, following with $H_{V\text{-Capacitive}}$. These results are also checked for a transformer with different numbers of discs and turns per disc for HV and LV windings, different dimensions of HV winding wire, and different radiuses of LV winding. As the results of the SD index and the 1-CC index for all cases are the same, only the results of the SD index for other parameters of the model are presented in Table 2. It shows that for most parameters, $H_{V\text{-Short}}$ is the best transfer function, and for other ones, $H_{V\text{-Capacitive}}$ is the best one. There are two recommended transfer functions for the parallel conductance between HV and LV windings, because both of them showed a very high sensitivity to a deviation of this parameter. $H_{V\text{-Short}}$ is also sensitive to the series resistance of HV and LV windings, but in some cases, $H_{V\text{-Open}}$ and $H_{V\text{-Inductive}}$ are also as good as $H_{V\text{-Short}}$ for the series resistance of HV and LV winding, respectively. For the series and ground conductance of LV winding, no transfer function is suggested because in different cases, one or two transfer functions are not the most sensitive one. It also worthy to mention that all of these transfer functions are based on the measurement on the HV side; therefore, for some parameter of the LV winding, another transfer function that could be measured from the LV side might be better than the recommended transfer function in Table 2. For example, if $H_{V\text{-Short}}$ is measured from LV side, it might be more sensitive than $H_{V\text{-Inductive}}$, which is measured from HV side, to find series LV capacitance.

The investigations have shown, that specific FRA measurements are recommendable in order to determine specific parameters of the RLCM model, which can then be created more efficiently.

Table 2: Different transfer functions & connections

Parameters	Best Transfer Function
Series HV Capacitance	$H_{V\text{-Short}}$
Series LV Capacitance	$H_{V\text{-Capacitive}}$
Ground HV Capacitance	$H_{V\text{-Short}}$
Parallel Capacitance between HV and LV	$H_{V\text{-Short}}$
Ground LV Capacitance	$H_{V\text{-Capacitive}}$
Series HV inductance	$H_{V\text{-Short}}$
Series LV inductance	$H_{V\text{-Short}}$
Mutual Inductance between HV and LV	$H_{V\text{-Short}}$
Series HV Conductance	$H_{V\text{-Short}}$
Series LV Conductance	-
Ground HV Conductance	$H_{V\text{-Short}}$ & $H_{V\text{-Inductive}}$
Parallel Conductance between HV and LV	$H_{V\text{-Short}}$
Ground LV Conductance	-
Series HV Resistance	$H_{V\text{-Short}}$ ($H_{V\text{-Open}}$)
Series LV Resistance	$H_{V\text{-Short}}$ ($H_{V\text{-Inductive}}$)

Untersuchung der Bildung fester Alterungsprodukte in Transformatoren für Windenergieanlagen

M.Sc. Moritz Kuhnke

Die Integration des Transformators im Turmfuß der Windenergieanlage bietet einige Vorteile gegenüber der Installation in einem zusätzlichen Gebäude. Dadurch verringern sich die Verluste der Niederspannungsleitung vom Generator zum Transformator und es wird eine geringere Baufläche benötigt. Allerdings resultieren daraus neue Anforderungen für den Transformator. Dieser muss bei gleicher Leistung geringere Außenmaße besitzen, da die Größe der Turmöffnung der Windenergieanlage durch die Statik begrenzt wird. Daraufhin wurden Kompakttransformatoren entwickelt, welche synthetische Ester oder Silikonöle als Isolierflüssigkeit und Aramidpapier als Lagenisolierung verwenden. Diese neuen Materialien können den, durch die verringerte Kühlfläche bedingten, höheren Betriebstemperaturen standhalten. Ein Gaspolster in diesen Hermetiktransformatoren soll die Wärmeausdehnung der Isolierflüssigkeit ausgleichen. Allerdings kommt es trotzdem vermehrt zu Ausfällen mit demselben Fehlerbild. Durchgeführte DGAs zeigen dann erhöhte Werte der Gase Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4) und Ethan (C_2H_6). Diese Fehlergase lassen auf Teilentladungen schließen. Weitere Untersuchungen zeigten X-Wachs an der Oberspannungswicklung, welches vermehrt in Bereichen geringerer Kühlung gefunden wurde. Die Gefahr von X-Wachs (Bild 1) besteht darin, dass Kühlkanäle verklebt werden und es somit zu einer weiteren Überhitzung des Transformators kommt. Dies kann zum Ausfall und einem vorzeitig erforderlichen Austausch des Betriebsmittels führen.

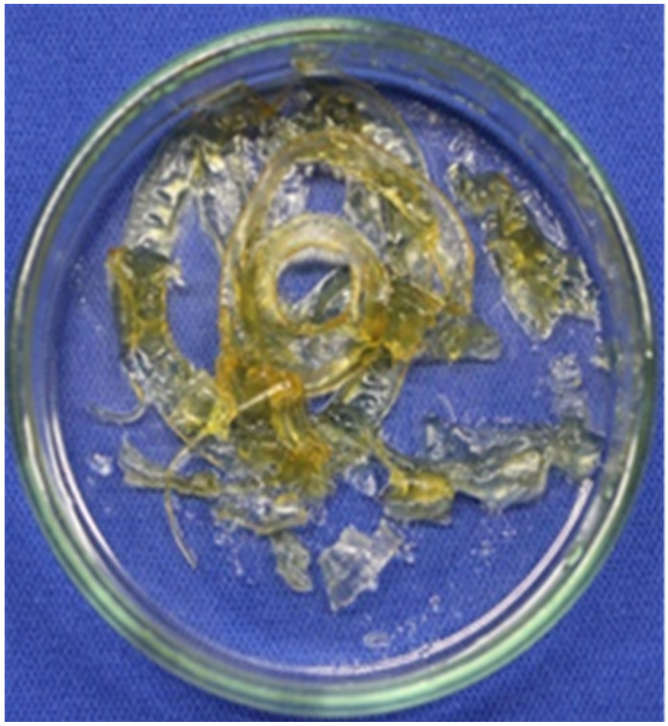


Bild 1: X-Wachs; erzeugt mit der synth. Ester bei 155 ºC in 168 h

Da die Temperatur offensichtlich Einfluss auf die X-Wachsbildung hat, stellt sich die Frage, ob durch eine höhere Temperatur größere Mengen an X-Wachs gebildet wird. Deswegen wurden im Labor Versuche mit unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten (synth. und nat. Ester, Mineralöl) bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Zudem ist es noch unbekannt, ob durch den Druck im Hermetiktransformator die X-Wachsentstehung begünstigt wird. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zur X-Wachsbildung bei einem erhöhten und einem niedrigeren Druck durchgeführt. Zusätzlich wurden Analysen gelöster Gase (DGA) durchgeführt, um Indikatoren für eine X-Wachsbildung bei einem realen Transformator zu ermitteln.

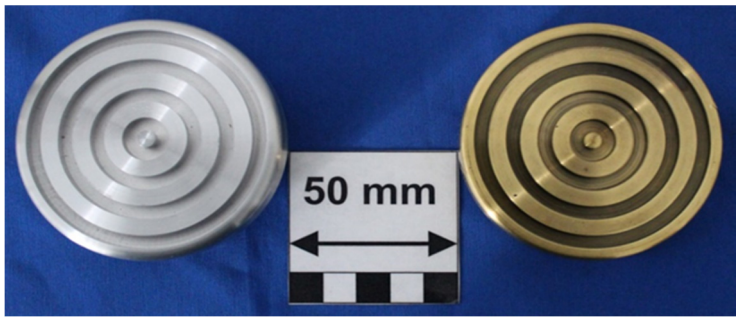


Bild 2: Elektroden aus Aluminium und Messing

Die Beanspruchung des im Labor nachgebildeten Isoliersystems eines Transformators wurde in einer geschirmten Teilentladungs-messzelle durchgeführt bei einer Belastungsdauer von 168 h.

Als Elektroden wurden 2 verschiedene Anordnungen verwendet. Zunächst wurden speziell hergestellte Plattenelektroden für die Hochspannungselektrode sowie für die Erdelektrode verwendet, die konzentrisch ausgebildete Rillen aufweisen (Bild 2). Diese stellen die Windungen einer Transformatorwicklung dar und ermöglichen somit die Ausbildung eines inhomogenes Feldes. Neben dem Messing-Elektrodenpaar wurde auch Elektroden aus Aluminium verwendet. Zwischen den Elektroden wurden verschiedene feste Isolierstoffe als Kreisscheiben eingesetzt, sodass in Kombination mit der eingesetzten Isolierflüssigkeit ein geschichtetes Dielektrikum realisiert wird. Es erfolgte zunächst die Auswahl des festen Isolierstoffes, da bei Einsatz der meisten Isoliermaterialien, wie beispielsweise einem Mischdielektrikum aus vorimprägnierten Aramidpapier, die Teilentladungsaktivität nach einiger Zeit zu einem Durchschlag führte. Verwendet wurden vorimprägniertes Aramidpapier der Firma *Nomex Typ 414*, zwei 1 mm starke PTFE Scheiben, eine 2 mm dicke PTFE Scheibe und eine vorimprägnierte *Nomex* Gewebescheibe. Die besten Ergebnisse wurden mit zwei 1 mm starken PTFE Scheiben erzielt.

Des Weiteren wurde als Elektrodenanordnung eine Mini-Spule entwickelt, welche die Geometrie einer Hochspannungswicklung genauer nachbildet. Die Erdelektrode bildet ein Aluminiumzylinder, um den zweilagig Aramidpapier gewickelt wird. Als Hochspannungselektrode wird ein Backlackdraht straff um die Aluminium-Aramidpapier-Anordnung gewickelt. Der Backlackdraht besitzt eine dritte Lackschicht, welche im Ofen bei 200 ºC anschmilzt und sich formstabil verbackt. Somit wird eine größere mechanische Festigkeit erreicht. Um das Hochspannungspotential am Prüfgefäßdeckel zu kontaktieren, wurde eine Spirale nach oben gewickelt und der Lack von der Kontaktierungsstelle entfernt.

Als Messsystem wurde das ICMsystem gewählt mit einem Speicherrhythmus von 4 Stunden. Somit entstehen 42 Speicherpunkte bei denen das PRPD-Pattern, die Anzahl der Teilentladungen, der Effektivwert der anliegenden Wechselspannung und ein fiktiver Strom (NQS Value) gespeichert werden. Daraus konnte ein Messprotokoll angelegt werden, welches eine Darstellung der Messergebnisse in einem Diagramm ermöglichte. In Bild 3 ist die Messung mit einem synth. Ester bei 60 ºC und einem Druck von 800 mbar dargestellt. Auf der linken vertikalen Achse ist der Effektivwert der anliegenden Wechselspannung in kV und der NQS Value in µA dargestellt. Auf der rechten vertikalen Achse sind die Anzahl der Teilentladungen pro Stunde abgebildet. Alle Werte wurden über die Belastungsdauer von 168 h aufgetragen. Zusätzlich wurden durch die Summierung der einzelnen Energien in den 4 Stunden Abschnitten die Gesamtenergie der Teilentladungen und aus dem NQS-Value die mittlere scheinbare Ladung bestimmt.

In dem Beispiel aus Bild 3 wurden bei einer mittleren scheinbaren Ladung von Q_{mittel} = 1,312 nC und einer Gesamtenergie von E = 18,313 Wh insgesamt 0,328 g X-Wachs erzeugt. Somit zeigt sich, dass bei einem geringeren Druck die X-Wachsbildung bei weit geringeren Temperaturen einsetzt.

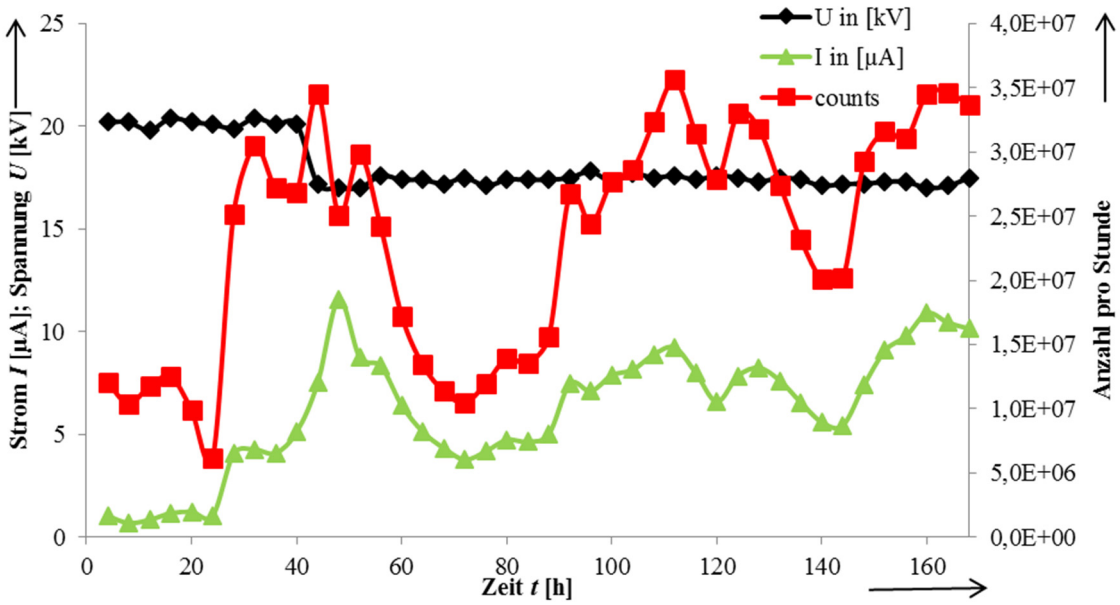


Bild 3: Messung mit synth. Ester bei 60 ºC und 800 mbar

In dieser Arbeit wurde zusammenfassend festgestellt, dass bei Temperaturen über 130°C keine signifikante Steigerung der X-Wachsbildung stattfindet. Des Weiteren setzt die X-Wachsbildung bei einem Druck von 800 mbar bei weit geringeren Temperaturen als bisher angenommen ein. Bei einem Druck von 1200 mbar konnten keine dauerhaften Teilentladungen generiert werden, da die TE-Einsetzspannung sehr hoch war und es nur zu wenigen Teilentladungen kam. Durch den höheren Druck steigt nach dem Henry‘schen Gesetz auch die mögliche absorbierbare Gasmenge in der Isolierflüssigkeit an. Somit bilden die durch Teilentladungen entstandenen Spaltgase sich nicht als Mikrobläschen in der Isolierflüssigkeit aus und der starke Anstieg der Teilentladungen bleibt aus. Aus diesem Grund konnte die Spannung nicht verringert werden und die hohe anliegende Wechselspannung führte zu einem vorzeitigen Durchschlag und damit zum Versuchsabbruch. Bei einem nat. Ester kam es mit Erreichen der TE-Einsetzspannung schnell zu einem deutlichen Anstieg der Teilentladungen, jedoch nahmen diese nach kurzer Zeit wieder ab. Erneutes Erhöhen der Spannung zeigte den gleichen Effekt, somit konnten keine dauerhaften Teilentladungen generiert werden. Bei einem Mineralöl wurde eine X-Wachsbildung bei einer Temperatur von 130 ºC nachgewiesen. Da dauerhafte Teilentladungen ein instabiler Zustand ist, kam es bei der verwendeten Versuchsanordnung häufig zu einem vollkommenen Durchschlag der festen Isolierung. Die besten Ergebnisse wurden mit zwei 1 mm starken PTFE Scheiben erzielt. Das Verhalten der vorimprägnierten *Nomex* Gewebescheibe hinsichtlich Teilentladungen war auch gut, jedoch wurde in diesem Fall kein X-Wachs gebildet.

Durchgeführte Analysen der gelösten Gase (DGA) und der Bildung des Verhältnisses von Wasserstoff zu Methan haben vorherige Ergebnisse bestätigt. Dabei ist auffällig, dass das Verhältnis bei einer Messung mit X-Wachs deutlich höher ist als bei einer Messung, bei der kein X-Wachs erzeugt wurde.

Korrelationsanalyse ausgewählter Isolierölparameter von Leistungstransformatoren

M.Sc. Sebastian Schreiter

Die Untersuchung der Isolieröleigenschaften bzw. der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Isolieröls gehört zu den grundlegenden Methoden der Zustandsbewertung von Leistungstransformatoren, denn damit wird untersucht, ob das Isolieröl den unterschiedlichen Anforderungen standhalten kann. In dieser vorgestellten Arbeit wird analysiert, ob Zusammenhänge zwischen den Isolierölkenngrößen an realen Transformatoren auftreten und ob damit ggf. einzelne Isolierölparameter andere Kenngrößen vorhersagen. Dabei wurde festgestellt, dass keine signifikanten Zusammenhänge nachweisbar sind, also auch nicht auf die Messung einzelner Parameter verzichtet werden kann.

Die Norm IEC 60422 nennt eine Reihe von Untersuchungen, welche durchgeführt werden können bzw. müssen, um die verbleibende Qualität des Isolieröls zu untersuchen. Dabei gibt es solche, welche die Frage beantworten sollen, in wie weit das Isolieröl den dielektrischen Anforderungen noch standhalten kann, wobei hier vor allem die Durchschlagspannung zu nennen ist. Andere Parameter dienen eher dazu, einen Alterungszustand anzeigen. Hier sind u.a. der dielektrische Verlustfaktor, die Neutralisationszahl oder die Grenzflächenspannung zu nennen. Dabei gibt die Norm unterschiedliche Alterungsmechanismen als Ursache für Veränderungen bei diesen Kenngrößen an.

Um den Zustand des Öls zu bewerten, schlägt die Norm Grenzwerte vor, welche u.a. von der Nennspannung der Betriebsmittel abhängen. Anhand dieser Grenzwerte können die Messwerte dann in die Bereiche *gut*, *ausreichend* und *ungenügend* eingeteilt werden.

Für diese Untersuchung standen Ergebnisse der Messungen von Isolierölkennwerten von Transformatoren unterschiedlicher Spannungs- und Leistungsklassen sowie unterschiedlicher Anwendungen zur Verfügung, welche in einem Zeitraum von vielen Jahren gewonnen wurden.

Um zu untersuchen, ob unterschiedliche Isolierölparameter im Zusammenhang stehen, beziehungsweise einander anzeigen, erweist sich eine Korrelation als geeignet: Mit Hilfe der Korrelationsrechnung werden die Werte von jeweils zwei Parametern über einen großen Datensatz in Abhängigkeit voneinander betrachtet.

Das Ergebnis, der Korrelationskoeffizient, kann dabei Werte zwischen minus eins und eins annehmen, wobei Null für keine Korrelation (kein Zusammenhang zwischen den beiden Parametern), Eins für einen idealen positiven Zusammenhang (mit dem Steigen des einen Parameters steigt im gleichen Maße auch der andere Parameter) und minus Eins für einen idealen negativen Zusammenhang (mit dem Steigen des einen Parameters sinkt im gleichen Maße auch der andere Parameter) steht.

Wichtig ist dabei, dass mit der Korrelation jedoch keine Aussage über die Ursache eines Zusammenhangs getroffen werden kann. Ein (positiver) Zusammenhang zwischen zwei Isolieröleigenschaften würde also bedeuten, dass die Kenntnis der einen Eigenschaft die Kenntnis der anderen Größe vorhersagen kann [4].

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Korrelationskoeffizienten beschreiben jeweils den Zusammenhang zwischen den beiden Isolierölkennwerten, die zu Beginn der jeweiligen Zeile und Spalte stehen. Zur besseren Einordnung und Darstellung sind die Ergebnisse in Anlehnung an [5] in folgende Bereiche eingeteilt und farblich hervorgehoben:

r < 0,35 kein Zusammenhang (nicht farblich gekennzeichnet)
r ±0,35 bis ±0,5 weniger starker Zusammenhang (gelb)
r ± 0,5 bis ± 0,7 mittlerer Zusammenhang (rot)
r > ±0,7: starker Zusammenhang (violett)

Da in der Tabelle jedes Paar zweimal vorkommen würde, und der Korrelationskoeffizient einer Eigenschaft mit sich selbst immer 1 wäre, sind die Felder der oberen Hälfte einschließlich der Hauptdiagonalen leer.

Aus Tabelle 1 (linke Seite) geht hervor, dass insbesondere die Durchschlagspannung (DS) mit keinem anderen Parameter in Zusammenhang steht, diese also nicht durch einen anderen angezeigt wird. Aber auch bei den Isolierölkennwerten, welche Alterungserscheinungen anzeigen, findet sich nur zwischen der Grenzflächenspannung und der Farbzahl bzw. der Neutralisationszahl (NZ) ein starker oder mittlerer Zusammenhang. Lediglich zwischen dem Wassergehalt und der Durchschlagspannung aber dem dielektrischen Verlustfaktor, der Neutralisationszahl und der Grenzflächenspannung besteht ein weniger starker Zusammenhang.

