

# Jahresbericht 2022



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



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Personelle Besetzung des Institutes.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Lehre.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Neue Mitarbeiter und Gastwissenschaftler.....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Promotionen.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Forschungsarbeiten.....</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Konferenzen und Exkursionen.....</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>Lageplan und Ausstattung.....</b>	<b>105</b>

## 1 Vorwort

Lieber Freundeskreis des Schering-Instituts,

wie im letzten Newsletter angekündigt, gibt es dieses Jahr wieder einen ausführlichen Jahresbericht, welchen wir zudem erstmalig sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache erstellt haben, da wir immer mehr Kontakte und Projekte mit ausländischen Industriekooperationspartnern und Universitäten haben. Sollten Sie daher auch einen englischsprachigen Jahresbericht benötigen, lassen Sie und dies bitte wissen, dann können wir Ihnen gerne ein Exemplar zusenden.

Nachdem sich die Pandemiesituation im letzten Jahr deutlich verbessert hat, so dass in 2022 die Lehre wieder in Präsenzveranstaltungen durchgeführt werden konnte, hat sich erneut Vieles mit dem unrechtmäßigen Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine verändert. Neben der Energiekrise kam es zu deutlichen Preissteigerungen und Lieferengpässen unterschiedlichster Materialien und Bauteile, was auch die Arbeit am Schering-Institut beeinflusste, da diese nach wie vor experimentell besonders ausgeprägt ist. So leben wir alle weiterhin in ungewöhnlich unruhigen Zeiten, wobei kaum abzuschätzen ist, wie sich die Situation weiter entwickeln wird, so dass nichts anderes übrig bleibt, als auf die Vernunft aller Beteiligten zu hoffen.

Natürlich kommt durch die Energiekrise unserer Branche aktuell eine besondere, zukunftsweisende Bedeutung zu, die dazu führt, dass die Aussichten auf dem Arbeitsmarkt für unsere Studierenden hervorragend sind. Dies wird auch in den nächsten Jahrzehnten so bleiben, denn neben der aktuellen Veränderung des Energiesystems hin zu den regenerativen Energien - basierend vor allem auf Sonne und Wind - ist schon die nächste Energiewende in einigen Jahrzehnten in Sicht, infolge der fortschreitenden Erfolge in der Kernfusion, wie jüngst aus den Vereinigten Staaten berichtet wurde. Dies wird sicherlich auch einen positiven Einfluss auf zukünftige Abiturjahrgänge haben, so dass sich immer mehr für einen Energietechnikstudiengang interessieren werden, jedoch hilft dies aktuell wenig, denn die Universitäten können den Bedarf an notwendigen Ingenieurinnen und Ingenieuren der Elektrotechnik nicht decken. In Konsequenz wird dies dazu führen, dass sich die großen Energietechnikprojekte verzögern werden und somit auch die Energiewende in Gänze verlängert wird. Wie schon im letzten Newsletter dargestellt, erfordert eine Transformation hin zur E-Mobilität und zu einer veränderten E-Versorgung - mittel- bis langfristig auch zu einer E-Wärmeversorgung - einfach viele weitere E-Fachkräfte, wobei parallel versucht werden soll, auch mehr Ingenieurinnen für diese Branche zu begeistern.

Wir alle sind daher aufgefordert mehr Werbung für unseren Beruf zu machen, denn auch wenn das Studium nicht einfach ist - es lohnt sich, denn es warten tolle, gut bezahlte Arbeitsplätze, die interessant und international sind und das zukünftige Energieversorgungssystem gestalten sollen - eine, wie wir alle wissen, *hochspannende* Aufgabe.

Der derzeitige Mangel an leistungsstarken Studierenden macht sich natürlich auch am Schering-Institut bemerkbar, da wir einerseits weitere Doktorandinnen und

Doktoranden suchen, um die diversen Projekte bearbeiten zu können, andererseits die Industrie natürlich mit interessanten Angeboten lockt. Dieses Jahr konnten wir aber mit den Herren Balali, Moh'd und Wang drei neue Mitarbeiter gewinnen, während Herr Dr. Zhou seine Arbeiten am Schering-Institut mit seiner Promotion zum Thema Kriechwegentladungen entlang Öl-Papier-Grenzflächen bei verschiedenen Spannungsbeanspruchungen erfolgreich beendet hat. Zudem konnten wir im letzten Jahr Herrn Prof. Akbari Azirani von unserer Partneruniversität im Iran - der K.N. Toosi University of Technology in Teheran - sowie Herrn Ariannik als Doktorand von der York Universität in Toronto, Kanada als Gastwissenschaftler begrüßen, die Teile ihrer Forschungsarbeiten am Schering-Institut durchführten.

Positiv in 2022 war zudem, dass die Mitarbeiter/innen endlich wieder an diversen Konferenzen teilnehmen konnten, was zu mehr als 20 nationalen und internationalen Veröffentlichungen führte. Auch unsere TLM Konferenz konnte im September in Bad Gögging ohne besondere Auflagen stattfinden, was von mehr als 200 Besuchern und fast 30 Fachausstellern genutzt wurde. Im Laufe der nun mehr als 10 Jahre stattfindenden TLM wurden viele kleine Erweiterungen vorgenommen, so dass in die TLM 2022 neben den ca. 20 Fachvorträgen und den erwähnten Fachausstellung mittlerweile auch Intensivworkshops zu verschiedenen Themen integriert wurden und zudem auch eine Postersession erfolgte, bei der vor allem die jungen Forscher/innen ihre Arbeiten präsentieren können. Die TLM 2023 wird am 18. und 19. September in Schweinfurt stattfinden und sicher auch wieder intensiv von unseren Doktoranden/innen genutzt werden, um das eigene Netzwerk auszubauen und Details der Forschungsarbeiten mit erfahrenen Besuchern/innen zu diskutieren. Dies soll auch durch Arbeiten in Gremien gefördert werden, so dass einige der etwas erfahreneren Doktoranden/innen seit dem letzten Jahr nun auch in Arbeitsgruppen der CIGRÉ mitarbeiten und auf diese Weise ein kontinuierlicher internationaler Austausch gewährleistet ist.

Wie Sie aus diesen einleitenden Worten entnehmen können, ging ein ereignisreiches aber auch arbeitsintensives Jahr zu Ende, so dass wir uns abschließend sehr herzlich für die gute Zusammenarbeit, Förderung und Unterstützung bei Ihnen, unseren Kooperations- und Industrie-partnern, dem ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) des BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz), der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) "Otto von Guericke" e.V. - Projekt GmbH, der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, der Deutschen Forschungs-gemeinschaft (DFG), dem Deutschen Akademischen Auslandsdienst (DAAD) und der Alexander von Humboldt Stiftung (AvH) bedanken möchten, wobei wir uns auf eine Weiterführung dieser Kooperationen im neuen Jahr freuen.

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

Hannover, Januar 2023



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:	Erich Semke (Leitung) Ina Riekeberg
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Borsi
Lehrbeauftragte:	Hon.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Pöhler Hon.-Prof. Dr.-Ing. Monika Sturm
Gastwissenschaftler:	Prof. Dr.-Ing. Asghar Akbari
Doktorandinnen und Doktoranden:	M.Sc. Behnam Balali M.Sc. Sebastian Braun M.Sc. Kristin Homeier M.Sc. Mahmoud Moh'd M.Sc. Büsra Özdemir M.Sc. Henning Schnittker M.Sc. Junaid Shaikh M.Sc. Aref Sharifi M.Sc. Laureen Stahl M.Sc. Javier Torres M.Sc. Yunfei Wang
Externe Doktoranden:	M.Sc. Oliver Derigs Dipl.-Ing. (FH) Henry Hirte M.Sc. Sebastian Schreiter
Dissertation in Vorbereitung:	Dipl.-Ing. Mirnes Aganbegović M.Sc. Mohammad Akbari Azirani M.Sc. Mohammad Taghi Imani Dipl.-Ing. Tobias Kinkeldey M.Sc. Tobias Münster M.Sc. Sahand Seifi





## 3 Lehre

### Prof. Dr.-Ing. P. Werle

#### **Hochspannungstechnik I**

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

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

#### **Hochspannungstechnik II**

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

Durchschlagsarten flüssiger Isolierstoffe  
Durchschlagsarten fester Isolierstoffe  
Einflussgrößen auf die Durchschlagspannung  
Lebensdauer kennlinie, 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<sub>6</sub>-Systeme, Ersatzgase  
Strom- und Spannungswandler, Verhalten bei Wanderwellen  
Hochspannungskabel  
Vergleich von Energieübertragungssystemen  
Spannungsdurchführungen und -ausleitungen  
Dimensionierung und Feldberechnung  
Hochspannungs-Leistungskondensatoren  
Überspannungsableiter  
Schutzkonzepte



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

Energiewende: Ursache und Auswirkungen

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

Freileitungen: Materialien, Aufbau, Masten, Auslegung, Schwingungen

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HVDC)

Supraleitende Betriebsmittel

Konventionelle Erzeugungssysteme

Energiespeicher und Kernfusion

Blitzschutz und EMV

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

Asset-Management Grundlagen

Normen, ISO, IEC, VDE, IEEE

DIN ISO 55000, 55001, 55002

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

IEC 60422, IEC 60599

Energiewirtschaftsgesetz

Aufgaben des Asset Managers

Flottenmanagement

Instandhaltungsstrategien

Risiko-Wichtigkeits-Diagramme

Zustandsanalysemethoden

Ölanalytik, DFR, FRA, TE, Isolationsmessungen, Thermovision

Sensortechniken

Monitoringsysteme

Datenkorrelationstechniken

Zustandsverbesserungsstrategien

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

**M.Sc. M. Kuhnke****Elektrotechnisches Grundlagenlabor Teil I (ET)****(SS, experimentelle Übungen, 2 SWS)**

Strom- und Spannungsmessungen

Gleichstrom-Netzwerke

Kennlinien elektrischer Bauelemente

Einfache Wechselstromkreise

**Elektrotechnisches Grundlagenlabor Teil II (ET)****(WS, experimentelle Übungen, 3 SWS)**

Feldmessungen

Schwingkreise

Leistung bei Wechselstrom

Dreiphasenwechselstrom

Technisches Schreiben

**Elektrotechnisches Grundlagenlabor Teil III (ET)  
(WS, experimentelle Übungen, 2 SWS)**

Schaltvorgänge  
Halbleiterschaltungen und Operationsverstärker  
Spektralanalyse und-synthese periodischer Signale  
Feldeffekttransistor und CMOS-Grundsaltungen

**Elektrotechnisches Grundlagenlabor (MB)  
(WS, SS, experimentelle Übungen, 2 SWS)**

Strom- und Spannungsmessungen  
Gleichstrom-Netzwerke  
Schwingkreise  
Kennlinien elektrischer Bauelemente

**Physiklabor für Wirtschaftsingenieure  
(SS, experimentelle Übungen, 1 SWS)**

Feldmessungen  
Schwingkreise  
Leistung bei Wechselstrom  
Dreiphasenwechselstrom

**Elektrotechnisches Grundlagenlabor f. Nachhaltige Ingenieurwissen-  
schaften****(SS, experimentelle Übungen, 1 SWS)**

Kennlinien elektrischer Bauelemente  
Schwingkreise

**Prof. Dr.-Ing. P. Werle / Prof. Dr.-Ing. habil. L. Hofmann****Labor Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
(SS, WS, experimentelle Übungen, 4 SWS)**

Messung hoher Wechselfspannungen  
Elektrischer Durchschlag in Gasen  
Ausmessung von elektrischen Feldern  
Bestimmung der Durchschlagsspannung von Mineralöl  
Sternpunktterdung & Ausgleichsvorgänge (am IEE)  
Kurzschlussstromberechnung mit PC (am IEE)  
Windenergieanlage (am IEE)  
Kippschwingungen (am IEE)

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

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

**Hon.-Prof. Dr.-Ing. M. Sturm****Systeme zur zukünftigen Energieoptimierung und -vermarktung  
(SS, Vorlesung 2 SWS)**

Marktanforderungen  
Energiewirtschaftliches Umfeld  
Strukturen, Prozesse, Modelle, Zielsetzungen  
Dezentrale/regenerative Systeme  
Optimierte Energienutzung  
Querverbundoptimierung  
Zusammenspiel EVU - Industrie  
Smart Grid  
Kommunikation/verteilte Intelligenz  
Smart Metering  
Elektromobilität

## 4 Neue Mitarbeiter und Gastwissenschaftler

### M.Sc. Mahmoud Moh'd

Im Jahr 2010 begann ich mein Bachelorstudium im Bereich der Elektrotechnik an der Al-Balqa Applied University in Jordanien. Anschließend habe ich mein Praktikum im Amman East Station (AES) – Kombikraftwerk in der Wartungsabteilung gemacht. Im Jahr 2014 nahm ich eine Anstellung in Qatar als Site-Ingenieur im Bereich Kabelverlegung und Umspannwerke an. 2015 wechselte ich nach Jordanien, um als Design-and-Application-Ingenieur im Bereich Solarenergie-Photovoltaik bei der Firma Philadelphia-Solar zu arbeiten. In dieser Tätigkeit war ich für die Auslegung, Installation sowie die Kostenrechnung der Projekte verantwortlich. Unter anderem habe ich hier zusammen mit Arbeitskollegen ein Photovoltaik-Anlage mit einer Leistung von 50 Mega-Watt installiert.



Im Jahr 2019 habe ich mein Masterstudium im Fach Energietechnik an der Leibniz Universität Hannover (LUH) begonnen. Das Studium konnte ich im Jahr 2022 mit einer Masterarbeit am Schering Institut mit dem Thema „Anwendung von Klassifikationsmodellen zur Unterstützung der Bewertung von Leistungstransformatoren“ erfolgreich beenden. Seitdem bin ich am Schering-Institut als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Aktuell beschäftige ich mich mit freiatmenden Leistungstransformatoren. Während des Betriebs sind Transformatoren verschiedenen Belastungen ausgesetzt, wie z. B. thermischen, elektrischen, chemischen und mechanischen Beanspruchungen. Ein Hauptproblem ist die Aufnahme von Feuchtigkeit und Sauerstoff von außen, die zu chemischen Reaktionen führen und die Degradationsmechanismen im gesamten Isolationssystem von ölpapierisolierten Transformatoren beschleunigen können. Insbesondere bei freiatmenden Transformatoren, die über das Ausdehnungsgefäß Kontakt zur Umgebungsluft haben, werden beim Einatmen des Transformators Feuchtigkeit und Sauerstoff eingebracht. In diesem Zusammenhang entwickle ich ein Verfahren zur Lebensdauerverlängerung dieser Leistungstransformatoren.

## M.Sc. Behnam Balali



Im Jahr 2014 begann ich mein Bachelorstudium der Elektrotechnik an der Universität Science and Culture, Teheran, Iran. Nach meinem Bachelor-Abschluss im Jahr 2018 begann ich mein Master-Studium in Elektrotechnik, Leistungselektronik und elektrische Maschinen an der K. N. Toosi University of Technology, Teheran, Iran. Der Titel meiner Masterarbeit lautete "Modellierung von Fehlern bei Synchrongeneratoren auf der Grundlage der Analyse ihres Frequenzgangs und der Möglichkeit der Erkennung des Isolationszustands". In dieser Arbeit wurde

zunächst ein Hochfrequenz-Ersatzschaltbild des Leistungssynchrongenerators vorgestellt. Dann wurden mit Hilfe der Simulation des 3D-Modells eines Synchrongenerators mit ausgeprägtem Pol in Ansys Maxwell alle Parameter der Wicklungen und des Kerns eines realen Synchrongenerators extrahiert. Schließlich wurden einige Isolationsdefekte gleichzeitig mit der Auswirkung der Rotorposition auf den Frequenzgang der Statorwicklungen modelliert, und die Diagnose wurde mithilfe der Frequenzganganalyse (FRA) durchgeführt.

Darüber hinaus sammelte ich während meines Masterstudiums wertvolle Erfahrungen als Betreuer von Elektroniklabore und als Dozent für diesen Kurs an der Universität Science and Culture. Nach Abschluss meines Masterstudiums im Jahr 2021 setzte ich meine Forschung zur Zustandsüberwachung von Hochspannungsgeneratoren im Hochspannungslabor der K. N. Toosi University of Technology fort.

Seit Mai 2022 bin ich Mitglied des Forschungsteams des Schering-Instituts, um mein PhD-Programm zu verfolgen. Mein derzeitiges Forschungsthema lautet "Entwicklung und Untersuchung eines Online-Überwachungssystem für Hermetiktransformatoren". Mittelspannungs-Maschinentransformatoren werden häufig in Windkraftanlagen eingesetzt, um die Ausgangsspannung des Turbinengenerators von einigen hundert Volt auf die Mittelspannungsebene des Kollektorsystems zu erhöhen. Eine der gebräuchlichsten Formen sind hermetisch abgedichtete ölgefüllte Transformatoren. Um zu verhindern, dass die Isolierflüssigkeit der Umgebungsluft und der Feuchtigkeit ausgesetzt wird, wird der Transformator mit einem Gaspolster, meist aus Stickstoff oder trockener Luft, abgedichtet. Bei schweren Fehlern ist mit der Entstehung einer beträchtlichen Menge von Fehlergasen zu rechnen, die bei hermetisch verschlossenen Leistungstransformatoren allmählich aus der Isolierflüssigkeit entweichen und in das Gaspolster diffundieren. Die Gas-in-Öl-Analyse (DGA) ist eine der wirksamsten Diagnosemethoden bei Leistungstransformatoren. Daher soll am Schering-Institut ein kostengünstiges alternatives Online-Überwachungssystem entwickelt werden.

## M.Sc. Yunfei Wang

Seit Februar 2022 bin ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Schering-Institut tätig. Mein Bachelorstudium der Wärme- und Kraftwerkstechnik habe ich 2015 in China absolviert und arbeitete anschließend ein Jahr lang in der Betriebs- und Wartungsabteilung eines Turbinengeneratorsystems in einem Wärmekraftwerk in China. Daraufhin beschloss ich das Masterstudium in Deutschland zu absolvieren und kam 2017 an die Universität Hannover und studierte Energietechnik mit der Vertiefungsrichtung Energieversorgung. Das Masterstudium beendete ich erfolgreich im Jahr 2021 mit einer Masterarbeit am Schering-Institut zu dem Thema „Untersuchung des Diffusionsverhaltens von verschiedenen Säurekonfigurationen im Isolierpapier in einem geschlossenen Transformatorsystem“.



Derzeit beschäftige ich mich mit Kühl- und Isoliermedien für hybrid-elektrische Antriebssysteme von Flugzeugen. Aufgrund der Forderungen zur Minderung des Treibhausgasausstoßes rücken die Bedeutung von Energieeffizienzmaßnahmen und Energieeinsparungen immer weiter in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Hybrid-elektrische sowie voll-elektrische Antriebstechnologien bieten die Möglichkeit, fossile Brennstoffe teilweise oder vollständig aus der regionalen Luftfahrt zu verdrängen. Sie bieten weiterhin die Möglichkeit, über die traditionellen Flächenflugzeuge hinaus, Transportkonzepte zu entwickeln, die in ein urbanes, nachhaltiges Leben eingebunden sind. Vor diesem Hintergrund werden hohe Anforderungen an die eingesetzten Technologien beim voll- und hybrid-elektrischen Fliegen und an die damit einhergehenden Kühl- und Isoliermedien gestellt. Für effiziente Systeme mit hohen Leistungsdichten werden auch hohe Verlustleistungsdichten in Elektromotor, Umrichter und Batteriespeicher benötigt. Die elektrischen und elektronischen Komponenten des Systems erzeugen große Mengen an Wärme, die abgeführt werden muss, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten. Die Wärmeübertragung erfolgt mittels Thermomanagementsystem über das Kühlmedium. Ohne ein geeignetes Kühl- und Isoliermedium ist eine Umsetzung des hybrid-elektrischen Fliegens also nicht realisierbar.

In Zusammenarbeit mit Industriepartnern werden Kühlfluide für hybrid-elektrische Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Alterungs- und Lebensdauereigenschaften untersucht. Dies betrifft sowohl die thermischen Eigenschaften wie auch die elektrischen Isoliereigenschaften.



## Prof. Dr.-Ing. Asghar Akbari Azirani



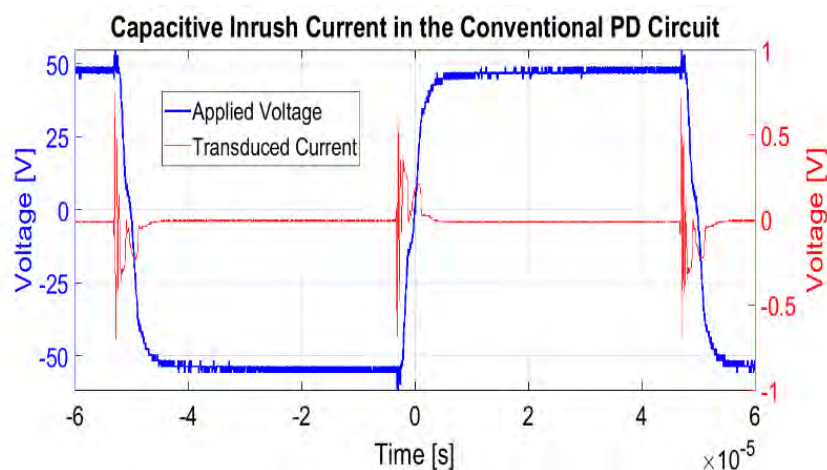
### Gastprofessor am Schering-Institut

Im Rahmen der langjährigen akademischen Zusammenarbeit zwischen dem Fachbereich Elektrotechnik der K.N. Toosi University of Technology, an der ich tätig bin und dem Schering-Institut, werden in diesem Bericht zwei aktuelle Forschungsprojekte vorgestellt, die unter meiner Leitung und unter Nutzung der gut ausgestatteten Labors und Einrichtungen des Schering-Instituts durchgeführt wurden.

### Messungen von Teilentladungen bei schnellen, sich wiederholenden Impulsen von Stromrichtern

Der herkömmliche Aufbau für Teilentladungs- (TE) Messungen wird in der Norm IEC 60270 erläutert. Bei einer reinen sinusförmigen Hochspannung bildet ein als TE-Koppler bezeichneter Kondensator eine geschlossene Schleife mit niedriger Impedanz für TE-Stromimpulse, welche vom Prüfobjekt ausgehen. Die einfachste Idee für die Messung eines TE-Stromimpulses könnte darin bestehen, eine Impedanz in Reihe mit dem Koppelkondensator zu schalten, um die Impulse detektieren.

Bei Prüfobjekten, die von Stromrichtern gespeist werden, entsteht durch den konventionellen, kapazitiven TE-Koppler und die durch die Leitungselektronik verursachte schnelle Spannungsänderung ein Einschaltstromimpuls. Die Anstiegszeiten solcher Impulse liegen im Bereich von wenigen Nanosekunden und ihre Frequenzanteile dementsprechend bei bis zu mehreren 100 MHz. Infolgedessen können durch die herkömmliche Messimpedanz, die für die Trennung des netzfrequenten Anteils von den TE-Impulsen ausgelegt ist, die TE-Impulse nicht von den genannten Einschaltimpulsen unterschieden werden. Weiterhin ist es im Falle einer rechteckförmigen Hochspannung von hoher Bedeutung die

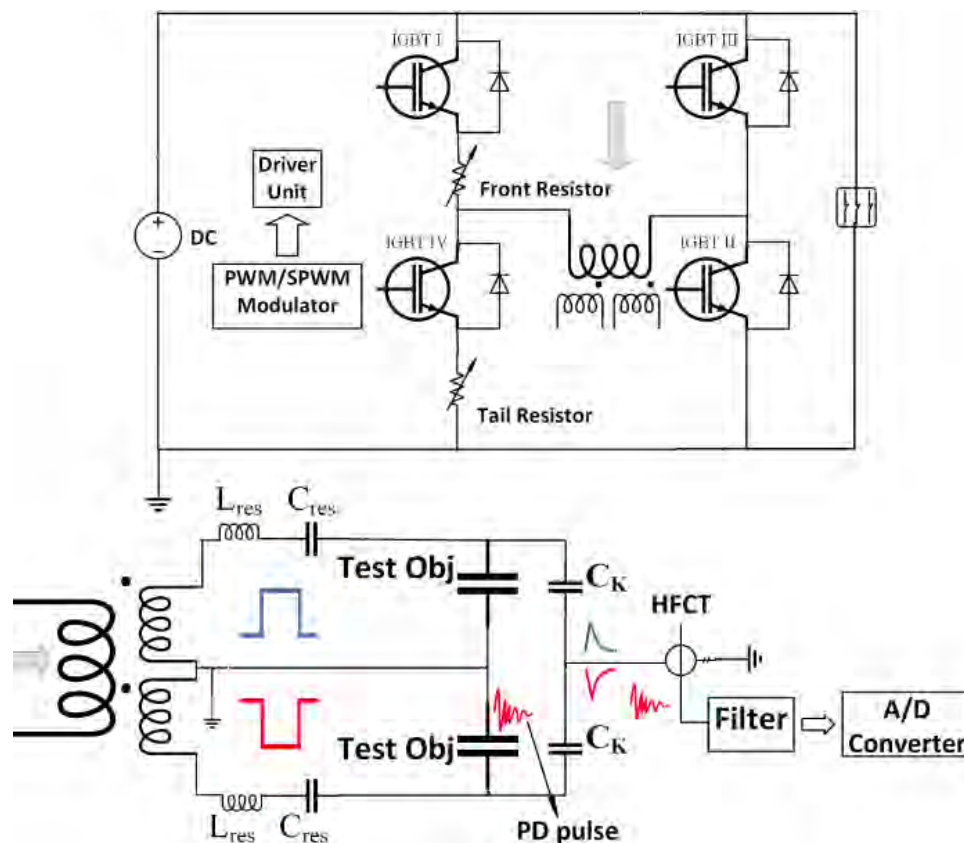


**Bild 1:** Kapazitiver Einschaltstrom in einem 1,5 nF Koppelkondensator bei einer Spannung von 100 V Spitze-Spitze

TE-Impulse gerade im Moment der Spannungsänderung messen zu können. Bild 1 zeigt den kapazitiven Einschaltstrom eines 1,5 nF TE-Kopplers in einer herkömmlichen TE-Messschaltung. Die angelegte Spannung beträgt in diesem Experiment

100 V Spitze-Spitze, während die Spannungsamplitude bei einer tatsächlichen TE-Messung normalerweise im Bereich von mehreren Kilovolt liegt.

Um den Stromrichter nachzubilden, wurde in dieser Arbeit eine Vollbrücken-Zwei-Quadranten-Topologie zur Realisierung schneller Schaltvorgänge genutzt. Der Aufbau besteht aus mehreren Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT), welche für Hochspannung geeignet sind (siehe Bild 2). Um eine Einstellung der Anstiegs- und Abfallzeit zu ermöglichen, werden die Prüfobjekte durch den vorderen und hinteren Widerstand (front und tail Resistor) gespeist.

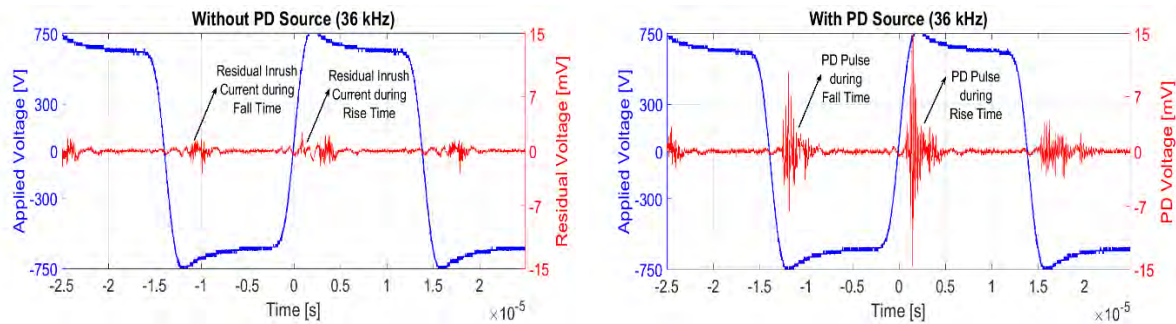


**Bild 2:** Beschriebene Schaltung zur TE-Messung. Entwickelter Stromrichter (oben) und TE-Messschaltung (unten)

Mit dieser Schaltung ist es möglich sowohl unipolare wie auch bipolare Spannungsformen durch Pulsweitenmodulation (PWM) zu erzeugen. Durch den Anschluss externer Induktivitäten und Kapazitäten ( $L_{res}$ ,  $C_{res}$ ) kann die entsprechende Resonanzfrequenz eingestellt werden. Außerdem wurde der TE-Strom, wie in Bild 2 dargestellt, durch einen Stromwandler (HFCT) gemessen.

In Bild 3 ist ein Teil der aufgezeichneten Signale bei einer Spitze-Spitze-Spannung von ungefähr 1,5 kV dargestellt. Links im Bild sind die Ergebnisse ohne TE-Quelle und rechts im Bild die Ergebnisse mit TE-Quelle dargestellt. Die auftretenden Impulse links im Bild sind auf die weiter oben beschriebenen Einschaltimpulse zurückzuführen.

Diese treten während der Anstiegs- und Abfallzeit auf. Im rechten Teil des Bildes sind die Ergebnisse mit TE-Quelle gezeigt. Hier treten die TE sowohl während der Anstiegs- wie auch während der Abfallzeit im Einschalt und Ausschaltaugenblick auf. Mit dieser Schaltungsvariante lassen sich also die Einschaltstromimpulse von den gemessenen TE-Impulsen klar unterscheiden.



**Bild 3:** Die aufgezeichneten Signale. Links: Hauptsächlich aufgrund des Resteinschaltstroms ohne TE-Quelle. Rechts: Wenn eine TE-Quelle mit einem der Prüflinge parallelgeschaltet wurde

Eine ausführliche Beschreibung der Thematik und der Ergebnisse findet sich in der Veröffentlichung unter dem Titel „*A novel wideband partial discharge measuring circuit under fast repetitive impulses of static converters*“. Erschienen im Elsevier **Measurement** Journal (Paper 108895).

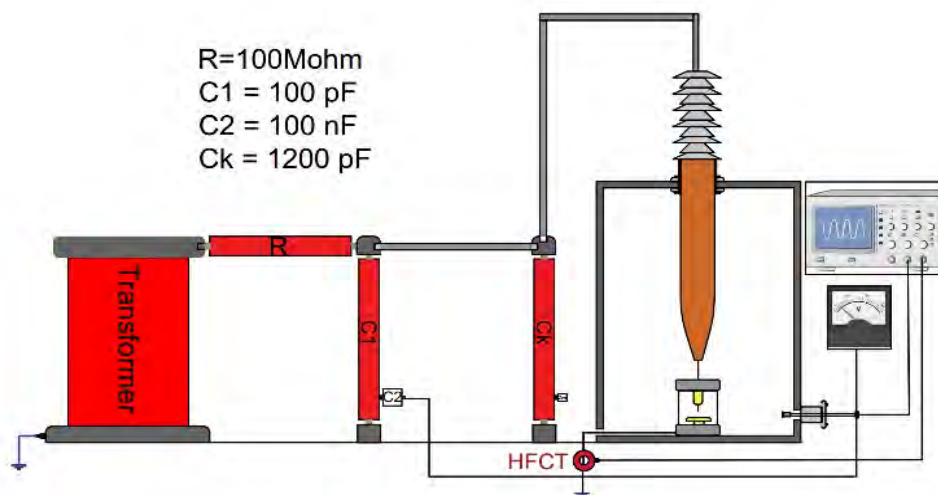
## UHF-EM-Wellenausbreitung bei negativer und positiver Koronaentladung im Tank von Leistungstransformatoren

In den letzten Jahren wurden TE-Messungen mit unkonventionellen Methoden wie akustischen und Ultrahochfrequenz (UHF)-Techniken als Online-Überwachungs- und Lokalisierungsinstrument für Leistungstransformatoren eingesetzt. Eine Herausforderung bei der Verwendung der UHF-TE-Messmethode besteht darin, dass sie nicht kalibriert werden kann, so dass die Stärke der erfassten Signale nicht mit der gemessenen TE korreliert werden kann.

Um die Möglichkeit der Kalibrierung bei der UHF-TE-Messung zu untersuchen, müssen alle Parameter berücksichtigt werden, die sich auf das Messergebnis auswirken, wie der Erfassungsbereich der Frequenz, der TE-Typ, das Strahlungsmuster der Antenne, die Antennenpolarisation, der Abstand zwischen TE-Quelle und Sonde sowie der Einfluss des aktiven Teils des Transformators. Zwar existieren einige Untersuchungen zur Ausbreitung von EM-Wellen im Inneren des Transformertanks, aber die TE-Quelle wurde lediglich mit einer Monopolantenne simuliert, die nicht den gesamten Aspekt einer realen TE-Quelle als komplexer Sender von UHF-EM-Wellen berücksichtigen kann. Um diese Unzulänglichkeiten zu überwinden, ist eine genaue Simulation

der TE-Quellen hinsichtlich der Ausbreitung der EM-Wellen unerlässlich, die in dieser Untersuchung teilweise durchgeführt wird.

In dieser Untersuchung wurde ein auf Drift-Diffusion basierendes Modell entwickelt, um Koronaentladungen in der Luft sowohl unter negativer als auch positiver Hochspannung zu simulieren. Grundsätzlich sind Stoßreaktionen von Elektronen, im Wesentlichen die Ionisierung von Stickstoff und Sauerstoff, die Anlagerung von Elektronen an Sauerstoffmoleküle und die Photoionisierung aufgrund des Auftreffens von Photonen auf Sauerstoff und die Wand der Konfiguration, daran beteiligt. Dies ist ein effizientes Modell, um einerseits die Ausbreitung der EM-Wellen zu untersuchen und andererseits einen Vergleich zwischen den Eigenschaften zweier Formen der Koronaentladung zu ermöglichen.

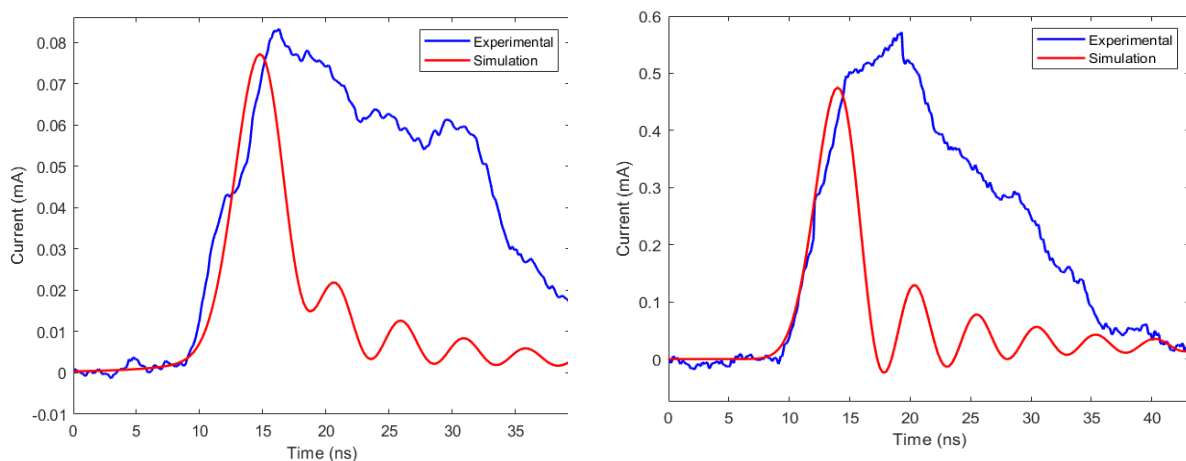


**Bild 4:** Experimenteller Aufbau zur Erfassung der Signale von Koronaentladungen

Um die Validierung des vorgeschlagenen Entladungsmodells zu untersuchen, wurde im Hochspannungslabor der in Bild 4 gezeigte Versuchsaufbau vorbereitet. Die Messung der TE-Aktivität wird auf zwei verschiedene Arten durchgeführt. Niederfrequente Komponenten bis 200 MHz werden mit einem Hochfrequenz-Stromwandler (HFCT) gemessen, während die Messung höherer Frequenzkomponenten mit einer Monopolanterne durchgeführt wird, die durch das DN80-Ventil in den Transformatorontank eingeführt wird. Der Grund für die Verwendung des HFCT anstelle der Messimpedanz ist die höhere Bandbreite des HFCT, die für die Untersuchung des Verhaltens der Koronaentladung geeigneter ist. Andererseits ist die Verwendung einer Antenne unerlässlich, da die höherfrequenten Komponenten der TE mit der elektrischen Methode nicht erfasst werden können. Außerdem breitet sich die Energie höherer Komponenten der Frequenz über elektromagnetische Wellen aus.

Das beschriebene Modell zielt darauf ab, die Differentialgleichungen für Elektronenzahldichte, Elektronenenergie, Photoionisation, schwere Arten und elektrisches Potential zu lösen. Um eine korrekte und eindeutige Antwort zu erhalten, ist es notwendig, die entsprechende Randbedingung anzuwenden. Der Kürze halber sind Formeln, partielle Differentialgleichungen, verwendete Beziehungen und Randbedingungen der Simulation nicht aufgeführt.

Zum Vergleich zwischen den simulierten und den gemessenen Signalen mittels HFCT wird bei den unteren Frequenzen ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 200 MHz auf das simulierte Signal angewendet. Bild 5 links zeigt die simulierten und gemessenen Signale bei den Frequenzen unter 200 MHz. Die Ergebnisse sind vielversprechend in Bezug auf Amplitude und Anstiegszeit der Signale, aber der Abfall des simulierten Signals ist geringer als der des gemessenen. Dies könnte auf den Messpfad des Versuchsaufbaus zurückzuführen sein, der die Dauer des Entladungssignals verlängert.



**Bild 5:** Simulierte und experimentelle Signale negativer (links) und positiver (rechts) Koronaentladung im Frequenzbereich von 200 MHz.

Ähnlich wie bei der negativen Koronaentladung wird auch für die positive Koronaentladung bei den niedrigeren Frequenzen eine Überprüfung durchgeführt. Bild 5 rechts zeigt die experimentell gemessene und die simulierte positive Koronaentladung, auf die ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 200 MHz angewendet wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass das simulierte Stromsignal in Bezug auf die Anstiegszeit und die Amplitude der Signale gut mit dem Experiment übereinstimmt, aber die Abfallzeit des simulierten Stromsignals ist geringer als das gemessene Signal, ähnlich wie bei der negativen Koronaentladung.

Im Allgemeinen bestätigt die relative Übereinstimmung der Mess- und Simulationsergebnisse die Simulationemethode für diesen komplexen Prozess.

Abschließend wurden in dieser Untersuchung die Unterschiede zwischen positiven und negativen Koronaentladungen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass diese beiden Arten von Koronaentladungen bei niedrigen und hohen Frequenzen ein unterschiedliches Verhalten zeigen, was durch experimentelle Ergebnisse bestätigt wurde.

Der Einfluss der Spannungshöhe auf die Form des Entladungsstroms wurde ebenfalls untersucht. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung des Spannungspegels die Anstiegszeit der positiven und negativen Koronaentladungen auf unterschiedliche Weise verringert. Bei der negativen Koronaentladung verkürzt sich die Zeit vom Beginn der Entladung bis zur Elektronenlawine, während dieser Effekt bei der positiven Koronaentladung in der Nähe der Spitze des Entladungsstroms auftritt.

Eine ausführliche Beschreibung ist in der Veröffentlichung "Simulation of Negative and Positive Corona Discharges in Air for Investigation of Electromagnetic Waves Propagation" in IEEE Transactions on Plasma Science, Band 50, 2022, Nr. 9 zu finden.



## M.Sc. Mohamadreza Ariannik



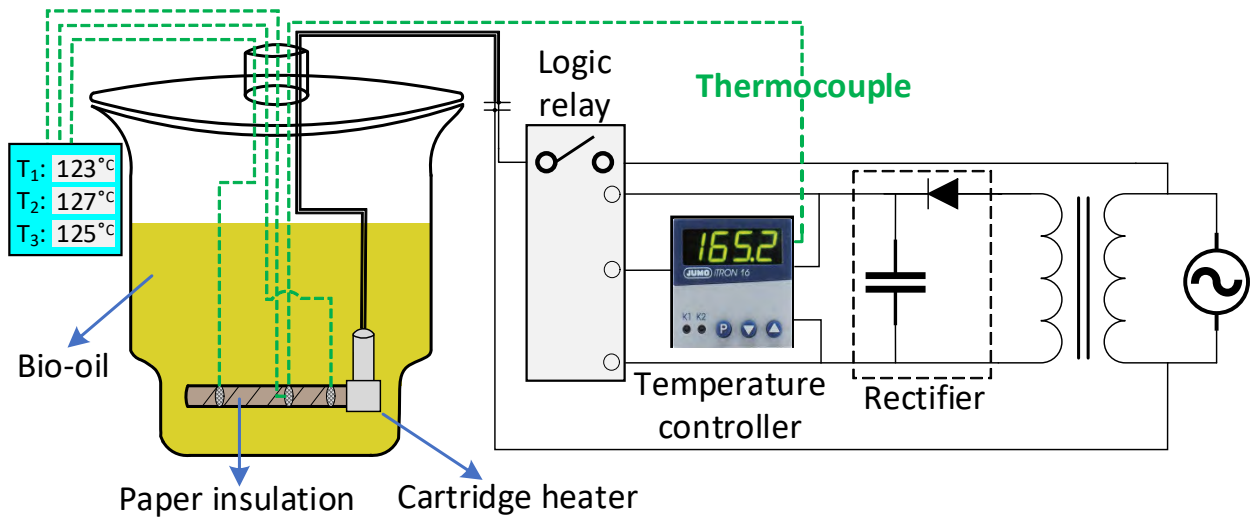
Mein Name ist Mohamadreza Ariannik und ich bin Doktorand im vierten Jahr an der York University in Toronto, Kanada. In 2022 hatte ich die Möglichkeit einen Forschungsaufenthalt am Schering-Institut in Hannover, Deutschland, zu verbringen. Das gut ausgestattete Labor des Instituts ermöglichte es mir, meine Experimente innerhalb der geplanten Zeit abzuschließen

**Forschungsprojekt:** Leistungstransformatoren sind so ausgelegt, dass sie unterhalb bestimmter Belastungsgrenzen arbeiten.

Die Betriebsgrenzen für die Hot-Spot-Temperatur (HST) von Transformatoren sind in Normen wie IEC 60076-7 und IEEE C57.91 festgelegt. Die Begrenzung der HST soll den sicheren Betrieb von Leistungstransformatoren gewährleisten und ihre Lebensdauer verlängern. Die beschleunigte Alterung des Isolationssystems, der Flammpunkt des Isolieröls und die Bildung von Gasblasen rechtfertigen die Beschränkung der Belastung und damit der HST der Transformatoren.

Bestimmte Bedingungen führen zu einer Erhöhung der HST über die genormten Grenzwerte hinaus. Meine Forschung konzentriert sich dabei auf die Auswirkungen geomagnetischer Störungen und geomagnetisch induzierter Ströme in Stromnetzen und Transformatoren. Starke Sonnenphänomene wie koronale Massenauswürfe verursachen den Ausbruch von Plasma von der Sonnenoberfläche. Die Wechselwirkung des Plasmas mit dem Magnetfeld der Erde verursacht geomagnetische Störungen. Infolgedessen fließen Quasi-Gleichströme, die als geomagnetisch induzierte Ströme (GICs) bekannt sind entlang langer Leiter im Stromnetz. Die Erhöhung der HST von Transformatoren aufgrund von GICs führt zu einer beschleunigten Alterung der Öl-Papier-Isolierung und zur Bildung von Gasblasen. Meine Arbeit behandelt das letztgenannte Phänomen.

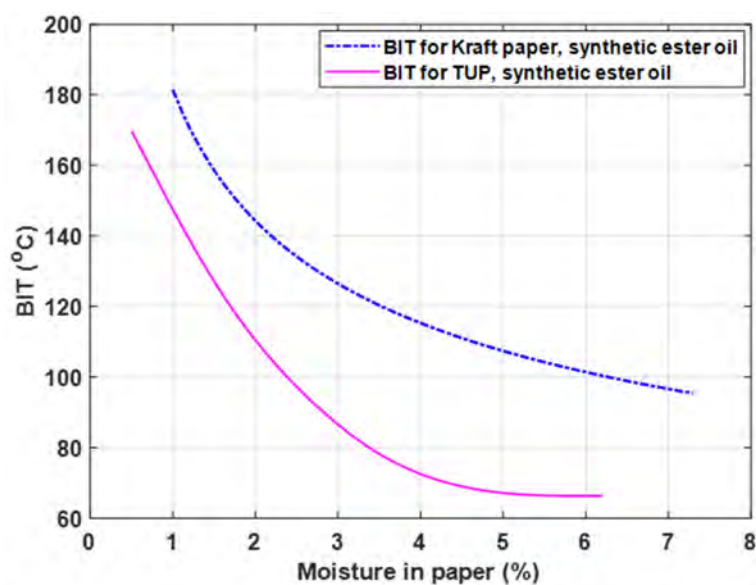
Am Schering-Institut wurde dazu ein Versuchsaufbau entwickelt, um die Blasenbildung an der Oberfläche von in Isolieröl getauchten Papierisolierungen zu untersuchen. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Bild 1 zu sehen. Ein Jumo iT-RON-Mikroprozessor steuert die Temperaturanstiegsrate an der Oberfläche des Heizelements. In den Versuchen wurden zwei Arten von Papierisolierung verwendet. Darunter Kraftpapier und thermisch veredeltes Papier (TUP). Die Heizpatrone wird in ein Gefäß eingesetzt, welches mit einem synthetischen Esteröl (Midel 7131) gefüllt ist. Mehrere Streifen der Papierisolierungen werden erhitzt und verbleiben dann in Kontakt mit der Umgebungsluft, um Feuchtigkeit in unterschiedlichen Mengen aufzunehmen. Der Feuchtigkeitsgehalt der Papierproben wird durch Überwachung der Gewichtszunahme mit einer hochauflösenden Waage überprüft.



**Bild 1:** Darstellung des Prüfaufbaus zur Untersuchung der Blasenbildung

In den Leitfäden zur Berechnung der Belastung von Leistungstransformatoren werden lediglich Transformatoren, welche mit Mineralöl isoliert werden, berücksichtigt. Natürliche Esteröle werden in diesen Leitfäden nicht erwähnt. Im Vergleich zu Mineralölen zählen die biologische Abbaubarkeit, die höhere Wärmeleitfähigkeit und der höhere Flammpunkt zu den Vorteilen der natürlichen und synthetischen Esteröle. Darüber hinaus gibt es nur wenige experimentelle Ergebnisse zu alternativen Papierdämmstoffen. Aus diesem Grund wurden die Versuche am Schering-Institut mit synthetischem Esteröl, Kraftpapier und TUP durchgeführt. Darüber hinaus wurde mit zwei verschiedenen Temperaturanstiegsgeschwindigkeiten,  $3^\circ\text{C}/\text{min}$  und  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ , gemessen, um sowohl Betriebs- wie auch Notfallbelastungen während geomagnetischer Störungen zu berücksichtigen.

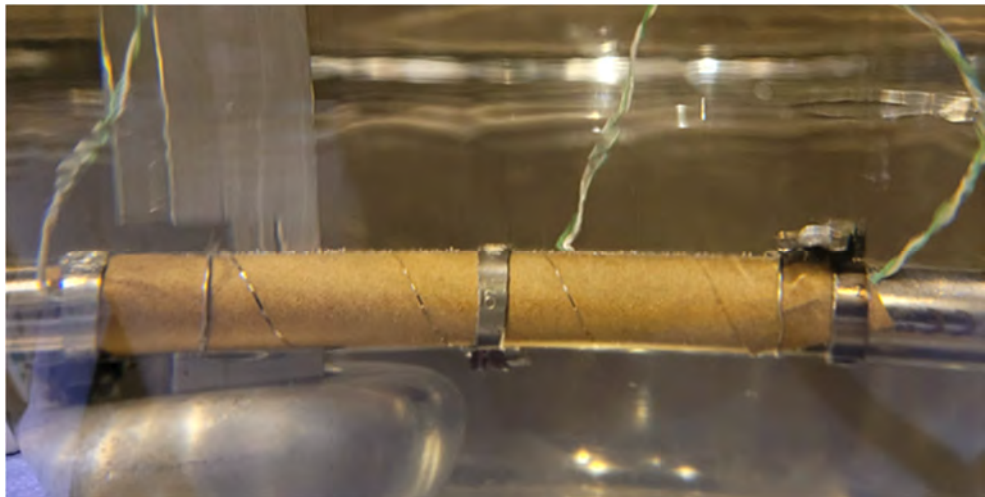
Die Blasenbildungstemperatur (Bubbling Inception Temperature, BIT) gilt als ein Kriterium zum Schutz der elektrischen Festigkeit der Isolierung der Transformatoren. Die Videoaufzeichnungen der Versuche wurden untersucht, um die BITs sowohl für Kraftpapier als auch für TUP zu ermitteln. Die Ergebnisse der Experimente, die mit einer Temperaturanstiegsrate von  $3^\circ\text{C}/\text{min}$  durchgeführt wurden, sind in Bild 2 dargestellt.



**Bild 2:** BIT für Kraftpapier und BUT

Die Ergebnisse für das Kraftpapier zeigen, dass die Verwendung von synthetischem Esteröl anstelle von Mineralöl einen vernachlässigbaren Einfluss auf die BIT im Vergleich zu den in der Literatur angegebenen Versuchsergebnissen hat. Es ist zu beachten, dass die Belastungsnormen einen Grenzwert von 140 °C bei 2 % Feuchtigkeitsgehalt in der Papierisolierung berücksichtigen. Auf der Grundlage der BIT-Kurve würde der Vorschlag eines einzigen Wertes für die BIT ältere Transformatoren mit höherem Feuchtigkeitsgehalt gefährden. Andererseits zeigen die Ergebnisse, dass bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt die Blasenbildung auf der Oberfläche des TUP bei einer wesentlich niedrigeren Temperatur erfolgt als bei Kraftpapier. Es wurde festgestellt, dass sich die Ansammlung von Blasen auf der Papieroberfläche und die Geschwindigkeit der Blasenbildung zwischen diesen beiden Papieren unterscheiden. Bild 3 zeigt eine erweiterte Blasenansammlung auf der Oberfläche des Kraftpapiers. Obwohl die BIT bei TUP niedriger ist, bilden sich auf der Oberfläche deutlich weniger Blasen als bei Kraftpapier. Es ist demnach ein umfassenderer Vergleich erforderlich, um Blasenbildungsphänomene auf TUP zu bewerten und Betriebsgrenzen für Leistungstransformatoren zu entwickeln.

Während einer schweren geomagnetischen Störung steigt die Hot-Spot-Temperatur allerdings wesentlich schneller an. In diesem Zusammen-



**Bild 3:** Ansammlung von Gasblasen auf dem Kraftpapierprüfling  
die Versuche mit einer Rate von 20 °C/min wiederholt, und es wurde festgestellt, dass die BIT bis zu 30 °C betragen konnte. Wie erwartet, beschränken sich die Unterschiede zwischen Kraftpapier und TUP nicht auf die BIT. Aus Kraftpapier wird ein kontinuierlicher Strom von Blasen freigesetzt, während bei TUP nur vereinzelt Blasen entstehen. In Anbetracht der Tatsache, dass sowohl Kraftpapier als auch TUP bei hohen Temperaturanstiegsgeschwindigkeiten eine niedrige BIT aufweisen, müssen andere Parameter eingeführt werden, um deren Isolationsfähigkeit bewerten und vergleichen zu können.

Die hier gezeigten Ergebnisse und die Analyse der nachteiligen Auswirkungen der Blasenansammlung und der Blasenbildungsrate sind Teil eines laufenden Kooperationsprojektes. Die Ergebnisse dieses gemeinsamen Forschungsprojektes der York University und des Schering-Instituts der Leibniz Universität Hannover werden demnächst veröffentlicht.

## 5 Promotionen

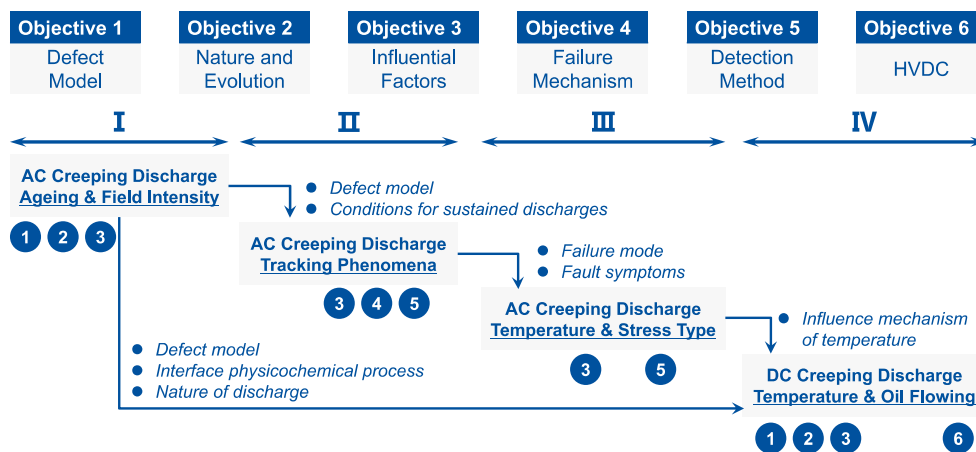
### Study of oil/pressboard progressive creeping discharge under divergent electric field

M.Sc. Xin Zhou

Tag der Promotion: 16.03.2022

#### Motivation and Research Outline

The oil/pressboard progressive creeping discharge is a particularly dangerous phenomenon, as it can fail the major insulation system even under normal operating conditions. However, the progressive creeping discharges have thus far still not been fully understood, making it still a difficult task to effectively detect the ongoing incidents. This problem is largely due to the highly intricate nature of the progressive creeping discharge. On the one hand, it involves multiple materials, exhibits varying discharge patterns, and features different accompanying phenomena. On the other hand, it can generate distinct faults and fails the insulation system in utterly different manners.



**Figure 1:** Research outline

The present work aims to provide a better understanding of progressive creeping discharges. The primary objectives are:

- (1) to formulate a valid defect model of creeping discharge as well as to identify its discharge sources, discharge pattern, and discharge signals;
- (2) to draw a clear line between damage-free creeping discharges and failure-inducing creeping discharges;
- (3) to give clear illustrations and convincing explanations to the typical accompanying phenomena, such as white marks, tracking, and bubbling;
- (4) to investigate the effects of critical influential factors on the inception and development of creeping discharges under AC voltage;
- (5) to propose a tentative methodology to detect dangerous creeping discharges in power transformers;
- (6) to examine the progressive creeping discharges under the DC field based on the relevant knowledge obtained under AC voltage.

To fulfill the task, this work carries out four consecutive and independent investigations (I, II, III, and IV), and Figure 1 illustrates the research outline of the entire work.

### Investigation I

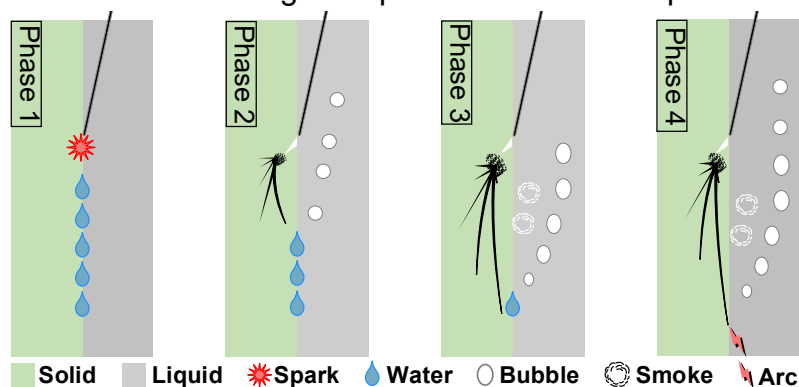
The first investigation focuses on the fundamental phenomena of the progressive creeping discharge as well as the influences of pressboard ageing and voltage amplitude under divergent AC voltages. The major purposes are to better understand the fundamental characteristics of creeping discharge, to examine its long-term trend, and to revisit the influences of ageing and voltage with deeper insights.

We used a special electrode configuration to generate sustained creeping discharges. A ramp-stress test is used to determine the interface partial discharge inception voltage (PDIV) and the flashover voltage versus pressboard ageing. Constant-stress tests are carried out to investigate the partial discharge (PD) behaviors, the pressboard surface temperature, and the oil-dissolved gases. Besides, we also explored the oil/pressboard interface morphology, studied the interface field distribution, and systematically interpreted the competing effects of ageing by analyzing the pressboard water absorption capability, fiber integrity, and absolute water contents.

It is found that the progressive creeping discharge is a multi-sourced discharge that comprises primarily oil corona discharge and surface discharge. The pressboard ageing affects only the interface PDIV. The progressive discharges exhibit in general a constant PD pattern but a diminishing intensity, and nevertheless can be sustained for the severely-aged pressboards under strong voltages. The major reason for a sustained creeping discharge is the intensified negative discharges, which are possibly due to the field emission in the triple-junction area. The general diminishing trend of progressive creeping discharge is probably caused by the interface moisture emigration governed by the competing effects of pressboard aging. Hydrogen is the key faulty gas of progressive creeping discharge and its concentration grows with voltage and ageing, and no pressboard overheat is found during the discharge process.

### Investigation II

The second investigation presents both an experimental study and a theoretical discussion on the relevant faults resulting from progressive creeping discharge. The primary objectives are to demonstrate the fault progression, investigate their characteristic phenomena, and explore the failure mechanisms.



**Figure 2:** The failure mode of internal treeing due to creeping discharge



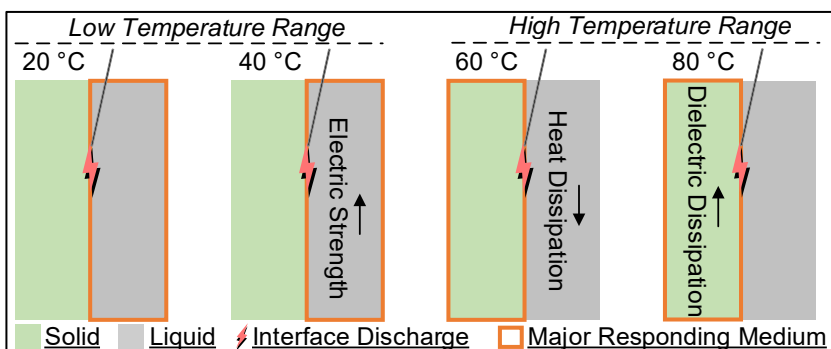
Pressboard ageing, voltage amplitude, and pressboard type are configured to generate the faults under divergent creeping stresses. The fault progression is recorded by a high-resolution camera, partial discharge (PD) device, and optic-fiber thermometer. The damaged pressboards are scrutinized by microscopy and image-processing techniques, and gas chromatography is used to analyze the gas compositions.

The results show that the progressive creeping discharges could generate either internal treeing or surface tracking to the pressboard. The fault type is dependent on the pressboard density, the voltage amplitude, and the pressboard ageing. The progression of internal treeing shows distinct stages of different interface phenomena, such as spark discharge, white marks, and bubbling effect, as well as varying discharge patterns. In contrast, the progression of surface tracking is a simple but hardly noticeable process due to the PD disappearance. The internal carbonization channels are the fundamental causes of interface phenomena and a theoretical model is proposed to expound the development of the internal carbonization channels, which considers the charge emission, the pressboard pyrolysis, and the percolation theory. The failure mode of internal treeing is schematically illustrated using a four-phase model (see Figure 2). The development of surface tracking is governed by ageing-induced moisture behaviors and field distortion due to carbonization. A detailed comparison is made between internal treeing and surface tracking in terms of the occurrence condition, initiation mechanism, growth driver, and growth characteristics.

### Investigation III

The third investigation studies the effects of temperature and stress type under divergent AC voltage. The primary objectives are to investigate the effects of temperature and stress type on creeping discharge and its related failure modes, to examine the discharge behaviors during fault progression, to explore the mechanisms of influential factors, and to propose a novel method for detecting developing faults.

A ramp-stress test determines the short-time interface electric strengths, and long-term tests are carried out at different temperatures using constant and step stresses, respectively. Afterwards, a novel methodology is proposed to detect the developing fault using synchronous partial discharge (PD) and online dielectric measurements.



**Figure 3:** Illustration of temperature's influence on creeping discharges

It is found that the interface short-time electric strengths correlate positively with the temperature. In long-term tests, the creeping discharges can generate three failure modes to oil/pressboard insulation: interface flashover, surface

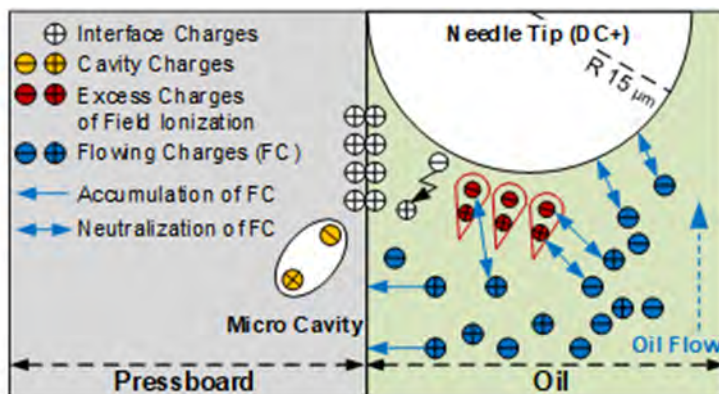


tracking, and internal treeing. Different failure modes vary significantly in the discharge characteristics and the severities of damage to the pressboard. The temperature exerts complex influences on the creeping discharges. It influences the material physical properties, acts synergistically with the field in exacerbating the pressboard dielectric dissipation, and changes the interface field and loss distributions. The failure mode of creeping discharge is subject to these factors and their sophisticated interplays. The principal influential factor would vary as the temperature rises, thereby resulting in different failure modes (see Figure 3). The influence of stress type is related to the cumulative effect of stressing and the voltage rising steepness. The proposed methodology of synchronous PD and online dielectric measurements proves a potent tool for detecting internal treeing. The PD measurement can identify the discharge type, whereas the online dielectric measurement is highly indicative of the pressboard damage and show superior detection sensitivity.

#### Investigation IV

The fourth investigation studies the influences of temperatures and forced oil flows on oil/pressboard progressive creeping discharges under DC voltage. The primary purpose is to examine the fundamentals of oil/pressboard creeping discharge under DC voltage.

It is found that the temperature rises increase the oil and pressboard DC conductivities exponentially, widen the permittivity mismatch, and narrow the conductivity mismatch. Under static oil, DC creeping discharges exhibit two kinds of PDs (PD 1 and PD 2), which show distinctions in the inception voltage, magnitude, intervals, and intensity. PD 1 is probably the oil discharge, and PD 2 is the pressboard cavity discharge, which is enabled by an extra local field due to field ionization.



**Figure 4:** Electrical and physical processes at triple-junction area with oil flows

competing effects on PD 1, including the decline of oil relative saturation and the augmentation of oil field intensity. By comparison, the temperature rise exerts a straightforward effect on PD 2, increasing its magnitude while decreasing its intensity.

The forced oil flow shortens the interface withstand time and generates erratic PD

pulse trains. The pulse train results possibly from the massive neutralization of excessive space charges from streaming electrification (see Figure 4). The oil speeds and the competing effects of temperature determine the quantities of the space charges, thus influencing the pulse trains.

**Summary**

The present work extends the fundamental knowledge of the oil/pressboard progressive creeping discharges under AC and DC fields, systematically revisits the multifaceted influences of critical factors, provides a clear demonstration and reasonable elucidation of relevant faults and failures, and offers a framework for monitoring and diagnosing the dangerous creeping discharge in power transformers. The research results are expected to serve as a base for future scientific studies and a piece of valuable information for practical applications.