Tabelle 1: Ergebnisse der Korrelationsanalyse aller betrachteten Proben.

	Farbe	DS	TanD	NZ	Grenzfl	Wasser
Farbe						
DS	-0,199					
TanD	0,204	-0,080				
NZ	0,402	-0,157	0,284			
Grenzfl	-0,721	0,208	-0,250	-0,585		
Wasser	0,347	-0,450	0,386	0,498	-0,469	
Alter	0,344	-0,063	0,197	0,091	-0,483	0,332

	Farbe	DS	TanD	NZ	Grenzfl	Wasser	Alter
Farbe (erhöht)		-0,082	0,080	0,241	-0,098	0,281	0,028
DS (erhöht)	-0,050		-0,041	-0,077	0,130	-0,279	-0,073
TanD (erhöht)	0,035	-0,035		0,086	-0,337	0,457	0,162
NZ (erhöht)	0,119	-0,099	0,154		-0,366	0,415	-0,003
Grenzfl (erhöht)	-0,530	0,131	-0,296	-0,634		-0,410	-0,210
Wasser (erhöht)	0,143	-0,228	0,258	0,329	-0,257		0,216

Da in der diskutierten Betrachtung alle vorhanden Proben einbezogen wurden, könnte eingewandt werden, dass geringe Zusammenhänge aus den häufigen „unauffälligen“ Parametern resultieren könnten. Deshalb wurden in einem zweiten Schritt alle Ergebnisse in die Bereiche gut, ausreichend und ungenügend in Anlehnung an die Norm IEC 60422 eingeteilt. Danach wurde die Korrelationsrechnung für jede Eigenschaft wiederholt, wobei nur die Ergebnisse mit einbezogen wurden, welche für den jeweiligen Parameter als ausreichend oder ungenügend einzustufen waren.

Das Ergebnis ist in Tabelle 1 rechts zusammengefasst und muss wie folgt verstanden werden: In den Zeilen stehen die Korrelationskoeffizienten, welche die Eigenschaft der Zeile (Bsp.: 1. Zeile: Farbe) mit den jeweiligen der Spalten aufweisen. Die Tabelle muss also zeilenweise gelesen werden. So sind in der ersten Zeile die Korrelationskoeffizienten zwischen der Farbzahl und den anderen Isolierölkennwerten beschrieben, wenn die Farbzahl erhöht ist, in der zweiten Zeile die Korrelationskoeffizienten zwischen der Durchschlagspannung und den anderen Kennwerten, wenn die Durchschlagspannung vermindert ist usw. Da in die jeweiligen Korrelationsrechnungen z.B.: zwischen Farbe (ausreichend oder ungenügend) und Durchschlag andere Wertepaare einbezogen sein können als in der Korrelationsrechnung zwischen Durchschlagspannung (ausreichend oder ungenügend) und Farbzahl, sind beide Korrelationskoeffizienten aufgeführt und müssen nicht gleich sein.

Die Tabelle kann also so gelesen werden, dass hohe Korrelationskoeffizienten bedeuten, dass der Parameter im Kopf der Spalte den Parameter zu Beginn der Zeile anzeigt.

Da das Alter des Betriebsmittels bei der Probennahme nicht schlecht sein kann, es aber in die Betrachtung mit einbezogen werden sollte, zeigt die letzte Spalte den Zusammenhang zwischen den erhöhten Isolierölparametern und dem Alter. Dadurch entsteht eine Asymmetrie in der Tabelle.

Die Einteilung und Hervorhebung der Korrelationskoeffizienten erfolgte analog zur bereits dargestellten Rechnung.

Das Ergebnis bestätigt den bereits diskutierten Befund: So geht aus der Tabelle hervor, dass nur die Grenzflächenspannung in einem mittelstarken Zusammenhang mit der Farbzahl bzw. der Neutralisationszahl steht. Insbesondere die Durchschlagspannung wird nicht durch andere Parameter angezeigt - auch nicht durch den Wassergehalt, wobei dieser natürlich die Festigkeit der Flüssigkeit beeinflusst, aber eben nicht allein. Trotzdem zeigt der Wassergehalt andere Parameter in einem leichten Zusammenhang mit an, andersherum wird der Wassergehalt nicht durch andere Parameter angezeigt.

Auch eine Veränderung des Isolierkennwertes allein mit dem Alter konnte anhand der Messungen nicht nachgewiesen werden.

Eine Erklärung für die diskutierten Befunde kann sein, dass die Durchschlagspannung als Parameter das verbleibende Isoliervermögen der Isolierflüssigkeit abbildet, welche aber offensichtlich nicht in einem Zusammenhang mit nur einem Alterungsparametern steht, sondern von vielen Kenngrößen abhängt.

Auch die Alterungsparameter zielen jeweils auf unterschiedliche Eigenschaften ab, deshalb zeigen diese einander nicht an.

Für die umfassende Bewertung eines Isolieröls sollte demnach nicht auf die Erfassung einzelner Parameter verzichtet werden. Außerdem erscheint es nicht sinnvoll, das Altern eines Isolieröls insbesondere nicht durch andere Parameter vorherzusagen.

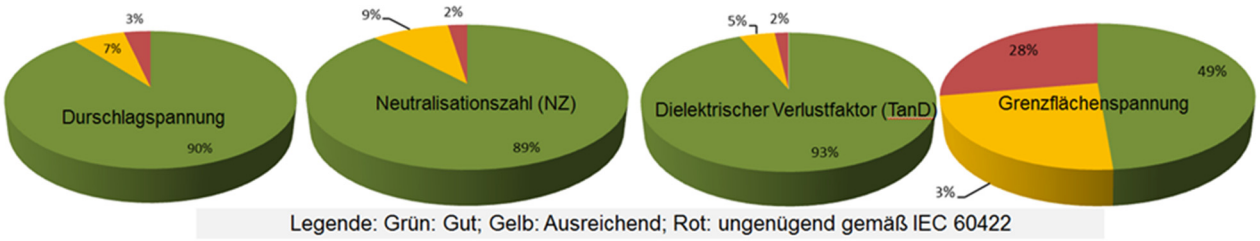


Bild 1: Graphische Darstellung der Verteilung der Isolierölkennwerte

Darüber hinaus wurde der Zustand des Isolieröls anhand dessen Isolierölkennwerten untersucht und die Verteilung der Ergebnisse der in der Norm genannten Bereiche gut, ausreichend und ungenügend in Bild 1 dargestellt. Daraus geht hervor, dass das Isolieröl nur in wenigen Fällen die Anforderungen der Norm nicht erfüllt und vielmehr in den meisten Fällen zu über 90% Werte aufweisen, die als gut einzustufen sind, während 10% der Transformatoren Werte aufweisen, die auf Einschränkungen oder gar bedenkliche Werte hinweisen. Anders ausgedrückt kann aber auch argumentiert werden, dass in ca. 10% der Fälle das Isolieröl nicht mehr vollständig den Forderungen der Norm entspricht.

Mit dieser Übersicht können Betreiber von Leistungstransformatoren in der Lage sein, anhand dieser exemplarischen Ergebnisse die Untersuchungsergebnisse der eigenen Betriebsmittel nicht nur anhand der Grenzwerte der Norm einzuordnen, sondern diese auch im Kontext anderer Transformatoren - also der hier betrachteten Flotte - zu beurteilen.

Analyse und Weiterentwicklung von Asset-Datenkonzepten und Monitoringsystemen von Systemen zur Blindleistungsbereitstellung im Übertragungsnetz

M.Sc. Henning Schnittker

Die Energiewende bringt zunehmend volatile Leistungsflüsse innerhalb der europäischen Stromnetze mit sich. Dieses erfordert eine steigende Anzahl regelungstechnischer Eingriffe seitens der Übertragungsnetzbetreiber. Eine wichtige Stellgröße ist hierbei die Anpassung der Blindleistung, weshalb in zunehmenden Maß Systeme zur Blindleistungsbereitstellung in den Netzen installiert werden. Die Instandhaltung dieser Systeme als Teil des Asset Managements, wird durch Informationssysteme unterstützt, welche die entstehenden Daten organisieren. Die Effizienz der Informationssysteme hängt entscheidend von der Ausgestaltung der zugrunde liegenden Datenstrukturen ab. Vor diesem Hintergrund wurden für drei in Praxis verwendete Systeme zur Blindleistungsbereitstellung individuelle Datenkonzepte für die Einbettung in ein ERP-System (Enterprise Resource Planning) erstellt. Die ausgewählten Systeme sind MSCDN-Anlagen (Mechanically Switched Capacitor with Damping Network), rotierenden Phasenschieber und STATCOM-Anlagen (Static Synchronous Compensator).

Bild 1: MSCDN-Anlage

Die Datenstruktur bildet die Komponenten und Betriebsmittel in hierarchischer Struktur ab. Dabei lassen sich zwei Hauptobjektarten unterscheiden. Das *Betriebsmittel* ist ein in sich geschlossenes technisches Objekt, dem technische Daten und Eigenschaften direkt zugeordnet sind. Dem gegenüber steht der *technische Platz*. Im Allgemeinen ein ortsfestes Objekt, das eine Vielzahl von Objekten enthält. Einzelne Programme des ERP-Systems greifen nun auf diese Objekte zu. Die Datenstruktur sollte dabei minimale Dokumentationstiefe aufweisen, wodurch der Aufwand von Pflege und Erstellung der Daten geringgehalten, Data-Mining vermieden und die Implementierung weiterer Programme vereinfacht wird. Gleichzeitig muss aber die Funktionalität der Programme gewährleistet werden. Da jedes Programm die gleichen Anforderungen an die verschiedenen Systeme zur Blindleistungsbereitstellung stellt, konnte ein identisches Vorgehensmuster zur Erstellung der jeweiligen Datenkonzepte abgeleitet werden:

- Identifizierung der Spannungsebenen
- Ermittlung der freischaltbaren Komponenten
- Wahl der Dokumentationstiefe der Zustands- und Schadensmeldungen
- Zusammenfassung von Bauteilen mit gleichen Wartungszyklen
- Berücksichtigung speziell benötigter Auswertungen

Darüber hinaus werden die jeweiligen Monitoringsysteme der verschiedenen Anlagen betrachtet. Diese Systeme haben besonders an Bedeutung gewonnen, da vermehrt nach der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie verfahren wird. Nach dieser Strategie wird mit Hilfe von Monitoring- und Diagnoseverfahren versucht den genauen Zustand eines Betriebsmittels zu bestimmen. Hieraus werden geeignete Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet, um neben der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit den Instandhaltungsaufwand zu senken. In diesem Zuge wächst allerdings die Menge der Daten, was die Relevanz effizienter Datenstrukturen noch verstärkt.

Einer Sicherstellung der Spannungsqualität (Power Quality) kommt ebenfalls eine wachsende Bedeutung zu. Insbesondere leistungselektronische Bauteile wie HGÜ-Umrichter verursachen Oberschwingungen, die auch das Übertragungsnetz betreffen. Die Spannungsqualität kann mit sogenannten Power Quality Interfaces aus den Messdaten der Strom- und Stromspannungswandler der Systeme zur Blindleistungsbereitstellung bestimmt werden. Die Power Quality Interfaces zeichnen in Oszilloskop-Recordern die Strom- und Spannungswerte auf. Aus diesen Werten können direkt weitere Parameter ausgelesen werden. Hierzu zählen u.a. Leistung, Frequenz, harmonische und zwischen-harmonische Schwingungsanteile, Flicker oder Spannungsunsymmetrien.

In erster Linie werden durch die Auswertung der Daten die Ursachen von Störungen und Qualitätsschwankungen ermittelt, um Rückschlüsse zur Dimensionierung und den optimalen Betrieb zu ziehen. Die Daten können aber auch Auskunft über den aktuellen Zustand des Systems zur Blindleistungsbereitstellung geben. So können Betriebszeiten oder die Anzahl von Zuschaltungen der Systeme Hinweise auf die Belastung und somit die Alterung geben. Weiter kann auch eine Änderung des Stromes, die nicht zu einem Ansprechen der Schutztechnik führt, ein Anzeichen für einen kleineren Defekt sein. Dieser schränkt den Betrieb zwar nicht ein, führt allerdings zu einer Verringerung der Lebensdauer. Eine Optimierungsmöglichkeit besteht folglich in einer vermehrten Nutzung der gewonnenen Monitoring-Daten – also einer Hinwendung zur zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie. Die Instandhaltungsmaßnahmen können dann den Belastungen angepasst werden, wodurch sich der Instandhaltungsaufwand reduziert, ohne das Ausfallrisiko zu steigern. Hierzu müssen die Informationen der Auswertung der gewonnen Daten in zunehmendem Maße Einzug in die Instandhaltungspläne finden.

Die Datenkonzepte und Monitoringsysteme bilden also die Grundlage für eine effiziente Instandhaltung, die angesichts einer steigenden Anzahl von Systemen zur Blindleistungsbereitstellung immer bedeutender wird. Weiterführend muss eine allgemeine Zustandsbestimmung der Systeme zur Blindleistungsbereitstellung vorgenommen werden. Aus einer Gesamtbewertung ist dann abzuleiten, an welchem Zeitpunkt eine Abschaltung oder größere Wartung vorgenommen werden sollte. Die Entwicklung und Optimierung geeigneter Asset-Strategien zur Zustandsbewertung, woraus sich eine betriebswirtschaftlich optimale Instandhaltungstätigkeit ergibt, ist ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt im Bereich des Asset Managements des Schering-Instituts.

Simulation von verschiedenen Fehlerszenarien an langen HVDC-Kabelstrecken

M.Sc. Younes Norouzi

Im Zuge der Energiewende in Deutschland sollen im Rahmen des Projektes *SuedLink* mehrere vier HVDC-Verbindungen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) von Schleswig-Holstein nach Bayern errichtet werden. Diese Verbindungen werden größtenteils als Kabel realisiert. Da diese Kabel im Erdboden verlegt werden, sind Fehler nicht ohne weiteres erkennbar. Um auftretende Fehler zu erkennen und die Betriebssicherheit der Kabelstrecken sicherstellen zu können, müssen verschiedene Fehlerortungsverfahren eingesetzt werden. Für Drehstrom-Kabelanlagen werden diese Fehlerortungsverfahren bereits seit einigen Jahrzehnten genutzt und haben sich etabliert.

Um einen ersten theoretischen Rahmen zur Ortung und Klassifizierung von Fehlern zu schaffen, der auch für Kabellängen verwendbar ist, wie diese im Projekt *SuedLink* zum Einsatz kommen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Simulation zweier Verfahren zur Fehlerortung und Fehlerklassifizierung sowie deren Eignung bei langen Kabelstrecken. Es werden dabei zwei Methoden simuliert und untersucht. Zum einen liegt der Fokus der Arbeit auf einem Verfahren, welches das Kabel im Zeitbereich analysiert und so auf den Fehlerort und die Fehlerart schließen lässt. Zum anderen wird eine Methode simuliert, die die Erkennung von Fehlern im Kabel durch eine Frequenzbereichsanalyse ermöglicht. Beide Verfahren wurden mit der Software *Matlab* simuliert.

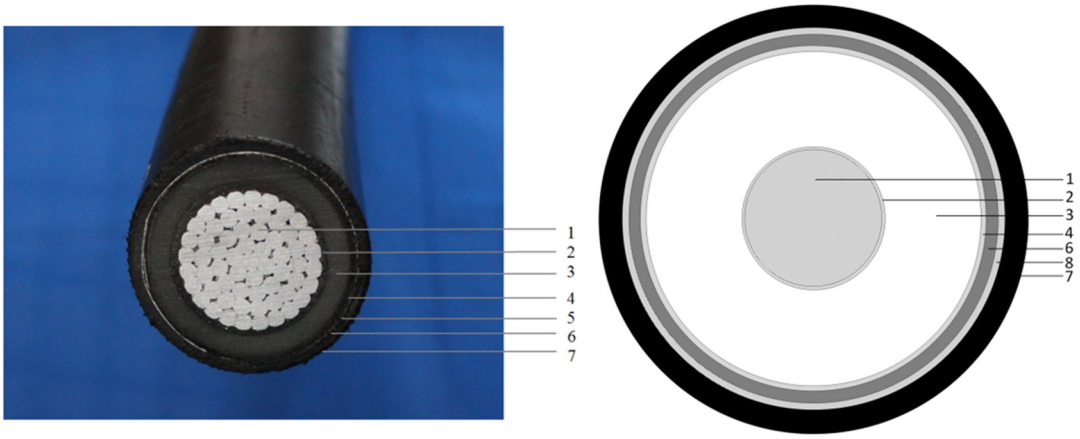


Bild 1: Schnitt durch den realen Prüfling (links) und schematisch dargestellter Schnitt des Kabelprüflings (rechts)

Das Kabel, an denen die Messungen für einen Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen durchgeführt wurden, ist ein kunststoffisoliertes Mittelspannungskabel der Firma Nexans. Der Kabelprüfling hat eine Länge von 78,1 m und verfügt über eine Isolierung aus vernetztem Polyethylen. Bild 1 zeigt den realen Prüfling (links) und eine schematische Darstellung des Prüflings mit seinen Ausbauelementen (rechts). Der Kabelprüfling besteht aus einem strangförmigen Aluminiumleiter (1), der inneren Leitschicht (2), einer Isolierung aus vernetztem Polyethylen (3), der äußeren Leitschicht (4), einem Quellband (5), der elektrischen Schirmung aus Aluminium (6) und einem Mantel aus Polyethylen. Aufgrund der Tatsache, dass beide Fehlerortungsverfahren mit Signalfrequenzen mit bis zu 20 MHz arbeiten, muss die Frequenzabhängigkeit aller Aufbauelemente bei der Berechnung der

Leitungsbeläge berücksichtigt werden. Für die Widerstands- und Induktivitätsbeläge des Innen- und Außenleiters (Schirm) des Kabels geschieht dies durch eine Besselfunktion. Der Kapazitäts- und Leitwertbelag der Isolierung sind aufgrund der konstanten relativen Permittivität von Polyethylen über dem zu untersuchenden Frequenzbereich konstant. Der Kapazitätsbelag der Leitschichten ist aufgrund der sich verändernden Permittivität der Leitschichten frequenzabhängig. Dieser wird durch mehrere Simulationsdurchläufe ermittelt und ist in Bild 2 dargestellt.

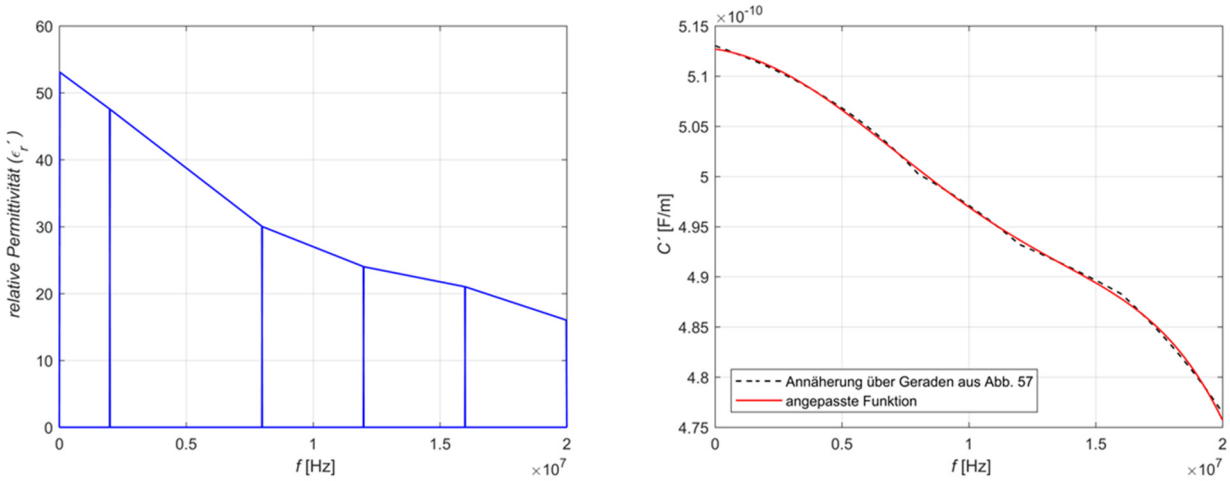


Bild 2: Ermittelter Verlauf der relativen Permittivität der Leitschichten (links) und der daraus resultierende frequenzabhängige Kapazitätsbelag (rechts)

Mit den beschriebenen Zusammenhängen wird zunächst ein Simulationsmodell entwickelt, welches das Kabel im Frequenzbereich analysiert (Frequency Domain Analysis). Dabei werden Sinussignale mit unterschiedlichen Frequenzen in das Kabel eingespeist. Hierbei werden zu jeder Frequenz Spannung und Strom gemessen, wodurch sich die komplexe Eingangsimpedanz des Kabels berechnen lässt. Diese komplexe Eingangsimpedanz ist abhängig von der Länge des Kabels, sowie von dessen Materialeigenschaften. Verändern sich die Länge, beziehungswiese die Materialeigenschaften, beispielsweise durch einen Fehler oder Alterung im Kabel, so verändern sich auch die charakteristischen Resonanzfrequenzen der Eingangsimpedanz. Nach der Legung des Kabels kann ein Referenzbild angefertigt werden, welche kann mit späteren Messungen zu vergleichen ist, um so auf Fehler oder Alterungsmerkmale im Kabel schließen zu können. Das entwickelte Simulationsmodell kann bis auf eine maximale relative Abweichung von - 0,34 %, bezogen auf die Frequenz, an die Messung angenähert werden.