## 6 Forschungsarbeiten

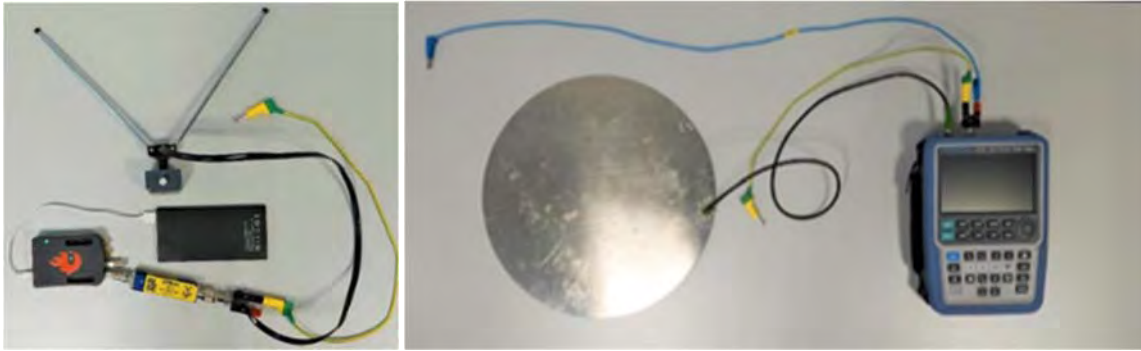
### Entwicklung von berührungslosen Messsystemen zur Messung von impulsförmigen Hochspannungen

**M.Sc. Moritz Kuhnke**

Impulsspannungen werden bei Hochspannungsprüfungen zur Nachbildung, der durch äußere und innere Überspannungen auftretenden Beanspruchungen, sowie für grundsätzliche Untersuchungen von Durchschlagsvorgängen benötigt. Die Prüfung von Hochspannungsgeräten auf Widerstandsfähigkeit gegenüber atmosphärischen und/oder durch Schalthandlungen hervorgerufene Stoßspannungen erfolgt mit vollen oder abgeschnittenen Stoßspannungen, deren Scheitelwerte und Zeitparameter mit hoher Genauigkeit erfasst werden müssen. Zur messtechnischen Ermittlung dieser Werte stehen den Anwendern kommerzielle Messgeräte zur Verfügung, die bei vollen und auch abgeschnittenen Stoßspannungen mit Messunsicherheiten im Bereich von 1 % arbeiten. Durch den weltweiten Ausbau der Energietransportkapazitäten, der an vielen Orten nur mit Ultrahochspannungsleitungen (UHV) gedeckt werden kann, werden zur Prüfung Hochspannungsimpulsgeneratoren mit immer höheren Spannungen benötigt, sowie die dazugehörigen Messsysteme.

Üblicherweise wird die Hochspannungsimpulsmessung mit einem ohmschen oder gedämpften kapazitiven Spannungsteiler durchgeführt. Die für die Impulsmessung verwendeten Teiler haben eine ähnliche geometrische Höhe (Isolationskoordination) wie der Impulsgenerator. Allerdings benötigen sie aus statischen Gründen auch große Sockel und Stützstrukturen, die viel Platz im Hochspannungsprüffeld einnehmen. Durch die Verwendung von Präzisionsbauteilen sind sie zudem noch kostenintensive Geräte. Die Teiler fügen dem Prüfkreis eine kapazitive Last hinzu, welche die Effizienz der Impulsgeneratoren verringert. Linearitätsuntersuchungen bei der Messung von Blitz- und Schaltstoßspannungen zeigen einige problematische Aspekte. In Untersuchungen wurde beispielsweise gezeigt, dass es bei der Verwendung von nicht geschirmten Spannungsteilern wegen der nichtlinearen Feldverteilung, durch Corona-Entladungen oder durch den Proximity-Effekt zu unerwünschten Verfälschungen der Messergebnisse kommen kann.

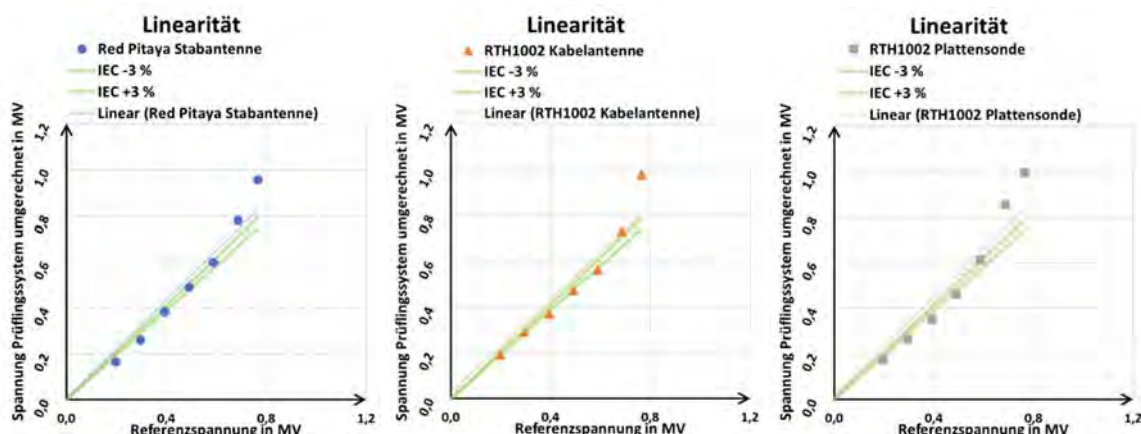
Die *PTB* und das *Schering-Institut* haben begonnen, Messsysteme zu untersuchen, welche kontaktlos arbeiten und mit vergleichsweise wenig Aufwand kabellose Datenübertragung verwenden, somit also komplett galvanisch getrennt operieren. Diese Systeme (Bild 1) sind leicht und kompakt und können problemlos auch mobil mit Hilfe eines Akkupacks verwendet werden. Sie bieten die Möglichkeit auch hohe Spannungen komplett berührungslos zu messen und können per WLAN ferngesteuert werden. Bislang ist die Präzision solcher Feldsonden noch nicht vergleichbar mit ohmschen oder gedämpft kapazitiven Teilern.



**Bild 1:** Feldsonden und Messgeräte „Stemplabs Red Pitaya“ [8] (links) und „Rohde und Schwarz RTH1002“ [9] (rechts)

Bei der Überprüfung der Feldsonden ist als Referenz jeweils das Referenzmesssystem der *PTB* als auch des Schering-Instituts der *LUH* verwendet worden. Im Fall der *PTB* ist dies eine Eigenentwicklung auf Basis eines *National Instruments Systems*, das *Schering-Institut* der *LUH* verwendete ein *HiRES* System des Herstellers *HighVolt*.

Der Messaufbau in der Hochspannungshalle der *PTB* erfolgte mit einer Standardkonfiguration des Referenzmesssystems. Ein Impulsspannungsgenerator (Marx-Generator) erzeugt Impulse, die mithilfe des Referenzmesssystems (Zängl-Teiler) aufgenommen werden. Der Referenzmessteiler ist ein gedämpft-kapazitiver Spannungsteiler bis 1000 kV Scheitelspannung. Die Sonden wurden in ca. 6 Meter (*Rohde und Schwarz RTH 1002*) und ca. 10 Meter (*Stemplabs Red Pitaya*) Entfernung aufgestellt. Mit dem Impulsspannungsgenerator wurden Spannungen bis ca. 800 kV erzeugt. Diese Impulse wurden gleichzeitig von allen beschriebenen Systemen aufgezeichnet. Bild 2 zeigt einige wichtige Ergebnisse der Messungen gegenüber dem Referenzteiler.



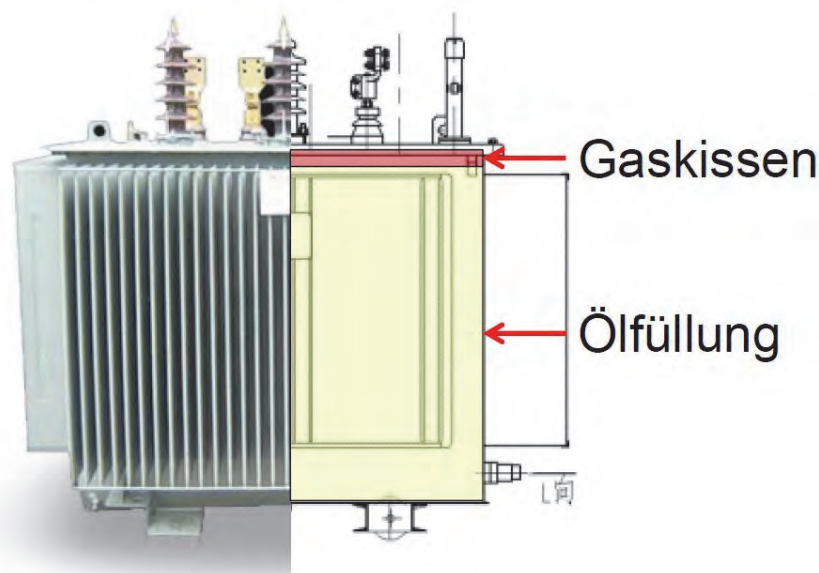
**Bild 2:** Erste Messreihen zur Spannungslinearität der Feldsonden bis 800 kV

Aufgrund der guten ersten Ergebnisse und der vielversprechenden Einsatzmöglichkeiten sollen diese Untersuchungen zusammen mit der *PTB* im Rahmen eines *DFG Projektes* weiter untersucht werden. Der entsprechende Antrag wurde dieses Jahr gestellt.

## Untersuchung eines Online-Überwachungssystems für hermetisch abgedichtete Transformatoren

M.Sc. Behnam Balali

Leistungstransformatoren sind Schlüsselemente des Stromnetzes. Ihre zustandsorientierte Wartung hat sich als finanziell vorteilhaft für die Betreiber erwiesen, da jeder Ausfall der Anlage mit enormen Kosten verbunden ist. Um die Wartung zu optimieren, geht der Trend zum Einsatz von Online-Überwachungssystemen. Mittelspannungsaufwärtstransformatoren werden häufig in Windkraftanlagen eingesetzt, um die Ausgangsspannung des Turbinengenerators von einigen hundert Volt auf die Mittelspannungsebene zu erhöhen. Da diese Transformatoren in der Regel im Turm, in der Gondel der Windturbine oder in einer kleinen Versorgungseinrichtung in der Nähe des Turms installiert werden, ist die Größe ein wichtiger Faktor. Die Hersteller konstruieren diese Art von Transformatoren so kompakt wie möglich. Eine der häufigsten Formen sind hermetisch abgedichtete, ölgefüllte Transformatoren. Da sich die Temperatur dieser Transformatoren unter Windbedingungen häufig ändert, werden besondere Maßnahmen ergriffen, um die Ausdehnung der Isolierflüssigkeit zu berücksichtigen. Der abgedichtete Tank kann mit Rippen ausgestattet werden, die sich bei höheren Temperaturen ausdehnen. Um zu verhindern, dass die Isolierflüssigkeit der Umgebungsluft und der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt wird und um die elektrischen Eigenschaften erhalten werden können, wird der Transformator mit einem Gaspolster versiegelt, welches normalerweise aus Stickstoff oder trockener Luft besteht.

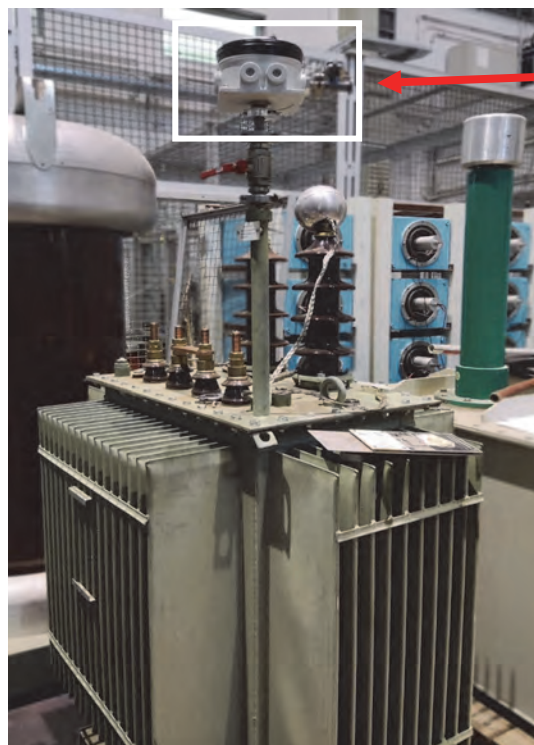


**Bild 1:** Aufbau eines hermetisch abgeschlossenen Transformators

Bei schwerwiegenden Fehlern entsteht im Transformator eine beträchtliche Menge an Fehlgasen. Bei hermetisch abgedichteten Leistungstransformatoren entweichen

diese Fehlergase allmählich aus der Isolierflüssigkeit und diffundieren in das Gaspolster. Wasserstoff ist eines der Nebenprodukte, die bei den häufigsten Fehlern in Leistungstransformatoren entstehen. Die Gas-in-Öl-Analyse (DGA) ist eine wirksame Diagnosemethode für Leistungstransformatoren. Dabei wird eine Ölprobe aus dem Transformator entnommen und analysiert, indem das Gas aus der Flüssigkeit extrahiert und in seine einzelnen Elemente zerlegt wird. Moderne Techniken ermöglichen es, potenzielle Fehler zu erkennen, lange bevor sie auftreten. Es gibt Online-DGA-Überwachungssysteme auf dem Markt, aber da die Überwachungskosten das von den Herstellern und Betreibern vorgesehene Budget übersteigen, werden diese in der Regel nicht für leistungsmäßig kleine hermetisch abgedichtete Leistungstransformatoren geeignet.

Als kostengünstige und kompakte Alternative zur Gaschromatographie wird am Schering-Institut ein halbleiterbasiertes Online-Überwachungssystem für ungelöste Fehlergase entwickelt. Dieses Überwachungssystem basiert auf einer Reihe von integrierten Sensoren, die die Konzentration von Fehlergasen im Gaspolster kontinuierlich erfassen, wodurch Fehler im Isoliersystem frühzeitig erkannt werden können. Darüber hinaus werden auch weitere Parameter wie Temperatur, Druck und Feuchtigkeit permanent aufgezeichnet. Das Überwachungssystem wird dabei auf einem Rohr, welches auf der oberen Seite des Kessels herausgeführt wird, installiert. Die ungelösten Fehlergase sammeln sich unter dem Deckel des Transformators, wandern das Rohr hinauf und erreichen nach und nach die Fehlergassensoren. Außerdem besteht aufgrund der Länge des Rohres ein gewisser Abstand zwischen der Oberfläche der Isolierflüssigkeit und dem Überwachungssystem, was einen zusätzlichen Schutz für die Fehlergassensoren bedeutet.



Entwickeltes Online-Überwachungssystem

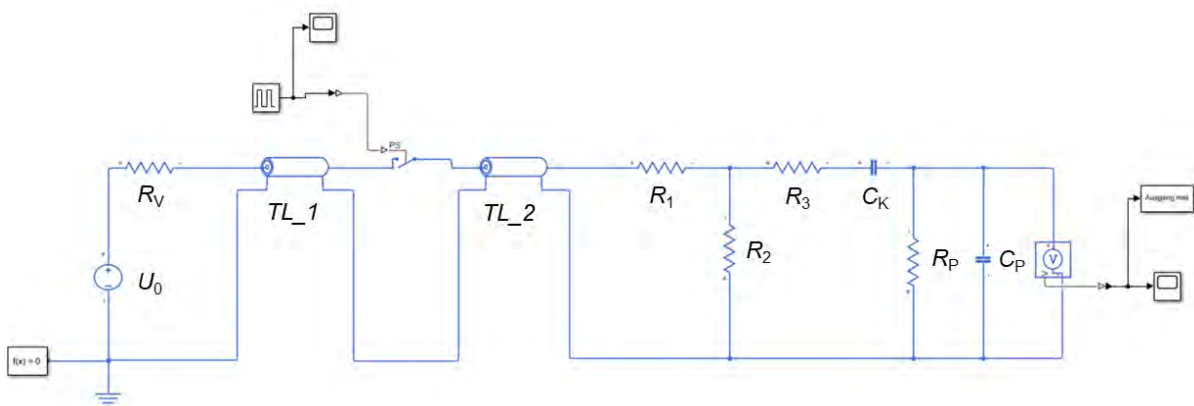
**Bild 2:** Überblick über den hermetischen Transformator mit dem installierten Online-Überwachungssystem



## Entwicklung und Aufbau eines Impulsspannungsgenerators zur Anregung von Raumladungen in polymeren Isolierstoffen

M.Sc. Sebastian Braun, B.Sc. Christian Kohlsaatt

Bisher existiert kein standardisiertes Verfahren mit dem die Lebensdauer fester Isolierstoffe in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke unter Gleichspannungsbelastung ermittelt werden kann. Begründet ist dies vor allem in der Bildung von Raumladungen im Isoliermedium, die die Zuverlässigkeit und Lebensdauer beeinflussen. Zur Bestimmung der Raumladungsverteilung kann die Pulsed-Electro-Acoustic-Methode (PEA) angewendet werden. Dabei handelt es sich um eine zerstörungsfreie Methode, die auf dem Coloumb'schen Gesetz basiert. Wirkt auf die Raumladungen eine Kraft, ausgelöst durch einen elektrischen Spannungsimpuls, entsteht eine der Raumladungsverteilung proportionale akustische Welle im Isolierstoff. Diese kann mithilfe einer piezoelektrischen Folie gemessen werden. In diesem Beitrag wird der Entwurf eines Impulsspannungsgenerators zur Anregung von Raumladungen in polymeren Isolierstoffen vorgestellt. Die Spannungsform des Impulses beeinflusst unweigerlich die Qualität der Wellenform der akustischen Welle. Fehler bzw. Ungenauigkeiten im Spannungsimpuls würden sich auf somit die gesamte Messung auswirken. Aus den Klassen der Impulsspannungsgeneratoren wurde der Leitungsimpulsgenerator ausgewählt, da es sich dabei um eine kostengünstige und einfache Methode handelt Spannungsimpulse mit den gewünschten Anforderungen zu erzeugen. Weitere Methoden wie der Marx-Generator mit Peak- und Tailcut-Schalter sowie eine Halbleiterschaltung wurden nicht umgesetzt, da diese entweder zu viel Platz beanspruchen und somit nicht für ein kompaktes PEA-System in Frage kommen oder eine aufwendige Korrektur des Signals bedürfen, da diese die Eigenschaft einer starken Nachschwingung aufweisen, die das akustische Signal stört. Das Schaltbild des Leitungsimpulsgenerators ist in Bild 1 dargestellt.

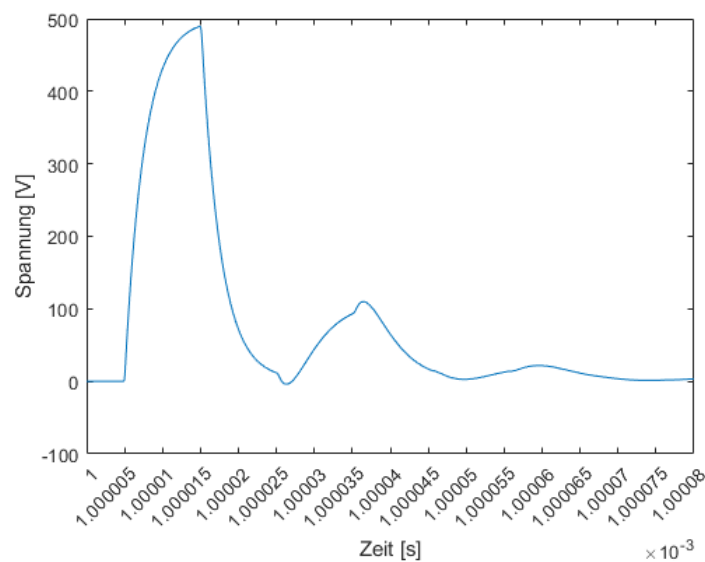


**Bild 1:** Schaltbild des Impulsspannungsgenerators

Dieser besteht aus einer Gleichspannungsquelle  $U_0$ , einem Vorwiderstand  $R_V$ , einem Koppelkondensator  $C_K$ , einer Last bzw. dem Prüfling, bestehend aus  $R_P$  und  $C_P$ , zwei Koaxialkabeln  $TL_1$  und  $TL_2$  und einer Impedanzanpassung aus  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ . Die Impulserzeugung eines Leitungsimpulsgenerators basiert auf dem Wanderwelleneffekt. Nach abgeschlossenem Ladevorgang des ersten Koaxialkabels  $TL_1$  auf die Spannung  $U_0$  werden beim Schließen des Relais zwei transiente Wanderwellen mit einer Amplitude von  $0,5 U_0$  erzeugt, da beide Koaxialkabel dieselbe Wellenimpedanz besitzen. Eine Welle wandert mit positiver Amplitude in Richtung Prüfling. Der andere Teil der Welle wandert mit negativer Amplitude in Richtung Spannungsquelle und wird vor dieser am Vorwiderstand, aufgrund des hohen Impedanzunterschieds, vollständig reflektiert. Die Impulsbreite wird von der Länge des ersten Kabels ( $TL_1$ ) und der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kabel bestimmt. Damit die Spannungswellen nach dem Durchlaufen des zweiten Koaxialkabels  $TL_2$  nicht reflektiert werden, wurde mithilfe eines T-Gliedes die Abschlussimpedanz auf die Wellenimpedanz der Koaxialkabel angepasst. Dafür wurden mithilfe von Simulationen Widerstandskombinationen ermittelt, die eine möglichst genaue Einhaltung der Wellenimpedanz von  $50 \Omega$  darstellen. Neben der angestrebten Rechteck-Form des Impulses wurden als zusätzliche Designziele die Impulsbreite auf maximal  $20 \text{ ns}$  und die Amplitude auf  $500 \text{ V}$  festgelegt. Die nach diesen Kriterien ermittelten Werte der einzelnen Bauteile sowie die Größen des Prüflings können Tabelle 1 entnommen werden und der simulierte Spannungsimpuls ist in Bild 2 dargestellt.

**Tabelle 1:** Bauteil- und Prüflingsgrößen des Impulsgenerators

Bauteil	$R_V$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C_K$	$R_P$	$C_P$
Größe	1 M $\Omega$	10 $\Omega$	68 $\Omega$	47 $\Omega$	700 pF	1 G $\Omega$	33,4 pF



**Bild 2:** Simulierter Spannungsimpuls mit geringen Nachschwingungen

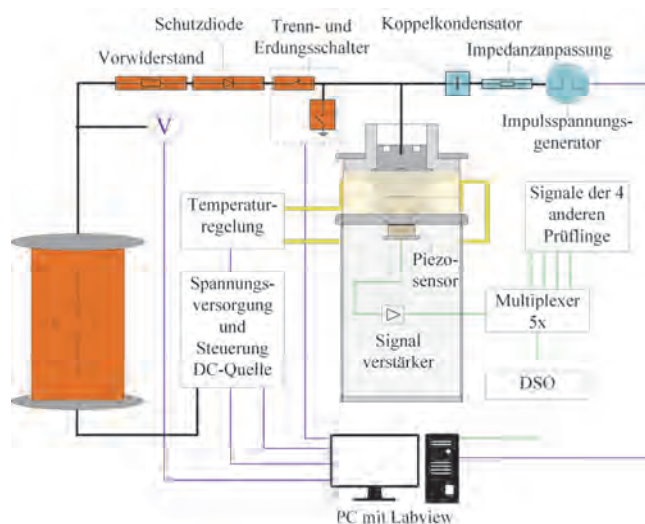
Nach abgeschlossener Simulation des Impulsspannungsgenerators wurden Platinen entworfen, um einen qualitativ guten und gleichzeitig kompakten Generatorschaltungsaufbau zu erstellen. Es wurde eine Platine für die Absicherung der Spannungsquelle, eine für das schaltende Relais, inklusive der Erzeugung des 100 Hz Schaltsignals und eine Platine für die Impedanzanpassung erstellt. Eine Aufteilung der Schaltungsgruppen auf einzelne Platinen ist insofern sinnvoll, als dass auf diese Weise interne Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Schaltungsgruppen verhindert werden und die Koaxialkabel als Verzögerungsglieder mit eingebracht werden müssen. Weiterhin wurde beim Leiterplattendesign für die wesentlichen Platinen auf eine Leiterbahnwellenimpedanz von  $50 \Omega$  geachtet und die Leiterstrecken möglichst kurzgehalten, um Störungseinflüsse zu minimieren. Zusätzlich wurden als Bauteilart SMD-Widerstände für die Impedanzanpassung gewählt, um ebenfalls weitere Störungen insbesondere durch Leiterschleifenbildung und damit verbundenen induktiven Spannungseinkopplungen zu vermindern. Mithilfe verhältnismäßig großer erdkontaktierter Kupferflächen wurden außerdem Störungen abgedämpft. Für eine weitere Abschirmung gegen Störungen von außen wurden die bestückten Platinen in geerdeten Metallgehäusen installiert. Des Weiteren wurden alle Platinen modular ausgelegt, sodass eine Erweiterung an Spannungsimpulsen mit gleichen Eigenschaften einfach umzusetzen ist. Der entwickelte Impulsspannungsgenerator soll so in Zukunft in einem PEA-Messsystem eingesetzt werden.

## Konzept zur Langzeitraumladungsmessung von polymeren Isolierstoffen unter hoher Gleichspannungsbelastung

M.Sc. Sebastian Braun

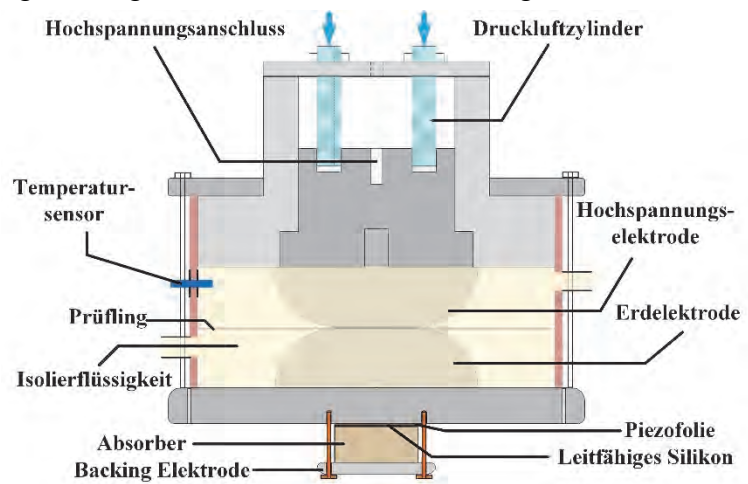
Infolge der weltweit stattfindenden Energiewende und den damit verbundenen Veränderungen im Energiesystem, werden neue Hochspannungs-übertragungssysteme installiert, die im Gegensatz zur bisher verwendeten Wechselspannungstechnik auf Gleichspannungsübertragung basieren werden. In Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen (HGÜ) kommen vermehrt feste polymere Isolierstoffe zum Einsatz. In Projekten wie Suedlink oder SuedOstLink sollen Strecken mit einer Länge von bis zu 700 km mit Höchstspannungskabeln, deren Isoliersystem aus vernetztem Polyethylen (VPE) besteht, realisiert werden. Hierbei stellt sich die Frage, ob die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der HGÜ-Komponenten mindestens so gut ist wie die der Wechselspannungsanlagen. Die Langzeiterfahrungen mit polymeren Isolierstoffen in HGÜ-Systemen sind im Vergleich zu denen der Wechselstromsysteme als gering einzustufen. Die Lebensdauer einer Hochspannungskomponente wird maßgeblich durch das verwendete Isoliersystem bestimmt, wobei für Wechselspannung Methoden entwickelt wurden, mit denen die Lebensdauer fester polymerer Isolierstoffe in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke bestimmt werden kann. Ein solches Verfahren steht derzeit für Gleichspannung nicht zur Verfügung, was die Lebensdauerabschätzung des Isoliersystems nahezu unmöglich macht. Ein Grund hierfür ist die Bildung von Raumladungen im Isoliersystem unter Gleichspannung, welche die Lebensdauer der Isolierung signifikant beeinflussen. Um die Lebensdauer polymerer Isolierstoffe unter Gleichspannungsbelastung in ähnlicher Weise wie unter Wechselspannungsbelastung abschätzen zu können, ist es nötig die

Ausbildung von Raumladungen im Isolierstoffvolumen während der gesamten Alterung zu messen und so den Einfluss dieser bei verschiedenen Feldstärken, Temperaturen und Alterungszeiträumen auf den Lebensdauerexponenten untersuchen zu können. Hierfür werden in diesem Beitrag ein Konzept und ein Aufbau zur Alterung polymerer Isolierstoffe vorgestellt. Der Messaufbau ermöglicht die gleichzeitige Alterung von fünf Prüflingen mit Feldstärken bis zu 100 kV/mm und Temperaturen im Bereich von 20 bis 80 °C. Weiterhin ermöglicht die Messeinrichtung eine kontinuierliche Messung der Raumladungsverteilung im Isolierstoffvolumen über



**Bild 1:** Gesamtmessaufbau zur Alterung polymerer Isolierstoffe und gleichzeitiger Raumladungsmessung

die gesamte Dauer der Alterung mittels der Pulsed-Electro-Acoustic-Methode (PEA). Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau des gesamten Messsystems. Die Prüflinge (insgesamt 5) werden über eine Gleichspannungsquelle parallel gealtert und es erfolgt eine gleichzeitige Raumladungsmessung aller Prüflinge. Durch die links im Bild dargestellte Gleichspannungsquelle werden die Prüflinge, je nach Dicke, mit einer Gleichspannung von bis zu 200 kV gealtert. Die akustische Detektionseinheit, samt piezoelektrischer Folie, ist unter der Erdelektrode in einem geschirmten Gehäuse angebracht. Die Anregung der Raumladungen erfolgt durch einen Rechteckspannungsimpuls im Nanosekundenbereich durch einen Leitungsimpulsgenerator. Dieser ist über einen Koppelkondensator mit dem jeweiligen Prüfling verbunden. Die Messdatenerfassung, Temperatursteuerung sowie die Steuerung der automatischen Trennung und Erdung eines durchgeschlagenen Prüflings erfolgt durch ein LabVIEW Programm auf dem Mess-PC. Der geplante Aufbau der Elektroden ist in Bild 2 dargestellt. Der zu prüfende Isolierstoff befindet sich zwischen zwei Elektroden, welche eine Rogowskikontur aufweisen und aus Aluminium bestehen. Die Hochspannungselektrode ist steckbar mit einer darüber liegenden Stempелеlektrode verbunden. Die Stempелеlektrode dient einerseits als Aufnahme für den darauf liegenden Elektrodenstempel aus Polytetrafluorethylen



**Bild 2:** Oberer Teil des Messaufbaus mit Elektroden, Gehäuse und Druckluftzylinder für die Steuerung des Anpressdrucks

(PTFE). Weiterhin befinden sich an der Oberseite der Stempелеlektrode Bohrungen, beziehungsweise Aufnahmen für den Anschluss der Hochspannung sowie für zwei Druckluftzylinder, welche zur Steuerung des Anpressdrucks dienen. Mit dem hier vorgestellten Konzept soll eine Reihe polymerer Isolierstoffe auf ihr Alterungsverhalten hin untersucht werden. Ziel dabei soll es sein, das Raumladungsverhalten auch über lange Zeiträume während der Alterung zu untersuchen, da es auch nach einigen Wochen noch zu Veränderungen in der Raumladungsdichteverteilung kommen kann, welche einen Einfluss auf die Alterungsmechanismen im Isolierstoffvolumen haben. Konkret sollen fünf Prüflinge mit einer Dicke von 1 mm gleichzeitig mit Spannungen von bis zu 100 kV elektrothermisch bis zu 3000 h gealtert werden. Für eine bessere statistische Auswertbarkeit werden anschließend die Messungen mit identischen Randbedingungen mit fünf weiteren Prüflingen wiederholt. Die Alterung soll insgesamt bei sieben verschiedenen Spannungsstufen durchgeführt werden, woraus dann die Ermittlung einer Art von Lebensdauergesetz erfolgen soll. Außerdem werden die beschrie-

benen Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Weitere Untersuchungen, wie beispielweise die genaue Ermittlung des Einflusses der Restwelligkeit der Spannungsquelle auf das Raumladungsverhalten sowie die Variation der Dicke der Prüflinge zur Untersuchung des Volumeneffekts sind geplant. Die Untersuchungen finden innerhalb eines von der DFG geförderten Projektes in Kooperation mit der Hochschule Zittau/Görlitz statt.



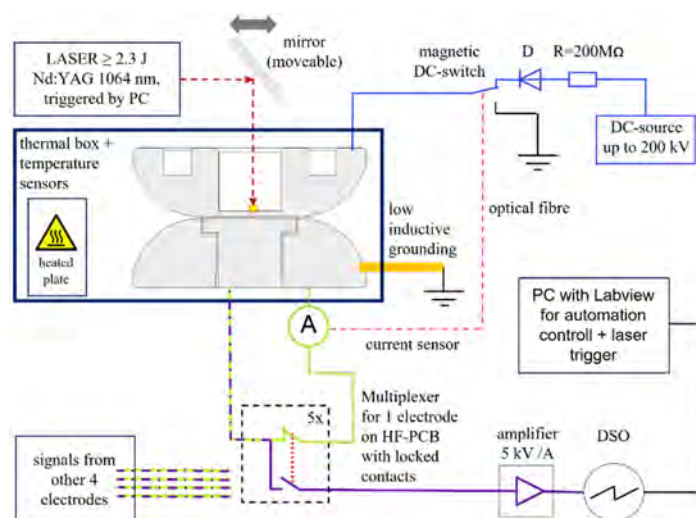
## Versuchsstand zur Raumladungsmessung mit LIPP Methode und gleichzeitiger Alterung polymerer Isolierstoffe unter hoher Gleichspannung

Dipl.-Ing. (FH) Henry Hirte

Parallel zu den im Schering-Institut kommenden Untersuchungen zur Alterung und Langzeitraumladungsmessung wird in dem gemeinsamen DFG-Projekt an der Hochschule Zittau/Görlitz an einem ähnlichen Versuchsstand gearbeitet. Dieser dient ebenfalls dem parallelen elektrothermischen Altern von fünf polymeren Isolierprüfkörpern, jedoch mit dem Unterschied, dass hier die LIPP (laser-induced-pressure-pulse) Methode zum Einsatz kommt. Das Ziel ist neben der Vergleichbarkeit und gegenseitigen Validierung der Raumladungsmessmethoden die Ermittlung von Lebensdauer kennlinien polymerer Isolierstoffe bei hohen Gleichspannungen. Die gemeinsame Arbeit im Gremium des technischen Komitees 112 des IEC erlaubt es mit den Ergebnissen dieses Projektes die Standards auf dem Gebiet der Spannungsfestigkeitsprüfung bei DC aktiv mitzugestalten.