Des Weiteren wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches das Kabel im Zeitbereich analysiert. Bei der sogenannten TDR-Methode (Time-Domain-Reflectometry) wird ein Spannungsimpuls in das Kabel eingespeist. Dieser breitet sich als elektromagnetische Welle auf dem Kabel aus und wird bei Veränderung der Materialeigenschaften des Kabels oder im Fehlerfall verschiedenartig reflektiert. Durch die Art wie der Impuls reflektiert wird und an welcher Stelle im Kabel die Reflexion auftritt, kann somit auf die Fehlerart geschlossen werden. Das Simulationsmodell kann bis auf eine absolute Abweichung von 0,18 m, bezogen auf die Kabellänge, an die Messung angenähert werden.

Um die Grenzen der beiden Fehlerortungsverfahren, bezogen auf die Kabellänge, zu ermitteln, werden die Simulationsmodelle sukzessive von 1 km bis auf 250 km erweitert. Hierbei wird zusätzlich zum gezeigten Mittelspannungskabel ein Kabel simuliert, welches für HVDC-Anwendungen entwickelt wurde. Dieses verfügt über einen größeren Leiterquerschnitt, sowie über einen Innen- und Außenleiter aus Kupfer. Die Grenzen der Simulationsmodelle sind in Tabelle 1 dargestellt. Das Mittelspannungskabel ist mit *MS* und das Hochspannungskabel mit *HS* gekennzeichnet. Das Mittelspannungskabel ist demnach bis zu einer Länge von 25 km (FDA und TDR) und das Hochspannungskabel bis zu einer Länge von 100 km (TDR), beziehungsweise 250 km (FDA) analysierbar.

Tabelle 1: Grenzen der Simulationsmodelle bezogen auf die Kabellänge

	1 km		10 km		25 km		50 km		100 km		250 km	
	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MS	HS
FDA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	✓	x	✓
TDR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	✓	x	x

Die Empfindlichkeit der beiden Verfahren gegenüber verschiedenen Fehlern wurde weiter untersucht, indem an einer Kabelstrecke von 100 km Länge unterschiedliche Fehlerszenarien simuliert wurden. Dabei wurde zuerst ein Fehlerwiderstand zwischen Innen- und Außenleiter (Schirm) eingefügt, um so einen Leiter-Schirm-Fehler zu simulieren. Bei diesem Fehlerszenario werden einerseits der Fehlerwiderstand und anderseits der Fehlerort variiert. In Bild 3 ist dargestellt wie sich der Verlauf der Eingangsimpedanz bei Variation des Fehlerwiderstandes bei einer Fehlerposition von 50 km und Fehlerwiderständen von 1 mΩ bis 25 Ω verhält. Hierbei kann für die FDA-Simulation gezeigt werden, dass eine Unterscheidung von Fehlerwiderständen, die unterhalb der Wellenimpedanz des Kabels und solchen, die darüber liegen, möglich ist. Bei Variation des Fehlerortes lässt sich für die FDA-Simulation zeigen, dass sich durch die Anzahl der Resonanzstellen (bei $R_{\text{Fehler}} < Z_{\text{w}}$), beziehungsweise deren Maxima (bei $R_{\text{Fehler}} > Z_{\text{w}}$) auf den Fehlerort schließen lässt.

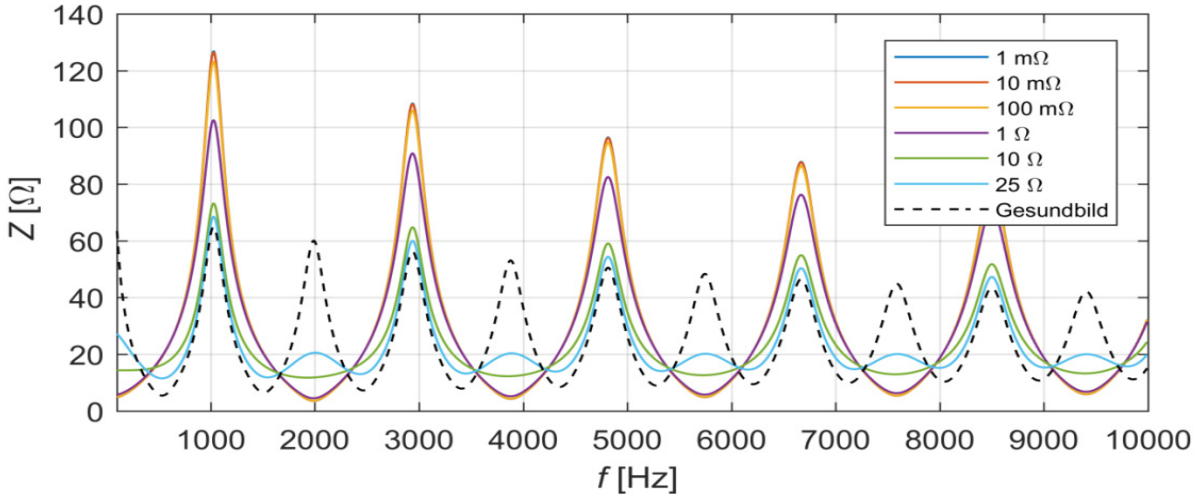


Bild 3: Verlauf der Eingangsimpedanz bei einem 100 km-Kabel mit Fehlerwiderständen zwischen 1 mΩ und 25 Ω, wobei der Fehlerort bei 50 % der Kabelstrecke liegt

Bild 4 zeigt das TDR-Simulationsergebnis für einen Fehlerwiderstand von 10 mΩ zwischen Leiter und Schirm bei Variation des Fehlerortes in 20 % -Schritten. Hierbei kann durch den Ort der Reflexion und deren Verhalten auf die Fehlerart und die Fehlerentfernung geschlossen werden.

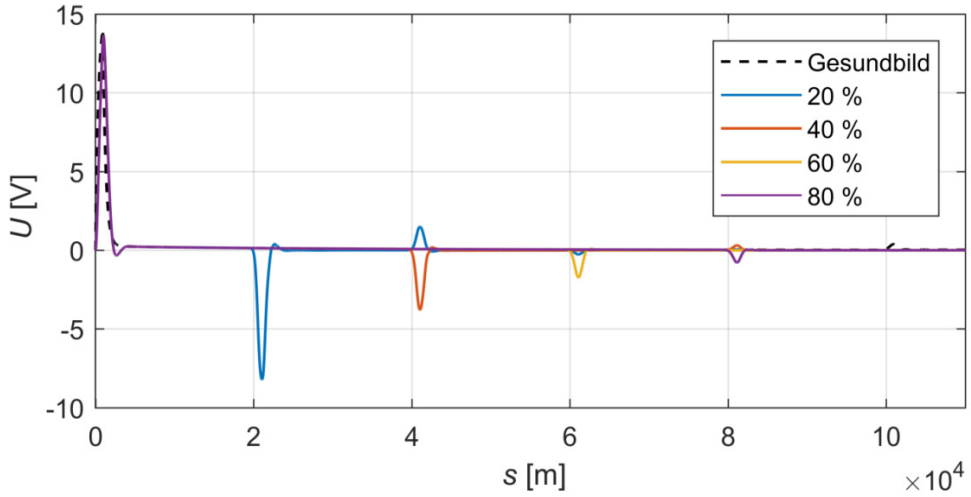


Bild 4: Verläufe der reflektierten Spannung bei Variation des Fehlerortes in 20 %-Schritten

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich eine Veränderung des Kapazitätsbelags der Isolierung auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Eine solche Veränderung kann beispielsweise durch eine mechanische Beschädigung der Isolierung hervorgerufen werden. Um die Empfindlichkeit der Verfahren gegenüber einem solchen Fehler zu erforschen, wurde beispielweise die Länge, auf der die Änderung auftritt, variiert. Ferner soll untersucht werden, wie empfindlich die Fehlerortungsmethoden auf eine Temperaturerhöhung im Innenleiter des Kabels reagieren. Dabei zeigen erste Ergebnisse, dass beide Verfahren empfindlicher gegenüber Leiter-Schirm-Fehlern sind, als auf Fehler, die durch eine Beschädigung der Isolierung oder eine Temperaturerhöhung im Leiter entstehen. Weitere Untersuchungen werden durchgeführt um die Empfindlichkeit der Ortungsverfahren zu erhöhen, indem diese Verfahren mit anderen Methoden, welche beispielsweise Schirmströme an verschiedenen Stellen erfassen, kombiniert werden.

Untersuchung der Schirmströme in extrudierten Kabeln bei langen HVAC/HVDC Kabelstrecken zur Fehlerortung

M.Sc. Younes Norouzi

Die Energiewirtschaft steht in der heutigen Zeit vor einer gravierenden Umstrukturierung. Mit dem Ziel der Bundesregierung bis 2050 die Stromerzeugung von heutigen ca. 35% auf 80 % erneuerbarer Energiequellen sicherzustellen, steht eine Änderung der Erzeugerlandschaft bevor. Dies bedeutet zugleich, dass die Stromerzeugung nicht mehr dort erfolgt, wo die elektrische Energie benötigt wird. Um die Energie vom Ort der Erzeugung zu den Verbrauchern zu bringen, befinden sich derzeit mehrere Projekte der Übertragungsnetzbetreiber in Planung. Beispielsweise ist hier das Projekt SüdLink zu nennen. Die sich im Norden Deutschlands befindlichen Windparks sollen dabei über Hochspannungsgleichstromübertragungs (HGÜ)-Leitungen mit dem Süden Deutschlands verbunden werden. Durch die geringe Akzeptanz vom Bau neuer Freileitungen und dem Beschluss der Bundesregierung im Jahr 2015 soll das Projekt primär durch die Verlegung von Erdkabeln realisiert werden. SüdLink gilt gleichzeitig als Pilotprojekt, um Erfahrungen mit langen Kabelstrecken zu sammeln, da bei solch langen Kabeln diverse Fehler auftreten können, welche dann möglichst genau lokalisiert werden müssen.

In diesem Zuge wurden in einem Forschungsprojekt zur Fehlerortlokalisierung in Kooperation mit dem Kabelhersteller Nexans Deutschland GmbH die Schirmströme an einem einadrigen, VPE-isolierten Mittelspannungskabel untersucht. Der Projektpartner stellte dazu drei gleich lange Kabel von jeweils 75 m Länge zur Verfügung. Der Kabelquerschnitt sowie die Anordnung der einzelen Schichten ist in Abbildung 1 zu sehen. Die drei Kabel wurden insoweit präpariert und mit einander verbunden, sodass eine Versuchsstrecke von insgesamt 225 m entstand, bei der entsprechend an den zwei Verbindungsstellen sowie am Kabelende ein reproduzierbares zuschalten eines Fehlers mit unterschiedlichen Fehlerwiderständen ermöglicht wurde.

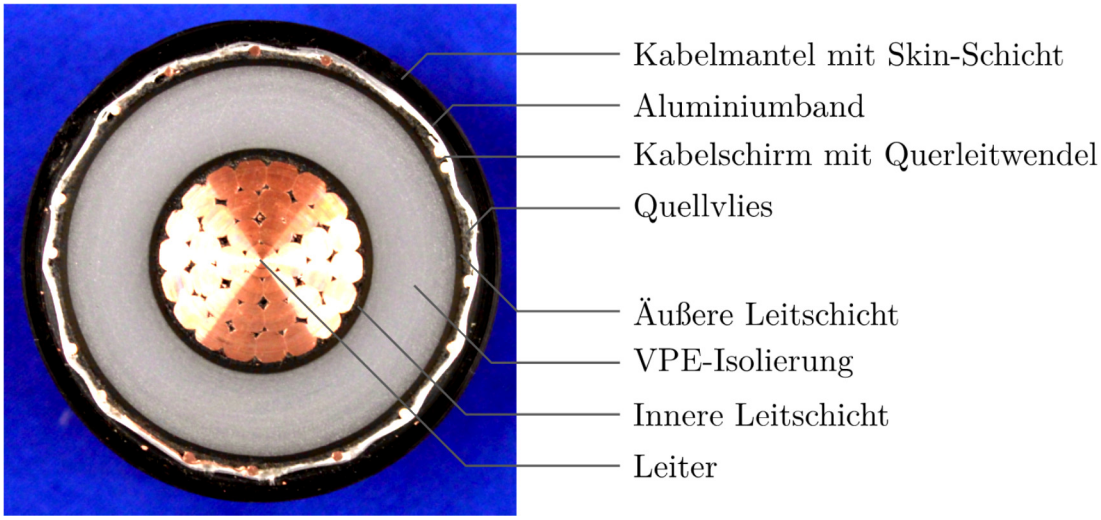


Bild 1: Kabelquerschnitt des Prüflings

Da das Kabel mit einer zusätzlichen Skin-Schicht, die als Elektrode zur Mantelprüfung dient, versehen ist, wurde zusätzlich untersucht, ob die Skin-Schicht einen Einfluss auf die Ausbreitung der Stromimpulse hat.

Dazu wurden zum einen die Impulse in den Leiter und zum anderen in den Schirm eingespeist und die Stromimpulse entlang des Kabels mit 4 *High Frequency Current Transformers* (HFCTs) im Kabelschirm aufgezeichnet (Siehe Bild 2). Zunächst sind dabei in Bild 3 keine Unterschiede hinsichtlich der Laufzeiten beider Einspeisungsvarianten zu erkennen. Die unterschiedliche Polarität der Stromimpulse beider Einspeisungsvarianten beruht dabei auf dem Verschiebungsstrom der zugehörigen Spannungswelle. Der Stromimpuls am Kabelende A hat im Vergleich zu den anderen Messpunkten eine andere Polarität, da die positive Orientierung des HFCT im Gegensatz zu den anderen drei HFCTs zum Kabelende A anstatt zum Kabelende B zeigt.

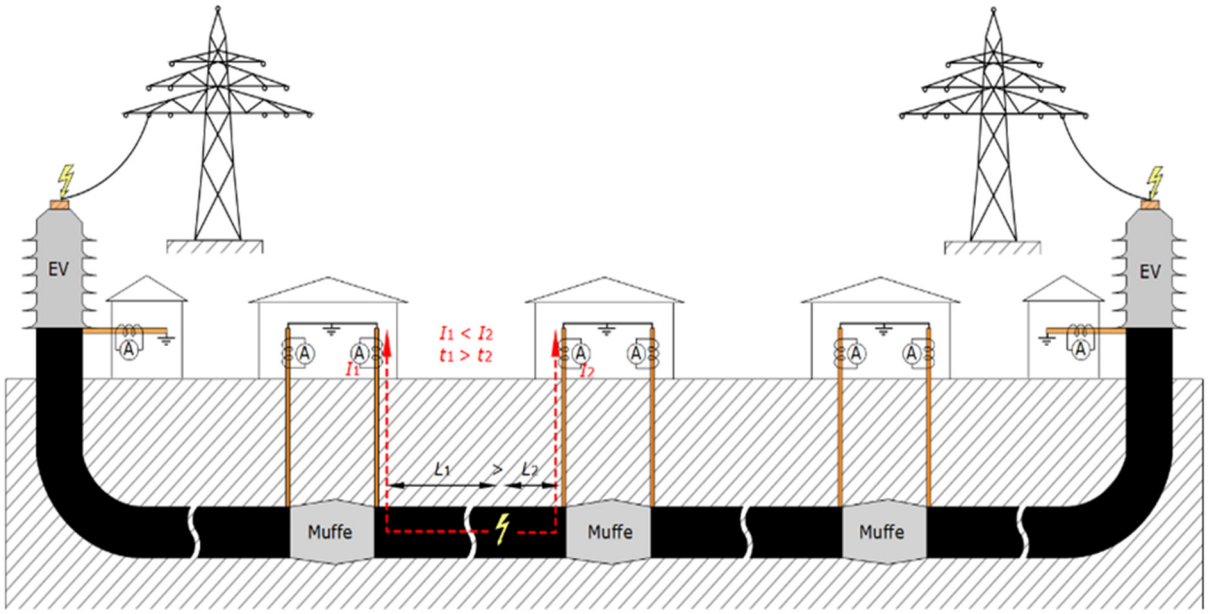


Bild 2: Prinzipskizze zur Messung der Schirmströme einer Kabelstrecke aus vier Abschnitten mit Erdungsmuffen und zwei Endverschlüssen (EVs)

Neben der Laufzeitmessung wurde zudem geprüft, ob im Vergleich zur traditionellen Zeitbereichsreflektrometrie (TDR) auch das Fehlerecho mithilfe der am Kabelschirm befindlichen HFCTs ausgewertet werden kann. Dazu wurden unterschiedliche Fehlerwiderstände an diskreten Fehlerorten (1/3, 2/3 oder 3/3 der gesamten Kabellänge) zwischen Leiter und Kabelschirm eingesetzt. In Abbildung 2 sind die Stromverläufe bei Einspeisung in den Leiter und in den Kabelschirm bei unterschiedlichen Fehlerwiderständen an der Verbindungstelle 2 gegenübergestellt. Generell ist auch eine Auswertung mit den am Kabelschirm angebrachten HFCTs möglich. Bei den durchgeführten Versuchen konnten Fehlerwiderstände bis 100 Ω anhand der reflektierten Stromimpulse erkannt werden. Dabei ist zu sagen, dass mit Hilfe des HFCTs, der am nächsten an der Fehlerstelle ist, die beste Möglichkeit der Auswertung des reflektierten Stromimpulses besteht.

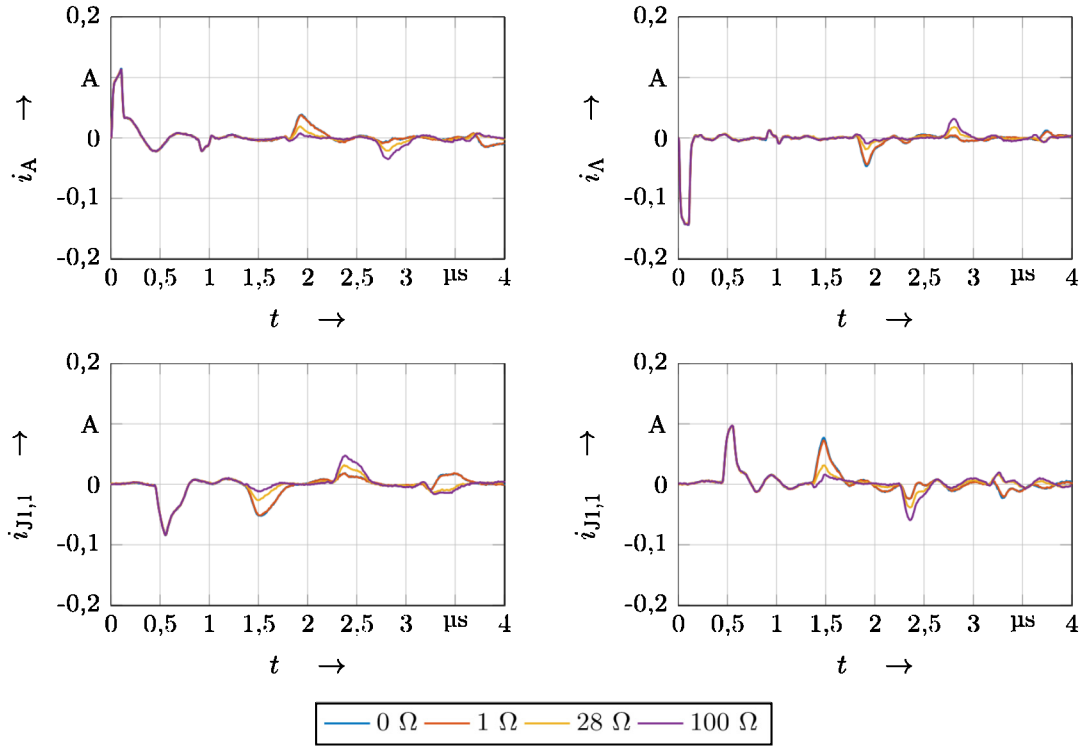


Bild 3: Vergleich der Messung der Impulse bei Einspeisung des Impulses in den Leiter (links) und in den Kabelschirm (rechts) mit unterschiedlichen Fehlerwiderständen an der 2. Verbindungsstelle

Der zweite Teil der Untersuchungen galt der Auswertung der transienten Fehlerströme im Kabelschirm. Dabei wurde das Kabel an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen und mit einer ohmschen Last von 38 Ω abgeschlossen. Zur Begrenzung des Fehlerstroms im Kurzschlussfall, wurde zudem ein Vorwiderstand in Höhe von 38 Ω gewählt. Das Zuschalten des Fehlers erfolgte mit einem Relais, das entweder an einer der Verbindungsstellen (J1 und J2) oder dem Kabelende B angebracht wurde. Bei dem verwendeten Fehlerschalter konnten zusätzlich Fehlerwiderstände in unterschiedlicher Höhe eingebracht werden. Die am Kabel anliegende Spannung betrug für alle Versuche 5 V. Neben Fehlerort und der Höhe des Fehlerwiderstandes wurde zusätzlich überprüft, inwieweit die Variante der Erdung einen Einfluss auf die transienten Schirmströme hat. Die betrachteten Erdungsvarianten sind die einseitige und beidseitige Erdung sowie die zusätzliche Erdung an den Verbindungsstellen.