Die Forschungsarbeiten der letzten Jahrzehnte konnten bereits viele Abhängigkeiten bei der Raumladungsbildung untersuchen. So ist die Entstehung und Bewegung von Raumladungen in polymeren Isolierstoffen neben der elektrischen Feldstärke unter anderem auch von Temperatur, Druck, Isolierstoffproduktion und Elektrodenmaterial abhängig. Ebenso wurden einige Modelle entwickelt, die den Zusammenhang zwischen Raumladungsbildung und Alterung physikalisch zu erklären versuchen. Auch, wenn es als erwiesen gilt, dass Raumladungen einen maßgeblichen Effekt auf die Alterung eines Isolierstoffes unter Gleichspannung besitzen, so gibt es hierzu noch keine bestehende Forschungsarbeit, die eine Anpassung des jetzigen Prüfverfahrens der Lebensdauerbestimmung an Gleichspannung anstrebt.

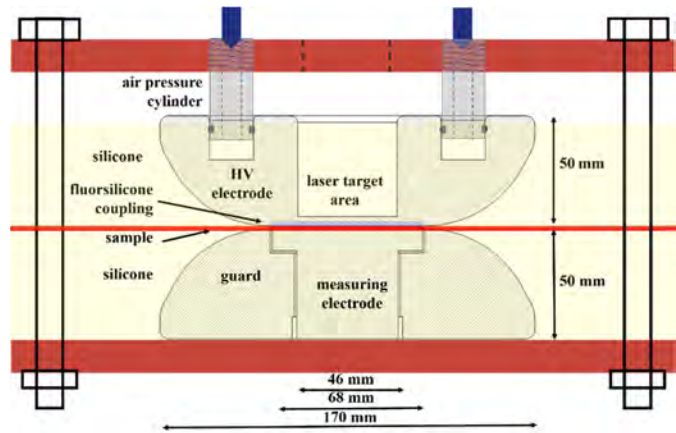
Es ist daher geplant eine Gruppe ausgewählter, weit verbreiteter Isolierstoffe bestehend aus Silikon, HDPE und Gießharz für einen zu untersuchen, um daraus eine gültige Methode für die Lebensdauerbestimmung unter DC zu entwickeln. Die Prüfdauer soll in sieben Zeitstufen unterteilt bei 3000h in der letzten Stufe enden. Für eine Versuchsreihe werden 10 Proben verwendet und die Versuchsreihe einmal bei Raumtemperatur und einmal bei 80°C durchgeführt, um den



**Bild 1:** Versuchsstand zur Alterung polymerer Isolierstoffe und gleichzeitiger Raumladungsmessung mit LIPP

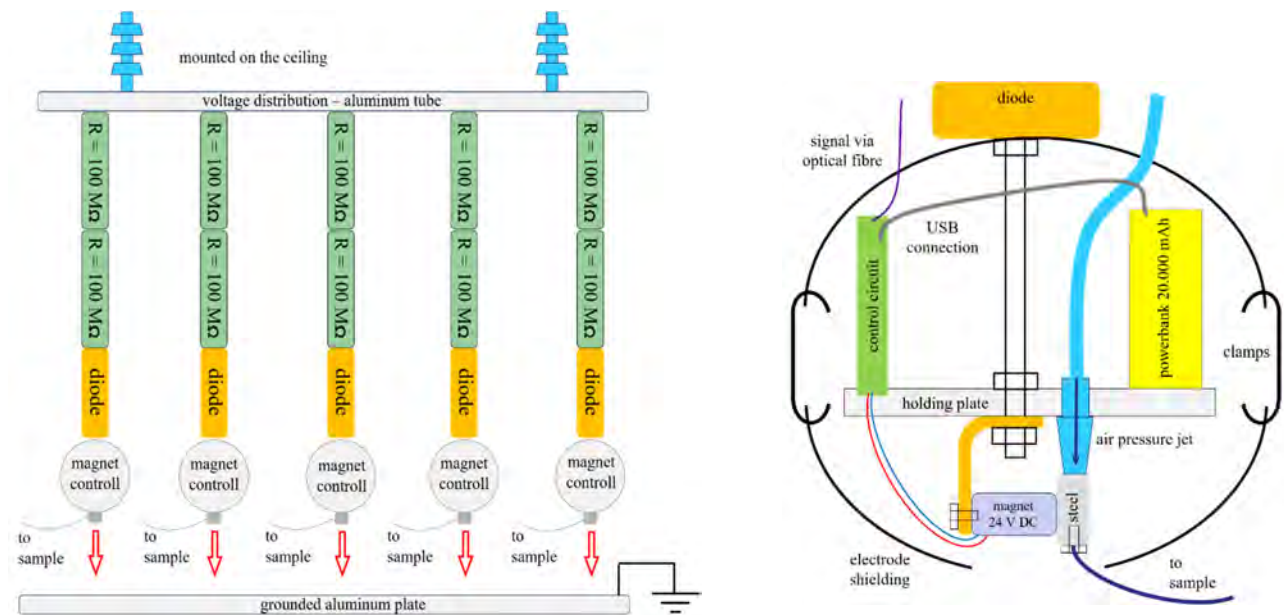
Temperatureinfluss auf die Raumladungsbildung zu berücksichtigen. Der zugehörige Versuchsstand ist in Abbildung 1 zu erkennen.

Neben der Temperatur kann auch der Anpressdruck der Elektroden auf den Prüfkörper via Druckluft reguliert werden, wie durch die Druckluftzylinder im Abbildung 2 angedeutet wird. Die Elektrodenanordnung ist zudem auf die Anwendung der LIPP-Methode angepasst. Hierzu wurde die Hochspannungselektroden mittig auf 4mm reduziert, um die Zielfläche für den Laser dazustellen. An der Grenzfläche zum Prüfkörper wurde eine 200µm Vertiefung eingearbeitet, die mit einem leitfähigen akustischen Koppelmaterial gefüllt wird. Dies dient der Durchleitung der Druckwelle vom Metall in den Prüfkörper. Die Abschaltung der Spannung wird über einen selbst entwickelten DC-Trenner realisiert, welcher den abgehenden Kontakt via Druckluft und gleichzeitig durch die Verwendung eines Elektromagneten öffnet, wie in Abbildung 3 zu erkennen ist. Der Ausfall eines Prüflings wird durch ein Grenzwertrelais erfasst und optisch an die auf Hochspannungspotential liegende Magnetsteuerung geleitet. Ein elektrischer Dauermagnet wird daraufhin kurz zugeschaltet, woraufhin die Magnetkraft nachlässt und der Kontakt mit dem der Prüfling an Spannung geschaltet wird nach unten auf ein geerdetes Blech fällt. Zur höheren Ausfallsicherheit wird gleichzeitig ein Druckluftstoß erzeugt, der den Kontakt vom Magneten löst.



**Bild 2:** Elektrodenanordnung mit Halterung

Die Abschaltung der Spannung wird über einen selbst entwickelten DC-Trenner realisiert, welcher den abgehenden Kontakt via Druckluft und gleichzeitig durch die Verwendung eines Elektromagneten öffnet, wie in Abbildung 3 zu erkennen ist. Der Ausfall eines Prüflings wird durch ein Grenzwertrelais erfasst und optisch an die auf Hochspannungspotential liegende Magnetsteuerung geleitet. Ein elektrischer Dauermagnet wird daraufhin kurz zugeschaltet, woraufhin die Magnetkraft nachlässt und der Kontakt mit dem der Prüfling an Spannung geschaltet wird nach unten auf ein geerdetes Blech fällt. Zur höheren Ausfallsicherheit wird gleichzeitig ein Druckluftstoß erzeugt, der den Kontakt vom Magneten löst.



**Bild 3:** DC-Trennschalter mit Druckluft-bzw. Magnetauslösung

# Entstehung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen in Isolierflüssigkeiten infolge von Transformatorfehlern

## Teil 1: Papier-/Ölalterung

M.Sc. Kristin Homeier

Die Gas-in-Öl-Analyse(DGA) stellt eine etablierte und vielversprechende Möglichkeit dar den Zustand des Isoliersystems eines Leistungstransformators zu bewerten, frühzeitig Transformatorfehler zu erkennen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Aufgrund von verschiedenen Belastungen im Betrieb des Transformators laufen in dem Isoliersystem, bestehend aus einer Kombination aus festem Isolierstoff (meist Zellulose) sowie einer Isolierflüssigkeit, verschiedene Alterungsmechanismen ab. Die Isolierstoffe weisen zumeist eine chemische Struktur aus verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen auf, deren Verbindungen aufgebrochen werden, so dass unterschiedliche Alterungsprodukte entstehen. Die Alterungsprodukte können dabei in gasförmiger (Fehlgase), flüssiger (Säure, Alkohole, Furane, Wasser) und fester Form (Schlamm, X-Wachs) auftreten und wiederum als Katalysatoren für weitere Alterungsreaktionen wirken. Insbesondere die in Öl gelösten Fehlgase stellen eine zielführende Grundlage für eine Diagnose dar.

Es gibt eine Vielzahl an DGA-Interpretationsmethoden auf dem Markt, jedoch basieren diese zumeist auf den Erfahrungen mit Mineralöl. Der zunehmende Einsatz alternativer Isolierflüssigkeiten, die sich in ihrer chemischen Struktur und vor allem auch in ihrem elektrischen, dielektrischen und physikochemischen Verhalten unterscheiden, erschwert hier die Zuverlässigkeit der DGA-Interpretation. Zudem ist bei den niederwertigen Kohlenwasserstoffen wie Methan und auch bei Wasserstoff die Löslichkeit in der Isolierflüssigkeit gering, so dass bei der Ölprobenentnahme sowie bei dem Transport eine Verflüchtigung der Gase resultieren kann und somit die Messgenauigkeit der DGA reduziert wird. Im Extremfall kann dies zu einer Fehlinterpretation und somit auch Fehlentscheidung führen.

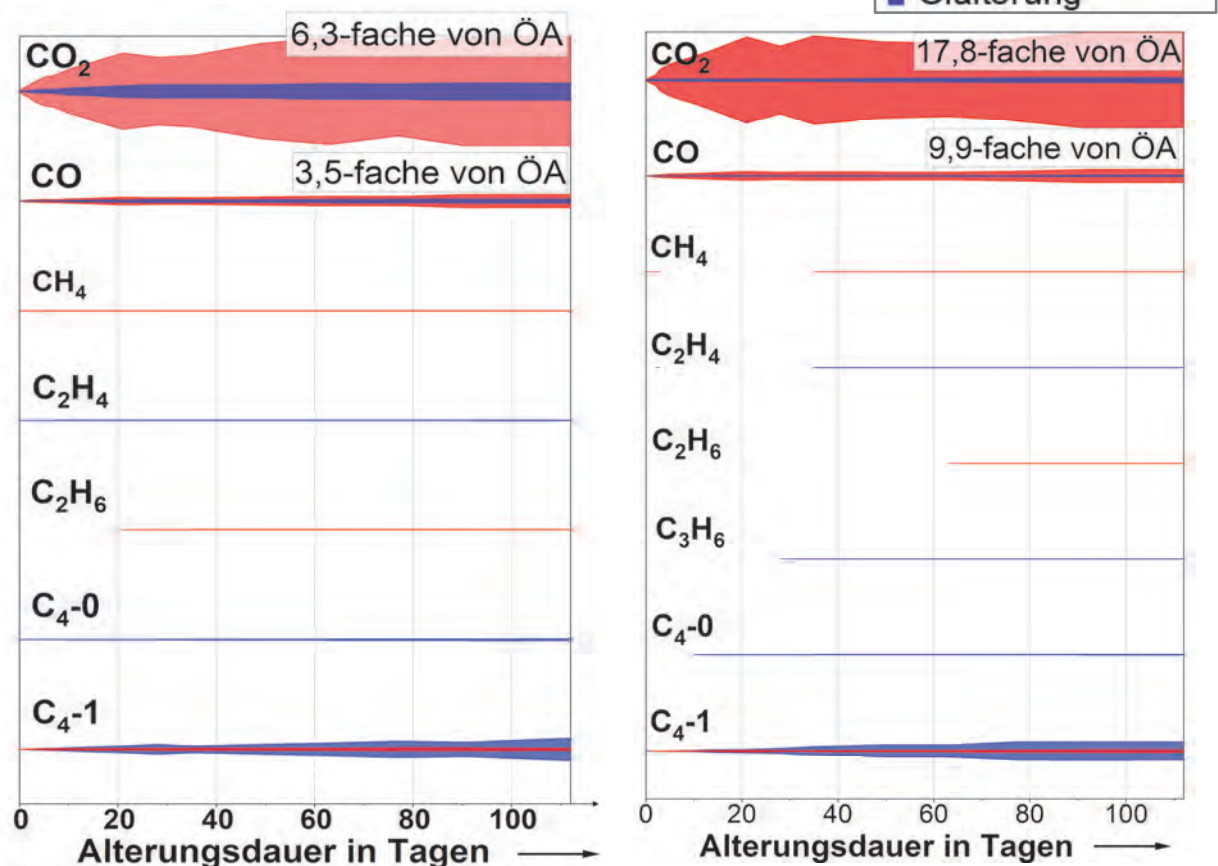
Vor diesem Hintergrund wurde mit dem Projektpartner *Elektrochemie Halle GmbH* ein DGA-Messgerät entwickelt, welches neben den konventionellen Fehlgasen auch eine Detektion höherwertiger C<sub>4</sub>- und C<sub>5</sub>-Kohlenwasserstoffe sowie weitere C<sub>3</sub>-Kohlenwasserstoffe erlaubt. Es scheint einen Zusammenhang zwischen der Gaslöslichkeit und der Menge an Kohlenstoffatomen zu geben: Je größer die Anzahl der höherwertigen Kohlenwasserstoffe, desto höher ist die Gaslöslichkeit der Isolierflüssigkeit. Somit kann die zusätzliche Berücksichtigung der höherwertigen Kohlenwasserstoffe eine geeignete Maßnahme darstellen, den Fehler bei der Probenentnahme und dem Transport signifikant zu reduzieren, so dass die Zuverlässigkeit der DGA-Interpretation erhöht werden könnte.

Zur Untersuchung der Entstehung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen werden verschiedene Nachbildungen von Transformatorfehlern im Labor entwickelt und aufgebaut. Je nach Transformatorfehler laufen in der Isolierflüssigkeit unterschiedliche Alterungsmechanismen ab, so dass auch infolge der Alterung unterschiedliche Fehlergasarten mit verschiedenen Konzentrationen und -verhältnisse entstehen.

In diesem ersten Teil der Vorstellung der Forschungsergebnisse wird die Bildung der höherwertigen Fehlergase neben den konventionellen Fehlergasen unter Papier- und Ölalterung vorgestellt. Für die Papierölalterung wurden mit dem Öl imprägnierte Papiere in Streifen geschnitten und dann zusammen mit dem Öl in einem 10:1 Öl-Papier-Gewichtsverhältnis in einem geschlossenen Erlenmeyerkolben bei 120 °C im Wärmeschrank gelagert und nach verschiedenen Belastungsdauern Proben entnommen. Für die Ölalterung wurde das gleiche Ölvolumen in einen Erlenmeyerkolben gefüllt und geschlossen unter denselben Bedingungen gelagert. Die generierten Fehlergase werden am Beispiel von den alternativen Isolierflüssigkeiten, synthetischer Ester und GtL-Öl, in Bild 1 dargestellt.

### Synthetische Esterflüssigkeit

### GtL-Öl



**Bild 1:** Vergleich der generierte Fehlergase in Papierölalterung (rot) und Ölalterung (blau) in der synthetischen Esterflüssigkeit (links) und GtL-Öl (rechts)

Auch bei den alternativen Isolierflüssigkeiten wird unter Papieröalterung eine signifikant höhere Konzentration an  $\text{CO}_2$  und CO generiert als bei der reinen Öalterung. Zudem werden bei der Papieröalterung zusätzlich noch Methan und Ethan gebildet, während bei der Öalterung vor allem Ethen sowie im Falle vom GtL-Öl auch noch Propen generiert wird.

Im Allgemeinen werden neben den konventionellen Fehlergasen auch höherwertige Kohlenwasserstoffe generiert. Hier sind vor allem die  $\text{C}_4$ -Kohlenwasserstoffe C4-0 und C4-1 charakteristisch. Insbesondere das C4-0 wird lediglich bei der reinen Öalterung gebildet und kann somit als Unterscheidungskriterium bei den beiden Fehlerarten dienen.

Diese ersten Messergebnisse verdeutlichen, dass die Berücksichtigung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen in einem DGA-Interpretationsalgorithmus eine vielversprechende Möglichkeit darstellt einen Fehler genauer zu klassifizieren und die Zuverlässigkeit der DGA-Interpretation zu steigern.



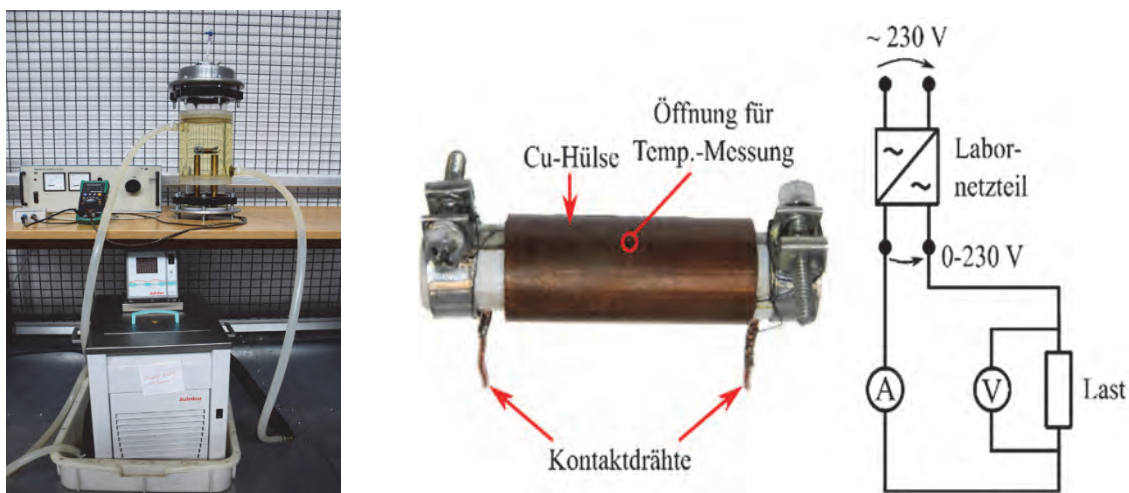
## Entstehung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen in Isolierflüssigkeiten infolge von Transformatorfehlern

### Teil 2: Thermische Fehler

M.Sc. Kristin Homeier

Je nach Transformatorfehler laufen in den Isolierflüssigkeiten verschiedene Reaktionen und Sekundärreaktionen ab, so dass unterschiedliche Fehlergase als Alterungsprodukte generiert werden. Die Bildung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen infolge von thermischen Fehlern wird in diesem zweiten Teil vorgestellt.

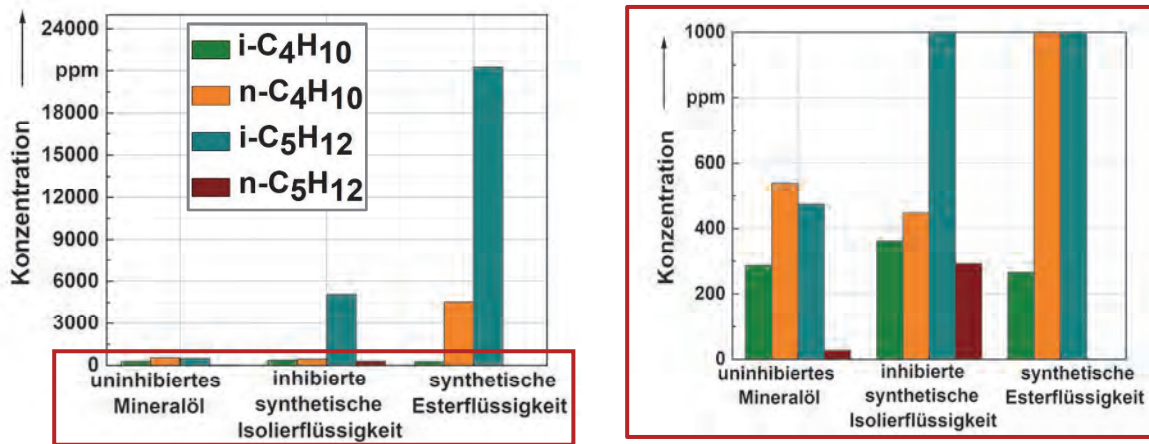
Als Transformatorfehlermodell wird hierbei ein lokaler thermischer Hot-Spot-Fehler mithilfe von einem Widerstandsdrahtwickel aus Konstantan, der durch einen Trenntransformator mit verschiedenen Strömen beansprucht wird, nachgebildet. Der Konstantandraht ist dabei um einen Keramikstab gewickelt. Um die lokale Hot-Spot-Temperatur und somit die Fehlergasmenge zu erhöhen, wurde zudem ein Kupferrohr mit PTFE-Abstandsscheiben über den unwickelten Keramikstab gestülpt, dargestellt in Bild 1. Das Modell wird in einem mit der Isolierflüssigkeit gefüllten Prüfgefäß fixiert, welches über seinen Doppelmantel die umgebene Isolierflüssigkeit aktiv kühlt, um einen lokalen thermischen Fehler zu gewährleisten. Verschiedene Isolierflüssigkeiten wurden mit unterschiedlichen Strömen und somit Hot-Spot-Temperaturen sowie Belastungsdauern beansprucht. Anschließend wurden die Öle einer DGA in dem mit dem Projektpartner *Elektrochemie Halle GmbH* entwickelten DGA-Messgerät zur Detektion höherwertigen Kohlenwasserstoffe unterzogen.



**Bild 1:** Prüfaufbau zur Nachbildung eines lokalen thermischen Hot-Spot-Transformatorfehler vollständiger Prüfaufbau (links); Widerstandsmodell (rechts)

Bild 2 zeigt die generierten höherwertigen Fehlergase in verschiedenen Isolierflüssigkeiten unter Beanspruchung mit einem thermischen T1-Fehler für eine Belastungsdauer von 1 Stunde. Zunächst werden die vier ausgewählten und kalibrierten C<sub>4</sub> und C<sub>5</sub>-Kohlenwasserstoffe i- und n-Butan sowie i- und n-Pentan gezeigt.

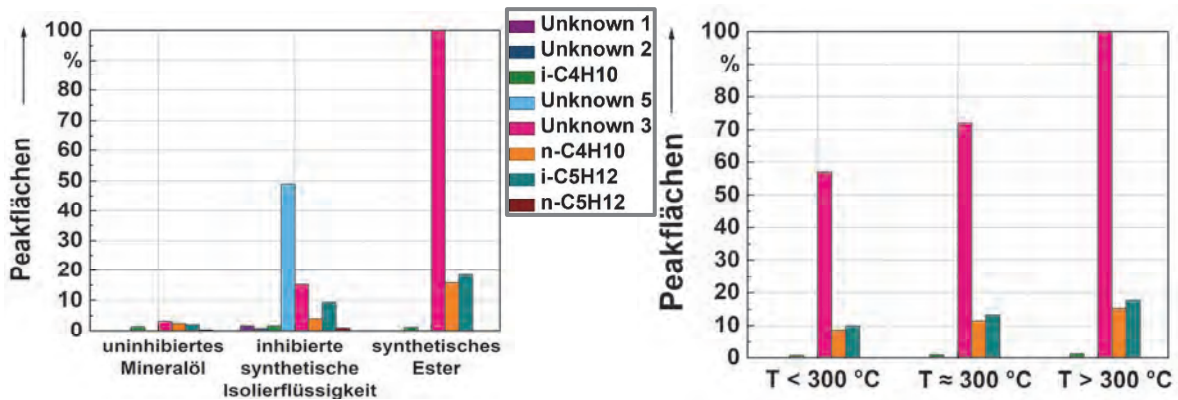




**Bild 2:** Ausgewählte generierte C4 und C5-Kohlenwasserstoffe (KW) in verschiedenen Isolierflüssigkeiten: gesamter Konzentrationsbereich (links); verkleinerter Ausschnitt (rechts)

In allen Isolierflüssigkeiten werden schon bei T1-Fehler nach einer Stunde in hohen Konzentrationen höherwertige Kohlenwasserstoffe generiert. Auffallend ist, dass die synthetische Esterflüssigkeit die höchsten Konzentrationen, vor allem von n-Butan und i-Pentan aufweist, während in dem uninhibierten Mineralöl insgesamt die geringsten Konzentrationen entstehen.

Neben den ausgewählten kalibrierten Fehlern werden auch noch weitere, bisher unbekannte Fehlern detektiert, dargestellt in Bild 3 links. Zudem wird rechts in dem Bild 3 die Relation zwischen Fehlernkonzentration und Temperatur am Beispiel von der synthetischen Esterflüssigkeit verdeutlicht.



**Bild 3:** Normierte Peakflächen der C<sub>4</sub> und C<sub>5</sub>-KW in verschiedenen Isolierflüssigkeiten (links) Normierte Peakflächen der C<sub>4</sub> und C<sub>5</sub>-KW bei verschiedenen Temperaturen (rechts)

Bei den gebildeten unbekanntem Fehlern (Unknown, da diese noch nicht strukturmäßig zugeordnet werden konnten) sticht bei der synthetischen Esterflüssigkeit insbesondere Unknown 3 in hohen Peakflächen hervor. Dieses Fehlern wird auch in den anderen Isolierflüssigkeiten detektiert. Dagegen ist bei der inhibierten synthetischen

Isolierflüssigkeit das unbekannte Fehlergas Unknown 5 auffällig und weist die höchsten Peakflächen auf.

Des Weiteren wird am Beispiel der synthetischen Esterflüssigkeit der Zusammenhang zwischen Temperatur und Fehlergasmenge in Unknown 3 und auch n-Butan und i-Pentan ersichtlich: je höher die Temperatur, desto höher die Fehlergaskonzentration.

Diese DGA-Messergebnisse stellen ebenfalls eine vielversprechende Möglichkeit bei der Verbesserung der DGA-Interpretation mittels Einbeziehung von verschiedenen höherwertigen Kohlenwasserstoffen dar. Es wird jedoch deutlich, dass eine isolierflüssigkeitsspezifische DGA-Interpretation sinnvoll ist.

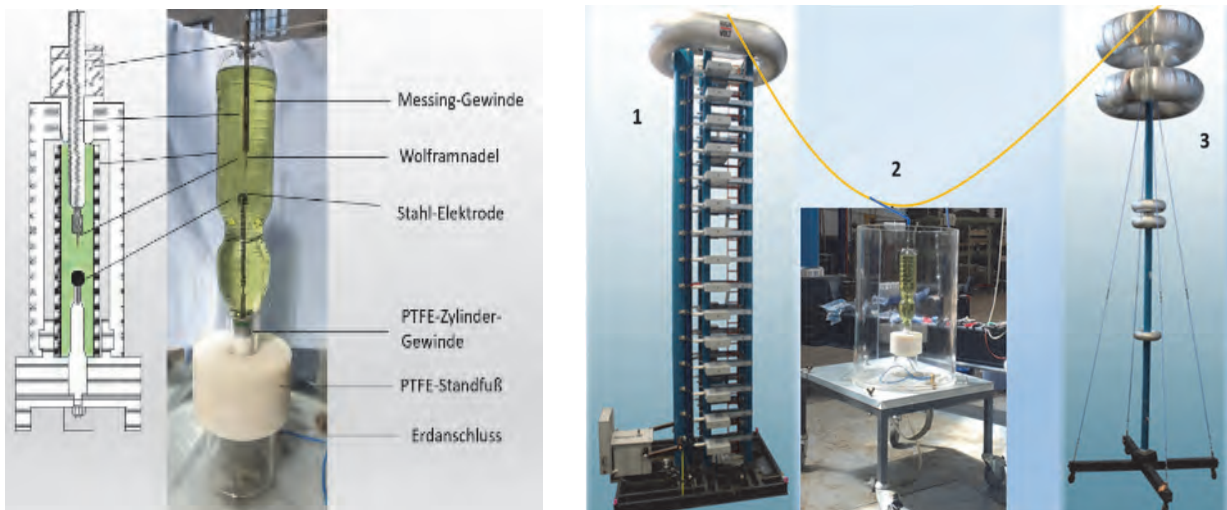
# Entstehung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen in Isolierflüssigkeiten infolge von Transformatorfehlern

## Teil 3: Elektrische Fehler

M.Sc. Kristin Homeier

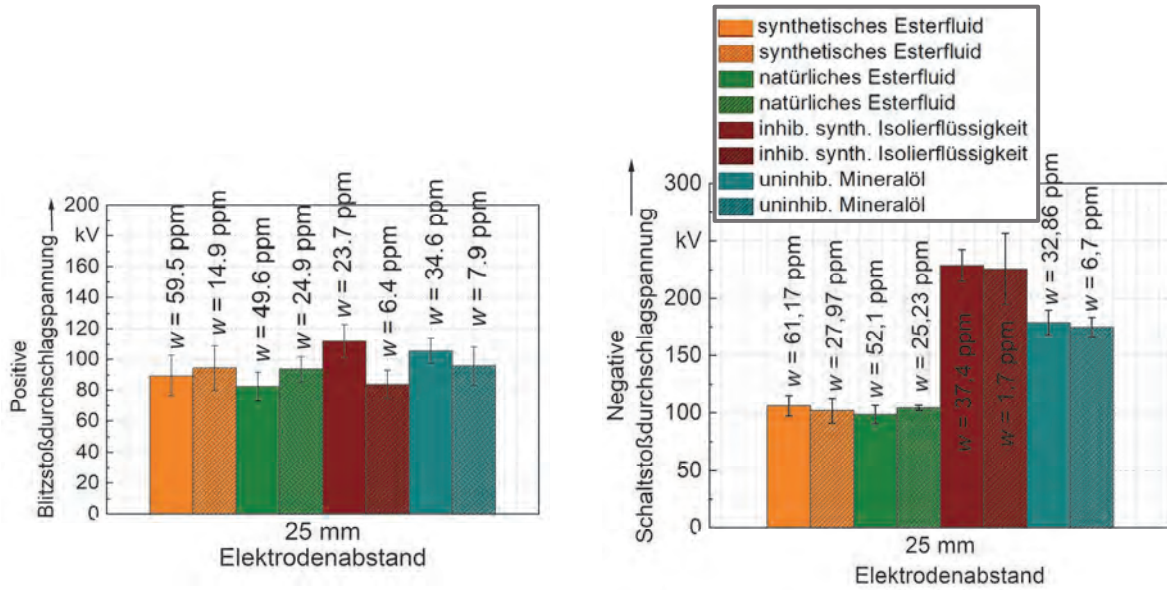
Elektrische Fehler stellen in der Regel die kritischen Transformatorfehler dar. Hierbei wird in elektrische Fehler in Form von Entladungen mit verschiedenen Energien sowie Teilentladungen unterschieden. Daher wird in diesem dritten Beitrag kurz ein Einblick auf den Einfluss von Entladungen in Form von Stoßspannungen mit unterschiedlichen Energien und Stoßanzahl in Hinblick auf die Entstehung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen gegeben.

Dazu wurden im Labor verschiedene Isolierflüssigkeiten mithilfe eines im Bild 1 abgebildeten Prüfaufbaus mit Nadel-Kugel-Elektrodenanordnung mit 25 mm Elektrodenabstand in Anlehnung an die Prüfnorm IEC 60897 mit Blitzstoßspannung beansprucht.