Zunächst wird der Einfluss des Fehlerwiderstandes auf den Verlauf der Stromimpulse betrachtet. In Bild 4 sind die Verläufe der Stromimpulse am Kabelende A und B sowie der Verbindungsstelle J1 und dem Strom an der Fehlerstelle, also der Verbindungstelle J2 dargestellt. Die Änderung des Fehlerwiderstandes erfolgt dabei in diskreten Schritten von 0 Ω bis 100 Ω. Bei den durchgeführten Versuchen sind Ströme bei Fehlerwiderständen bis 100 Ω gut sichtbar. Fehlerwiderstände von 1 kΩ konnten in den Versuchen nicht mehr erkannt werden, da die gemessenen Stromimpulse nicht mehr vom Grundrauschen zu trennen waren. Mit zunehmender Spannung ist anzunehmen, dass auch Stromimpulse bei größeren Fehlerwiderständen gemessen werden können. Das Signal nimmt mit größer werdendem Fehlerwiderstand ab, da der Anteil des Wellenwiderstandes im Vergleich zum Fehlerwiderstand nur einen geringen Einfluss hat.

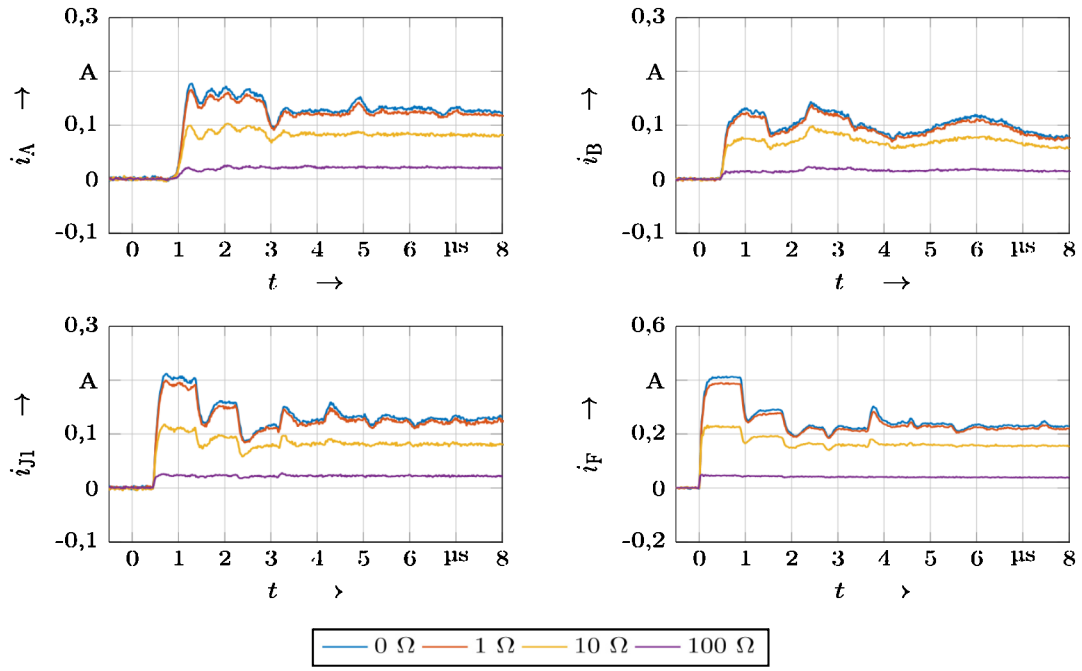


Bild 4: Verlauf der Schirmströme bei unterschiedlichen Fehlerwiderständen an der Verbindungsstelle J2 und einer Schirmerdung an den beiden Kabelenden

Die Untersuchung haben gezeigt, dass basierend auf transienten Schirmströmen lediglich Fehler im Bereich einiger 100 Ω zu erkennen sind. Dies lässt sich möglicherweise auf die geringe am Kabel anliegende Spannung zurückführen, weshalb weitere Versuche mit höherer Spannung durchgeführt werden sollen, um auch bei höheren Fehlerwiderständen die transienten Stromwellen im Kabelschirm auswerten zu können.

Partial Discharge Monitoring in Power Cables

M.Sc. Mahdi Mahdipour

Continuous operation of electric power cables used for transmission and distribution of energy is important, due to expenses of power outages. Thus using even expensive monitoring systems for cable systems with a special importance is reasonable. Partial Discharge (PD) monitoring as an indicator of insulation degradation could be implemented both on DC and AC cable systems. However in both cases there are some challenges. One of the challenges in AC cable systems is the cross-bonding of cable shields, which deteriorate the sensitivity of the measurements and PD phase identification. On the other hand under DC voltage PD repetition rate is much lower than that under AC voltages. Thus in DC cables even low number of PDs is considered as a sign of degradation of the cable system.

Figure 1: Effect of propagation in the cable on a transient signal

The main purpose of PD monitoring is to localize starting PD origins, which are the possible failures of the cable in the future. Currently there are two different strategies of PD localization in power cables, namely: Single sided PD measurements and synchronous PD monitoring.

The single sided PD measurement is applicable for PD localization in both DC and AC cables, using the signal propagation characteristics of the cable to estimate the distance travelled by a signal through the cable system, which is the distance of the PD source from the measuring point. Figure 1 compares a transient signal before and after traveling along the cable.

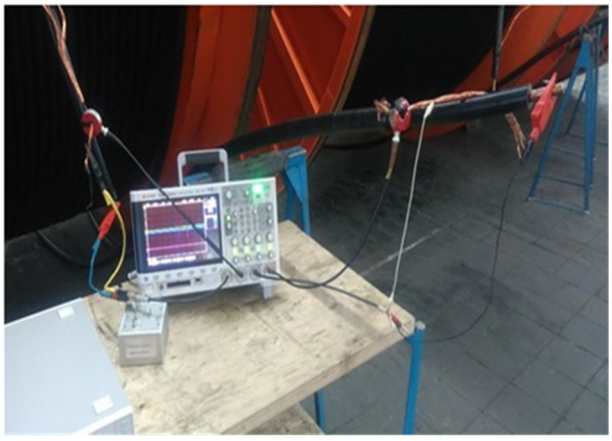


Figure 2: Experimental setup

As different cables have different signal propagation properties, it is of importance to have adequate knowledge of the propagation and attenuation characteristics of the cable under test. ATherefore different tests on different cable systems have been done in order to get more information on the travelling wave characteristics. Figures 2 and 3 show the experimental setup and results measured by HFCTs in the sending and receiving ends of a short circuited cable.

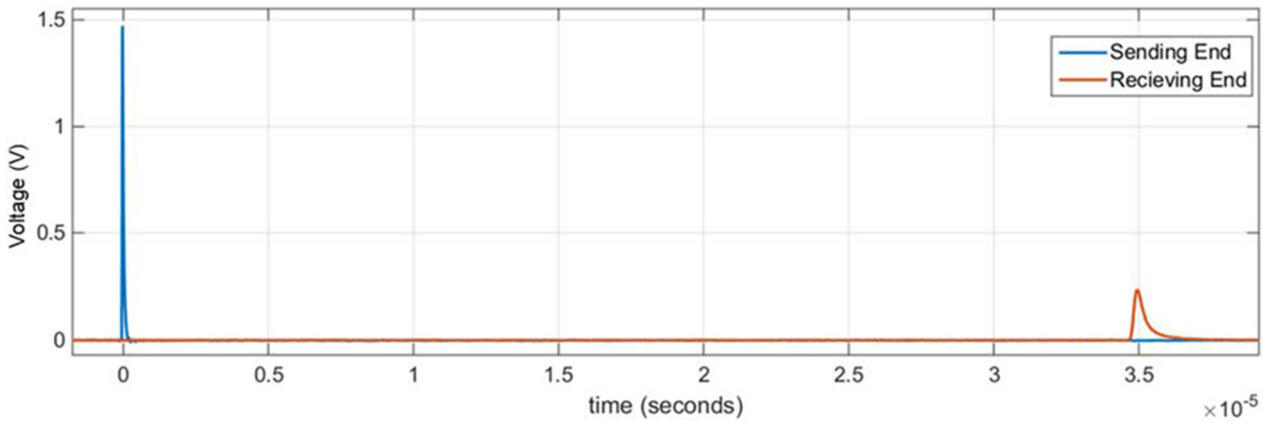


Figure 3: Current of sending end and receiving end of a 5896 m cable using HFCTs

Figure 4: Tests in a cross-bonded cablesystem

Synchronous PD monitoring is very reliable and accurate compared to single sided measurement in expense of more complicated monitoring system, due to synchronous operation of all measuring units. This method is applicable to both DC and AC cable monitoring. However currently a focus is put on PD monitoring in cross-bonded cable systems, in which the determination of the PD containing phase is one of the main challenges. The test setup shown in Figure 4 has been used with to model different PD source locations in a cross-bonded cable system.

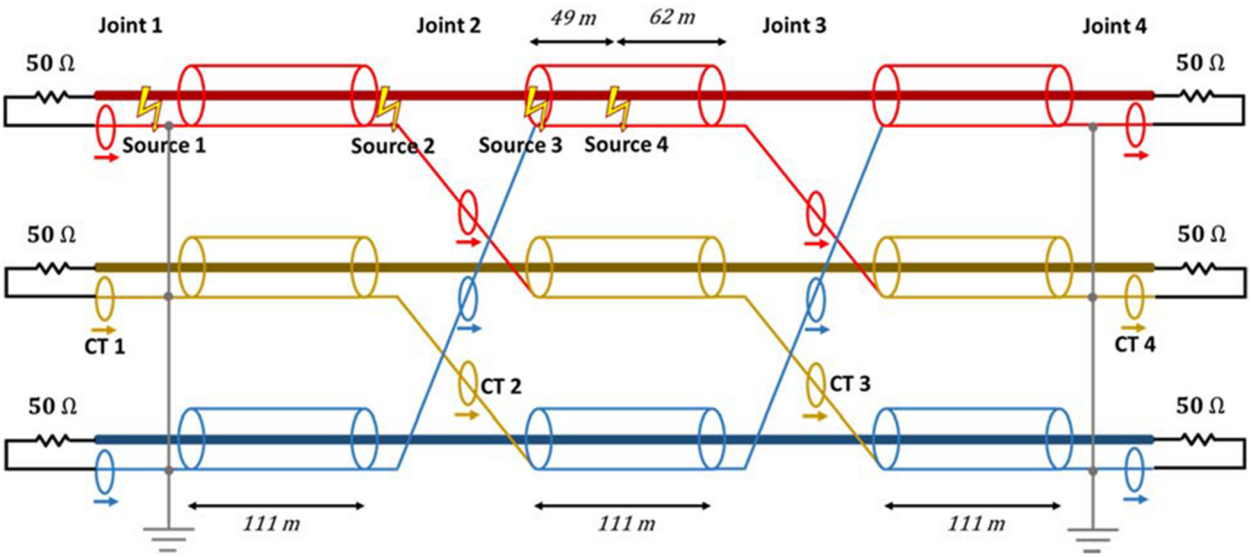


Figure 5: Configuration of the test setup for studying PD in cross-bonded cable systems

The test configuration shown in Figure 5 is based on a major section of a sectionalized cross-bonded cable system, in which PD sources are applied in different locations. According to the observation of the results detected in different sensor locations, a monitoring strategy was developed to improve the sensitivity of PD detection and PD phase determination, which is now in a patent registration process.

Auswirkung von Graphit in Silikon auf die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften bei Gleichspannung

Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović

Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung eines Isolierstoffs, welcher durch das Vermengen von Silikon mit Graphit bei hohem Gleichfeld seine Leitfähigkeit ändert und die entstehenden Raumladungen verringern kann, so dass dieser Isolierstoff besonders für HVDC Anwendungen geeignet wäre. Eine Herausforderung stellt die Ermittlung einer sinnvollen Menge Graphit dar, ohne die elektrische Festigkeit des Silikons signifikant zu beeinträchtigen. Hierfür ist sicherzustellen, dass eine homogene Verteilung des Graphits im Material herrscht. Zudem ist zu überprüfen, ob eine Sedimentierung des Pulvers im Silikon stattfindet. Um den Einfluss des Graphits auf die Eigenschaften des Silikons zu verdeutlichen, wird die Dotiermenge variiert. Zudem wird jede Messreihe bei verschiedenen Temperaturen wiederholt, so dass die Einwirkung von Wärme untersucht werden kann. Zur Bestimmung der Durchschlagfestigkeit werden Elektroden in das Material eingegossen und mit Gleichspannung beaufschlagt bis der Durchschlag erfolgt. Um einen Vergleich der elektrischen Festigkeit zwischen DC und AC zu erhalten, werden einige Versuche mit Wechselspannung wiederholt.

Für die Untersuchungen wurde ein RTV2 Platinsilikon verwendet. Basis und Katalysator werden im Mischungsverhältnis 1:1 vermengt. Nach dem Aushärten ist dieses Silikon wasserabweisend und chemisch inert. Es zeichnet sich durch hohe Beständigkeit gegenüber aggressiven Komponenten anderer Kunststoffe aus. Des Weiteren ist es äußerst reißfest, abnutzungs- und alterungsbeständig und beim Einsatz bei sowohl hohen als auch niedrigen Temperaturen formstabil. Weiterhin ist dieses Silikon gut verträglich mit Mineralölen. Bei dem hier verwendeten Zusatzstoff handelt es sich um ein Naturgraphit mit einem Kohlenstoffgehalt von > 99 %. Die Korngröße des Graphitpulvers beträgt ca. 4 µm und weist eine Feinheit von D 50 % auf.

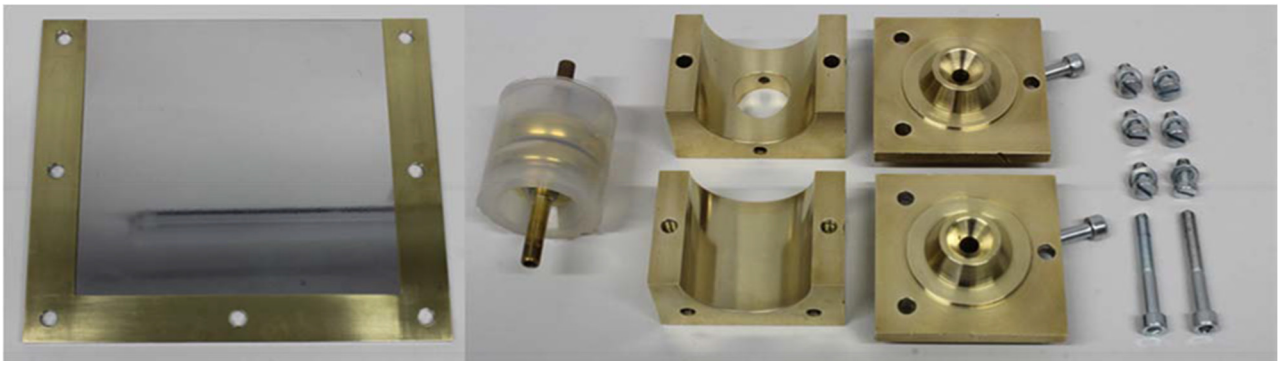


Bild 1: Formen für Plattenproben (links) und für Prüflinge mit Rogowski-Elektroden (rechts)

Für die Herstellung der Prüflinge wurden spezielle Gussformen angefertigt. Für die Messung der Gleichstromleitfähigkeit wurden 1 mm dicke Plattenproben hergestellt. Diese Proben wurden mit der in Bild 1 (links) dargestellten Gussform gefertigt. Für die Untersuchung der Durchschlagfestigkeit war ein homogenes Feld erforderlich. Daher wurden abweichend von der Norm *IEC 60455-2* Messingelektroden mit *Rogowski*-Profil verwendet. Die Elektroden wurden mit Hilfe der Gussform aus Bild 1 rechts im Abstand von 1 mm vollständig mit dem Silikon umgossen.

Zur Herstellung der Prüflinge wurden Basis und Katalysator getrennt mit dem gleichen Anteil an Graphit vermengt und für jeweils 30 Minuten mit einer Geschwindigkeit von 800 Umdrehungen pro Minute gerührt. Danach wurden Basis und Katalysator im Verhältnis 1:1 miteinander verrührt und schließlich unter konstanter Rüttelbewegung bei 0,5 mbar entgast. Anschließend wurde das Gemisch in die Gussform gegossen und erneut gerüttelt und entgast. Zum Aushärten wurden die gegossenen Proben für 2 Stunden bei 30 °C gelagert. Um den Polymerisationsprozess abzuschließen wurden die Prüflinge für 48 h bei 100 °C behandelt. Zur Prüfung, ob eine Sedimentierung des Graphits im Silikon stattfindet wurden verschiedene Mengen Graphit jeweils in die beiden Komponenten zugegeben, vermischt und luftdicht verschlossen. Dadurch, dass die Komponenten getrennt waren, konnte auch keine Vernetzung stattfinden. Nach etwa 5 Monaten Standzeit bei Raumtemperatur war keine Sedimentierung erkennbar. Da das Graphit eine geringe Dichte (ca. 2,2 g/cm^3) aufweist, findet die Sedimentierung in den hochviskosen Silikonkomponenten nur sehr langsam statt. Da das Material jedoch in kurzer Zeit aufgebraucht wird, kann davon ausgegangen werden, dass zwischen dem Einrühren des Graphits und dem Aushärten der Prüflinge keine Sedimentierung stattfindet. Die fertigen Prüflinge wurden mit Hilfe eines Mikroskops auf die Verteilung des Graphits untersucht. Bild 2 zeigt, dass das Graphit homogen im Silikon verteilt ist und dass es auch zu keinen Verklumpungen kommt.

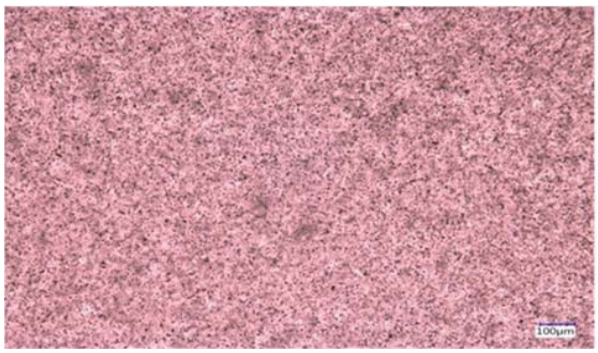


Bild 2: Graphitverteilung im Silikon

Für die Messung der Leitfähigkeit wurde in Anlehnung an die Norm *DIN EN 62631-3-1* eine Elektrodenkonfiguration mit Schutzringanordnung verwendet (Bild 3 links). Durch den geerdeten Schutzring konnten Störströme abgeleitet werden, sodass im Bereich des Prüflings an der Messelektrode ein homogenes Feld herrschte.