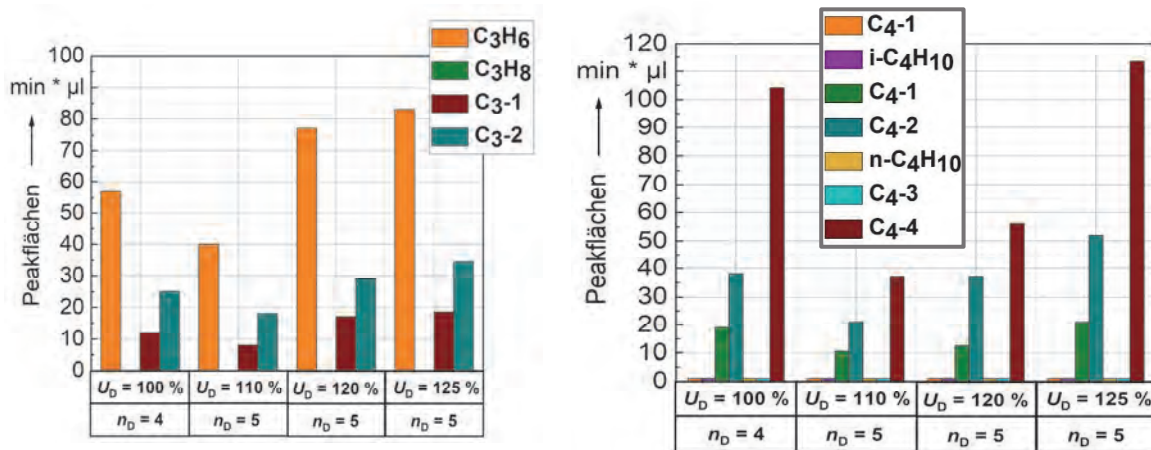
**Bild 1:** Prüfaufbau zur Fehlernachbildung: Prüfgefäß (links), gesamter Prüfaufbau (rechts)

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden zunächst von allen Isolierflüssigkeiten die negativen und positiven Durchschlagstoßspannungen ermittelt, dargestellt in Bild 2. Hierbei werden insbesondere bei der negativen Polarität signifikante Unterschiede zwischen den Isolierflüssigkeiten ersichtlich. Während Mineralöl und die synthetische Isolierflüssigkeit negative Durchschlagsblitzstoßspannungen von ca. 300 kV bis 400 kV aufweisen, besitzen Esterflüssigkeiten lediglich eine negative Durchschlagsblitzstoßspannung von ca. 130 kV. Bei der positiven Polarität weisen die Isolierflüssigkeiten annähernd ähnliche Durchschlagsblitzstoßspannungen von ca. 100 kV auf. Die Unterschiede lassen sich durch die verschiedenen ablaufenden Streamer-Mechanismen in den unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten aufgrund ihrer chemischen Struktur und den Polaritätseffekt erklären. Ferner wird eine moderate Reduktion der Durchschlagsblitzstoßspannung mit abnehmenden Wassergehalt ersichtlich.



**Bild 2:** Durchschlagsspannungen verschiedener Isolierflüssigkeiten bei Blitzstoßspannung verschiedener Polarität: positive Blitzstoßspannung (links); negative Blitzstoßspannung (rechts)

Die ermittelten negativen Durchschlagsspannungen der jeweiligen Isolierflüssigkeiten werden im Folgenden für die Untersuchung der Entstehung von Fehlern als 100 % Durchschlagstoßspannung definiert. Die Isolierflüssigkeiten wurden mit 5 Stößen bei 25 mm Elektrodenabstand bei unterschiedlichen negativen Blitzstoßspannungen beansprucht und im Anschluss einer DGA unterzogen. Als Beispiel zeigt Bild 3 die generierten C<sub>3</sub> und C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffe in uninhibierten Mineralöl.



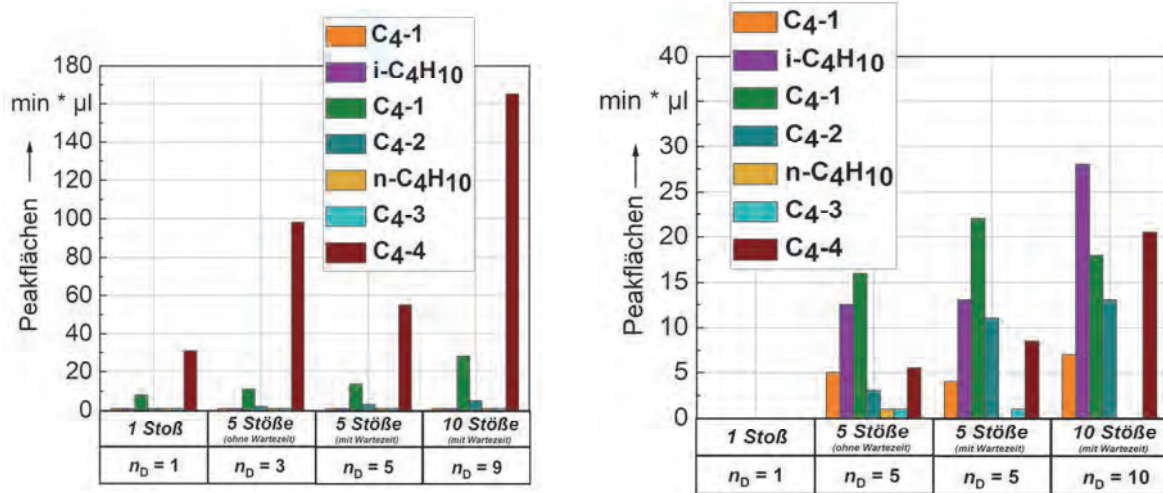
**Bild 3:** Peakflächen von C<sub>3</sub>-Kohlenwasserstoffen in uninhibierten Mineralöl (links)  
Peakflächen von C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffen in uninhibierten Mineralöl (rechts)

Im uninhibierten Mineralöl werden neben Propen auch noch die unbekanntes C<sub>3</sub>-1 und C<sub>3</sub>-2 als C<sub>3</sub>-Kohlenwasserstoffe generiert. Mit Ausnahme von der 100 % Spannung, wo ein unvollkommener Stoß aufgetreten ist, kann im Allgemeinen eine Zunahme der Peakflächen mit der Stoßspannungsenergie verzeichnet werden. Ähnliches wird auch



bei den gebildeten C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffen ersichtlich: mit Zunahme der Spannung erhöhen sich die Konzentrationen. Dort erscheinen vor allem die unbekannteren C<sub>4</sub>-1, C<sub>4</sub>-2, und C<sub>4</sub>-4 als charakteristische Fehlergase für einen elektrischen Fehler.

Auch der Einfluss der Stoßanzahl auf das Gasungsverhalten wurde untersucht, im Bild 4 am Beispiel vom uninhibierten Mineralöl und natürlichen Ester bei 120 % Spannung dargestellt.



**Bild 4:** Peakflächen von C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffen in uninhibierten Mineralöl (links)  
Peakflächen von C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffen in natürlichen Ester (rechts)

Es wird eine tendenzielle Relation zwischen Stoßanzahl und Konzentration ersichtlich: Je mehr Stöße, desto höher die Konzentration. Bei Reduktion der Wartezeit zwischen den Stößen auf ein Minimum wird beim uninhibierten Mineralöl eine Erhöhung der C<sub>4</sub>-4-Konzentration erkennbar, während beim natürlichen Ester eher eine Reduktion aller C<sub>4</sub>-Kohlenwasserstoffe deutlich wird. Die Peakflächen liegen bei dem Mineralöl im Vergleich zum natürlichen Ester signifikant höher, allerdings muss hier die signifikant niedrigere 100 % Spannung berücksichtigt werden.

Im Allgemeinen wird ersichtlich, dass in allen Transformatorfehlerarten neben den konventionellen Fehlergasen auch höherwertige Fehlergase generiert werden. Je nach Art des Transformatorfehlers und Isolierflüssigkeit werden unterschiedliche charakteristische Fehlergase generiert. Somit stellen diese DGA-Messergebnisse eine vielversprechende Möglichkeit bei der Verbesserung der DGA-Interpretation mittels Einbeziehung von verschiedenen höherwertigen Kohlenwasserstoffen dar. Auch hier wird jedoch wieder deutlich, dass eine isolierflüssigkeitsspezifische DGA-Interpretation sinnvoll ist.

## Entwicklung eines regenerativen Gerätes zur Reduktion der Feuchteaufnahme von freiatmenden Leistungs- transformatoren

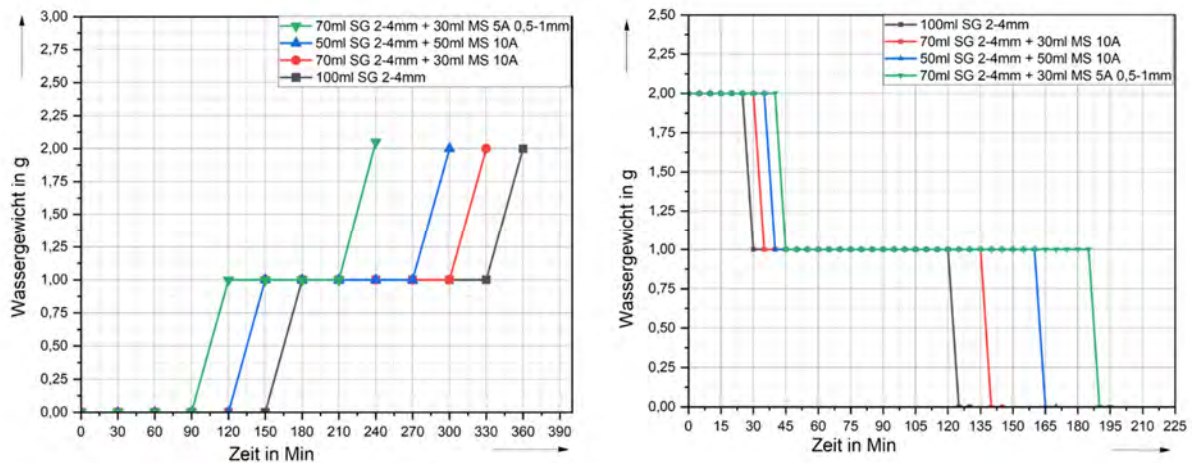
**M.Sc. Mahmoud Moh'd**

Während des Betriebs stehen Transformatoren unter verschiedenen Beanspruchungen, den sogenannten TEAM-Belastungen: thermische, elektrische, mechanische Beanspruchung und Umwelteinflüsse (Ambient). Bei den Umwelteinflüssen handelt es sich hauptsächlich um Feuchtigkeit und Sauerstoff aus der Umgebung, die zu chemischen Reaktionen führen und die Reaktionsmechanismen im gesamten Isoliersystem des Öl-Papier-Transformators beschleunigen können. Insbesondere bei freiatmenden Transformatoren, die über das Ausdehnungsgefäß Kontakt zur Umgebungsluft haben, werden beim Einatmen des Transformators Feuchtigkeit eingebracht. Um dies zu verhindern, gibt es auf dem Markt eine Vielzahl von Luftentfeuchtern. Diese reduzieren jedoch nur die Luftfeuchtigkeit und sind in der Regel nicht regenerierbar und somit wartungsintensiv. Aus diesem Grund soll ein neuartiger Luftentfeuchter entwickelt werden, der die Feuchtigkeit, regenerierbar reduziert.

Es sind geeignete Materialien oder Materialmischungen zur Feuchtereduktion zu finden. Ziel ist es ein Restfeuchtegehalt von  $< 3\%$  rF zu erreichen. Zu diesem Zweck werden geeignete Materialien hinsichtlich verschiedener Einflüsse auf die Reduktion, wie z. B. Volumen- oder Gewichtsverhältnisse, unterschiedliche Temperaturen und Start-Feuchtigkeitsgehalte sowie der Einfluss der Luftströmung getestet. Abschließend soll ein Setup aufgebaut werden, um die Regeneration des Trockenmaterials zu testen bzw. zu optimieren.

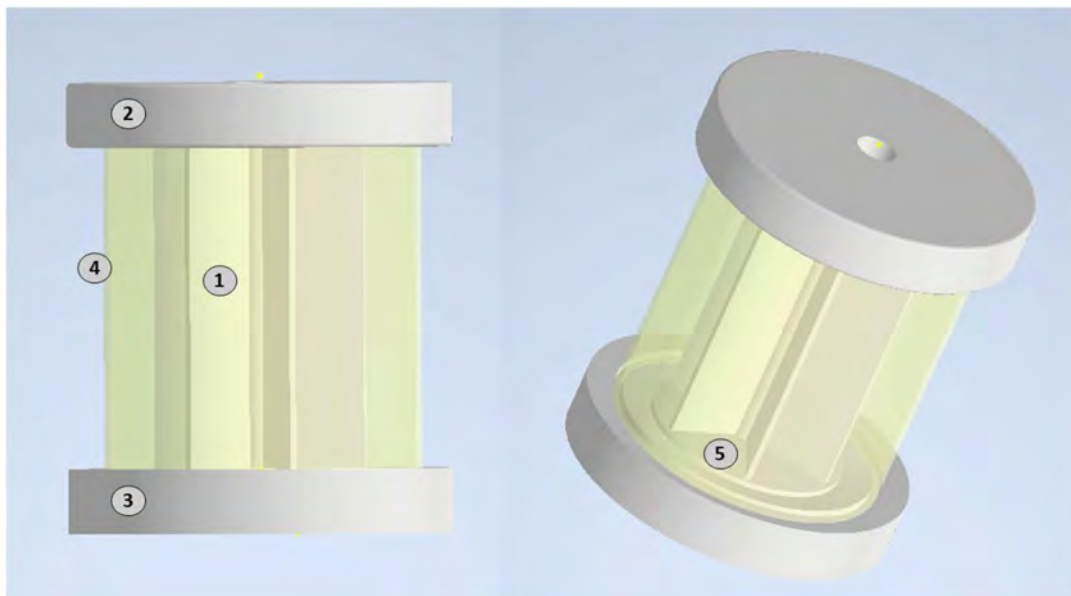
Die Untersuchung wurde schrittweise durchgeführt. Es sollten geeignete Materialien zur Luftentfeuchtung getestet werden. Hierfür wurden die Trockenmaterialien diverser Korngrößen wie Silica Gel, Zeolith, Bentonit sowie Mischungen aus diesen Materialien, überprüft. Die Trockenmittel sowie die Mischungen wurden erstmal statisch in einem Glasgefäß von 1 l Fassungsvermögen untersucht. Dann wurde der Einfluss des Volumens mit einem 3 l Gefäß kontrolliert. Im Anschluss wurde der Einfluss der Start-Feuchte auf die Feuchteaufnahme des Trockenmittels überprüft. Abschließend wurde der erste Regenerationsversuch mit einem Setup aus einem Rohr, einem Heizelement – bzw. einer Folie sowie Temperatursensoren durchgeführt (*siehe Bild 1*), die mit einem Arduino-Uno programmiert wurden.





**Bild 1:** **Links** – Ein Beispiel zur Befeuchtung der Mischungen aus Silica Gel (Blau) und Molekularsieb bis 2g Wassergewicht, was 12,5 % des Wasseraufnahmevermögens (20 % des Probengewichts) darstellt. Die gesamte Probe wiegt 80 g. **Rechts** – Regenerationsversuche der Mischungen aus Silica Gel - Blau und Molekularsieb anhand eines Regenerationssetups bei einer Temperatur von 125 °C.

Eine fertige Anordnung zur Regeneration des Trockenmittels ist noch zu entwickeln bzw. zu optimieren (*siehe Bild 2*). Die vorgeschlagene Anordnung befindet sich zurzeit in der Fertigung.



**Bild 2:** Vorgeschlagene Anordnung zur Regeneration des Trockenmittels mit einem eingebauten Heizelement in der Kernmitte. 1 – Kern mit einem eingebauten Heizelement, 2 – Oberer Flansch., 3 – Unterer Flansch mit Konus für Wasserabfluss, 4 – Glas, 5 – Unterer Teller.

Zusammengefasst ist das Ziel dieses Projektes, einen regenerativen Luftentfeuchter zu entwickeln. Dabei stand vor allem die Erprobung geeigneter Materialien bzw. Mischungen für die Luftentfeuchtung im Vordergrund. Es wurden für die Trocknungsver-

suche die Materialien Silica Gel, Molekularsieb sowie Bentonit, jeweils mit unterschiedlichen Korngrößen und Arten verwendet. Bei der Auswahl der Trockenmaterialien wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt, wie beispielsweise die Regenerationstemperatur, Regenerationszeit, Wasseraufnahmevermögen sowie der Lebenszyklus. Aus diesen Materialien sollte das am besten geeignete Material bzw. deren Kombination gefunden werden. Die Untersuchungen wurden schrittweise und unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Es wurden die besten sechs Materialien bzw. Mischungen ausgewählt und weiter untersucht. Die angestrebten Mischungen wurden weiter untersucht unter dem Einfluss der Start-Luftfeuchte, Volumenverhältnis sowie die Luftströmung. Im Anschluss wurde ein Setup aus einem Messingrohr, Heizfolie sowie Temperatursensoren aufgebaut, um die Regenerationsfähigkeit der Mischungen zu bewerten. Anschließend wurde eine Anordnung für die Regeneration der Trockenmittel entwickelt, welche sich derzeit in der Fertigung befindet. Die Anordnung besteht aus mehreren Teilen mit einem in der Mitte eingebauten Heizelement, um Wärme für die Regeneration der Trockenmittel zu erzeugen und diese anhand der Streifen möglichst gleichmäßig auf die Trockenmittel zu verteilen.

## Ein neues Verfahren zur Health-Index Bestimmung am Beispiel von Leistungstransformatoren

M.Sc. Mahmoud Moh'd, M.Sc. Henning Schnittker

Ein weitverbreitetes Verfahren zur Bestimmung des Zustands von Leistungstransformatoren ist die Ermittlung eines Health-Indexes. Die verschiedenen Methoden zur Bewertung des Health-Indexes von Leistungstransformatoren aus der technischen Broschüre TB-761 der CIGRÉ sind mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen verbunden. Der größte Nachteil bei einigen Methoden ist die Maskierung der Fehler, d. h. die Bewertung weist nicht auf den richtigen Zustand des Transformators hin, da ein Defekt maskiert bzw. von anderen Messwerten verdeckt wird. Daher wurde ein genaues und umfassendes Verfahren entwickelt, um diese Nachteile zu überwinden und den Zustand der Leistungstransformatoren in Form eines Health-Index-Wertes genauer zu bestimmen.

Nach der technischen Broschüre TB-761 der CIGRÉ stehen verschiedene Health-Indizes zur Verfügung, die nach dem Ziel der Bewertung unterschieden werden. Diese Verfahren sind entweder Rechenverfahren oder symbolische Methoden. Das neu entwickelt Verfahren erfolgt in fünf Schritten:

1. Festlegung der Bewertungsmatrix mit einer Einteilung der Kategorien (Stufen) und entsprechenden Farben. Eine Möglichkeit ist in *Tabelle 1* dargestellt, wobei jede Stufe oder Farbe in der Bewertungsmatrix eine bestimmte Bewertung repräsentiert. Die Anzahl der Stufen in der Bewertungsmatrix ist beliebig definierbar und beeinflusst nur die Genauigkeit der gesamten Bewertung.
2. Bewertung der einzelnen Messungen anhand der Bewertungsmatrix. Insbesondere die Anzahl der Messungen, die für die Bewertung des Assets relevant sind, da hieraus in Schritt 3 die Gewichte bestimmt werden.
3. Die grundlegende Idee dieses Verfahrens ist, dass das Gewicht  $G_i$  einer Stufe  $i$  in der Bewertungsmatrix multipliziert mit der Anzahl der Messungen  $N$  kleiner sein muss, als das Gewicht der nächsten Stufe (siehe Formel 1).

$$N \cdot G_i < G_{i+1} \quad (1)$$

In dieser Formel stellt  $N$  die Anzahl der betrachteten Fehlerarten bzw. der Messungen zur Bestimmung des HI dar,  $G_i$  das Gewicht der Stufe  $i$  und  $G_{i+1}$  repräsentiert das Gewicht der nachfolgenden Stufe. Die Formel wird immer angewendet zwischen einer Stufe und der nachfolgenden Stufe.

4. Summierung der Gewichte jeder Messung zur Ermittlung des gesamten Zustands des Assets (vgl. Formel 2).

$$\sum_1^N G \quad (2)$$

Anschließend ist eine Skalierung auf einer gewünschten Skala wie z. B. 1–10 möglich. Eine Skalierung erleichtert die Übersicht und ermöglicht eine Vergleichbarkeit zwischen Betriebsmitteln. Rückwirkend kann aus der Indexzahl direkt auf die Anzahl der Einzelbewertungen (wie bei Methode Anzahl pro Kategorie) geschlossen werden.

5. Erstellung eines Labels. Dieser Schritt ist optional, definiert allerdings die Handlungsanweisung und spiegelt daher das Ziel des HI wider (Ersatz-Index, Repair-Index etc.).

Im Folgenden wird das Prinzip der Berechnung beispielhaft für typische Messungen an Leistungstransformatoren angewendet.

Im ersten Schritt wird die Bewertungsmatrix erstellt. In diesem Fall wurde die Einteilung in 5 Stufen bzw. Farben gewählt (vgl. Tabelle 1).

Im zweiten Schritt werden die Messungen bewertet. Es werden in diesem Beispiel 4 Messungen betrachtet. Diese Messungen sind Wicklungswiderstandsmessung (R), Durchführungsmessung ( $\tan\delta$  und C), Standard Öl-Test (SOT) und Gas-in-Öl-Analyse (DGA). In diesem Fall wurden 15 Transformatoren zufällig als Beispiel zur Verdeutlichung des Verfahrens betrachtet. Die einzelnen Bewertungen sind in *Tabelle 2* zu erkennen.

Im dritten Schritt wird jeder Bewertungsstufe bzw. Farbe ein Gewicht zugeteilt. Dieses Gewicht hängt von der Anzahl der Messungen ab (siehe Formel 1). Für die vier betrachteten Messungen führt die Anwendung der Formel für die erste Stufe zu  $4 \cdot 0 = 0$ , d.h. das Gewicht der nächsten Stufe (gut) kann 1 sein. Da 1 größer als 0 ist, ist die Bedingung in *Formel 1* erfüllt. Für die zweite Stufe ergibt sich  $4 \cdot 1 = 4$ , so dass die nächste Stufe (mittel) mindestens 5 als Gewicht erhalten muss.

Im vierten Schritt werden die Gewichte aller Messungen zur Bestimmung des gesamten Zustandes des Transformators summiert. Beispielweise ergeben 4 Messungen mit der Bewertung sehr schlecht  $4 \cdot 125 = 600$ . Auf diese Weise ergibt sich der Zustandsindex in *Tabelle 2*.

**Tabelle 1:** Gewicht pro Stufe in der Bewertungsmatrix

Die Stufen in der betrachteten Bewertungsmatrix	Sehr gut	gut	mittel	schlecht	Sehr schlecht
Gewicht	0	1	5	25	125

Im fünften Schritt wird ein Label eingeführt. Das Label hat eine Skala von 0-5 und definiert die Zustände sehr gut bis sehr schlecht (vgl. Tabelle 3). Da sowohl Zustände vor einem Fehler sowie nach einem Fehler vorliegen, entspricht dies eher einem Komposit-Index

**Tabelle 2:** Beispielhafte Bewertung der Messungen bei verschiedenen Transformatoren

Trafo #	R	tan $\delta$	DGA	SOT	Zustands-index	Normierung	Label
1					600	10,00	5
2					251	4,18	4
3					255	4,25	4
4					300	5,00	4
5					175	2,92	4
6					128	2,13	4
7					132	2,20	4
8					176	2,93	4
9					180	3,00	4
10					56	0,93	3
11					36	0,60	3
12					32	0,53	3
13					16	0,27	2
14					11	0,18	2
15					0	0,00	0

**Tabelle 3:** Bewertungsskala des Modells, einschließlich des Zustandes, der Normierung und des Labels von 0 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht)

Zustand	Skala					
	sehr gut	gut	mittel	ausreichend	schlecht	sehr schlecht
Normierte Klasse	< 0,02	0,02 - 0,07	0,08 - 0,33	0,42 - 1,67	2,08 – 4,166	6,25 - 10
Label	0	1	2	3	4	5

Ein neues Health-Index-Verfahren zur Bewertung von Betriebsmitteln wurde beispielhaft an Transformatoren vorgestellt. Die Methode ermittelt eine Indexzahl, die eine detaillierte Zustandsaussage zu den Betriebsmitteln repräsentiert. Viele Nachteile der in der TB-761 der CIGRÉ vorgestellten Methoden können damit vermieden werden. Dies flexibilisiert die Zustandsbestimmung und es können individuell adäquate Lösungen für eine genauere Bewertung von Leistungstransformatoren entwickelt werden. In Bezug auf die betrachteten Diagnosemessungen kann das Verfahren außerdem mühelos erweitert werden.

## **Untersuchung des Diffusionsverhaltens von verschiedenen Säurekonfigurationen in Isolierpapier in einem geschlossenen Transformatorensystem**

**M.Sc. Büsra Özdemir**

Als wichtiger Teil der Hochspannungsstromversorgungskette müssen Transformatoren sicher und zuverlässig arbeiten. Die Grenze der Lebensdauer hängt weitgehend vom Isolationssystem des Transformators ab. Das gebräuchlichste Isoliersystem ist die Öl-Papier-Isolierung, deren organischer Anteil sich mit der Zeit verschlechtern kann. Wenn Mineralöl im Öl-Papier-Isoliersystem altert, können sowohl niedermolekulare als auch hochmolekulare organische Säuren gebildet werden, während sich bei der Alterung von Isolierpapier nur niedermolekulare organische Säuren bilden. Der Gehalt an niedermolekularen Säuren in Isolierpapier ist etwa 100 Mal höher als der an niedermolekularen Säuren in Öl. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass insbesondere niedermolekulare Säuren, die stark dazu neigen, in Synergie mit Wasser zu dissoziieren, die Alterung von Zellulose beschleunigen können. Daher ist die Untersuchung des Diffusionsverhaltens von Säuren in Öl-Papier-Isolierungen von großer Bedeutung. Mit dieser Grundlagenforschung kann eine Basis geschaffen werden, um das chemische Verhalten der Säuren in einem Öl-Papier-Isoliersystem besser zu verstehen. Hierfür werden die IR-Spektren von Isolieröl und Isolierpapier unter verschiedenen Alterungsbedingungen aufgezeichnet und die Änderungen der Absorptionswerte der C=O Doppelbindung der Proben werden verglichen. Es wird eine Korrelation zwischen dem Säuregehalt des Isolierpapiers und der spektralen Information hergestellt, um den Diffusionsmechanismus bei unterschiedlichen Temperaturen auf molekularer Ebene zu erfassen.

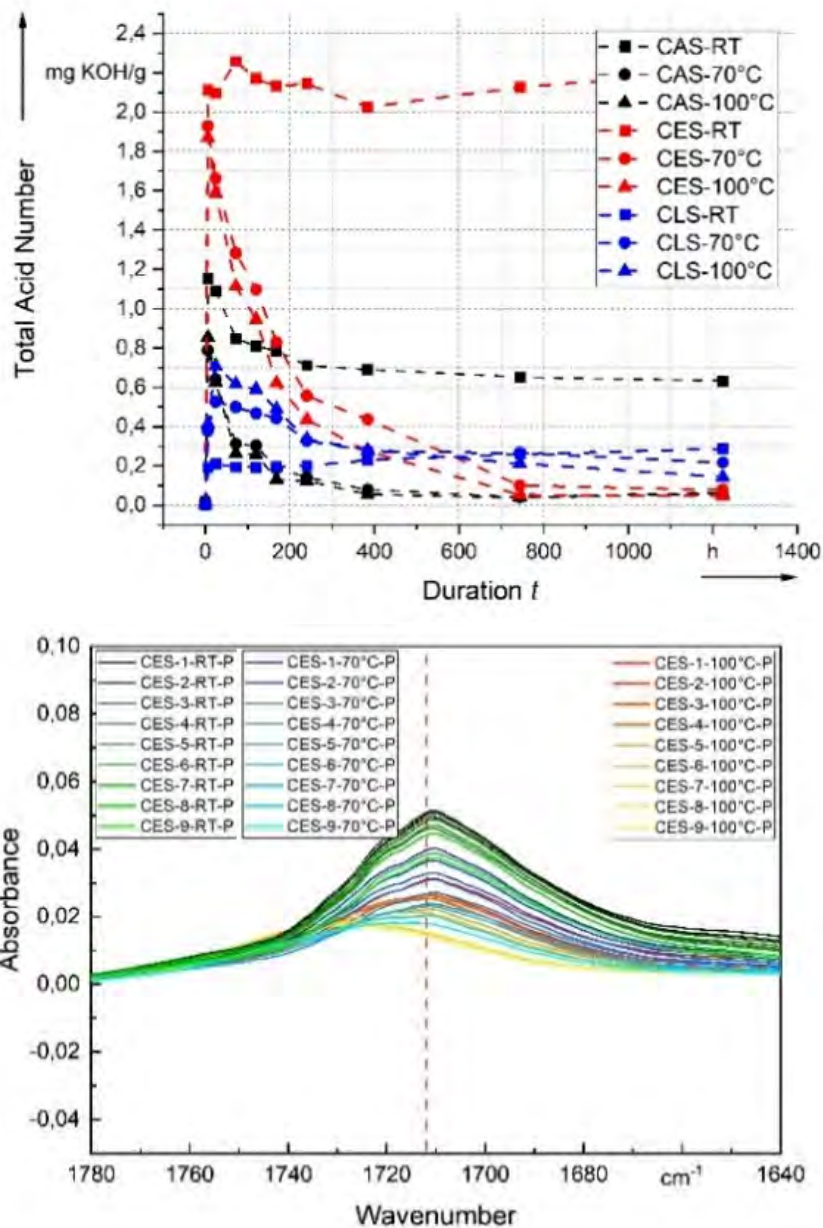
In dieser Untersuchung wurden Lävulinsäure (LS), Essigsäure (ES) und Ameisensäure (AS) herangezogen. Um das Diffusionsverhalten der Säuren zu untersuchen, wurden drei Versuchsreihen mit jeweils einer Säureart durchgeführt. Jede Versuchsreihe wurde bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert, nämlich bei Raumtemperatur (RT), 70 °C und 100 °C. Die erste Messung erfolgte nach 6 Stunden, die folgenden Messungen wurden auf der Grundlage der vorherigen Messergebnisse durchgeführt. Zusammenfassend wurden die Messzeitpunkte für die Tests auf 6, 24, 72, 120, 168, 240, 384, 744 und 1224 h festgelegt. Für jeden Messpunkt wurde eine Probenflasche mit 30 ml Gas-to-Liquids-Öl (C) vorbereitet. Pro Flasche wurden fünf Papierstreifen, die mit Säure vorbehandelt wurden, hinzugefügt. Zur Untersuchung der Diffusion wurden die Säurezahl und die IR-Spektren von Papier- und Ölproben aufgezeichnet. Jeder Papierstreifen der AS-Testreihe wurde mit 10 µl Säure behandelt, während die Papiere für die ES- und LS-Testreihen mit 20 µl Säure behandelt wurden. Aufgrund der geringen molaren Masse der Ameisensäure wurde die Dosierung halbiert. Um einen Refe-



renzstandard für den Diffusionszustand der Säure zu bestimmen, wurde die Gesamtmenge der den 5 Papieren pro Probe zugesetzten Säure berechnet. Diese Säuremenge wurde mithilfe der Säure-Base-Reaktionsbeziehung in die entsprechende Säurezahl umgerechnet.

## Diskussion

Die anfängliche Säurezahl des frischen Öls nach Trocknung und Entgasung ist mit 0,02 mg KOH/g sehr niedrig. Bild 1 (oben) zeigt den Verlauf der Säurezahl der Ölproben mit unterschiedlichen Säurekonfigurationen im Papier bei verschiedenen Temperaturen über den Diffusionszeitraum.



**Bild 1:** Säurezahl der Proben (oben) und IR-Spektren der Papierproben, die mit Essigsäure behandelt wurden

Ein Teil der Säure diffundiert aufgrund des Konzentrationsgefälles aus dem Papierstreifen heraus in das Öl. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass der Säurewert der Proben bei allen Temperaturen innerhalb der ersten 24 h einen Höchstwert erreicht. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Diffusionsprozess zwischen Papier und Öl abgeschlossen ist. Die prozentuale Menge der Säure, die ins Öl übergeht, kann anhand des Referenzstandards grob berechnet werden. Etwa 37,47 % der AS, 12,54 % der LS und 51,74 % der ES diffundieren innerhalb von 24 h in das Isolieröl. Nach 24 h ist zu erkennen, dass die Säurezahlen je nach Temperatur unterschiedlich stark abnehmen. Bei RT bleiben die Säurezahlen aller Ölproben nahezu konstant, was bedeutet, dass sich die Säurekonzentration von Papier und Öl zu diesem Zeitpunkt in einem relativen Gleichgewicht befindet. Bei 70 °C und 100 °C beginnen die Säurezahlen aller Ölproben kontinuierlich zu sinken. Das Gleiche ist in den IR-Spektren der Papierproben zu beobachten (Bild 1 unten). Da die Ergebnisse der Säuren ähnlich sind, werden in Bild 1 (unten) nur die Ergebnisse der Essigsäureproben dargestellt. Zunächst ist im Papierspektrum nach 6-24 Stunden ein deutlich ausgeprägter Säurepeak bei  $1712\text{ cm}^{-1}$  zu erkennen. Dieser nimmt aber unabhängig von der Temperatur kontinuierlich ab, wobei die Abnahme bei 70 °C und 100 °C am stärksten ist. Anhand dieser Beobachtungen wäre zu vermuten, dass die Säure aus dem Papier weiterhin ins Öl übergeht. Die Säurezahl des Isolieröls nimmt gemäß Bild 1 (oben) aber nicht zu. Im Gegensatz nimmt diese auch weiterhin ab. Gleiches konnte auch spektroskopisch nachgewiesen werden. Grundsätzlich war auch zu beobachten, dass der Wassergehalt genau wie die Säurezahl kontinuierlich abnahm und im Laufe der Diffusionszeit einen relativ stabilen Wert erreichte. Es wird vermutet, dass die niedermolekularen Säuren bei hohen Temperaturen weitere Reaktionen, ggf. mit Wasser, eingehen könnten.

### **Zusammenfassung**

Die Untersuchungen zeigen, dass die Säuren zwischen dem Papier und dem Isolieröl diffundieren. Insgesamt waren die Säurespeaks bei RT deutlich höher als bei 70 °C und 100 °C und nahmen im Laufe der Zeit sowohl im Öl als auch im Papier kontinuierlich ab. In Anbetracht der abnehmenden Säurezahl und des Wassergehalts kann vermutet werden, dass die Säuren und das Wasser an einer unbekanntem chemischen Reaktion beteiligt sein könnten. Die Ergebnisse der in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchung zeigen deutlich, dass die zugesetzten Säuren in Laborversuchen nicht ausschließlich in das Papier diffundieren, wie üblicherweise angenommen wird. Die untersuchten Öl- und Papierparameter zeigen auch, dass Lävulinsäure aufgrund ihres Molekulargewichts deutlich inerte und insgesamt chemisch stabiler ist als Ameisen- und Essigsäure.

Die Untersuchung bildet eine Grundlage, um weitere Untersuchungen durchzuführen, um die Reaktionsprozesse der Säuren in Papier-Öl-Isolierungen genauer abzubilden.

## Untersuchung des Einflusses von Wasser in Verbindung mit Säuren auf Papier-Öl-Isolierungen

M.Sc. Büsra Özdemir

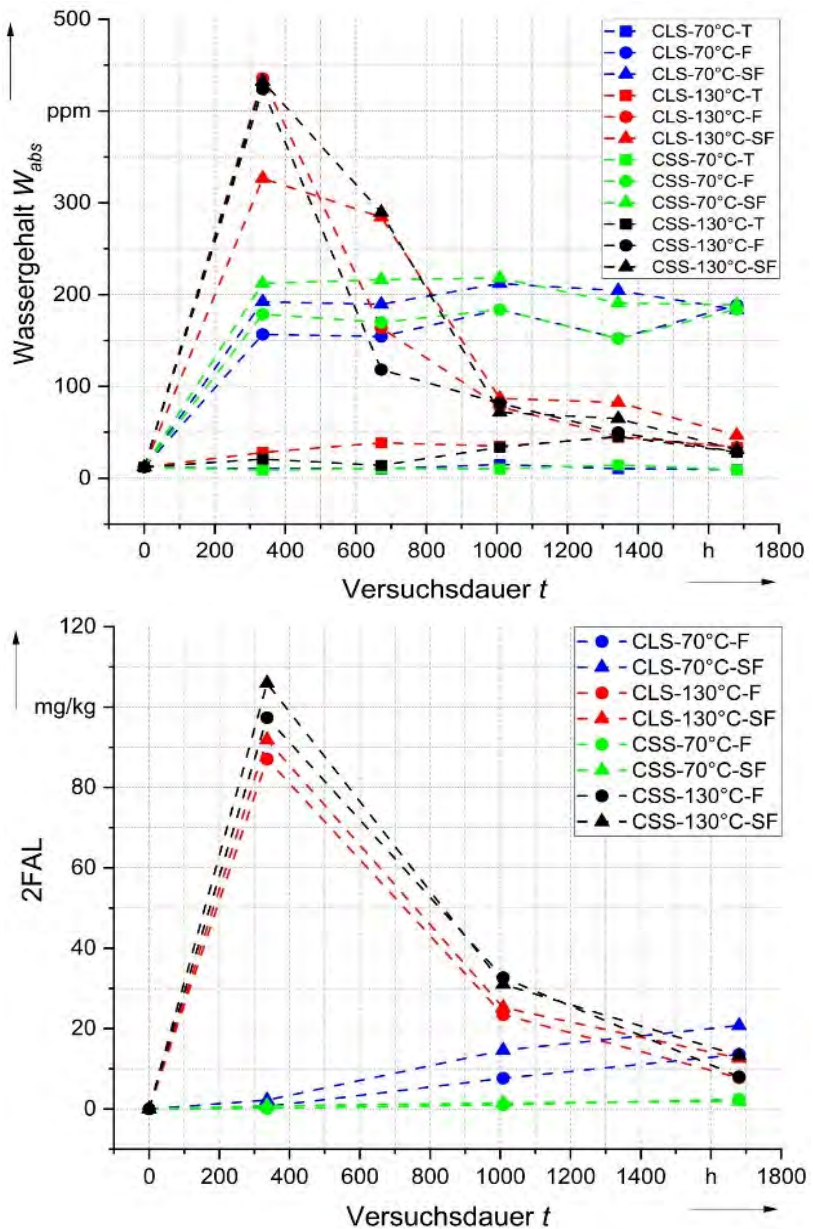
Transformatoren unterliegen im elektrischen Energienetz hohen thermischen, elektrischen und mitunter auch mechanischen Belastungen. Im Laufe der Betriebsjahre kommt es daher zur Alterung des organischen Isoliersystems. Dieses besteht für gewöhnlich aus Zellulose und einer Isolierflüssigkeit, meist Mineralöl. Die Alterung führt zu einer Verschlechterung der dielektrischen und mechanischen Eigenschaften der Zellulose und des Isolieröls, wobei die Lebensdauer des Transformators hauptsächlich von dem Isoliersystem abhängt. Zwei wichtige Alterungs-mechanismen sind die Pyrolyse und die säurekatalysierte Hydrolyse. Bei hohen Temperaturen dominiert die Pyrolyse und es kommt zu einem zufälligen Aufbrechen der Zellulosekette und der Glukoseringe. U.a. bilden sich Wasser und verschiedene Säuren. Diese beiden Alterungsprodukte können miteinander reagieren und es kommt zur Dissoziation der Säure. Dies führt zur säurekatalysierten Hydrolyse, wodurch die glykosidische Bindung der Zellulose gespalten wird. Vereinzelt kann sich hierbei ein einzelnes Glukosemonomer abspalten. Dieses kann durch weitere säurekatalysierte Prozesse zu Furanen reagieren, welche letztlich weiter zu niedermolekularen Säuren (NMS) zerfallen können und dadurch die Alterung weiter beschleunigen. Es lässt sich festhalten, dass die chemische Alterung des Isoliersystems recht komplex ist, da die unterschiedlichen Alterungsmechanismen sich gegenseitig beeinflussen. Um ein besseres Verständnis der chemischen Zusammenhänge zu erhalten, wurde daher der Einfluss einer Wasser-Säure-Kombination auf eine Papier-Öl-Isolierung untersucht.

Um die Auswirkungen der Wasser-Säure-Kombination auf eine Papier-Öl-Isolierung zu untersuchen, wurden insgesamt 12 Probenreihen erstellt. Grundsätzlich bestand jede Probe aus 220 g *Shell Diala S4 ZX-I* (C) und 22 g Isolationspapier. Die Proben unterschieden sich durch 3 Alterungsparameter. Um den Temperatureinfluss zu beobachten wurden zwei Hauptgruppen erstellt, welche bei 70 °C und 130 °C alterten. Für jede Temperatur wurden zwei Säurearten genutzt. Diese waren Lävulinsäure (CLS), welche eine niedermolekulare Säure (NMS) ist, und Stearinsäure (CSS), welche eine hochmolekulare Säure (HMS) darstellt. Die Säurekonzentration lag bei einer Säurezahl von 0,6 mg KOH/g Öl. Zuletzt wurde jede Säureart pro Temperatur mit drei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden konfiguriert, sodass es trockene (T) Proben mit ca. 0 % Feuchtigkeit, feuchte (F) Proben mit ca. 2 % Feuchtigkeit und sehr feuchte (SF) Proben mit ca. 8 % Feuchtigkeit gab. Die prozentualen Angaben sind Massenprozent in Bezug auf das Papiergewicht. Letztlich wurde jede Probe hermetisch verschlossen. Zu definierten Zeitpunkten (nach 336, 672, 1008, 1344 und 1680 Stunden) wurden Proben entnommen. Jede Probe wurde auf Wassergehalt,

Säurezahl, DP-Wert und mithilfe eines IR-Spektrometers auf Carbonylgruppen untersucht. Ebenso wurden alle F- und SF-Proben durch ein HPLC auf Furane untersucht.

## Diskussion

Der Wassergehalt im Öl zeigt eine deutliche Abhängigkeit zur ursprünglichen Feuchtigkeitskonfiguration und der Temperatur. Grundsätzlich sind in Bild 1 (oben) drei Verläufe zu sehen. Zwischen 0-50 ppm sind die T-Proben zu sehen. Dabei ist über dem gesamten Alterungszeitraum für 130 °C ein kontinuierlicher Anstieg der Feuchtigkeit zu beobachten. Ursache hierfür ist vermutlich die Pyrolyse, da für 70 °C der Wassergehalt recht konstant bei 10 ppm liegt. Zwischen 150-200 ppm liegen alle F- und SF-Proben bei 70 °C. Aufgrund des Konzentrationsgradienten diffundiert das Wasser, gemäß dem Fickschen Gesetz, aus dem Papier in das Öl. Daher ist ein erhöhter Wassergehalt zu beobachten. Allerdings bleibt



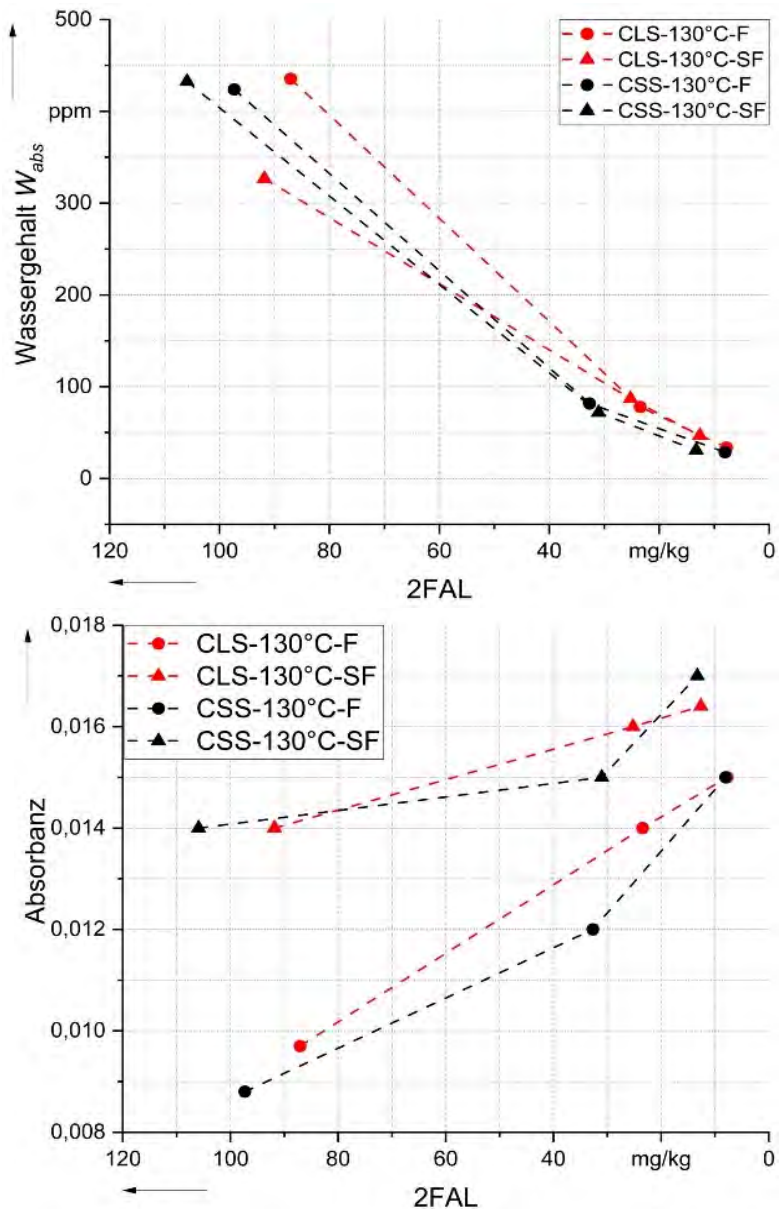
**Bild 1:** Wassergehalt und 2FAL über der Zeit

dieser über dem gesamten Beobachtungszeitraum relativ konstant. Der Wassergehalt der F- und SF-Proben bei 130 °C zeigt ein deutlich anderes Verhalten als die anderen beiden Verläufe. Zunächst ist ein starker Anstieg des Wassergehalts auf ca. 430 ppm zu sehen, welcher im weiteren Beobachtungszeitraum exponentiell fällt. Bei 1680 h sind die F- und SF-Proben auf etwa 50 ppm gefallen, was dem Niveau der T-Proben bei 130 °C entspricht. Aufgrund des starken Wasserverbrauchs ist auf eine sehr starke

Hydrolyse zu schließen, oder auf andere wasserkonsumierende Prozesse. Der Einfluss der Säureart scheint generell keinen Einfluss auf den Wassergehalt zu besitzen.

Eine mögliche Ursache für den starken Rückgang des Wassergehalts könnte, neben der hydrolytischen Spaltung der Glukosekette, der hydrolytische Zerfall des Furans 2FAL in NMS sein. Ebenfalls ist in Bild 1 der Verlauf der 2FAL Konzentration zu sehen, welcher ca. bei 336 h für 130 °C exponentiell fällt, also etwa zum selben Zeitpunkt wie der Wassergehalt. Dies geschieht unabhängig von der Säureart. Im Gegensatz dazu scheint bei 70 °C eine deutliche Abhängigkeit zur Säureart zu bestehen. Für CLS ist eine stärkere Furanbildung, als bei CSS zu sehen. Auch kommt es hier nicht zu einem Zerfall des 2FAL.

Da sich NMS aufgrund ihrer relativ starken Polarität besonders im Papier ansammeln, ist nach der oben genannten Vermutung im IR-Spektrum des Papiers bei C=O Bindungen, also etwa bei  $1712\text{ cm}^{-1}$ , eine deutlich erhöhte Absorbanz zu vermuten. Dies müsste nach Bild 1 unabhängig der Säureart sein, da Wassergehalt und 2FAL-Konzentration für 130 °C auch unabhängig der Säureart fallen. Dahingegen sollte für 70 °C eine vergleichsweise geringe Absorbanz zu sehen sein, da kein 2FAL-Zerfall zu beobachten ist. Im IR-Spektrum konnte dies auch nachgewiesen werden. Die Absorbanzen der F- und SF-Proben bei 130 °C zeigten nur marginale Unterschiede zwischen CLS und CSS. Einen deutlichen Unterschied dazu zeigt das IR-Spektrum



**Bild 2:** Wassergehalt und Absorbanz über 2FAL-Konzentration



der T-Proben bei 130 °C. Hier lagen die Absorbanzen der CLS-Proben etwa doppelt so hoch, wie die der CSS-Proben. Die CLS- und CSS-Proben bei 70 °C hingegen zeigten die schwächsten Absorbanzen, die auch einen unsystematischen Verlauf aufwiesen. Generell zeigten für 70 °C die CLS-Proben eine höhere Absorbanz, was jedoch aufgrund der niedermolekularen Eigenschaften der CLS zu erwarten war. Den Ergebnissen nach führen hohe Temperaturen in Kombination mit Wasser und einer allgemein sauren Umgebung zu einer starken Bildung von 2FAL und Carbonylgruppen, sowie einer starken Reduktion des DP-Wertes. Die Säureart scheint eher bei trockenen Umgebungen und niedrigeren Temperaturen eine größere Rolle zu spielen. Besonders deutlich wird die Korrelation zwischen dem Zerfall von 2FAL mit der Reduktion des Wassergehalts und dem Anstieg der Absorbanz bei 1712 cm<sup>-1</sup> in Bild 2. Deutlich zu sehen sind dort lineare Zusammenhänge. Mit einem Zerfall des 2FAL sinkt der Wassergehalt und gleichzeitig steigt die Absorbanz der Carbonylgruppen. Bei den Carbonylgruppen muss es sich nicht zwangsläufig um Carbonsäuren handeln, da viele organische Moleküle eine C=O Doppelbindung besitzen (z.B. Ester, Ketone, Aldehyde etc). Da jedoch in der chemischen Industrie 2FAL durch eine säurekatalysierte Hydrolyse u.a. zur Gewinnung von Lävulinsäure genutzt wird, verstärkt dies den Verdacht, dass es sich bei den Carbonylgruppen um Carbonsäuren handelt.

### **Zusammenfassung**

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die Bildung von Carbonylgruppen in der Zellulose eine starke Korrelation zum Zerfall des 2FAL aufweist. Dies zeigte sich dadurch, dass die Absorbanz um 1712 cm<sup>-1</sup>, mit einem Rückgang der 2FAL-Konzentration, anstieg. Diese Vermutung wird zusätzlich dadurch gestützt, dass für 70 °C die 2FAL-Konzentration kontinuierlich anstieg, also kein Zerfall stattfand, und gleichzeitig keine Änderung im IR-Spektrum zu beobachten war. Da der Zerfall unter einem starken Wasserverbrauch geschah, ist zu vermuten, dass es sich bei den Carbonylgruppen um Carbonsäuren handelt. Dies konnte jedoch nicht eindeutig festgestellt werden, da mit dem Spektrometer lediglich die Absorbanz der C=O Doppelbindungen gemessen werden konnte.

Da NMS einen schädigenden Effekt auf die Zellulose besitzen, sind weitere Untersuchungen zur Identifikation und Zusammensetzung der Carbonylgruppen sinnvoll, um Alterungsvorgänge besser verstehen und prognostizieren zu können.



## Bayesian Risk-based Maintenance

**M.Sc. Henning Schnittker**

Eine risikobasierte Instandhaltung kann, insbesondere im Zuge der Energiewende, für Stromnetzbetreiber von Vorteil sein. Ein Risiko lässt sich aus einer Wahrscheinlichkeit und einer Auswirkung berechnen.

$$\text{Risiko} = \text{Wahrscheinlichkeit} \cdot \text{Auswirkung}$$

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die Wahrscheinlichkeit eines Risikos individuell und flexibel in Abhängigkeit von den verfügbaren Daten, den Bedürfnissen des Netzbetreibers und der Kosten-Nutzen-Betrachtung der Bewertung selbst zu quantifizieren. Die Bayes'sche Statistik ermöglicht es, die Wahrscheinlichkeit eines Risikos individuell und flexibel zu bewerten, da sie die Wahrscheinlichkeit als Ausdruck eines Wissensstandes versteht. Der Grundgedanke des entwickelten Ansatzes ist die Wahrscheinlichkeit mit Hilfe des Bayes Theorems zu aktualisieren.

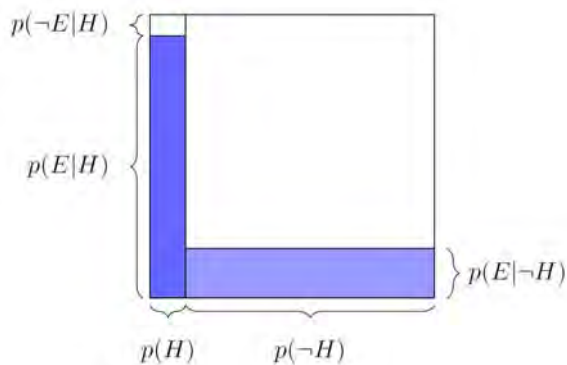
Das Verfahren wird im Folgenden am Beispiel eines fiktiven Assets erläutert. Die jährliche Ausfallrate dieses Assets betrage  $\lambda = 1\%$ . Weiter wird davon ausgegangen, dass eine Messung  $A$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % einen Fehler des Assets feststellt (z. B. erkennt eine Übergangswiderstandsmessung möglicherweise einen Fehler des Isoliersystems nicht). Außerdem kann die Messung  $A$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 3 % fälschlicherweise einen Fehler anzeigen, wenn tatsächlich kein Fehler vorliegt (z. B. bei einer fehlerhaften Durchführung der Messung). Dann kann die Hypothese "Fehler des Assets" aufgestellt und mit der Evidenz "Messung  $A$ " mit den folgenden Wahrscheinlichkeiten verbunden werden:

- Die A-priori-Wahrscheinlichkeit, dass die Hypothese "Ausfall des Assets" wahr ist, wird durch  $p(H) = 1\%$  als die jährliche Ausfallrate des Assets beschrieben.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass die Hypothese "Ausfall des Assets" falsch ist, ist  $p(\neg H)$  und kann durch  $p(\neg H) = 100\% - 1\% = 99\%$  erhalten werden.
- Die Gesamtwahrscheinlichkeit, dass die Evidenz auftritt, entspricht  $p(E)$ . Die blau gefüllten Quadrate in Bild 1 stellen diese Wahrscheinlichkeit dar. Da  $p(E)$  schwer zu bestimmen ist, wird häufig  $p(E) = p(H) \cdot p(E|H) + p(\neg H) \cdot p(E|\neg H)$  angewendet.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass die Evidenz die Hypothese stützt, wenn die Hypothese wahr ist, beträgt  $p(E|H) = 80\%$ . Dies beschreibt die Wahrscheinlichkeit den Fehler zu entdecken, wenn tatsächlich ein Fehler existiert.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass die Evidenz die Hypothese stützt, obwohl die Hypothese falsch ist, ist  $p(E|\neg H) = 3\%$  und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Messung einen Fehler anzeigt, obwohl kein Fehler vorliegt.

Mit dem Bayes-Theorem lässt sich dann die Wahrscheinlichkeit  $p(H|E)$  mit 21.2 % berechnen, dass die Hypothese wahr ist, nachdem die Evidenz vorliegt.

$$p(H|E) = p(H) \cdot \frac{p(E|H)}{p(E)} = p(H) \cdot \frac{p(E|H)}{p(H) \cdot p(E|H) + p(\neg H) \cdot p(E|\neg H)}$$

$$= 1 \% \cdot \frac{80 \%}{1 \% \cdot 80 \% + 99 \% \cdot 3 \%} = 21,2 \%$$



**Bild 1:** Die Wahrscheinlichkeit von zwei zufälligen Variablen  $H$  and  $E$

In diesem Fall aktualisiert Messung  $A$  die Wahrscheinlichkeit eines möglichen Fehlers in dem Asset.

Allgemein wird das Wissen über einen Sachverhalt angepasst, nachdem neue Erkenntnisse darüber vorliegen. Die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit  $p(H|E)$  als dessen mathematischer Ausdruck aktualisiert die A-priori-Wahrscheinlichkeit  $p(H)$  und erlaubt so den Grad der Überzeugung zu quantifizieren, was eine objektive Entscheidung unterstützt.

Eine Risikobewertung für einen Leistungsschalter veranschaulicht den praktischen Einsatz. Die jährliche Fehlerrate für Live-Tanks mit einer Bemessungsspannung von  $300 \text{ kV} \leq U \leq 500 \text{ kV}$ , wobei nur Hauptfehler major failure (MaF) betrachtet werden, betrage  $\lambda = 1,13 \%$ . Zusammen mit den Kosten für einen Ersatz, welche mit  $c = 200.000 \text{ €}$  angenommen werden, ergibt sich ein Risiko  $r$ .

$$r = c \cdot \lambda = 200.000 \text{ €} \cdot 1,13 \% = 2.226 \text{ €}$$

Ein Vergleich der Hersteller zeigt, dass Hersteller  $Z$  eine um 40 % höhere Fehlerrate aufweist. Bei einer Gesamtzahl von 885 Live-Tanks sind folglich 10 Fehler zu erwarten. Bei 10 verschiedenen Herstellern mit gleichen Anteilen an Leistungsschaltern, können 0,86 Fehler pro Hersteller und entsprechend 1,4 Fehler für Hersteller  $Z$  erwartet werden. Damit bleiben 87,1 Leistungsschalter des Herstellers  $Z$  und insgesamt 875 Leistungsschalter ohne Fehler. Dies führt zu einer Wahrscheinlichkeit von ca. 10 %, dass ein Fehler in einem Leistungsschalter des Herstellers  $Z$  angenommen wird, obwohl kein Fehler vorliegt  $p(E_A|\neg H)$ .

$$p(E_A|\neg H) = \frac{87,1}{875} = 9,95\%$$

Nun kann das Bayes Theorem benutzt werden, um die A-priori-Wahrscheinlichkeit  $p(H)$  zu der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit  $p(H|E)$  zu aktualisieren nachdem die Evidenz vorliegt. In diesem Fall die höhere Fehlerrate des Herstellers  $Z$ .

$$\begin{aligned} p(H|E) &= p(H) \cdot \frac{p(E|H)}{p(E)} = p(H) \cdot \frac{p(E|H)}{p(H) \cdot p(E|H) + p(\neg H) \cdot p(E|\neg H)} \\ &= 1,13 \% \cdot \frac{40 \%}{1,13 \% \cdot 40 \% + 98,87 \% \cdot 9,95 \%} = 4,4 \% \end{aligned}$$

Damit kann ein neues Risiko  $r_{new}$  für Leistungsschalter berechnet, sobald klar ist, dass diese von Hersteller Z stammen.

$$r_{new} = c \cdot p(H|E) = 200.000 \text{ €} \cdot 4,4\% = 8.786 \text{ €}$$

Die Aktualisierung der Wahrscheinlichkeit mit Hilfe des Bayes Theorems verändert die Perspektive von einer Betrachtung einer ganzen Population hin zu einer individuellen Betrachtung der Assets.

## Klassifikation von Messungen an Leistungs- transformatoren

**M.Sc. Henning Schnittker, M.Sc. Mahmoud Moh'd**

Die Anwendung von Asset Management im Zuge der Energiewende und der Digitalisierung sowie der Entwicklung neuer Zustandsdiagnoseverfahren erzeugt große Menge an Daten, die analysiert werden müssen. Maschinelles Lernen hat sich in den letzten Jahren als geeignetes Werkzeug für die Verarbeitung großer Datenmengen etabliert. Die Algorithmen des maschinellen Lernens benötigen einen Datensatz mit angemessener Datenqualität (Vollständigkeit, Relevanz der Daten, Anzahl der Datenpunkte etc.), um eine erwünschte Performance zu erreichen. Im praktischen Umfeld der Energieversorgung ist die direkt nutzbare Datenmenge relativ gering. Dabei sind Daten häufig vorhanden oder könnten verfügbar gemacht werden, jedoch ist teilweise unklar, dass diese Daten existieren bzw. nützlich sind, teilweise liegen die Daten für den Algorithmus in einem nicht nutzbaren Format vor, wie z. B. gescanntes pdf-Format oder teilweise müssen technische Lösungen für die Generierung der Daten erst installiert werden. Daher muss stets eine Abwägung von Aufwand und Nutzen der Datenbereitstellung vorgenommen werden. Somit entsteht ein Grundsatzproblem: einerseits ist im Sinne der Anwendung des Algorithmus unklar, welche Daten in welcher Qualität benötigt werden und andererseits ist für die Datenverwaltung unklar, welche Daten verfügbar sind oder verfügbar gemacht werden müssen.

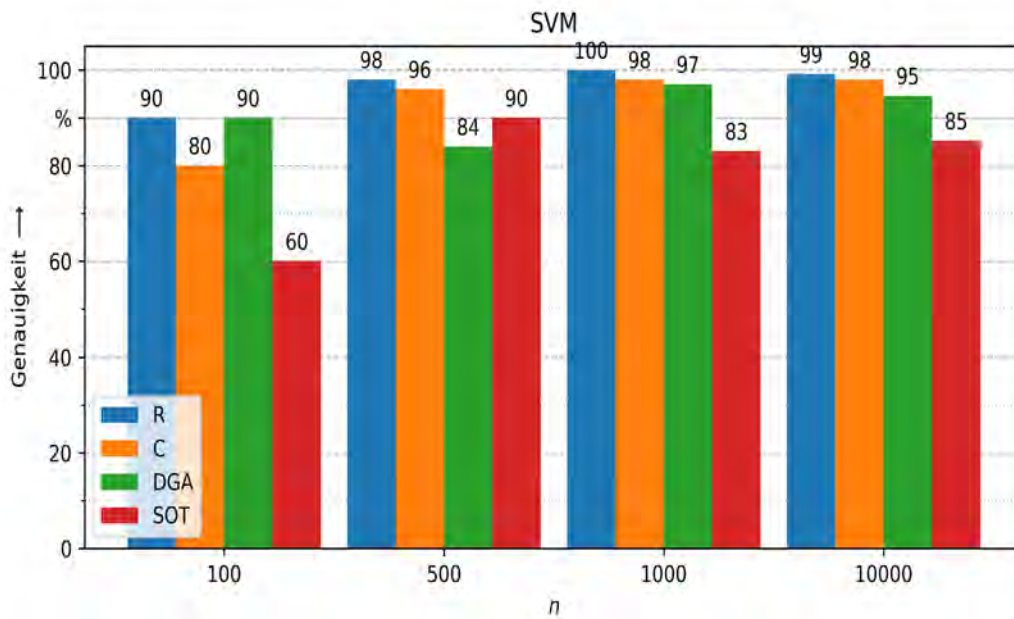
Hier wurde der notwendige Datenumfang der Klassifikationsalgorithmen lineare Diskriminanzanalyse (LDA), probabilistisch generative Modelle (PGM), probabilistisch diskriminative Modelle (PDM), Laplace Approximation (LA), Support-Vector-Machines (SVM) und neuronale Netze (NN) in Hinblick auf die Genauigkeit am Beispiel von Messungen an Leistungstransformatoren untersucht. Diese Klassifikationsalgorithmen ordnen Daten diskreten Klassen zu und eignen sich daher insbesondere für kategorische Bewertungen. In diesem Fall wurden die Messungen des Wicklungswiderstands (R), der Durchführung (C) sowie der Standard-Öl-Test (SOT) und die Dissolved-Gas-Analysis (DGA) mit der kategorischen Einteilung gut, mittel und schlecht bewertet.