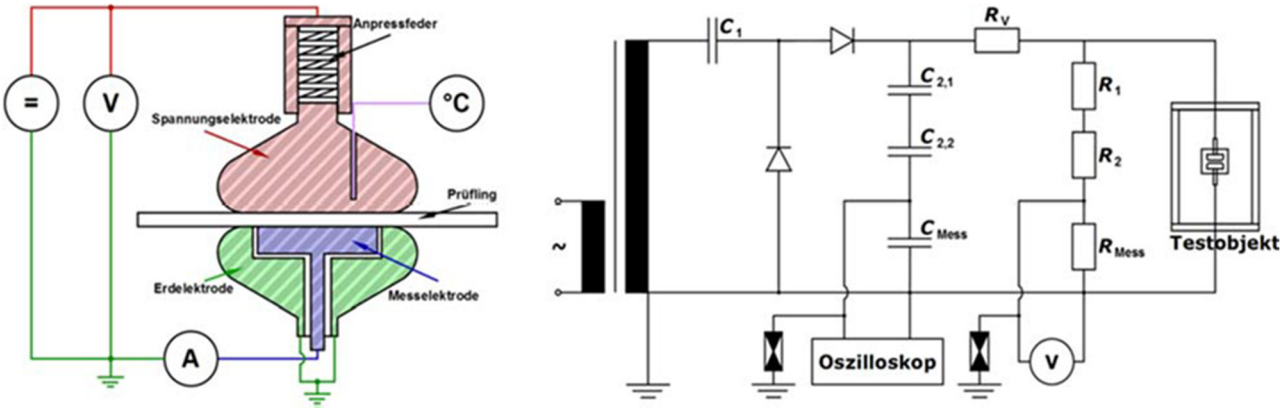


Bild 3: Elektrodenanordnung zur Messung der Leitfähigkeit (links) und Aufbau zur Ermittlung der elektrischen Festigkeit (rechts)

Zur Ermittlung der elektrischen Festigkeit wurde eine Schaltung nach Greinacher aufgebaut mit einer max. Ausgangsspannung von 280 kV (Bild 3 rechts). Die Durchschlagspannung wurde mit Hilfe eines ohmschen Teilers gemessen. Die Spannungssteigerung erfolgte über einen vorgeschalteten Motortransformator mit 2 kV/s, sodass der Durchschlag nach etwa einer Minute erfolgte (*DIN EN 60243-2*).

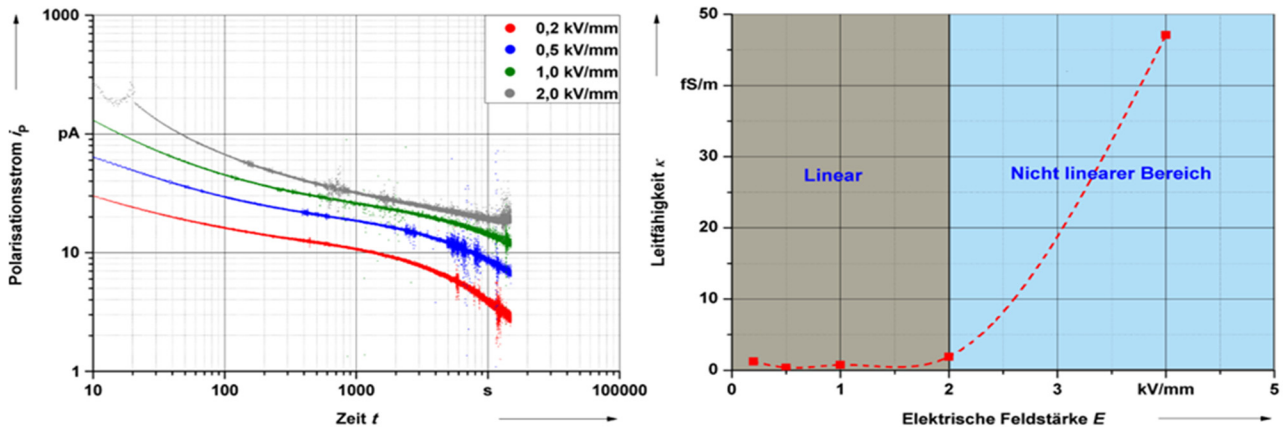


Bild 4: Polarisationsströme bei 23,5 °C (links) und Leitfähigkeit über der Feldstärke (rechts)

Bild 4 links zeigt die Polarisationsströme vom Silikon bei unterschiedlichen Feldbelastungen. Aus den Verläufen geht hervor, dass mit steigender Feldstärke auch ein höherer Strom fließt. Die Graphen verlaufen nahezu parallel, was andeutet, dass das Verhältnis der Ströme in einem Zeitpunkt in etwa dem Verhältnis der Feldstärken entsprechen muss. Bild 4 rechts zeigt die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des undotierten Silikons über der Feldstärke bei Raumtemperatur. Bis zu einer Feldstärke von ca. 2 kV/mm ist die Leitfähigkeit konstant. Darüber hinaus steigt die Leitfähigkeit exponentiell an. Bei Feldstärken in der Größenordnung von etwa 2 kV/mm ist eine felderleichterte thermische Injektion von Elektronen aus der Elektrode in das Polymer gemäß *Richardson-Schottky* überwiegend. Bei höheren Feldstärken wird der Feldstärkeeffekt erkennbar, so dass sich die Leitfähigkeit einem Potenzgesetz entsprechend $\kappa \sim E^n$ verhält.

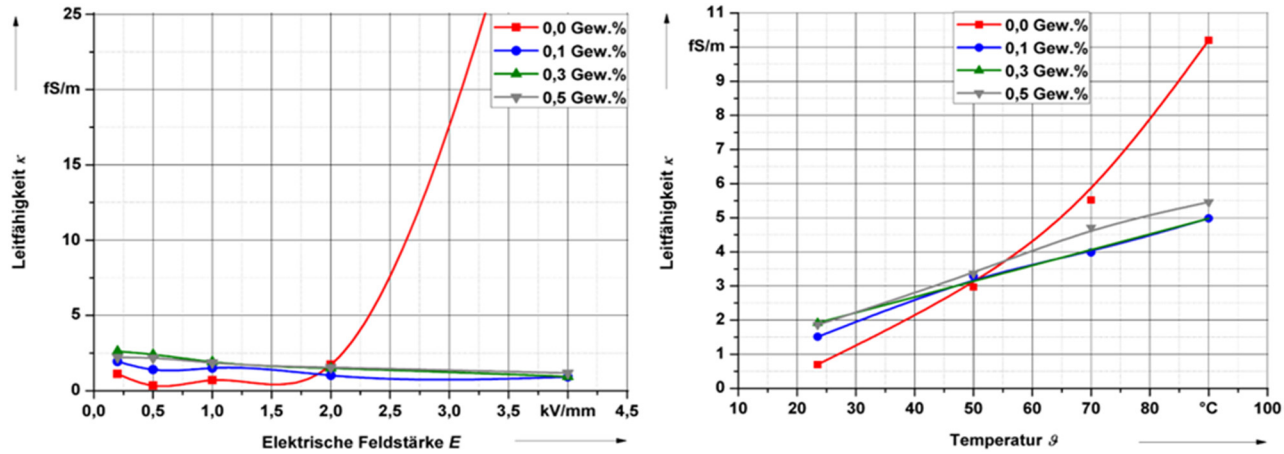


Bild 5: Leitfähigkeit und Durchschlagfestigkeit der Silikone in Abhängigkeit von der Temperatur

In Bild 5 links sind die Verläufe der Leitfähigkeit der dotierten Silikone in Abhängigkeit von der Feldstärke bei Raumtemperatur dargestellt. Durch das Einbringen von Graphit wird die Leitfähigkeit der Proben erhöht. Dies ist im Bereich bis 2 kV/mm sichtbar. Es ist zu erkennen, dass bei dem dotierten Silikon der exponentielle Anstieg der Leitfähigkeit bis 4 kV/mm ausbleibt. Die niedrigere Leitfähigkeit in dem Verbundwerkstoff ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es durch das Einbringen leitfähiger Partikel zu Feldverzerrungen kam. Das Graphit, das sich auf der Oberfläche des Prüflings befindet, ist mit den Metallelektroden in direktem Kontakt. Dadurch wird die Injektion nach *Schottky* unterbrochen, was in einer Reduzierung des gemessenen Stromes und somit auch zur Reduzierung der Leitfähigkeit führt.

Bild 5 rechts zeigt die Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Silikone von der Temperatur bei unterschiedlichen Dotierungen. Bei Raumtemperatur ist zu erkennen, dass die Leitfähigkeit mit steigendem Graphitanteil höher wird. Mit steigender Temperatur ist sowohl beim reinen als auch beim dotierten Silikon ein Anstieg der Leitfähigkeit deutlich. Dies kann auf das *Van't Hoffsche* Gesetz zurückgeführt werden. Die Leitfähigkeit beim dotierten Silikon steigt mit geringerer Steigung an. Dies kann an den unterschiedlichen Aktivierungsenergien von Silikon und Silikon-Graphit-Mischungen liegen.

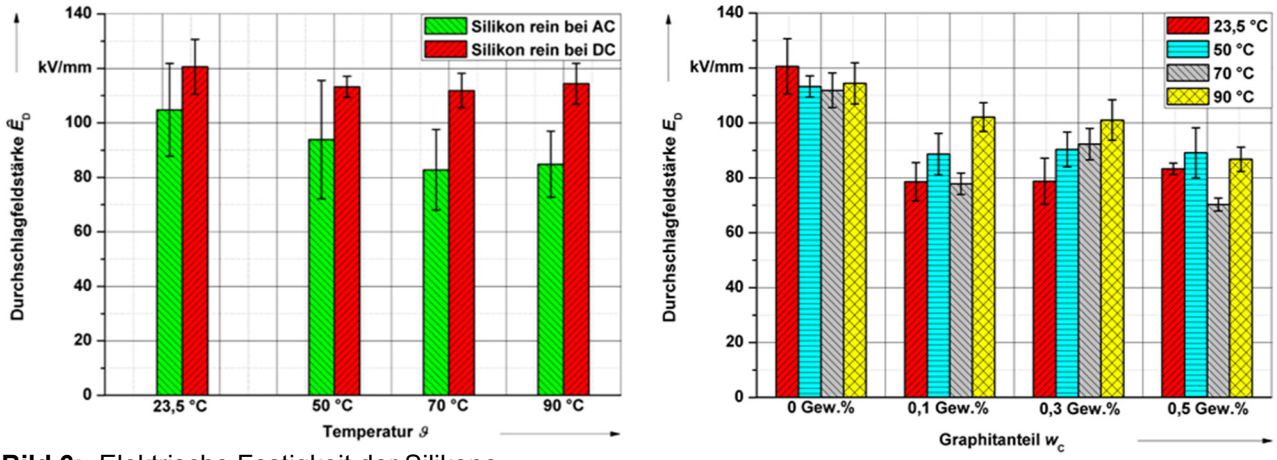


Bild 6: Elektrische Festigkeit der Silikone

Die Durchschlagfestigkeit des Silikons bei DC ist höher als bei AC. Es scheint bei beiden Spannungsarten eine leichte Abnahme der Festigkeit mit steigender Temperatur zu erfolgen. Dies kann durch eine steigende Leitfähigkeit bei steigender Temperatur erklärt werden, wobei mit steigender Temperatur sich auch die molekulare Bewegung erhöht, die zur Neuordnung freier Volumen führt. Generell ist eine Abnahme der Durchschlagfestigkeit mit der Zugabe von Graphit in das Silikon bemerkbar. Dies könnte auf die große Menge entstandener Grenzflächen zwischen Teilchen und dem Verbundstoff zurückgeführt werden. Zudem sind durch die Zugabe der Teilchen in das Silikon auch Teilchen an der Oberfläche des Silikons gelangt. Somit sind mikroskopische Spitzen entstanden, die die Inhomogenität erhöhen und die elektrische Festigkeit reduzieren. Bei den dotierten Proben scheint ein Anstieg der Festigkeit bei 90 °C ersichtlich. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass sich bei diesen Temperaturen mechanische Spannungen vermindern, was mit einer Reduzierung der Leitfähigkeit und dadurch mit einer Erhöhung der Festigkeit verbunden ist.

In dieser Arbeit wurde das Verhalten von mit Graphit dotierten Silikonen untersucht. Dabei wurden die Menge an Graphit und die Temperatur variiert. Zur Herstellung von Proben wurde eine Methode entwickelt, um diese frei von Gaseinschlüssen zu fertigen. Es wurde auch gezeigt, dass keine Sedimentierung der Partikel im Silikon stattfand. Bei der Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit kam heraus, dass durch die Zugabe von Graphit die Leitfähigkeit im Niederfeldbereich ansteigt, jedoch im Hochfeldbereich bis 4 kV/mm kein exponentieller Anstieg der Leitfähigkeit entsteht. Auch die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur wurde durch die leitfähigen Partikel geringer. Demnach bleibt die Leitfähigkeit bis zu dieser Feldstärkebelastung nahezu konstant, was darauf hindeutet, dass mit der Zugabe leitfähiger Partikel die Ausbildung von Raumladungen zurückgehalten werden konnte. Die Ermittlung der elektrischen Festigkeit ergab, dass der Durchschlag bei Belastung mit Wechselspannung eher eintritt als mit Gleichspannung.

Verhalten von speziell dotierten Silikonschichten bei hoher Gleichspannungsbeanspruchung

Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović

Kabel mit polymeren Isolierungen neigen bei Belastungen mit hoher Gleichspannung zur Bildung von Raumladungen. Diese würden bei einer Polaritätsumkehr der anliegenden Gleichspannung zu Feldüberhöhungen führen und somit die Isolierung überlasten. Weiterhin kommt es mit dem Anstieg der Leitertemperatur zur Ausbildung eines radial gerichteten Temperaturgradienten in der Isolierung. Dieser führt zur Leitfähigkeitsänderung im Dielektrikum, welche wiederum eine Feldstärkeumkehr innerhalb der Isolierung zur Folge hat. Eine Möglichkeit die entstandenen Raumladungen an Stellen höherer Felder abzuführen besteht darin, die elektrische Leitfähigkeit zu erhöhen. Dies kann durch das Einbringen leitfähiger Zusatzstoffen in den Isolierstoff erreicht werden, was bereits in früheren Arbeiten untersucht und beschrieben wurde. In diesem Beitrag wurde nur ein Teil des Dielektrikums mit leitfähigem Füllstoff versehen. Hierbei wurden Schichtproben aus Silikon hergestellt, die aus einer Lage ohne und einer Lage mit Füllstoff bestehen, wobei das Verhalten bei Belastung mit Gleichspannung untersucht wurde. Das Ziel war dabei, die elektrische Leitfähigkeit durch die Zugabe von leitfähigen Partikeln zu steuern, ohne die elektrische Festigkeit negativ zu beeinflussen.

Bei dem verwendeten Isoliermedium handelt es sich um ein additionsvernetzendes RTV2 Silikonkautschuk, welches aus einer Basis- und einer Katalysatorkomponente besteht. Beide Komponenten werden im Verhältnis von 1:1 miteinander vermengt. Zur Änderung der el. Leitfähigkeit wurde ein mikroskaliges Graphitpulver als Füllstoff verwendet. Dabei handelt es sich um ein fein gemahlenes Naturgraphit mit einem Kohlenstoffgehalt von > 99 % und einer Korngröße von 4 µm bis 6 µm. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass Silikon mit 0,3 Gew.% Graphitfüllstoff die besten Ergebnisse aufwies.

Für die Untersuchungen wurden entsprechend dotierte Plattenprüflinge mit einer Stärke von 1 mm hergestellt. Hierzu wurden die Basis- und Katalysatorkomponenten zunächst getrennt voneinander jeweils mit 0,3 Gew.% Graphitfüllstoff vermengt und anschließend beide Komponenten im Verhältnis von 1:1 miteinander verrührt sowie für zehn Minuten bei 0,5 mbar entgast. Danach wurde das Gemisch in eine entsprechende Aluminiumgussform, die aus zwei 4 mm starken Seitenplatten und zunächst nur einem Abstandhalter besteht, gegossen. Durch die Dicke des Abstandhalters kann die Stärke des Prüflings eingestellt werden. Zum Aushärten wurden die gegossenen Proben für etwa zwei Stunden bei Raumtemperatur gelagert. Danach wurde eine der beiden Seitenplatten entfernt, ein weiterer Abstandshalter gleicher Stärke eingesetzt und die zweite Silikonschicht ohne Graphitpulver eingegossen. Im Anschluss wurde der Schichtprüfling für weitere 2 Stunden zur Aushärtung im Wärmeschrank gelagert.

Bild 1: Querschnitt des Silikon-Schichtprüflings

Um den Polymerisationsprozess abzuschließen, wurden die Prüflinge schließlich für 48 h bei einer Temperatur von ca. 100 °C behandelt. Zur Ermittlung der elektrischen Festigkeit des geschichteten Silikons wurden spezielle Zweischichtprüflinge in zylindrischer Form entwickelt. Aus den bereits zuvor angefertigten Plattenprüflingen wurden hierzu kleinere Scheiben mit einem Durchmesser von 30 mm ausgestanzt und jeweils eine Probenscheibe zwischen zwei *Rogowski*-Elektroden eingebracht. Anschließend wurde die gesamte Elektrodenanordnung in eine Rundgießform eingesetzt und mit reinem Silikon aufgefüllt. Der angefertigte Rundprüfling ist in Bild 2 (links) dargestellt.

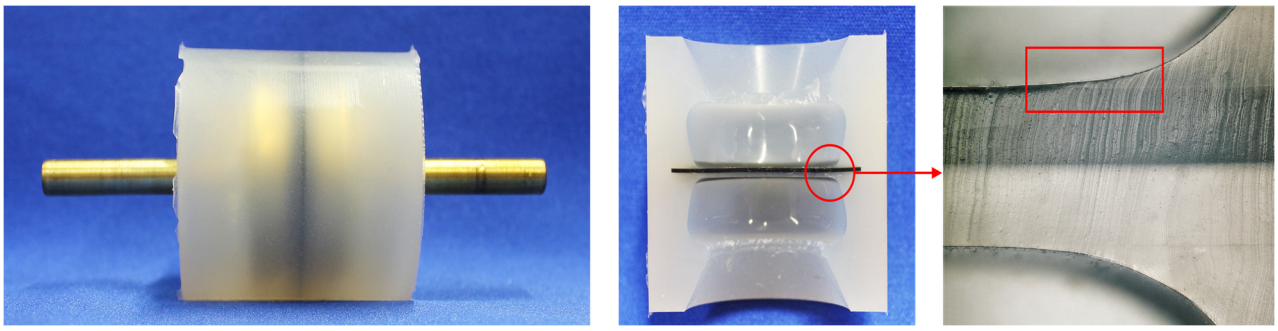


Bild 2: Querschnitt des Silikon-Schichtprüflings

In der mikroskopischen Aufnahme des Prüflingsquerschnitts in Bild 2 (rechts) sind sehr gut die beiden 0,5 mm starken Schichten der Probenscheibe, das reine Silikon als Einbettungsmedium sowie die Kontur der verwendeten *Rogowski*-Elektroden erkennbar. Entlang der Grenzflächen im Bereich des Zwickels ist es zu keinen Gaseinschlüssen gekommen, so dass von einer vollständigen Verfüllung durch das reine Silikon ausgegangen werden kann. Darüber hinaus ist zu sehen, dass ein nahezu ideal homogener Übergang zwischen der zweigeschichteten Probenscheibe und dem reinen Silikon erreicht wurde (umrahmter Bereich in Bild 2 (rechts)).

Die elektrische Leitfähigkeit wird aus dem stationären Endwert des Polarisationsstromes ermittelt (PDC). Hierzu wurde in Anlehnung an die Norm *DIN EN 62631-3-1* eine Elektrodenkonfiguration mit Schutzringanordnung verwendet. An den Prüfling wurde eine stabile Gleichspannung mit niedriger Welligkeit angelegt, die von einer starren Gleichspannungsquelle bereitgestellt wurde. Die angelegte Spannung konnte über einen kalibrierten Tastkopf und ein Oszilloskop exakt abgelesen werden. Mittels faseroptischer Temperaturmessung konnte die Temperatur direkt im Prüfling ermittelt werden und über ein Picoamperemeter wurde der Polarisationsstrom durch den Silikonprüfling gemessen (Bild 3).