Zunächst werden für jedes Messverfahren randomisierte, künstliche Datensätze mit einer Anzahl von 100, 500, 1000 und 10000 Datenpunkten auf Grundlage von Gamma-, Gauß- und Beta-Verteilung erzeugt. Anschließend wurden diese Daten gelabelt. Das Label stellt eine Bewertung der Messungen dar. Beispielsweise wurde den

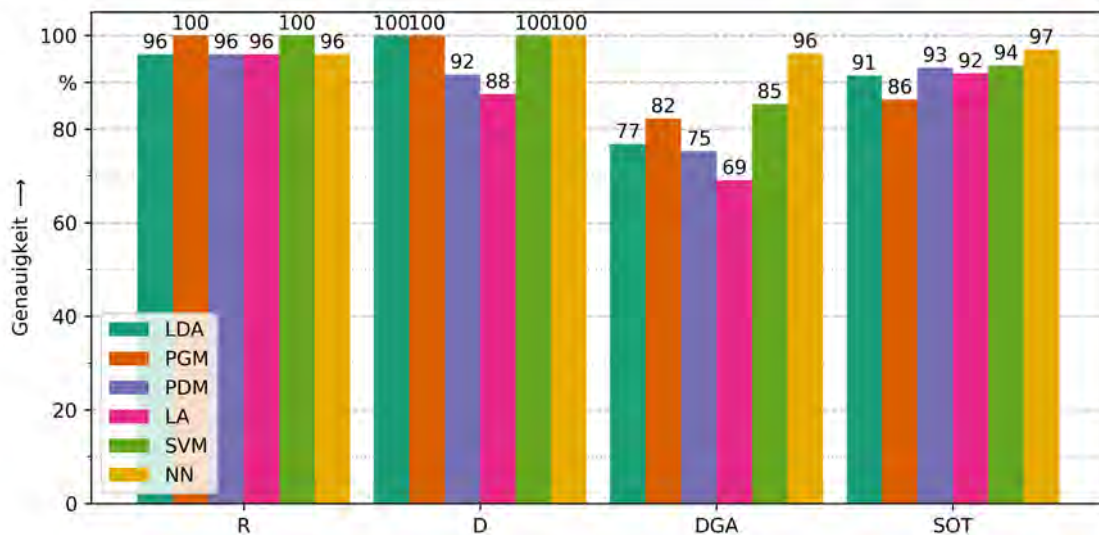
**Tabelle 1:** Angenommener Bewertungsmaßstab für Messparameter des Wicklungswiderstands

Messwert	gut	mittel	schlecht
$R_{\text{abs}}$ in $\Omega$	< 1		$\geq 1$
$\Delta R$ in %	< 5	5 – 10	> 10

einzelnen Daten der Widerstandsmessung anhand des in Tabelle 1 dargestellten Bewertungsmaßstabs eine der Kategorien gut, mittel oder schlecht zugeordnet. Dabei wurden absolute Widerstandswerte  $R_{\text{abs}}$  und Veränderungen der Werte  $\Delta R$  betrachtet.



**Bild 1:** Genauigkeit der SVM für unterschiedliche Messverfahren und Anzahlen von Daten  $n$



**Bild 2:** Genauigkeit der Algorithmen beim Training mit realen Messdaten für unterschiedliche Messverfahren

Veränderungen der Widerstandswerte von über 5 % gegenüber einer Referenzmessung z. B. beim Factory Acceptance Test können auf einen Fehler hindeuten. Höhere Abweichungen steigern die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers. Weiter ist auch ein unnormal hoher Absolutwert als kritisch anzusehen. Diese Bewertung erfolgt nur in den Kategorien gut und schlecht, da der Wicklungswiderstand von der Bauart des Transformators abhängt und somit zu stark variiert, um den Bewertungsbereich mittel zu definieren. Somit liegen insgesamt 16 klassifizierte Datensätze vor, die für das Training der Algorithmen verwendet werden (die vier Messverfahren mit den jeweils vier unterschiedlichen Anzahlen an Datenpunkten). Anzumerken ist, dass bei der Erstellung der

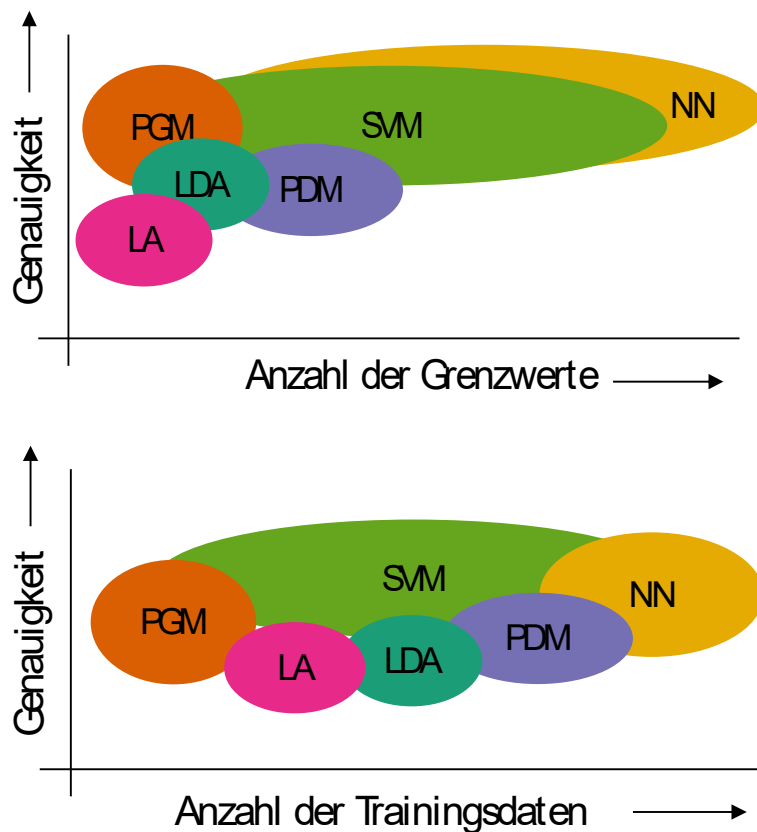
Datensätze beachtet wurde, dass jede Klasse (gut, mittel, schlecht) annähernd gleich viele Datenpunkte aufweist. Die einzelnen Datensätze werden nun geteilt, sodass 90 % der Daten zum Training der Algorithmen und 10 % der Daten für einen anschließenden Test zur Verfügung stehen.

Die SVM zeigt die in Bild 1 dargestellte Genauigkeit für die unterschiedlichen Messverfahren und die unterschiedlich großen Trainingsdatensätze. Insgesamt lässt sich feststellen, dass im Vergleich der Algorithmen in diesem Anwendungsfall die SVM die höchste Genauigkeit in der Bewertung der Messungen für alle betrachteten Messverfahren erzielt.

Abschließend wurde die Genauigkeit der Algorithmen anhand realer Messdaten unterschiedlicher Anzahl überprüft. Neben der SVM, erzielten das NN, die LDA und das PGM hohe Genauigkeiten (vgl. Bild 2).

In der dargestellten Untersuchung wurde versucht Grenzwerte nachzubilden. Da die Grenzwerte vorher bekannt waren, weisen die Algorithmen in diesem Sinne keine Intelligenz auf. Grenzwerte sind aber individuell anzusehen, was letztendlich die Zustandsbewertung präzisiert.

An dieser Stelle können für eine kategorische Bewertung Klassifikationsalgorithmen des maschinellen Lernens eingesetzt werden, wobei reale Trainingsdaten mit einer Anzahl von 500 Datenpunkten hinreichende Genauigkeiten erzielen können. Bild 3 verdeutlicht, dass eine Auswertung mit zunehmender Komplexität der Daten schwieriger ist, wobei generell relativ einfache Algorithmen wie SVM günstig verwendet werden können, so dass besondere Verfahren der KI wie NN nicht immer notwendig sind.



**Bild 3:** Eignung der Algorithmen in Abhängigkeit der Anzahl der Trainingsdaten und in Abhängigkeit der Anzahl der Grenzwerte



## **Möglichkeiten und Grenzen diagnostischer Verfahren bei betriebsgealterten Transformatoren**

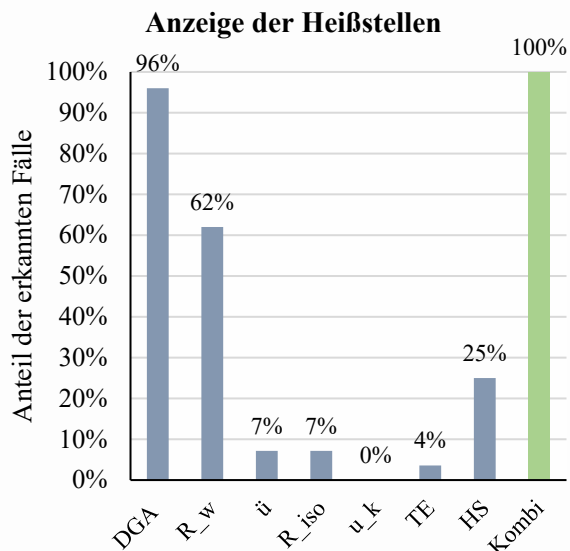
**M.Sc. Sebastian Schreiter**

Aufgrund der z.T. enormen finanziellen Folgen, die ein ungeplanter Ausfall eines Transformators nach sich ziehen kann, ist es für Betreiber solcher Betriebsmittel von elementarem Interesse, den Zustand und eventuell vorhandene Fehler von Transformatoren frühzeitig zu erkennen. Dazu steht eine Reihe unterschiedlicher diagnostischer Verfahren zur Verfügung. Aus diesen müssen Betreiber die geeignetsten Verfahren auswählen. Schon im Newsletter von 2017 wurde von einer Kooperation zwischen dem Schering Institut, der HTWK Leipzig und der jetzigen Hitachi Energy berichtet, bei dem anhand von mehreren hundert Befunden an Aktivteilen von im Betrieb gealterten Transformatoren und den Ergebnissen der korrespondierenden diagnostischen Verfahren untersucht werden, welche Verfahren oder Kombination von Verfahren notwendig sind, um Fehler anzuzeigen. Dazu stand eine Flotte im Betrieb gealterter Transformatoren unterschiedlicher Hersteller, Baujahre, Anwendungen sowie Spannungs- und Leistungsklassen zur Verfügung. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse für die Erkennung von Heißstellen überblicksartig vorgestellt.

Um die oben genannte Frage zu untersuchen, erfolgte ein Vergleich der Fälle, welche Spuren von Karbonisierungen, Abbrand oder thermisch verursachten Verfärbungen am Aktivteil zeigten, mit den Ergebnissen diagnostischer Messungen. Dabei wurden neben der Analyse und Bewertung der im Öl gelösten Gase auch elektrische Messungen wie die Wicklungs- und Isolationswiderstände, die Übersetzungsverhältnisse und die Kurzschlussspannung sowie die Ergebnisse der Eingangsprüfungen mit einbezogen, welche aus dem Betrieb des Transformators oder bei Eingang desselben im Reparaturwerk stammten. Lagen Auffälligkeiten, wie Richtwertüberschreitungen oder Abweichungen im Vergleich der Phasen vor, so wurden diese als Auffälligkeiten gewertet. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Bild 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit Hilfe einzelner diagnostischer Methoden die Heißstellen in höchstens 96 % (DGA) oder 62 % (Wicklungswiderstände) der Fälle angezeigt wurden. Die Kombination der Wicklungswiderstandsmessung und der Überprüfung, ob Auffälligkeiten in der DGA vorlagen, führte jedoch in jedem der betrachteten Fälle zu einem richtigen Hinweis.

Darüber hinaus wurden neben den aktiven Heißstellen eine Reihe von Fällen beobachtet, bei denen zwar eine Widerstandserhöhung vorlag, diese sich jedoch (noch) nicht zu einer Heistelle entwickelt hatten. Hier wurde nun untersucht, wo diese Widerstandserhöhung lagen und ob diese später mit Hilfe der DGA erkennbar geworden wären. Wie aus Bild 2 hervorgeht, lagen zwar 90 % aller Widerstandserhöhungen im Hauptlraum und waren lokal begrenzt, etwa ein einzelner

Kontakt am Umsteller oder Stufenschalter (grün) und wären damit mit Hilfe der DGA im Falle einer Ausweitung zu einer Heißstelle erkannt worden. Jedoch lagen auch insgesamt 10 % der Fälle in einem separaten Öltraum oder traten als globale Widerstandserhöhungen auf (gelb bzw. rot). Damit wären diese der regelmäßigen öldiagnostischen Überwachung verborgen geblieben, obwohl eine potentielle Gefährdung des Betriebsmittels verbunden war. Damit wird die Notwendigkeit der Kombination dieser beiden Messverfahren unterstrichen.



**Bild 1:** Anzeige von Heißstellen mittels diagnostischer Verfahren (blau) sowie Kombinationen von Verfahren (grün)



**Bild 2:** Ort und Art der beobachteten Wicklungswiderstandserhöhung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Heißstellen nur durch die Kombination von DGA und Wicklungswiderstandsmessung in der Regel sicher erkannt werden können. Zusammen mit den Ergebnissen zu anderen Fehlerbildern sowie zur Möglichkeiten der Fehleridentifikation mit unterschiedlichen DGA-Interpretationsverfahren stehen Betreibern von Transformatoren damit Grundlagen für eine gezielte Auswahl von diagnostischen Verfahren zur Verfügung.

Neben diesen Ergebnissen entstand aus dieser Forschungsarbeit eine weitere Kooperation zwischen dem Schering Institut und der HTWK Leipzig, bei dem die Diagnostik von Leistungstransformatoren mit Hilfe von maschinellem Lernen verbessert werden soll. In einem ersten Schritt wurde im Rahmen dieser Kooperation ein neuer Ansatz untersucht, um den Zustand der Papierisolation anhand von Isolierölparameter vorherzusagen. Dazu wurden die an im betrieb gealterten Aktivteilen festgestellten minimalen DP-Werte mit den tatsächlichen Isolieröleigenschaften verglichen und mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens ein neuer Algorithmus zur Vorhersage der DP-Werte entwickelt.

## Reduzierung des Feuchtegehalts in Isolierölen

**M.Sc. Junaid Shaikh**

Leistungstransformatoren sind ein wesentlicher Bestandteil unserer Energieversorgung. Um diese effizient und vor allem versorgungssicher betreiben zu können, ist es notwendig, dass vorhandene Systeme angemessen gewartet und betrieben werden. Aufgrund zunehmender erneuerbarer Energieträger kommt es zu schnellen Lastwechseln sowie hoher elektrischer und thermischer Beanspruchung von Transformatoren.

Transformatoren müssen aufgrund ihres physikalischen Aufbaus permanent gekühlt und mit Isolierflüssigkeit gefüllt sein. In flüssigkeitsgekühlten Transformatoren wird eine dielektrische Flüssigkeit verwendet, um die Wicklung zu kühlen und eine optimale Leistung zu erzielen.

Üblicherweise wird Mineralöl als Isolierflüssigkeit von Transformatoren verwendet. In den letzten Jahrzehnten kommen jedoch auch alternative Produkte, wie beispielsweise synthetische und natürliche Ester und Silikonöle zum Einsatz.

Durch Pyrolyse, Hydrolyse und Oxidation des organischen Isoliermaterials innerhalb der Transformatoren entstehen verschiedene Stoffe, die in der Isolierflüssigkeit aufgenommen werden und die Alterung des Trafos begünstigen und zu Ausfällen führen können. Um dem entgegenzuwirken, werden externe Systeme zur Isolierölaufbereitung eingesetzt, welche die Alterungsbeschleuniger – hauptsächlich Wasser, Feststoffpartikel oder den Säuregehalt– im Isolieröl reduzieren.

Für die Entwässerung des Transformatorenöls wird am häufigsten Zeolith (Molekularsieb) als Filtermaterial verwendet. Wobei andere Stoffe wie Silikagel, Bentonit und Zellulosepapier Alternativen darstellen.

Es wurden Laboruntersuchungen mit unterschiedlichen Filtermaterialien durchgeführt, um die Feuchtegehalt im Transformatorenöl zu verringern. Der verwendete Öltyp war Shell Diala S4. Das Öl wurde in Erlenmeyerkolben mit 300 ml Volumen gefüllt. In jedem Erlenmeyerkolben betrug das Gewicht des Öls 250 g und das Gewicht des Filtermaterials 2,5 g. Der Feuchtigkeitsgehalt wurde vor und nach dem Versuch durch das Karl-Fischer-Verfahren ermittelt.

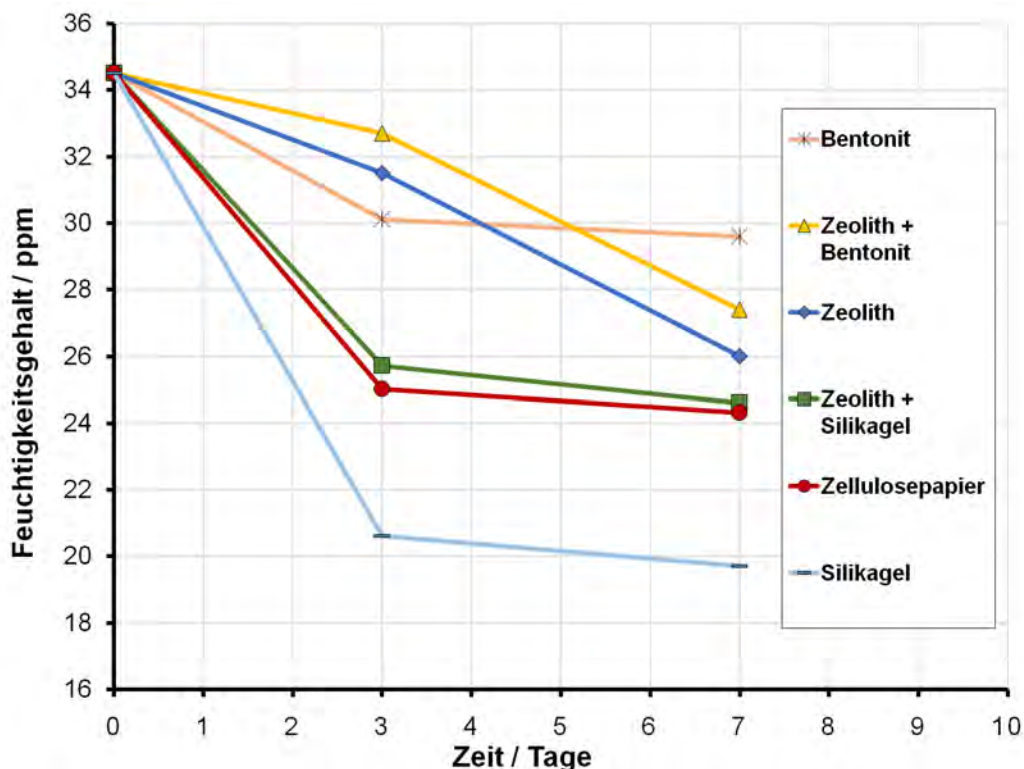
Als Filtermaterialien wurden Zeolith, Bentonit, Silikagel, Zellulosepapier, Kombination von Zeolith und Bentonit und Kombinationen von Zeolith mit Silikagel verwendet. Vor den Tests wurden die Filtermaterialien im Ofen erwärmt, um sie zu regenerieren. Zeolith wurde 1 Tag auf 250 °C erwärmt, Bentonit wurde 4 Stunden auf 150 °C erwärmt, Silikagel wurde 4 Stunden auf 130 °C erwärmt und Zellulosepapier wurde 12 Stunden auf 120 °C erwärmt. Die Filtermaterialien wurden in ein Filterpapier gefüllt und mit

einem Kupferdraht umwickelt, bevor sie in den mit Öl gefüllten Erlenmeyerkolben gegeben wurden. Die Erlenmeyerkolben wurden verschlossen und bei Raumtemperatur belassen. In Bild 1 ist ein Beispiel der Testprobe zu sehen. Ein Probensatz wurde 3 Tage und der Andere 7 Tage gelagert. Am Ende des Tests wurde der Feuchtigkeitsgehalt erneut mittels Karl-Fischer-Verfahren ermittelt und mit den ursprünglichen Messungen verglichen.



**Bild 1:** Testprobe

Bild 2 zeigt die Ergebnisse mit der Änderung des Feuchtigkeitsgehalts der Testproben nach 3 Tagen und 7 Tagen. Der gemessene Feuchtigkeitsgehalt am Anfang des Versuchs lag bei 34,5 ppm. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei den verwendeten Filtermaterialien zu einer Reduzierung des Feuchtigkeitsgehalts des Öls kommt. Die Feuchtigkeitsreduktion nach 3 Tagen läuft dabei erheblich schneller als die nach 7 Tagen ab.



**Bild 2:** Feuchtigkeitsgehalt nach 3 Tagen und 7 Tagen

Die Ergebnisse in Tabelle 1 zeigen die prozentuale Änderung des Feuchtigkeitsgehalts des Öls nach 3 Tagen und 7 Tagen. Die Reduzierung des Feuchtigkeitsgehalts gelingt am besten mit Silikagel. Zellulosepapier und die Kombination von Zeolith mit Silikagel sind die nächsten guten Optionen.

**Tabelle 1:** Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts nach 3 Tagen und 7 Tagen

Filtermaterial	Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts / %	
	nach 3 Tage	nach 7 Tage
Bentonit	-12,8	-14,2
Zeolith + Bentonit	-5,2	-20,6
Zeolith	-8,7	-24,6
Zeolith + Silikagel	-25,5	-28,7
Zellulosepapier	-27,5	-29,6
Silikagel	-40,3	-42,9

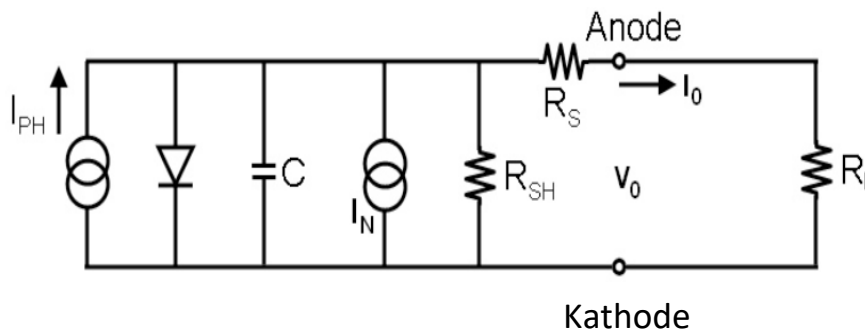
In dieser Untersuchung wurde der Einfluss unterschiedlicher Filtermaterialien auf den Feuchtegehalt im Transformatorenöl untersucht. Der Einfluss weiterer Parameter, wie Temperatur und Ölflussrate durch das Ölaufbereitungssystem muss jedoch noch untersucht werden. Weiterhin ist der Einfluss des Filtermaterials auf den Gashaushalt im Öl genau zu prüfen. Diese Themen werden aktuell im Schering-Institut bearbeitet.

## Photoleitende Elemente zur Detektion von Lichtbögen in Transformatoren

M.Sc. Aref Sharifi

Aufgrund von Lichtbögen können Leistungstransformatoren erheblichen Schaden nehmen. Eine schnelle und zuverlässige Detektionsmethode ist erforderlich, um zusätzliche um Ausfälle und Kosten zu reduzieren und Unfälle zu vermeiden. Ein Ansatz zur frühzeitigen Erkennung von Lichtbögen im Transformator ist die Verwendung lichtempfindlicher Elemente. Eine solche Anwendung erfordert die Auswahl eines geeigneten Elements unter Berücksichtigung der Anforderungen der Betriebsbedingungen des Transformators. Die gebräuchlichsten lichtempfindlichen Lichtelemente sind Fotodioden und Fotowiderstände.

In Bild 1 ist das elektrische Ersatzschaltbild einer Fotodiode dargestellt.



**Bild 1:** Ein elektrisches Modell für Fotodioden

In Bild 1

- $I_{ph}$  ist der Strom, der durch das einfallende Licht erzeugt wird,
- $C$  ist die Kapazität der Diode,
- $R_{SH}$  ist der Nebenschlusswiderstand,
- $R_s$  ist der Serienwiderstand,
- $I_N$  ist der Rauschstrom, und
- $R_L$  ist der Lastwiderstand.

Fotodioden können im photoleitenden oder photovoltaischen Modus eingesetzt werden. Im photoleitenden Modus wird die Photodiode durch eine Gleichspannung in Sperrichtung betrieben, während sie im zweiten Modus als lichtabhängige Stromquelle verwendet wird. Eine externe Gleichstromvorspannung erhöht zwar die Detektionsgeschwindigkeit, aber auch den Dunkel- und Rauschstrom. Dieses Verhalten ist bei geringer Lichtintensität problematisch, da der Dunkel- und Rauschstrom den durch das Licht verursachten Strom überlagern kann. Aus diesem Grund wird die Photodiode für den hier genannten Zweck als lichtabhängige Stromquelle (photovoltaischer Modus)



genutzt. Dies wird durch eine Transimpedanzschaltung mit Nullvorspannung (photovoltaischer Modus) realisiert.

Es gibt drei verschiedene Arten von Rauschströmen in Fotodioden, darunter Johnson-Rauschen, Schrotrauschen und Flimmern. Das Johnson-Rauschen wird auf den Shunt-, Serien- und Lastwiderstand zurückgeführt, was physikalisch durch (1) ausgedrückt wird.

$$I_j = \sqrt{\frac{4 KTB}{R}} \quad (1)$$

Dabei ist

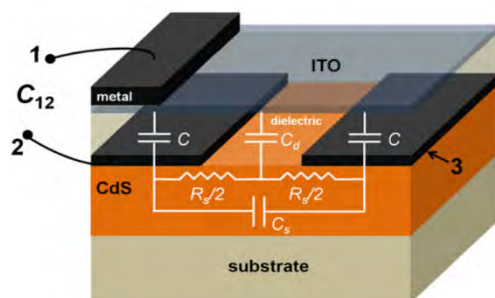
- $I_j$  ist das Johnson-Rauschen
- $K$  ist die Boltzmann-Konstante
- $T$  ist die Temperatur in Kelvin
- $R$  ist der zum Rauschen führende Ersatzwiderstand

Schrotrauschen tritt bei Photodioden mit umgekehrter Vorspannung auf und nimmt mit zunehmender Gleichstromvorspannung zu, insbesondere bei hohen Temperaturen. Typischerweise verdoppelt sich der Dunkelstrom  $I_{dark}$  von Fotodioden pro 10 °C als fließendes Verhältnis.

$$I_{dark}(T_2) = I_{dark}(T_1) \cdot 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}} \quad (2)$$

Außerdem reduziert eine höhere Temperatur den Absorptionskoeffizienten von Fotodetektoren. Daher ist es nicht ratsam, Fotosensoren jenseits ihrer empfohlenen Betriebstemperatur zu verwenden.

Bild 2 zeigt die innere Struktur eines typischen Fotowiderstands, der mit Cadmiumsulfid (CdS)-Technologie hergestellt wird, wobei Indiumzinnoxid (ITO) als transparente Oberfläche für CdS-Materialien dient. Das Substrat von Fotowiderständen wird in der Regel ebenfalls aus Keramik hergestellt. Das elektrische Modell eines Fotowiderstands besteht aus resistiven und kapazitiven Elementen; daher ist eine RC-Parallelschaltung ein geeignetes Modell für LDRs. Fotowiderstände (LDRs) haben eine Betriebstemperaturbegrenzung von im Allgemeinen bis zu 75 °C und Fotodioden bis zu etwa 100 °C.



**Bild 2:** Interner Aufbau eines lichtabhängigen Widerstands

Diese Temperaturbeschränkungen können ein Problem darstellen, wenn diese Art von Halbleitern in Transformatoren verwendet wird.

## Lichtbogendetektion mit halbleitenden Lichtsensorelementen in Leitungstransformatoren

M.Sc. Aref Sharifi

Transformatorexplosionen und -brände sind die gefährlichsten Folgen von Transformatorfehlern. Neben finanziellen Verlusten sind die Folgen oft Umweltverschmutzung oder Personenschäden. Besonders bei Schaltanlagen in dicht besiedelten Gebieten ist dies ein sehr hohes Risiko. Zum Schutz vor Isolationsfehlern oder starker Überlast werden flüssigkeitsisolierte Leistungstransformatoren mit einem Buchholzrelais (BHR) ausgestattet. Die Zeit zwischen dem internen Ausfall und der Abschaltung des Transformators beträgt etwa 5 Zyklen. In einigen Fällen ist die Auslösung des Buchholzrelais jedoch nicht schnell genug, um einen Kesselbruch und die oben beschriebenen Schäden zu verhindern. Daher werden derzeit schnellere Lichtbogendetektionssysteme, wie z. B. der Einsatz von lichtempfindlichen Halbleitern im Inneren des Transformatornkessels, untersucht. Diese müssen im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit, Empfindlichkeit, Betriebstemperatur und Lebensdauer untersucht werden.

Bild 1 zeigt den implementierten Aufbau. In dieser Schaltung wird der Strom zunächst mit Hilfe des Widerstands  $R_1$  in eine Spannung umgewandelt, und dann wird das Spannungssignal mit einem Rückkopplungswiderstand verstärkt. Basierend auf dem Stromsignal werden die Widerstandswerte sorgfältig ausgewählt, um das Signal ausreichend zu verstärken. Außerdem ist vor dem Oszilloskop ein EMV-Filter (elektromagnetische Verträglichkeit) eingebaut, um den Signal-Rausch-Abstand zu verbessern. Die Elektroden (Nadelplatte) befinden sich im Öl und der Abstand zwischen den Elektroden beträgt 1 cm.

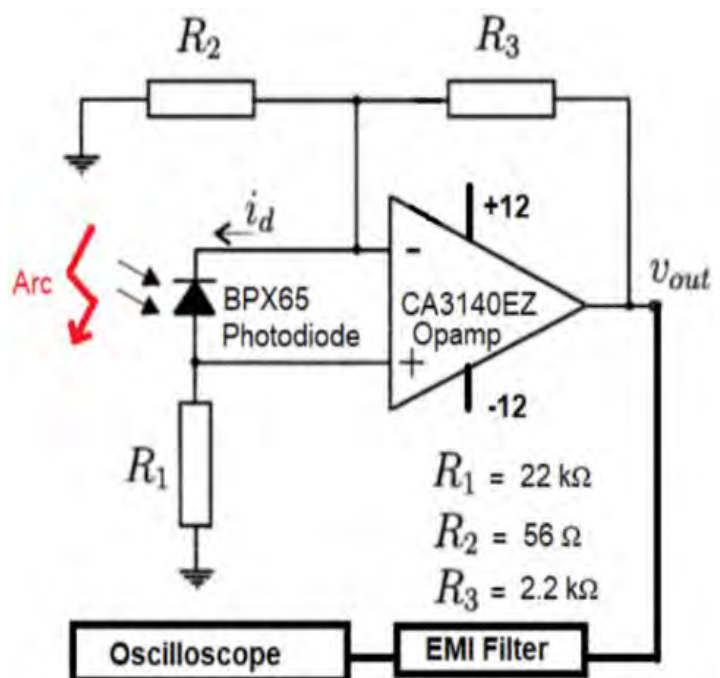
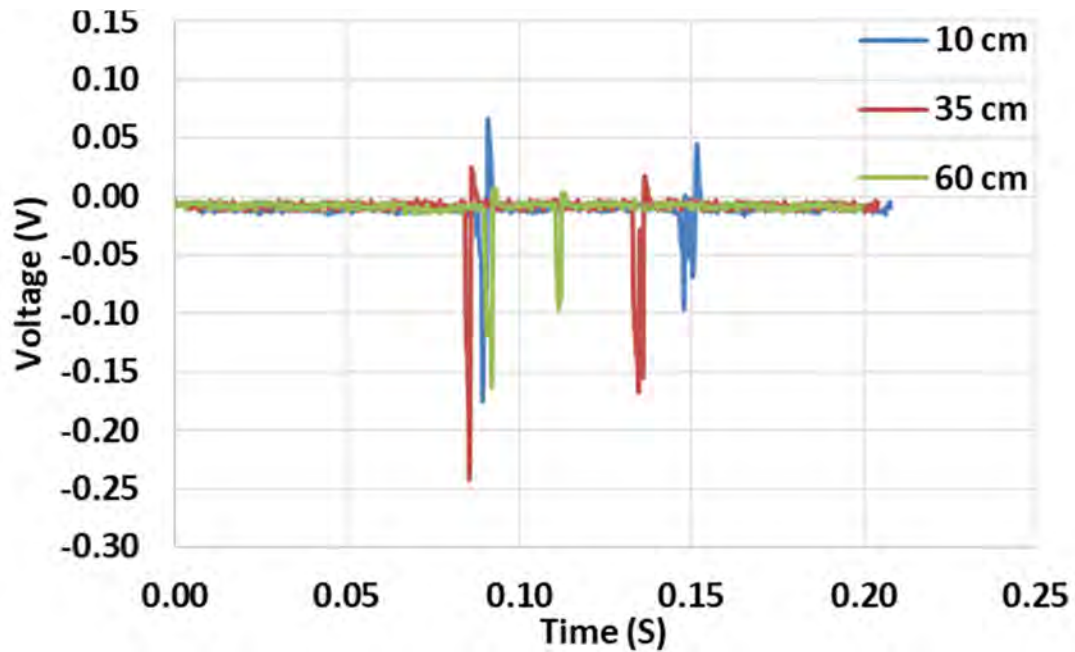


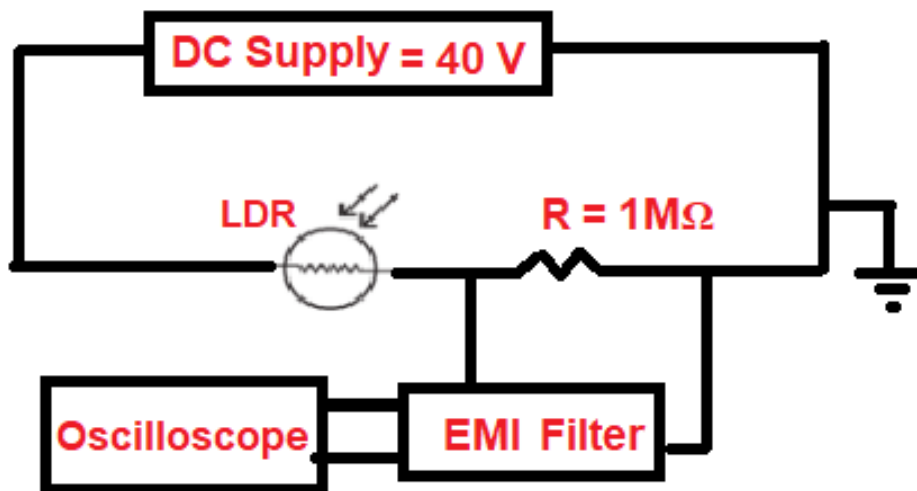
Bild 1: Transimpedanzverstärkerschaltung

Bild 2 zeigt das Signal des Lichtbogens in verschiedenen Abständen. Der Lichtbogen entstand in neuem Öl bei Raumtemperatur. Wie man sieht, nimmt die Signalintensität ab, wenn der Abstand zwischen dem Lichtbogen und dem Fotodioden-Sensor vergrößert wird, aber auch die EMI-Effekte sind bei größeren Abständen beträchtlich.