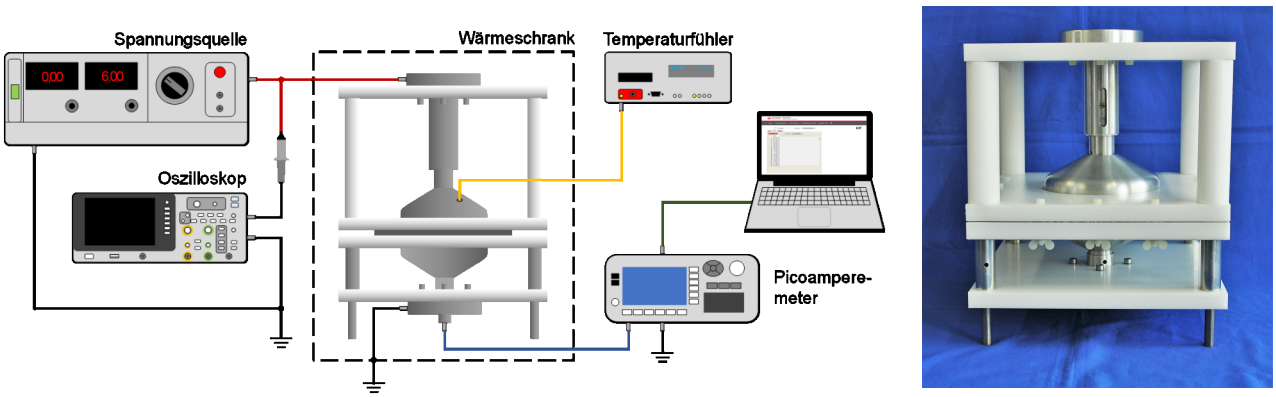


Bild 3: Gesamter Prüfaufbau (links) und Messelektroden (rechts) zur Messung der Polarisationsströme

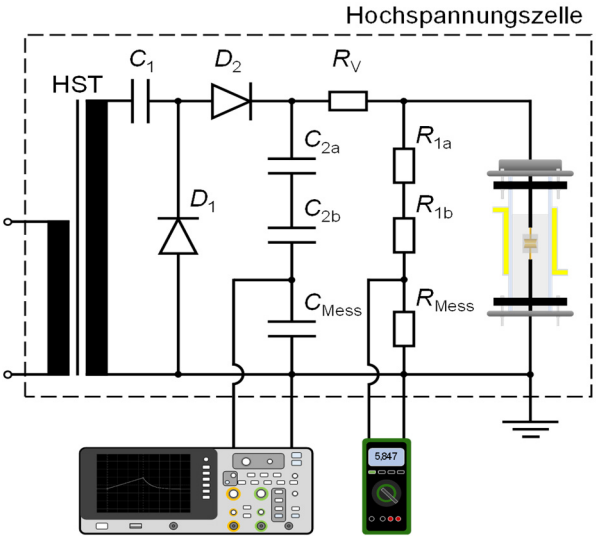


Bild 4: Messaufbau nach *Greinacher*

Die Ermittlung der elektrischen Festigkeit der Schichtproben erfolgte nach der Norm *DIN EN 60243-2.* Die benötigte Gleichspannung wurde durch eine *Greinacher*-Schaltung mit einer max. Ausgangsspannung von 280 kV bei einer Welligkeit von < 2 % realisiert (Bild 4). Die Durchschlagspannung wurde mit Hilfe eines ohmschen Teilers gemessen, wobei die Spannungssteigerung mit 2 kV/s erfolgte, sodass der Durchschlag nach etwa einer Minute erfolgte. Es wurden fünf Durchschläge wiederholt und der Mittelwert sowie die Standardabweichung gebildet.

In Bild 5 (links) sind die Verläufe der el. Leitfähigkeit verschiedener Silikonanordnungen in Abhängigkeit von der Feldstärkebelastung bei einer Temperatur von 23 °C dargestellt. Zunächst wurde die Schicht mit Graphit an die Hochspannung (HS) gelegt und gemessen. Zum Vergleich wurden Versuche durchgeführt, bei denen sich die Schicht mit dem reinen Silikon an HS befindet. Um den Einfluss der einzelnen Schichten deuten zu können, wurden auch Messungen an Plattenprüflingen aus reinem Silikon und an Proben aus Silikon mit 0,3 Gew.% Graphit durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei den Zweischichtproben der exponentielle Anstieg der el. Leitfähigkeit ab einer Feldstärke von 2 kV/mm bis 6 KV/mm ausbleibt. Wahrscheinlich setzt hier der Feldstärkeeffekt erst bei höheren Feldstärken ein. Da die Verläufe der beiden geschichteten Silikondielektrika nahezu identisch sind, ist eine Unterscheidung zwischen beiden Kontaktierungsvarianten der Zweischichtproben nicht notwendig. Bild 5 (rechts) zeigt die Verläufe der elektrischen Leitfähigkeit von verschiedenen Silikonanordnungen in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Feldbelastung von 1 kV/mm. Für die Verläufe der Zweischichtproben ist ersichtlich, dass die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit, vor allem bei höheren Temperaturen, wesentlich weniger stark ausgeprägt ist als beim reinen Silikon.

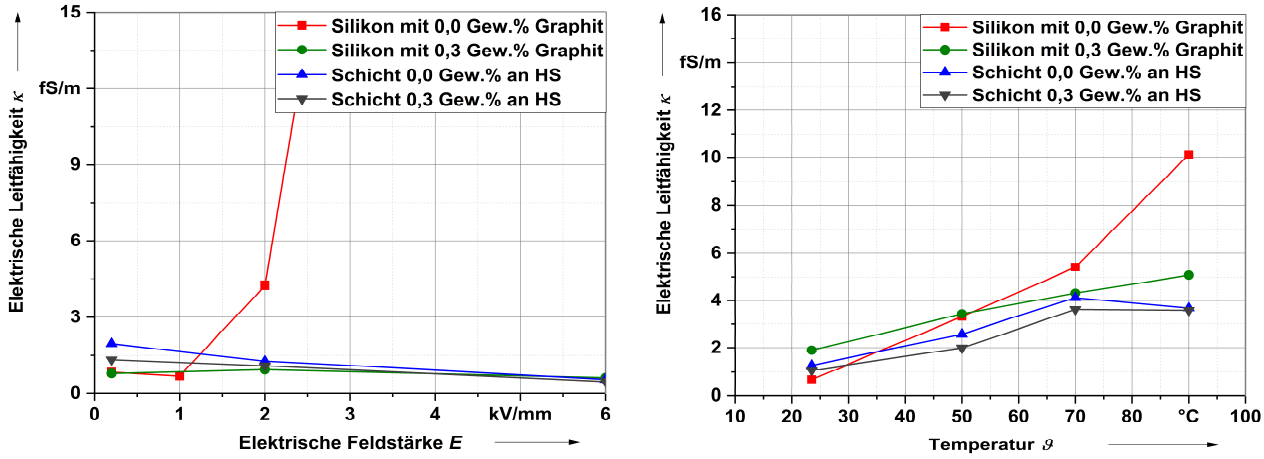


Bild 5: Elektrische Leitfähigkeit verschiedener Silikonanordnungen

In Bild 6 (links) ist die Abhängigkeit der elektrischen Durchschlagfeldstärke von der Temperatur für geschichtete Silikondielektrika dargestellt.

Um einen möglichen Einfluss der beiden Kontaktierungsvarianten der Zweischichtproben auf die Höhe der Durchschlagfeldstärke zu untersuchen, wurden die Messungen daher für beide Varianten wiederholt. Die linken Balken (orange) stellen die elektrische Festigkeit der Silikonschichten dar, bei der die Schicht mit reinem Silikon mit der Hochspannungselektrode kontaktiert wurde. Die rechten Balken (grün) stellen die elektrische Festigkeit der Silikonschichten dar, bei der die Silikonschicht mit 0,3 Gew.% Graphit mit der Hochspannungselektrode kontaktiert wurde. Aus dem Graphen geht hervor, dass die elektrische Festigkeit beider Anordnungen nahezu identisch ist und auch das gleiche Temperaturverhalten aufweist.

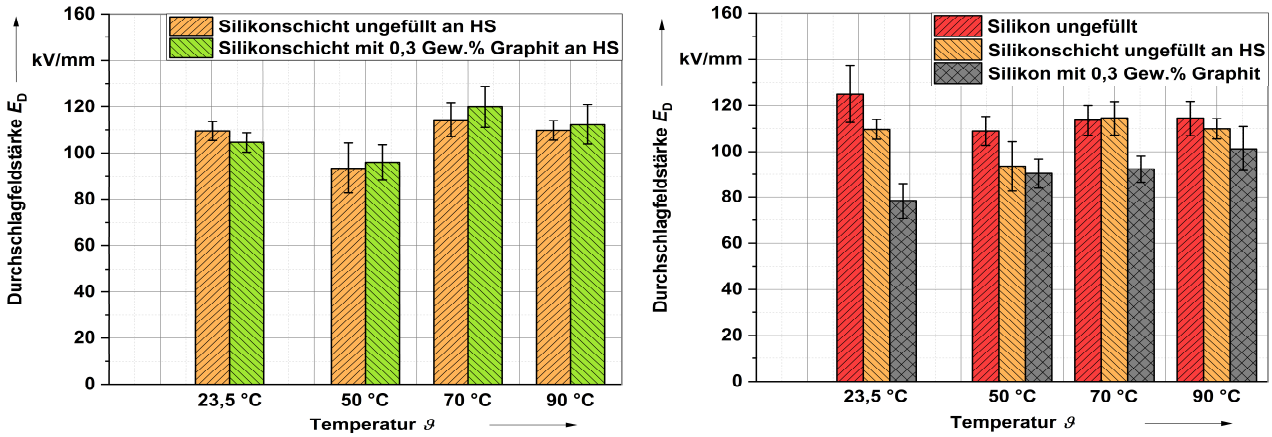


Bild 6: Elektrische Festigkeit der Schichtdielektrika (links) und verschiedener Isolieranordnungen (rechts)

Bild 6 (rechts) zeigt die der el. Durchschlagfeldstärke verschiedener Isolieranordnungen in Abhängigkeit von der Temperatur. Durch den Zweischichtaufbau konnte eine deutlich höhere el. Festigkeit der Prüflinge als bei der 0,3 Gew.% Probe erreicht werden. Bei Temperaturen von 70 °C und 90 °C sind die Durchschlagfeldstärken der Zweischichtproben nahezu identisch zum reinen Silikon. Dies könnte daran liegen, dass sich die Feldstärkebelastung an den Schichten unterschiedlich aufteilt, sodass die Schicht mit dem reinen Silikon, welche auch über eine geringere Leitfähigkeit verfügt, eine höhere Feldbelastung erfährt als die Schicht mit dem Graphit gefüllten Silikon. Da die einzelnen Schichten im Schichtdielektrikum etwa um die Hälfte dünner sind als die ungeschichteten Proben, ist die el. Festigkeit der Schichten aufgrund des Volumeneffektes höher.

In diesem Beitrag wurde das elektrische Verhalten von Silikonschichtelastomeren untersucht. Diese bestehen jeweils aus einer ungefüllten sowie einer mit 0,3 Gew.% Graphit gefüllten Silikonschicht. Dabei wurden die Position der Schichten und die Prüftemperatur variiert. Bei der Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit hat sich gezeigt, dass im Hochfeldbereich bis 6 kV/mm ein deutlicher Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit ausbleibt. Weiterhin hat sich gezeigt, dass es in diesem Feldstärkebereich keinen Unterschied macht, welche der beiden Schichtseiten an der Hochspannungs- oder Erdseite anliegt. Bei den Durchschlagversuchen hat sich herausgestellt, dass die Graphitpartikel die elektrische Festigkeit des Prüflings generell reduzieren. Jedoch wird beim Einbringen von Graphitteilchen in eine Schicht des Dielektrikums seine Durchschlagfestigkeit deutlich weniger beeinflusst. Bei Betriebstemperaturen von ca. 70 °C bis 90 °C wies das Schichtdielektrikum sogar eine nahezu identische Festigkeit auf, wie ungefülltes Material. Auch hier hat sich gezeigt, dass die die Lage der gefüllten Schicht keinen Einfluss auf das elektrische Verhalten des Prüflings hat.

Microscopic Image Processing and Frequency Domain Analysis as a Quality Control Method for Solid Composite Dielectrics in High Voltage Applications

M.Sc. Hassan Saadati

Composite dielectrics like GFRP (glass fibre reinforced plastics) are commonly used in high voltage insulation systems due to their promising mechanical and electrical characteristics, as well as their robustness against chemical and thermal stresses. The existence of voids and cavities inside the composite dielectrics is a common weak point of these materials, as they can cause internal partial discharges and further failures. Recently, more insulation failures in the composite insulation systems have been reported.

Therefore, the objective of this paper is to analyze and compare different methods for detecting weak points, such as cavities, in solid insulating materials. Digital microscopy analysis is a surface analysis that includes particle analysis and identification, such as elemental analysis of the samples, detection of impurities and identification of physical and chemical defects, as well as the cavity density of each sample. Dissipation factor and permittivity of the dielectric also could denote to the quality of solid dielectrics. Therefore a frequency domain analysis (FDA) is carried out to investigate the effect of cavities on the electrical insulation performance of the component. The results of an optical microscopy and FDA, as well as a possible correlation between the results from these different methods can lead to a quality control procedure of composite dielectrics. Through detection of cavities using a digital microscope and a special software developed in MATLAB for the evaluation of the microscopic pattern, it can be determined, which sample has the best insulation properties.

Experimental Setup

The first part of the experimental setup consists of two electrodes embedded in epoxy resin, three fixed silicone rubber layers, and one unfixed silicone rubber layer (with or without cavities). The second setup consists of two pairs of electrodes embedded in epoxy resin and each having a circular sample, i.e., with and without a cavity. One of the electrodes of each configuration is wrapped with a copper tape with conductive glue that serves as the guard electrode. Figure 1 shows the experimental setup.

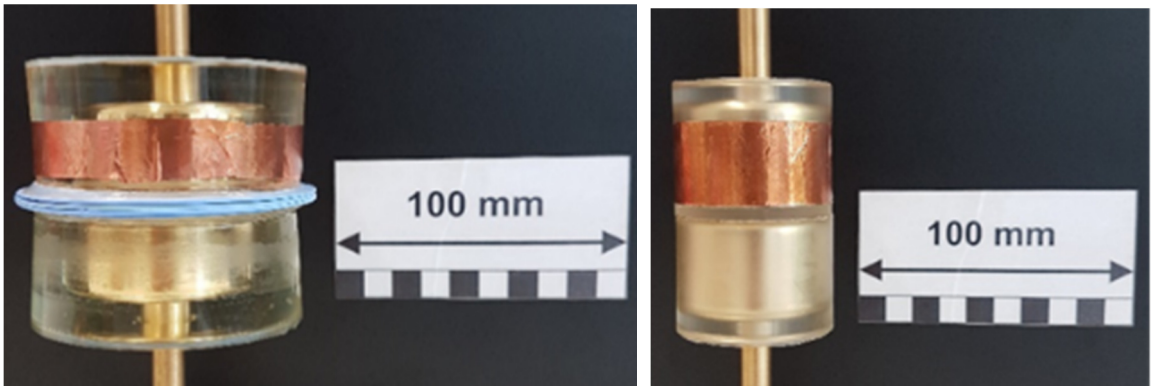


Figure 1: Electrode arrangement with silicone rubber sample (left) and with epoxy resin (right)

Frequency Domain Analysis

FDA is a known method to investigate and analyze solid dielectrics through parameters such as the dissipation factor (DF). Therefore, cavity detection on the samples through the DF could be possible. Figure 2 illustrates the cavity detection results on the sample using the DF analysis.

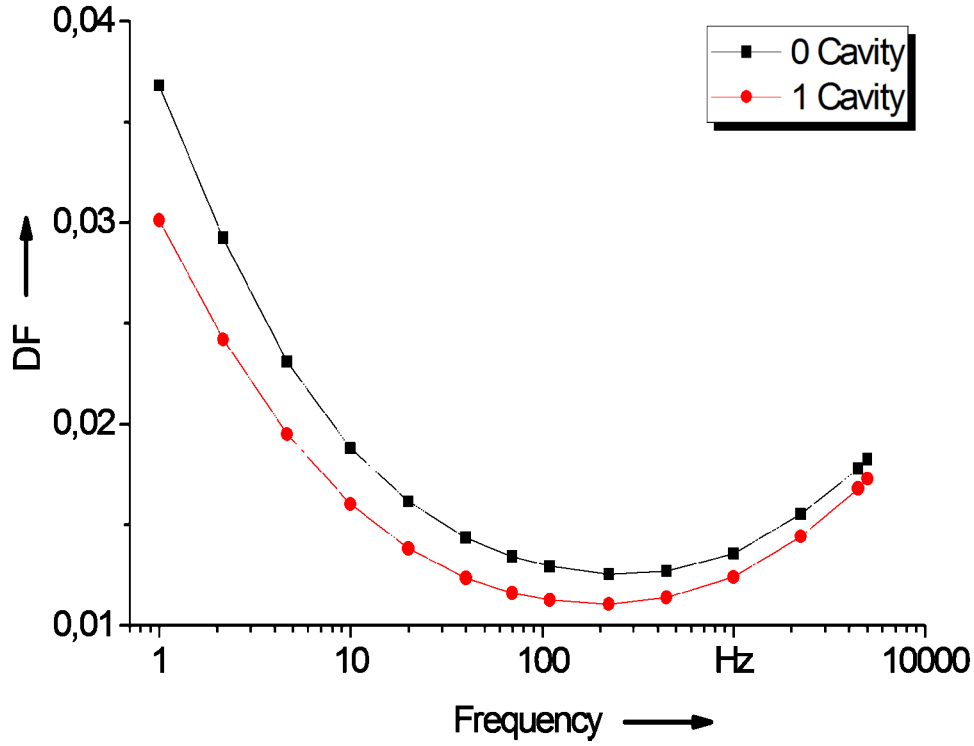


Figure 2: DF over the frequency for the epoxy resin samples

According to the results of the DF measurements, internal cavities cause lower DF in dielectrics. DF of air is lower than DF of dielectrics and the mixture of air and dielectric has lower DF than the non-cavity dielectric.

Relative Permittivity

Since the dissipation factor does not bring along reliable results, the relative permittivity is considered as an alternative method to distinguish correctly between samples with and without cavities. Figure 3 indicates that it is possible to detect cavities inside dielectrics through permittivity. As expected, the non-cavity sample has the highest ε_r, which leads to a reliable result. The area of the electrodes and the thickness of the sample were 12.57 cm^2 and 3.4 mm, respectively.

The permittivity calculated for the epoxy resin samples has a significant variation. Relative permittivity of air, which is 1, and dielectrics, which have value above 3, prove the results of permittivity measurements, which are in between these two values. As expected the no cavity sample leads to a higher ε_r.

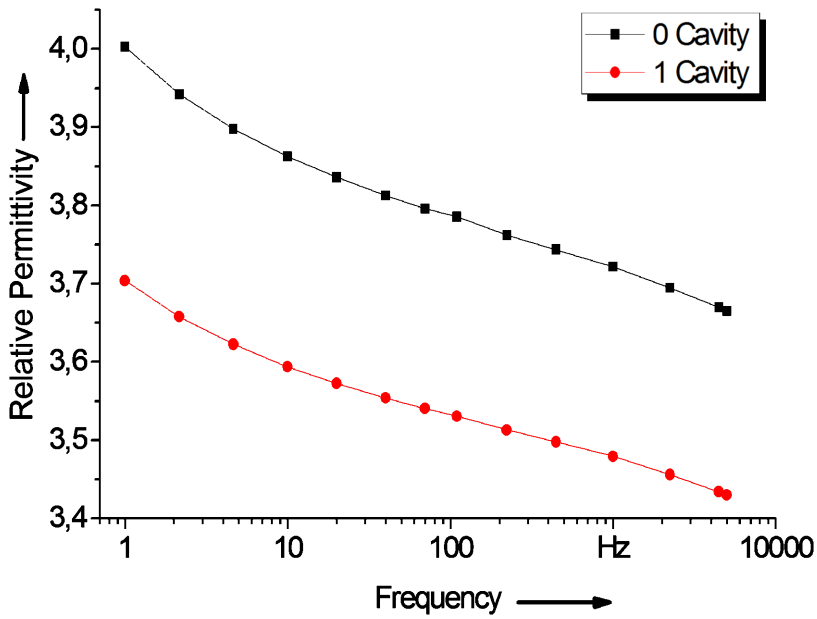


Figure 3: ε_r over the frequency for the epoxy resin samples

The calculation for the epoxy resin samples shows a remarkable result, the permittivity values of the two samples have an enormous difference, thus it seems as a good possibility to detect cavities. It should be mentioned that impurities in dielectrics as well as moisture and gas pressure in cavities could change the results. In this regard, these parameters should be taken into account during the measurements.

Optical Microscopy

The optical microscopy analysis helps to detect impurities and identify physical and chemical defects of objects. It can be determined, which sample has less cavities and the best insulation properties through detection of cavities using the microscope and MATLAB. The calculation of the area covered by cavities allows analyzing and comparing the samples with a higher precision.

A software that is introduced in this paper allows to calculate the area covered by cavities in GFRP samples. The images of the microscopically analyzed samples were taken with the magnification of 100x. Figure 4 shows a picture of a GFRP sample. Dark stains on the pictures are cavities and cracks.

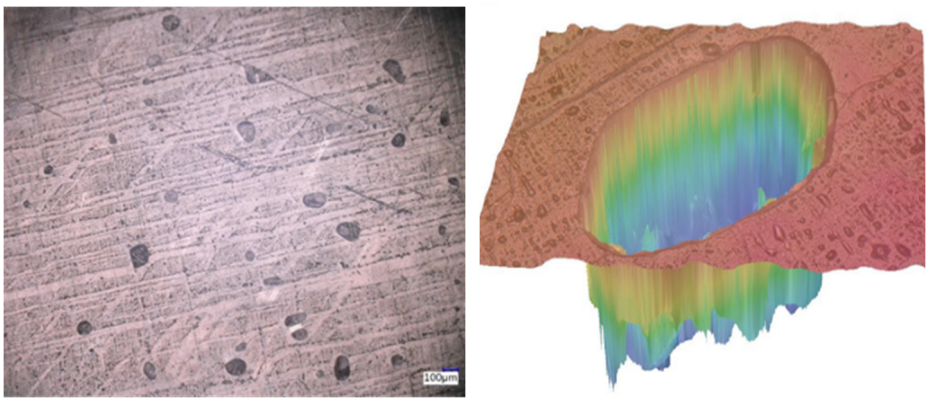


Figure 4: Surface of GFRP (left), 3D picture of one cavity (right)

In order to increase the speed of microscopic investigation a software has been developed, in which 2D pictures were processed, filtered and by employing different mathematical operations, the percentage of the area covered by cavities is calculated. Consequently, it is possible to classify different GFRP samples. The result of every image is shown in a Graphical User Interface (GUI). Figure 5 shows a window of the software. The so-called Exact Pixel method consists of calculating the pixels as seen in “Complement” (without the green squares), while the Oval Pixels method paints an ellipse inside the green squares given by the Bounding Box function. This last method allows approximating the filling of the cavities that has been lost along the image processing. Both methods eliminate the cavities outside the rectangles.

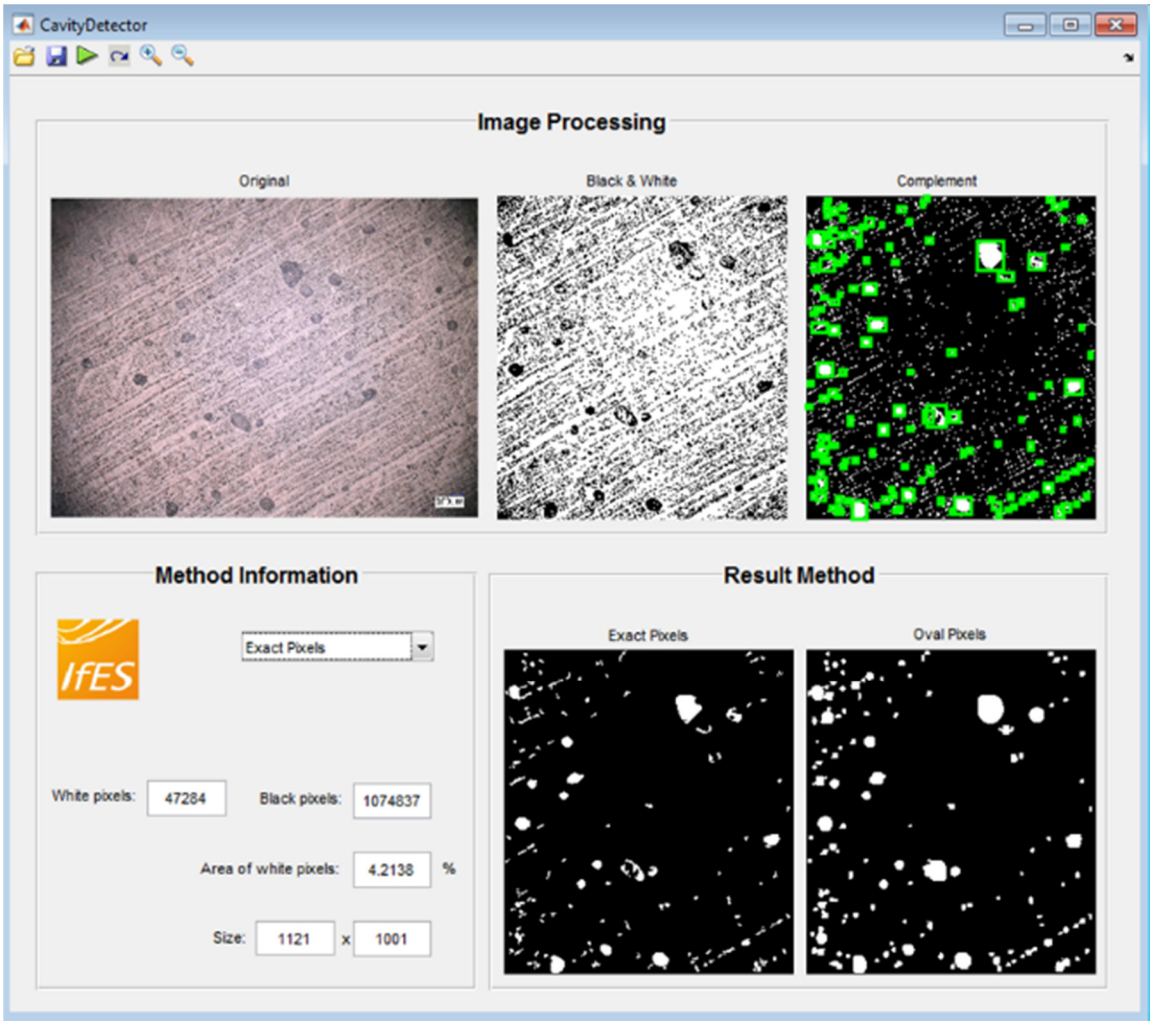


Figure 5: Graphical User Interface

The user must take into account that all the pictures need to have the same light conditions, zoom-ratio and use the same method in order to compare properly the results. The software allows to do a lot of optical microscopic investigation very fast and precise.

Industrial Implementation

The measuring system has been implemented in a gas insulated bushing factory and as it was expected, the usability of the method has been confirmed.

Investigation of Intrinsic Breakdown on Silicone Rubber and Epoxy Resin under AC, DC and Combined AC/DC Voltages

M.Sc. Hassan Saadati

The objective of this project is to analyze the characteristics of breakdown under AC, DC and combined AC/DC field stresses in an easy, efficient and economical way. This study evaluates these characteristics with two of the most important insulating materials in recent years: silicone rubber and epoxy resin. Although this research was performed under laboratory conditions, it could serve as a starting point for optimizing HVDC systems and developing HVAC/DC apparatus. A comparison of the results obtained with the proposed quality measures with those of state of the art metrics shows excellent outcomes. Silicone rubber and epoxy resin samples had a thickness of 1±0.1 mm for breakdown tests.

Silicone samples provided by the industry were used to perform the main tests of this work. On the other hand, epoxy samples were prepared from a low viscosity resin, in order to compare the results of silicone tests. A non embedded arrangement was chosen for the tests because the process of embedding is complex and very expensive. Furthermore, spheres were preferred as these allow the measurement of a single point and these can be rotated several times before changing them, which is a time-saving and efficient method. Figure 1 shows the schematic setup for the breakdown measurements. Electrodes of stainless steel (to minimize their damage at breakdown) with a diameter of 20 mm were used at all times.

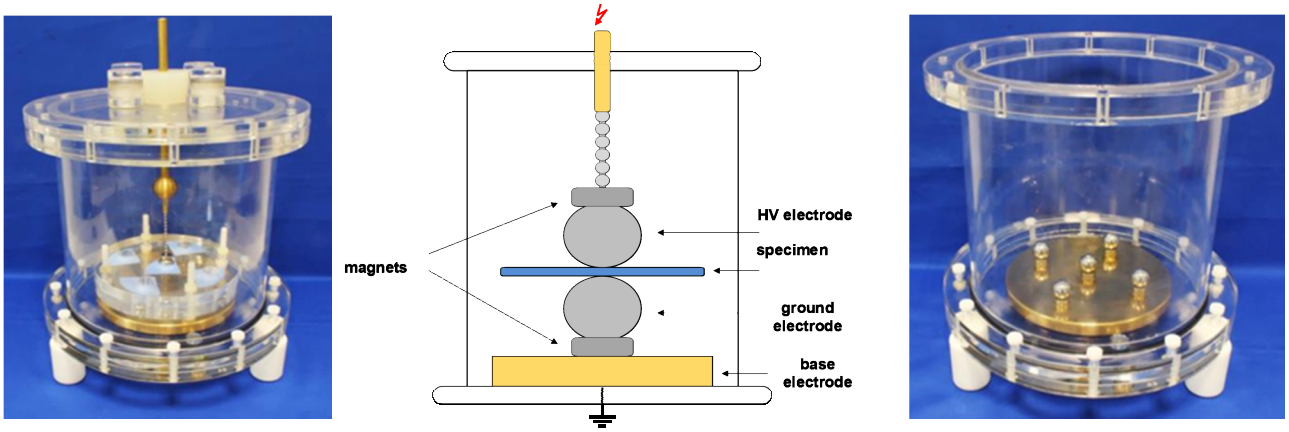


Figure 1: Schematic construction of test setup for breakdown measurements

A step-up transformer supplied from a sinusoidal low-voltage source, which is capable of varying the test voltage smoothly and uniformly was used at all times. Furthermore, the resistor in series with the transformer was used to limit the current during breakdown. The ramp-test was chosen for all measurements as it does not need a critical control of the electric field and is proper for both AC and DC measurements. The main tests were performed at a rate of increase of 3 kV/s, peak value. In order to analyze the effect of the rate on the breakdown, additional tests were performed at 250 V/s and 4.2 kV/s on silicone under AC and both DC positive and negative. In order to analyze the reliability of the test results, the measurements were repeated at least five times for each waveform.

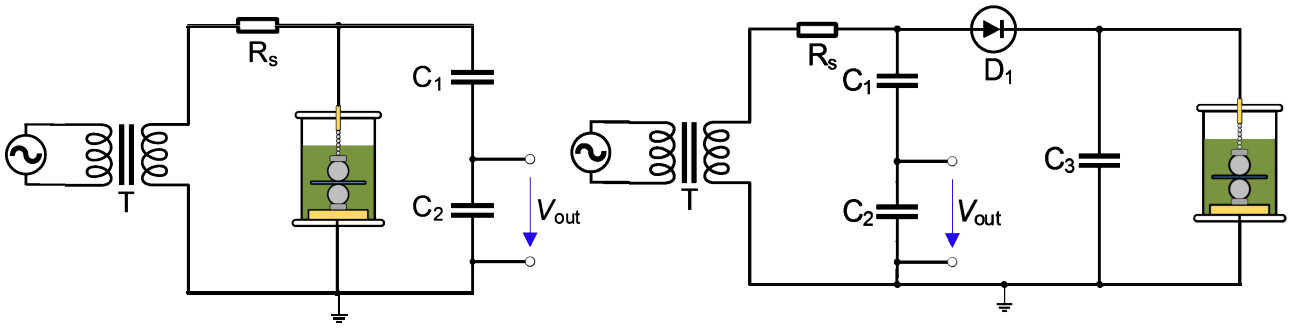


Figure 2: AC (left) and positive DC (right) measuring circuit

In order to measure the breakdown under DC stress, the AC output of the transformer was rectified using a diode and a smoothing capacitor, see Figure 2 - right, of which the ripple was less than 2 %. The output breakdown voltage was measured on the AC side.Between each measurement there was a pause of at least one hour due to the remaining charges of the oil. For negative DC measurements, D1 was changed in direction. Figure 3 depicts the circuit for combined voltage tests. By varying the values of R1 and R2, a change in the DC wave can be obtained. For this work, a ratio of 40 % and 75 % were used. The output breakdown voltage was measured over the secondary side of the transformer.

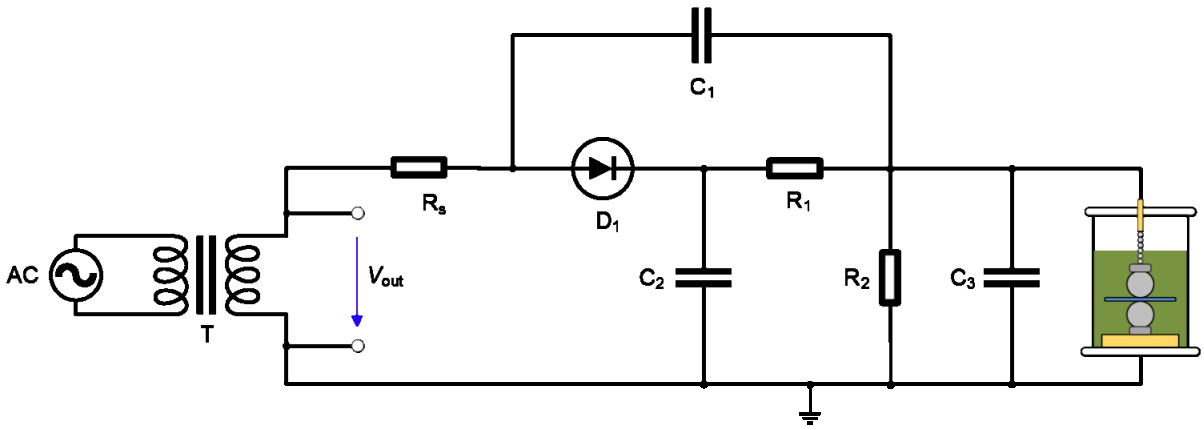


Figure 3: Positive combined voltage measuring circuit

The measured breakdown voltage for silicone rubber and epoxy resin at an increasing rate of 3 kV/s (peak value) under different applied voltages are illustrated in Figures 4 and 5, respectively, according to the Weibull distribution. Both diagrams show the significant influence of the different applied voltages during breakdown. In silicone rubber, the values are higher under negative combined voltages than under positive combined voltages, unlike the results under DC. In epoxy resin, on the contrary, the results of combined positive and negative voltages are approximately the same. From the comparison of both materials, it is obvious that the breakdown voltage is higher on silicone rubber, except for AC and positive combined stresses, where the trend shows the inverse effect.

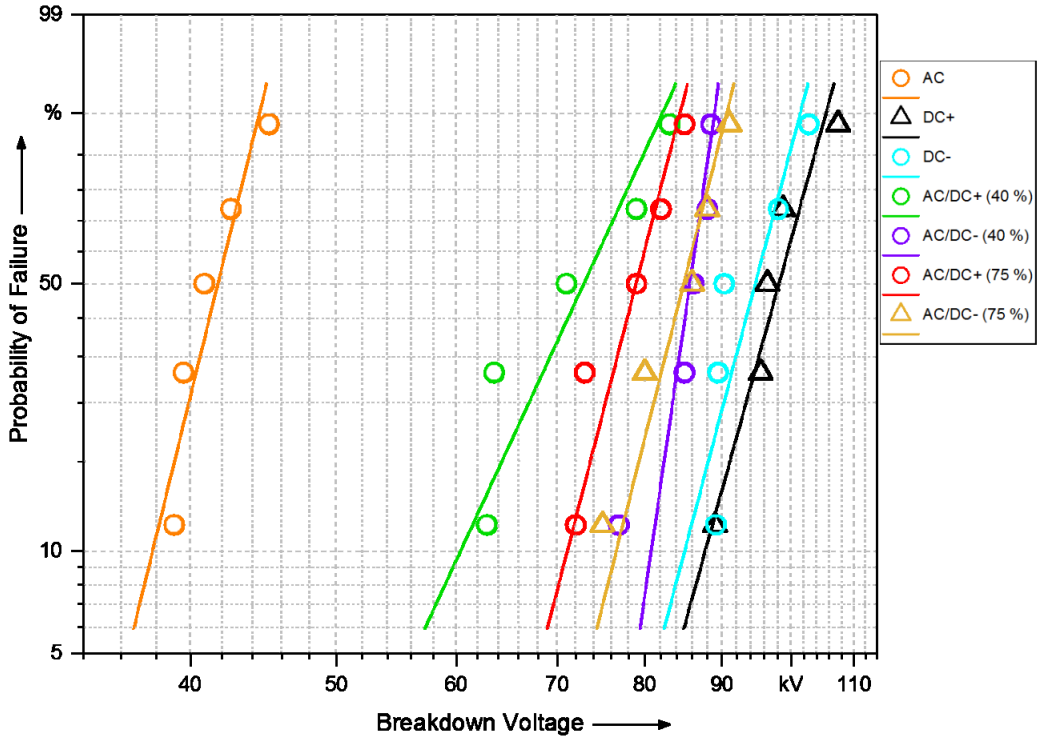


Figure 4: Weibull peak voltage plot for silicone rubber at an increasing rate of 3 kV/s

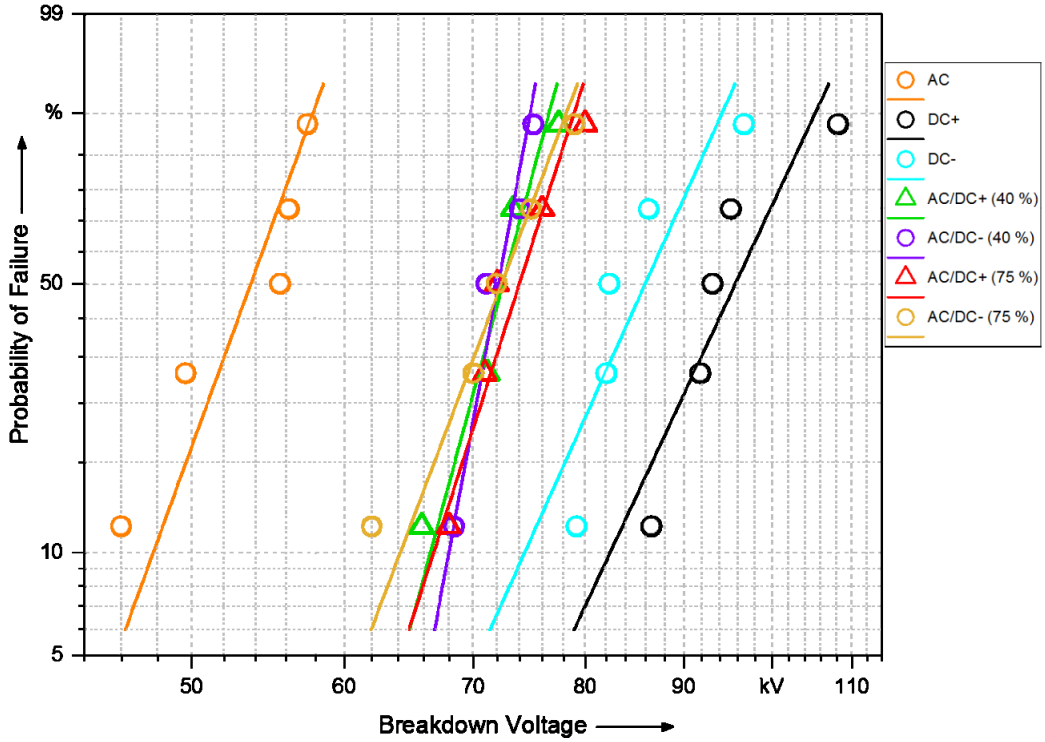


Figure 5: Weibull peak voltage plot for epoxy resin at an increasing rate of 3 kV/s

The comparison of the electric field distribution in Figure 6 demonstrates a completely different behavior. In both cases the distribution is maximal in the oil at the point closest to the triple junction. However, the difference is based on the fact that under AC, the intensity of the field is high along the axis of symmetry and decreases as it moves away from it, as indicated by the gradient of the colours. In this case, the intensity of the field predominates in the sample. While under DC, it predominates in the oil and extends uniformly to the sides. Here, the intensity of the field in the sample is high at the points bordering the electrodes.

In oil, ion conduction predominates. In the solid sample, however, electron conduction prevails.

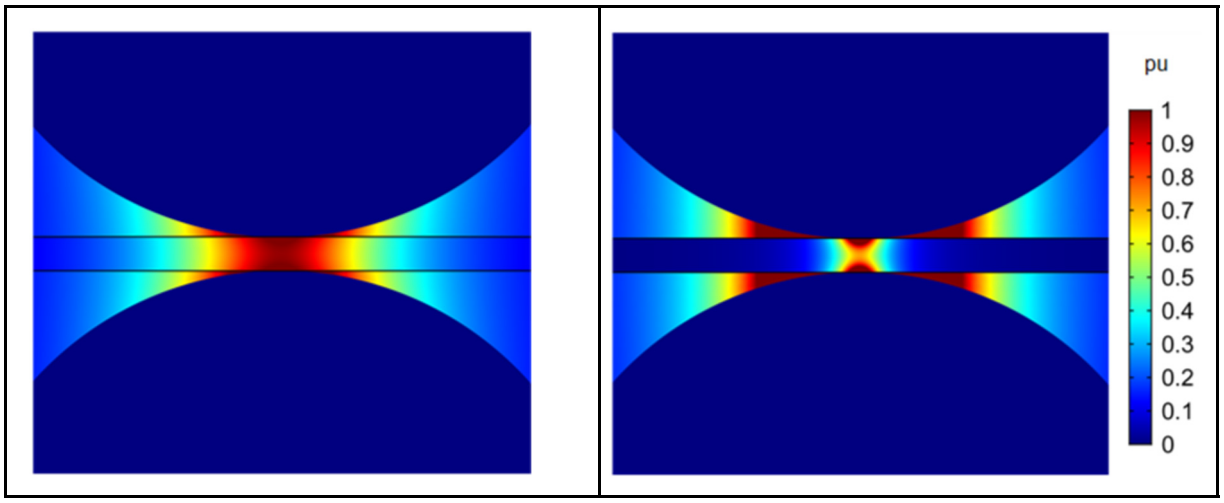


Figure 6: Electric field distribution under AC (left) and under DC (right) for silicone rubber

A novelty of the experimental arrangement of this work is based on the use of magnets to eliminate possible misalignments and thus guaranteeing a permanent superimposition of the spheres during the experiments, achieving more accurate results. The fact that the construction consists of five ground electrodes and that these can be rotated and used several times speeds up and facilitates the measurement of the breakdown voltage.

The experimental results are similar for both tested materials, the lowest breakdown strength could be determined under AC and the highest value under DC, whereas the breakdown values of combined voltage stresses are in between. Therefore if new DC systems will be installed in the future nearby old AC systems, attention have to be paid on the reliability, because due to occurring combined AC/DC stresses, the breakdown strength especially of DC systems could be considerably reduced.

Reproducibility of Partial Discharge Measurements according to IEC 60270 under AC and DC Voltages

M.Sc. Hassan Saadati

Partial discharge measurements under DC stresses are today not fully considered in *IEC 60270*, due to missing experience and information on the application. However, the partial discharge measurement under DC voltage will become more and more important, because of the increasing use of HVDC systems in the future transmission networks. Therefore, in a round-robin test the applicability of *IEC 60270* for partial discharge measurements with DC voltage was investigated. After measurements on defective epoxy-resin insulators with voids at University of Applied Science in Bremen, Graz University of Technology, and Leibniz University of Hannover further measurements on a simpler test setup have been carried out. A feasible and reproducible measurement procedure was therefore developed and necessary definitions in the interpretation and evaluation of the measured data were being determined. The partial discharge behavior at a needle-plate arrangement in air at AC and DC voltages was investigated at the mentioned laboratories. All three laboratories have used needles from the same manufacturer with a tip radius of approximately 50 µm. The microscopic picture of a needle for the experiment can be seen in Figure 1.

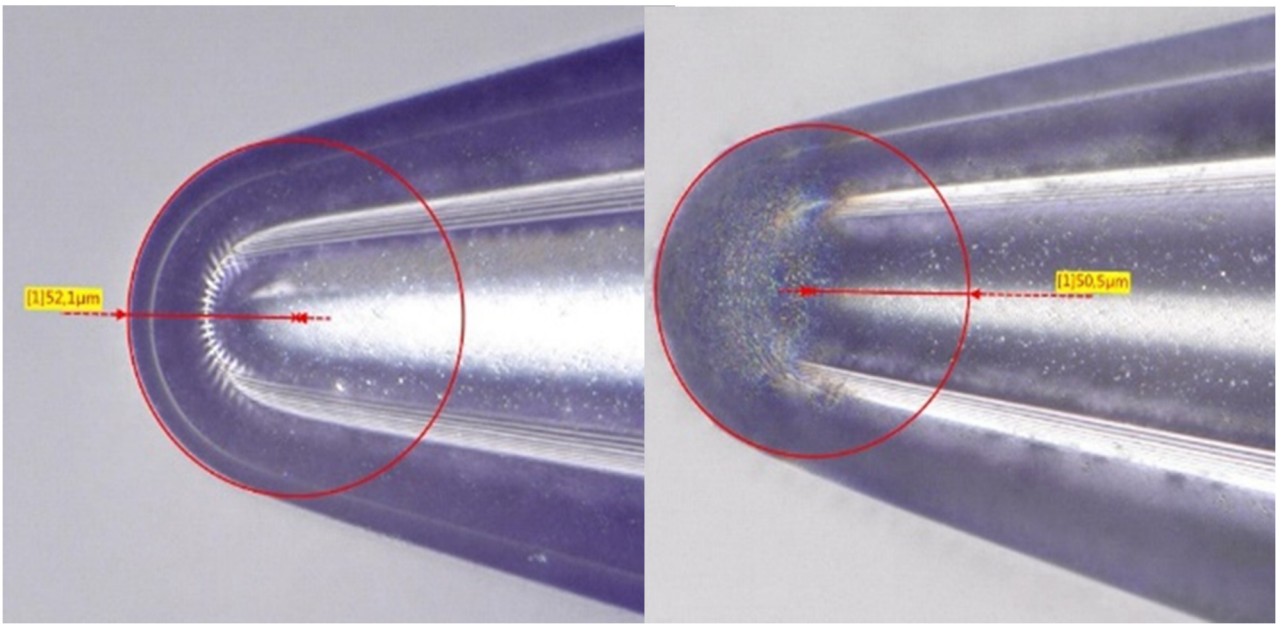


Figure 1: Electrode arrangement with silicone rubber sample (left) and with epoxy resin (right)

Parameters such as PDIV (PD inception voltage), PDEV (PD extinction voltage), the minimum, maximum and average value of PDs and the number of PDs were recorded for each performed test. The results presented in the following are averaged out of the three test sequences.

The average absolute value of the PDIV at AC voltages for the three different laboratories was between 3.1 kV and 3.5 kV, at DC+ it was between 4.5 kV and 5.5 kV and at DC- between 3.6 kV and 4.5 kV as shown in Figure 2.

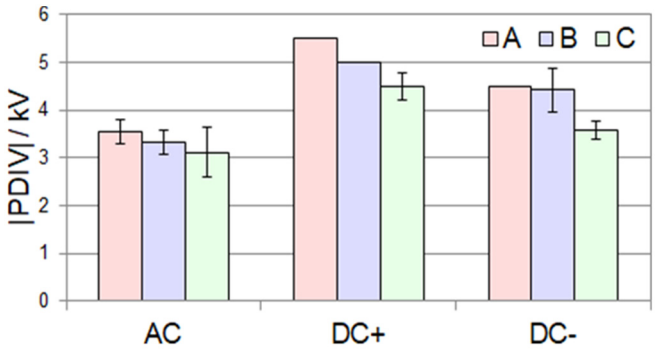


Figure 2: Average values of the PDIV at AC and DC voltages for all three laboratories (A, B, C)

The experiments on a rather simple electrode configuration have shown that PD measurements carried out in different laboratories under AC voltages are reasonable comparable if the measurements are performed according to *IEC 60270*. However, it seems on a first view also the difference for DC stresses are not so huge, although they are certainly larger than under AC stress. Nevertheless if additional parameters are compared the differences between the results of the 3 labs increase dramatically. Figure 3 shows the apparent charge and the number of PDs under negative DC stress.

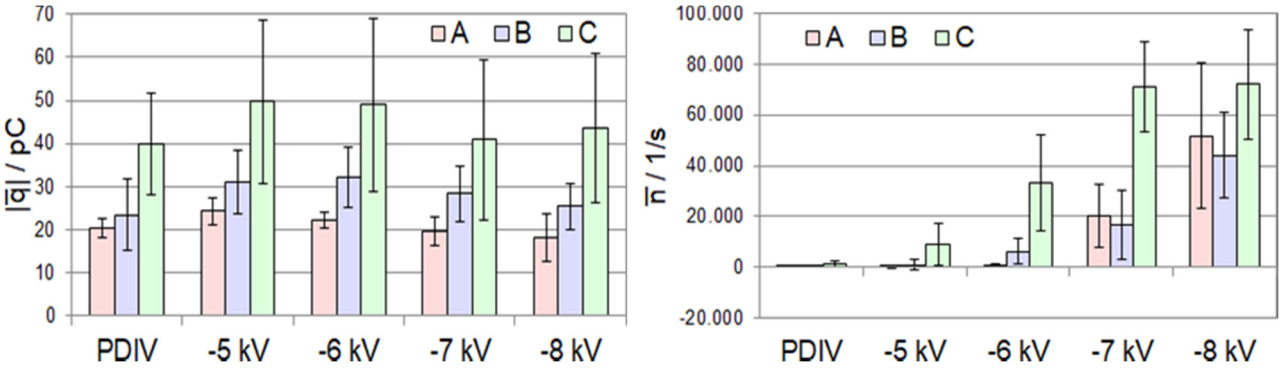


Figure 3: Average apparent charges and quantity of PDs under negative DC stress for all three labs

As it can be seen in Figure 3 huge differences in the determination of apparent charges and quantities of PD signals can be seen, which could not be detected under AC stresses, where the highest deviation for the number of PD signals was around 20 % and even lower if the standard deviation is considered.

Consequently, it is necessary to modify the *IEC 60270*, if PD measurements under DC stress should become as comparable as PD measurements under AC voltages.

7 Veröffentlichungen

e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2018, DOI 10.1007/s00502-018-0655-y, Springer Verlag GmbH Austria
Möglichkeiten und Grenzen von offline Diagnosemethoden zur Zustandsbeurteilung von Leistungstransformatoren
P. Werle, M. Hartje

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018 , Volume 25, Issue 5, Pages 1644 - 1650
Effect of carbonized patterns on oil-impregnated aramid pressboards surface on acoustic emission signals at inhomogeneous electric field
S. A. M. Najafi, E. Gockenbach, P. Werle , H. Borsi

International Journal of electrical Power and Energy Systems, Vol. 104, pp. 443-455, 2019
Thermal management of a distribution transformer: an optimization study of the cooling system using CFD and Response Surface Methodology
L. Raeisian, H. Niazmand, E. Ebrahimnia-Bejestan, P. Werle

International Transformer Life Management (ITLM), 12. - 13.04.2018, Shuzou, China
DGA - Possibilities and Limitations
P. Werle

Investigations on the Ageing of the Oil-Paper Insulation in Transformers
P. Werle

Fachtagung Polymere Isolierstoffe und ihre Grenzflächen, 17. - 18.05.2018, Zittau, Deutschland
Auswirkung von Graphit in Silikon auf die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften bei Gleichspannungsbeanspruchung
M. Aganbegović, P. Werle

Optical digital microscopy and frequency domain analysis as a quality control of solid composite dielectrics in high voltage applications
H. Saadati, J. Seifert, P. Werle

IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 01. - 05.07.2018, Budapest, Hungary
Feasibility of FDA method for the detection and classification of faults in extruded HVDC cables
Y. Norouzi, C. Frohne, V. Gauler, P. Werle, S. Seifi

Effect of Surroundings of UHF Partial Discharge Probes on the Captured Pulses in Power Transformers
M. Akbari Azirani, P. Werle, A. Akbari

Investigation of Partial Discharge Localization based on Electrical Measurements
M. Rahimbakhsh, J. Torres, P. Werle, E. Gockenbach, M. Akbari Azirani

A sensitivity analysis of RLC transformer winding model parameters used for a PD localization
S. Seifi, A. Akbari, P. Werle, H. Mohseni, A. A. Shayegani Akmal

IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 10. - 13.09.2018, Athens, Greece

High Frequency Model of Cables for Frequency Domain Analysis used for Fault Localization
Y. Norouzi, C. Frohne, P. Werle

Fundamental Difference of Partial Discharge Phenomena under AC and DC Stresses
H. Saadati, P. Werle, J. M. Seifert, E. Gockenbach, H. Borsi

Transformer Life Management (TLM), 24. - 25.09.2018, Neuss, Germany

Entwicklung von multifunktionalen Nanofluiden für Hochspannungsanwendungen; Möglichkeiten und Grenzen
M. T. Imani, P. Werle

Untersuchung zur Alterung des Papier-Öl-Dielektrikums
T. Kinkeldey, P. Werle

Neues zur FRA-Interpretation
M. Hartje, P. Werle

Intelligente Algorithmen zur Bewertung von Isolierölkennwerten
S. Schreiter, P. Werle, H. Loymeyer

IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 23. - 26.09.2018, Perth, Australia

Online Fault Gas Monitoring System for Hermetically Sealed Power Transformers
M. Akbari Azirani, M. Kuhnke, P. Werle, W. Sorgatz

Investigation on Ageing Parameters of a Thermally Accelerated Aged Paper-Oil-Insulation in a Hermetically Sealed System
T. Münster, T. Kinkeldey, P. Werle, K. Hämel, J. Preusel

Effect of Thermal Aging on the mechanical Characteristic of Insulation Paper Impregnated with Different Insulating Oils
I. Sari, Suwarno, T. Kinkeldey, P. Werle

IEEE International Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 21. - 24.10.2018, Cancun, Mexico

Optimized Arrival Time Determination of UHF Pulses for Localization of Partial Discharges in Power Transformers
M. Akbari Azirani, M. Ariannik, P. Werle, A. Akbari

Effect of Cable Joints on Frequency Domain Analysis
Y. Norouzi, S. Braun, C. Frohne, S. Seifi, P. Werle

How Far are Furan Compounds Reliable Indicators for Thermal Aging of Oil Impregnated Cellulose Insulation?
M. T. Imani, K. Homeier, P. Werle, G. Dräger

Feasibility of Partial Discharge Localization in Power Transformers based on a novel Curve Fitting Method
M.Rahimbakhsh, M. Mostoofi, P. Werle, E. Gockenbach

IEEE International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 29. - 31.10.2018, Alila Solo, Central Java, Indonesia

Estimation of the Degree of Polymerization (DP) in Oil-Paper Insulation System Based on Dielectric and DGA Data Using Fuzzy Logic Algorithm
E. F. Nasution, Suwarno, T. Kinkeldey, P. Werle

Fachtagung VDE Hochspannungstechnik, 12. - 14.11.2018, Berlin, Deutschland

Optimierte Bestimmung der Ankunftszeiten von UHF Signalen für die Lokalisierung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren
M. Akbari Azirani, M. Ariannik, P. Werle, A. Akbari

Entwicklung eines Online-Fehlergas-Überwachungssystems für hermetisch verschlossene Leistungstransformatoren
M. Akbari Azirani, M. Kuhnke, P. Werle, W. Sorgatz

A Novel Algorithm for UHF based Partial Discharge Localization in Power Transformers
M. Ariannik, M. Akbari Azirani, P. Werle, A. Akbari

Druckabhängigkeit des Teilentladungsverhaltens in Hermetiktransformatoren
M. Kuhnke, P. Werle

Investigation on the Accelerated Ageing Behaviour of Oil-Paper-Insulation Using Different Insulating Oils
T. Münster, T. Kinkeldey, P. Werle, K. Hämel, J. Preusel

Reproducibility of the Results of Partial Discharge Measurements according to IEC 60270 at DC and AC Voltage
H. Saadati, P. Werle, M. Huntke, M. Hartje, A. Pirker, U. Schichler

Furane als Alterungsindikatoren für die Zustandsbestimmung der Zellulose in ölgefüllten Transformatoren
M. T. Imani, K. Homeier, P. Werle, G. Dräger

Estimation of the Degree of Polymerization (DP) of Oil-Paper Insulated Transformers Using a Novel Fuzzy Logic Algorithm
T. Kinkeldey, T. Münster, P. Werle, E. Nasution, Suwarno, K. Hämel, J. Preusel

Prediction of Oil Hotspot Temperature in a Distribution Transformer by CFD Method
L. Raeisian, P. Werle, H. Niazmand, E. Ebrahimnia-Bejestan

Investigation of a Special Transformer Winding Model for the Interpretation of FRA Measurements
S. Seifi, P. Werle, H. Mohseni, A. Shayegani Akmal, Y. Norouzi

Feasibility of winding faults detection on power transformers based on a new proposed reflection method
M. Rahimbakhsh, S. Seifi, P. Werle, E. Gockenbach, M. Hartje

Aufbau einer kompakten Kaskadenschaltung zur Erzeugung hoher Gleichspannung bis 360 kV
O. Gratz, H. Schnittker, E. Gockenbach, P. Werle

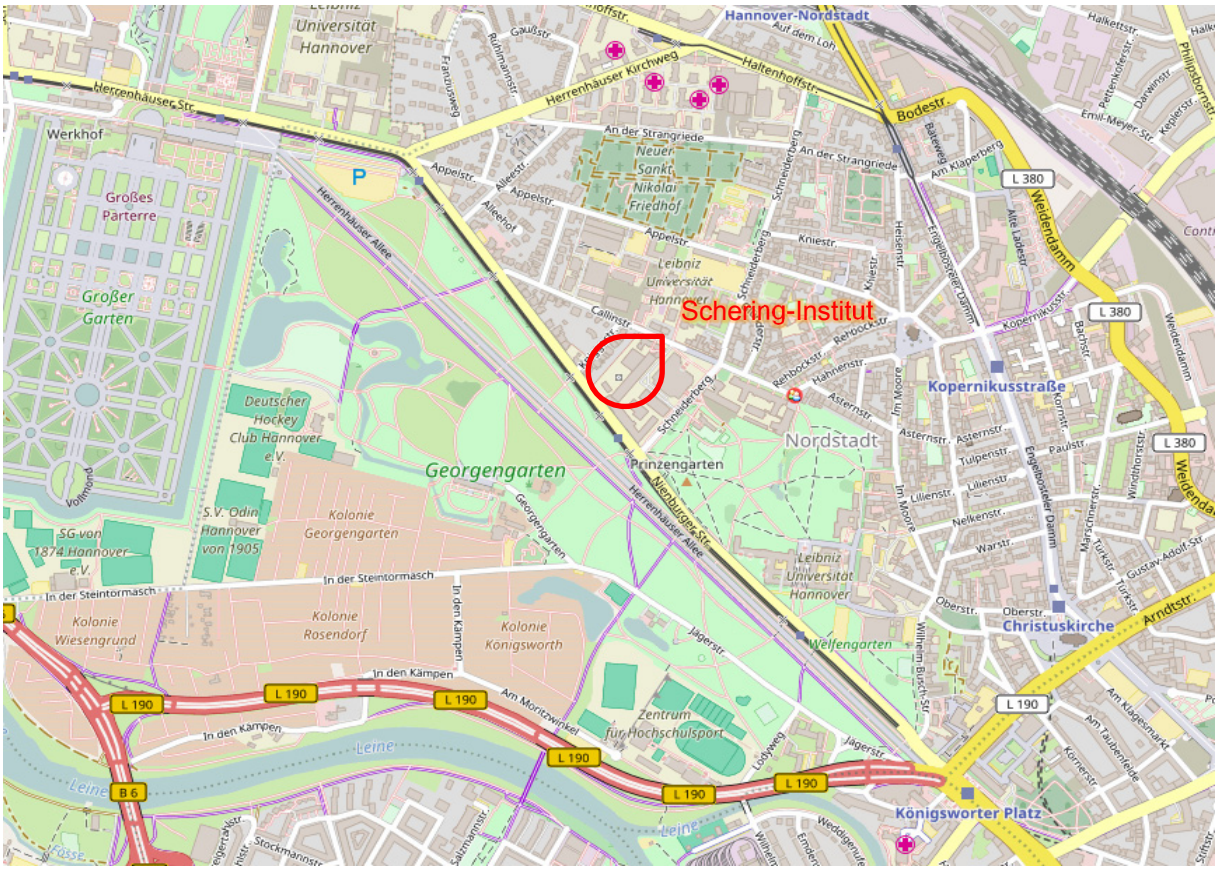
Mehrdimensionale Betrachtung ölanalytischer Ergebnisse am Beispiel einer großen, realen Transformatorenflotte
S. Schreiter, P. Werle, H. Loymeyer

Korrelationsanalyse ausgewählter Isolierölparameter von Leistungstransformatoren
S. Schreiter, P. Werle, H. Loymeyer

Verhalten von speziell dotierten Silikonschichten bei Gleichspannungsbeanspruchung
M. Aganbegović, P. Werle

Cigré-Brasil, IX Workspot: International Workshop On Power Transformers: Equipment, Substations and Materials, 25. - 28.11.2018, Iguazu, Brasil
Optimized Partial Discharge Localization in Power Transformers Using the UHF Measurement Technique
M. Akbari Azirani, M. Ariannik, P. Werle

8 Lageplan und Ausstattung



Ausstattung

- Prüfquellen: - Stoßspannung 3 MV, 300 kJ
  - Wechselspannung 800 kV, 1 A, 50 Hz
  - Gleichspannung 800 kV, 100 mA
  - Stoßstrom 200 kA, 300 kWs
- 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 ausgestatte Werkstatt zur Herstellung diverser Elektroden-konfigurationen 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