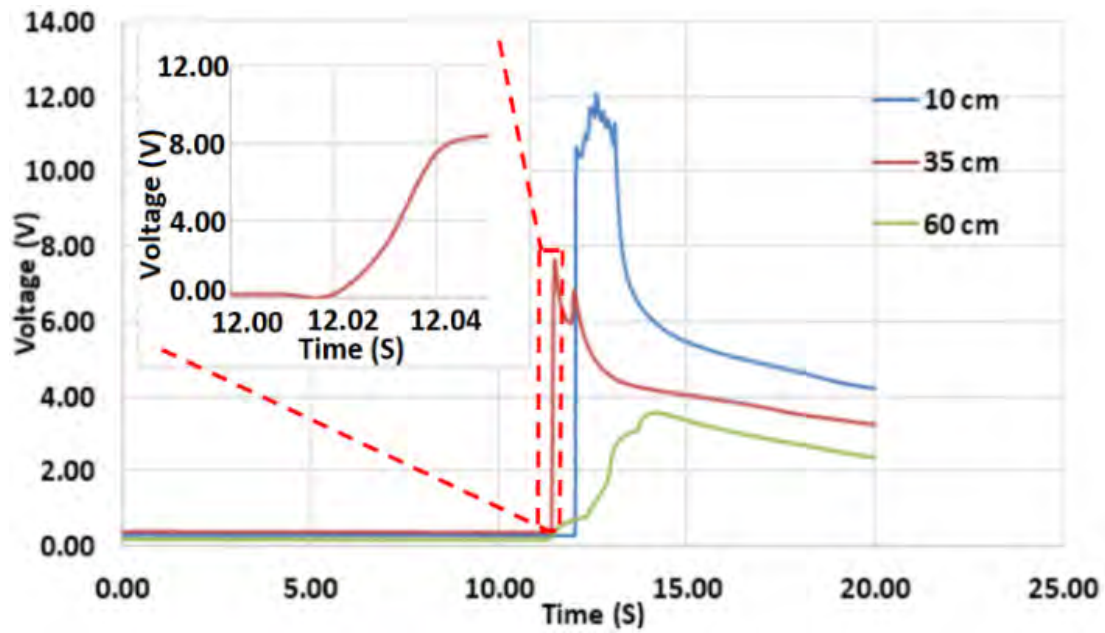
**Bild 2:** Signalprofil im Öl (25 °C) in verschiedenen Abständen

Der Fotowiderstand ist wie ein variabler Widerstand gegen die Lichtintensität. Wenn das Licht zunimmt, nimmt der Widerstand ab. Ausgehend von den Spezifikationen des Fotowiderstands wird die Messschaltung in Bild 3 dargestellt.



**Bild 3:** LDR-Messaufbau

In Bild 4 ist das Signalprofil im Öl (25 °C) in verschiedenen Abständen dargestellt. Wie man sehen kann, ist es gut zu beobachten, dass das Signal schwächer wird, wenn die Lichtintensität über größere Entfernungen reduziert wird. Andere Ergebnisse zeigten auch, dass der Fotowiderstand empfindlich auf Temperaturschwankungen reagiert.



**Bild 4:** Signalverlauf im Öl (25 °C) in verschiedenen Abständen ohne Barriere

Auf der Grundlage dieser und weiterer Untersuchungen kann der Schluss gezogen werden, dass Fotowiderstände oder Fotodioden offenbar keine zuverlässige Lösung für eine Lichtbogenerkennung darstellen und diese Funktion eines BHR nicht ersetzen können.

## Untersuchung von Fehlerarten an mit Papier isolierten Statoren

**M.Sc. Laureen Stahl**

Die Umsetzung klimapolitischer Ziele geht mit Maßnahmen zur Minderung des Treibhausgasausstoßes in sämtlichen Sektoren einher. Demnach betreffen die Energieeffizienzmaßnahmen und Energieeinsparungen ebenfalls den Energie- und Stromsektor. In der Forschung und Entwicklung liegt aktuell ein Schwerpunkt auf dem Einsatz von Elektromotoren, da deren Bedarf verbunden mit dem Umbruch zu einer Elektrifizierung und Mobilisierung stetig steigen wird. Aufgrund von höheren Anforderungen an Elektromotoren und des zu erwartenden steigenden Bedarfs wird eine Weiterentwicklung sowie die Realisierung von Fertigungs- und Qualitätsprüfverfahren vorausgesetzt. Es wird eine Verbesserung der Qualität und Lebensdauer angestrebt, sowie eine gleichzeitige Kostensenkung von Material und Fertigung.

Ein gewickelter Stator besteht aus einem Statorblechpaket, einer Nutisolation und einer Wicklung mit Imprägnierung beziehungsweise Verguss. Ein häufiger Grund für ungeplante Ausfälle an rotierenden elektrischen Maschinen sind Schäden an der Statorisolation. Die mit den Ausfällen verbundenen Produktionsausfälle sind für den Betreiber kostspielig und nicht wirtschaftlich, weshalb eine aussagekräftige und effiziente Diagnose der Statorisolation unabdingbar ist.

Vor diesem Hintergrund werden zunächst mögliche Fehler, welche in der Isolation eines Stators oder dem Blechpaket auftreten können, definiert.

Fehler in einem Stator werden dahingehend unterschieden, dass diese in der Isolationsschicht einer Nut oder bei der Produktion des Blechpakets auftreten, sowie weiterführend Fehler, die lediglich bei bereits eingelegter Wicklung auftreten können. Zu den Fehlern der Isolationsschicht gehören beispielsweise innere Hohlräume und leitende Partikel, welche als direkte Bestandteile in der Isolation auftreten oder bei Verbundstoffen, durch die Zersetzung in die einzelnen Bestandteile, entstehen. Infolge von Temperaturwechseln und Abkühlvorgängen kann es zu einer Versprödung und anschließenden Bildung von Rissen und Hohlräumen, einer direkten Bildung von Rissen und Hohlräumen, einem Verzug der Isolierung und einer unvollständigen Ausspritzung kommen. Ebenso ist eine Delamination der Hauptisolierung aufgrund von Temperaturwechseln und Abkühlvorgängen, sowie einer unvollständigen Aushärtung möglich. Neben der Temperatur als Einflussgröße trägt ungleichmäßiges Gießen zum Verzug der Isolierung, zur unvollständigen Ausspritzung oder zur Variation der Schichtdicke bei. Zudem können Nutentladungen zu den Fehlern der Isolationsschicht gezählt werden. Einige Fehler sind zudem auf das Einlegen der Wicklung zurückzuführen. Zu diesen Fehlertypen gehören Risse an der Austrittskante durch das Formen der Wicklung,

die Delamination zwischen Leiter und Isolierung, Oberflächenentladungen am Wickelkopf und Wickelkopfvibrationen, welche entstehen, da die Leiterstäbe nicht fest eingespannt, sondern lediglich durch Stützelemente versteift sind.

Neben den Isolationsfehlern sind Fehler bei der Fertigung des Blechpaketes möglich. Hierzu gehören scharfe Kanten, welche zu Rissen und zum Abrieb der Hauptisolierung führen und Stanzfehler, welche Einfluss auf die Schichtdicke und die Kapazität nehmen. Zudem können die Verschiebung der gestanzten Bleche sowie ein unebener Nutgrund Einfluss auf die Schichtdicke und Kapazität nehmen und zum Abrieb der Hauptisolierung führen. Nach dem Einlegen der Wicklung sind weitere Einflussgrößen eine lockere Befestigung, sowie Isolationsschrumpfung, welche zur Reibung am Blechpaket und letztlich zum Abrieb der Hauptisolierung führen. Neben diesen Fehlern des Blechpaketes, welche auf die Isolierung Einfluss nehmen, sind Fehler zwischen den Blechen möglich. Diese führen zur Änderung im magnetischen Kreis und sind über eine Streuflussmessung zu detektieren.

Unter Berücksichtigung der definierten Fehler wurden im Labor dielektrische und elektrische Messungen an Statorn mit Papierisolierung durchgeführt. Ziel war die Untersuchung des Einflusses modellierter Fehler nachbildungen. Aufgrund der oben definierten Fehler wurden neben der Nut ohne Fehler, die Fehlerarten Hohlraum, Riss, Delamination, doppelte Schichtdicke und leitfähige Partikel nachgebildet und untersucht. Um lediglich den Einfluss der Fehler auf die Nutisolation zu untersuchen, wurde ein mit leitfähigem Elastomer umwickeltes Metallrohr, welches an die Nutinnenseite gedrückt wurde, als Gegenelektrode zum Blechpaket verwendet (Bild 1).



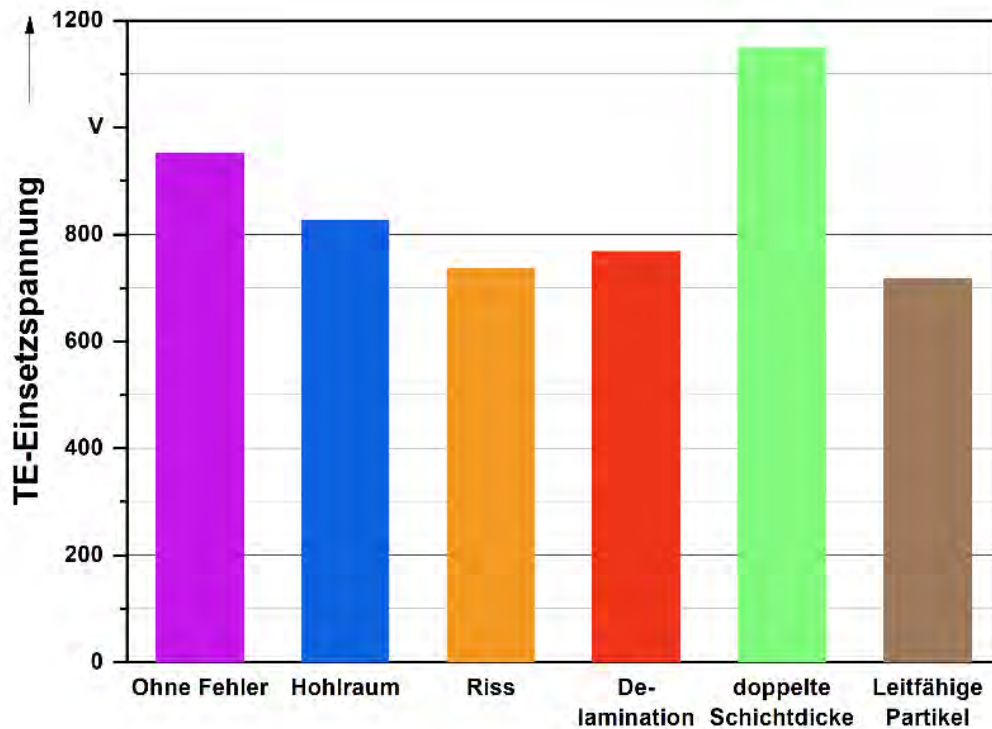
**Bild 1:** Stator mit Metallrohr als Gegenelektrode

Insbesondere bei der TE-Messung unter AC zeigten sich Unterschiede bei den Einsatzspannungen (Bild 2) infolge unterschiedlicher, modellierter Fehler. Für die Untersuchungen wurden 5 pC (50 Hz) als TE-Einsatz definiert.

Demnach nimmt die TE-Einsatzspannung, wie zu erwarten, infolge von Hohlräumen und einem Riss im Gegensatz zu der Nut ohne Fehler ab. Für die Delamination nimmt



die TE-Einsatzspannung einen Wert zwischen dem Riss und den Hohlräumen an. Dies ist auf die Lufteinschlüsse infolge der Delamination zurückzuführen. Die Delamination wurde mittels eines Stücks Schrumpfschlauchs nachgebildet, welches zwischen die Nutisolation und das Blechpaket gelegt wurde. Infolgedessen entstehen gegebenenfalls an den Kanten Lufteinschlüsse, welche im Gegensatz zu den nachgebildeten Hohlräumen größer sind, sodass die TE-Einsatzspannung abnimmt.



**Bild 2:** TE-Einsatzspannung der mit Papier isolierten Statoren für unterschiedliche Fehlerarten

Im Vergleich zu dem Isolierpapier ohne Fehler treten für eine doppelte Schichtdicke in der gesamten Nut bei einer höheren Spannung Teilentladungen auf. Zudem wird deutlich, dass insbesondere leitfähige Partikel einen Einfluss auf den Einsatz von Teilentladungen nehmen. Um diese Fehlerart nachzubilden, wurden Kupferpartikel auf das Isolierpapier gerieben.

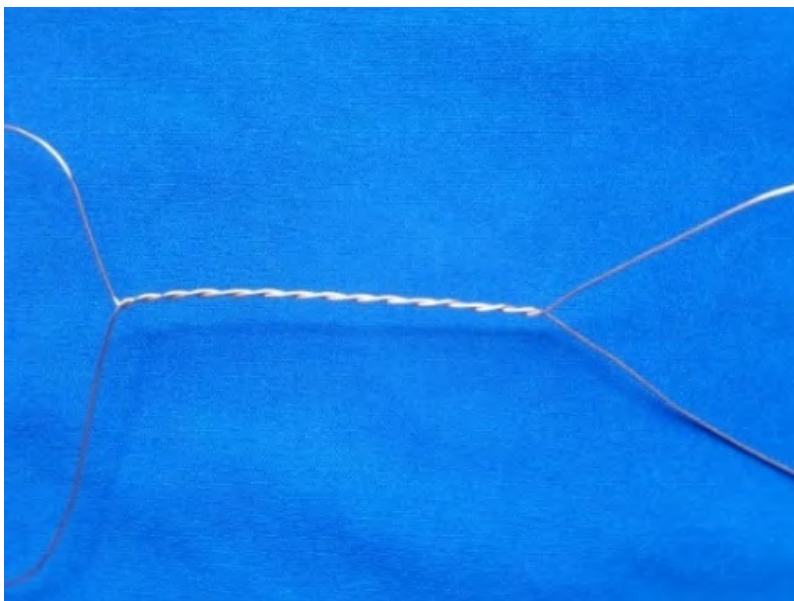
Anhand dieser ersten Untersuchungen ist ersichtlich, dass die Fehlerarten mittels TE-Messungen mit dem verwendeten Aufbau frühzeitig detektiert und charakterisiert werden können. Hierzu bedarf es weiterer Untersuchungen in Bezug auf weitere Fehlerarten und die Variation dieser, sowie die Untersuchung der Fehlerarten auf weitere dielektrische und elektrische Parameter.

## Untersuchung von isolierten Runddrähten mittels Wasser als Prüfmedium

M.Sc. Laureen Stahl

Der Wandel zu einer Elektrifizierung und Mobilisierung geht mit dem Einsatz von Elektro- und Hybridfahrzeugen einher. Mit dem steigenden Bedarf an Elektromotoren wird eine Zuverlässigkeit und gewisse Lebensdauer verlangt. Demnach ist die Kenntnis über die Alterung des elektrischen Isoliersystems unerlässlich.

Zum Isolieren von spannungsführenden Teilen werden in rotierenden Maschinen polymere Dielektrika eingesetzt. Bei Niederspannungsmotoren wird in die Nuten beispielsweise ein flächenförmiger Isolierstoff und darauf lackisolierte Drähte eingebracht. Im Anschluss wird der Ständer entweder mit Lack beträufelt, in Lack eingetaucht oder unter Vakuum mit beispielsweise Epoxidharz imprägniert. Während des Betriebs unterliegt das Isoliersystem verschiedenen Belastungsfaktoren. Zu diesen Belastungsfaktoren, welche zur Verschlechterung bis hin zum elektrischen Durchschlag der Isolierkörper führen können, zählen unter anderem die thermische, elektrische und mechanische Beanspruchung. Zudem kann durch Umgebungsbedingungen wie Feuchte, Temperatur und Umgebungsmaterial der Alterungsvorgang beschleunigt werden. Demnach kommen der Tränkung beziehungsweise Imprägnierung, welche eine zusätzliche Isolierung ist, weitere Aufgaben zu. Diese zusätzliche Isolierung schützt die lackisolierten Drähte vor Feuchtigkeit und stabilisiert die lackisolierten Drähte in den Nuten. Zudem hilft sie dabei ein Durchscheuern der Isolierung durch Vibrationen zu vermeiden und führt die Wärme, die während des Betriebs entsteht, ab. Die Windungsisolierung ist in der Regel die schwächste Stelle des Isoliersystems, weshalb diese genauer untersucht werden soll. Im Rahmen dieser Untersuchung soll die



**Bild 1:** Verdrillter Draht

Eignung von Leitungswasser als Prüfmedium für lackisolierte Statorwicklungen erforscht werden. Hierzu werden verdrillte Runddrähte (Bild 1) mittels einer Wickelmaschine, gemäß *DIN EN 60851-5* hergestellt. Diese Norm beschreibt ein Verfahren für die Messung der Durchschlagspannung von isolierten Drähten. In einer ersten Untersuchung zur

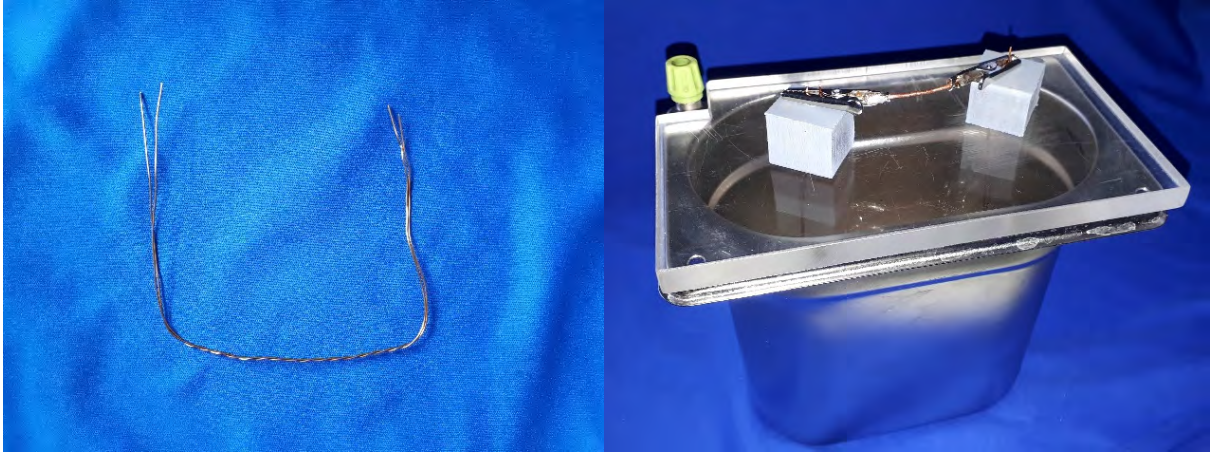
Eignung von Leitungswasser als Prüfmedium werden mit Polyurethan (PUR) isolierte Drähte mit einem Durchmesser von 0,63 mm verwendet.

Der Wickeldraht besteht ursprünglich aus einem zusammenhängenden Draht, welcher durchgeschnitten wurde, weshalb es an der Schnittkante bei der Verwendung von Wasser als Gegenelektrode zu einem Kontakt zwischen diesem und dem Kupferdraht kommt. Diese Schnittkante ist bei der Messung der Durchschlagspannung beispielsweise in Isolieröl, gemäß der Norm, nicht relevant. Aufgrund der hohen Leitfähigkeit besteht jedoch, bei dem für diese Untersuchungen verwendeten Aufbau mit Wasser, ein Kontakt zwischen der Spannungsseite und der Erde. Um dies zu vermeiden wird der Kupferkontakt mit Epoxidharz isoliert. Am Tripelpunkt zwischen Isolierstoff, Epoxidharz und Wasser kommt es zu einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke, weshalb versucht wird, am Ende des Wickeldrahts das elektrische Feld geometrisch zu steuern. Der Prüfling mit konischer Feldsteuerung ist in Bild 2 (links) dargestellt.



**Bild 2:** Prüfling mit konischer Feldsteuerung (links) und mikroskopischer Ansicht des Durchschlags (rechts)

Die auf diese Art gefertigten Prüflinge wurden anschließend mit einer ansteigenden Spannung von 500 V/s, angelegt an dem einen Draht, während der zweite Draht an die Erde angeschlossen ist, belastet. Trotz der geometrischen Feldsteuerung erfolgte der Durchschlag nicht wie gewünscht an dem Kontaktpunkt der beiden Drähte zueinander, sondern an dem Tripelpunkt oder in der Nähe des Tripelpunktes (Bild 2 rechts). Aufgrund dieses Ergebnisses wird der Aufbau zur Untersuchung der Durchschlagspannung, an die Methode mit Wasser weiter angepasst. Mittels des Wassers als Gegenelektrode ist es möglich den gesamten Isolierstoff des Drahtes und nicht lediglich den Kontakt der beiden Drähte zu untersuchen. Vor diesem Hintergrund wird der Draht weiterhin mithilfe der Wickelmaschine verdrillt, um eine Wicklung nachzubilden, jedoch werden beide Drähte an die Spannung angeschlossen (Bild 3).



**Bild 3:** Angepasster Prüfaufbau zur Messung der Durchschlagspannung in Wasser

Bei diesem Prüfaufbau ist die Durchschlagstelle vermehrt auf den verdrehten Bereich zurückzuführen, weshalb dieser Aufbau für weitere Untersuchungen mit Wasser als Elektrode verwendet werden kann, um den Einfluss des Wassers zu untersuchen. Diese Prüfmethode soll jedoch ebenfalls für Untersuchung verschiedener lackisolierter Drähte und deren TE-Verhalten sowie Durchschlagspannungsverhalten angewandt werden.

## **Entwicklung einer Schaltung für die Erzeugung von Spannungsimpulsen mit hoher Steilheit für die Alterung fester Isolierstoffe**

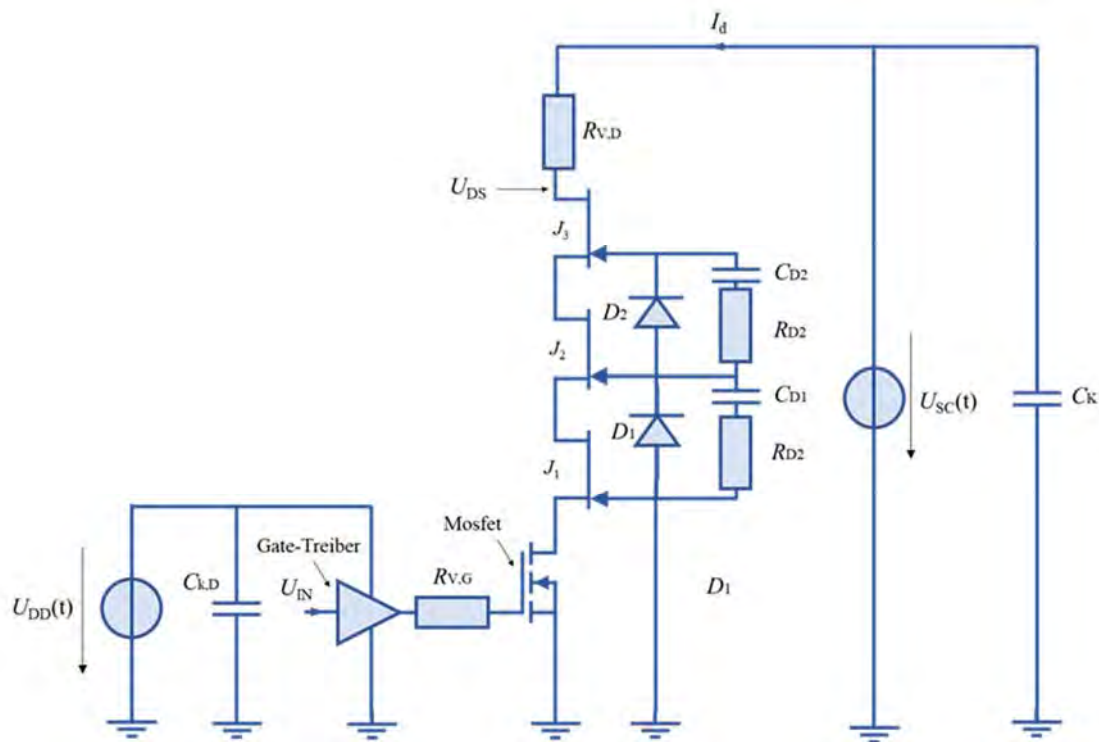
**M.Sc. Javier Torres**

Aufgrund der Veränderungen der Netzbedingungen, welche die Energiewende mit sich bringt, wie beispielsweise ein höheres Vorhandensein von leistungselektronischen Umrichtern, werden Betriebsmittel, insbesondere Transformatoren, zusätzlichen elektrischen Beanspruchungen unterzogen. In modernen Umrichtern kommen zunehmend Halbleiter aus Siliziumcarbid (SiC) zur Anwendung. Beim Schalten von SiC-Halbleitern treten impulsförmige Spannungen auf, welche Steilheitswerte bis zu  $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$  und Wiederholungsraten bis  $20 \text{ kHz}$  erreichen können. Diese impulsförmige Belastung kann die Lebensdauer der Isolation von Hochspannungsanlagen beeinträchtigen und zu einem früheren Ausfall führen. Die Forschung über die Auswirkung impulsförmiger Spannungen auf die Lebensdauer der Isolationsmaterialien ergibt sich in diesem Kontext als ein Hauptfaktor für den sicheren Betrieb von Mittelspannungstransformatoren.

Die Norm IEC 62068 legt die Kriterien für die Evaluierung des Einflusses von sich wiederholenden Impulsspannungen fest. Prüfsysteme, welche die Prüfspezifikationen der Norm IEC 62068 erfüllen, sind aufgrund der spezifischen Anwendung kaum auf dem Markt zu finden und existieren in der Regel als selbstgebaute Installationen in Forschungseinrichtungen. Vor diesem Hintergrund wurde im Schering-Institut ein Prototyp eines Generators für die Erzeugung von Spannungsimpulsen mit Steilheitswerten von ca.  $20 \text{ kV}/\mu\text{s}$  und Amplituden bis  $3 \text{ kV}$  konstruiert. Diese Auslegung repräsentiert einen Kompromiss zwischen den gewünschten Steilheitswerten und der notwendigen Leistung, um diese zu erzeugen.

Die Topologie des Generators beruht auf der Superkaskodenschaltung. Diese Struktur besteht aus mehreren JFET-Transistoren, welche über eine individuelle Sperrspannung von  $1,2 \text{ kV}$  verfügen und in Reihe über die Drain- und Source-Anschlüsse geschaltet, und über einen MOSFET gesteuert, werden. Bild 1 zeigt das Ersatzschaltbild der Anordnung.

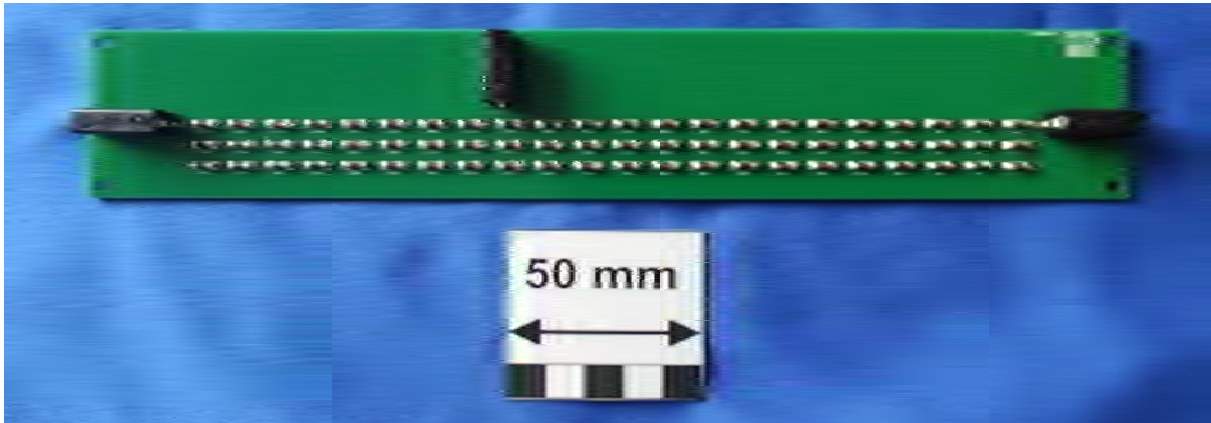




**Bild 1:** Ersatzschaltbild einer dreistufigen Superkaskodenschaltung mit Kompensationsnetzwerk

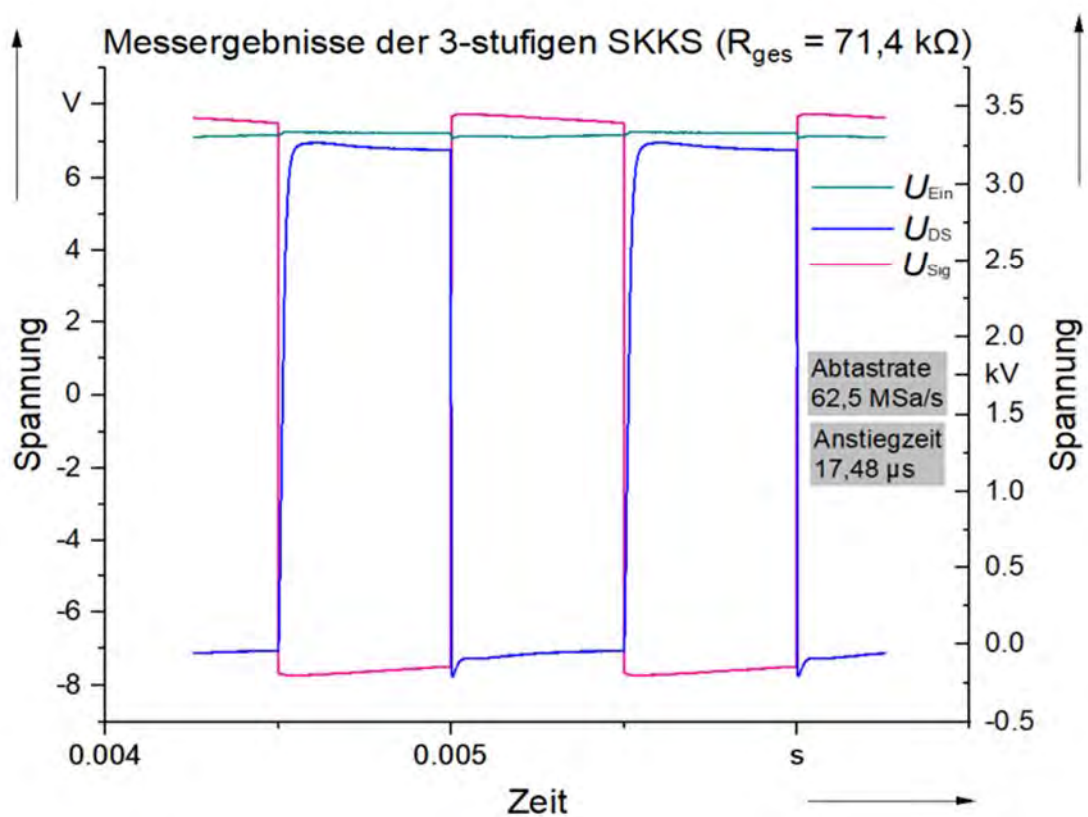
In diesem Fall bildet jeder JFET eine Stufe der Schaltung. Das meistens unerwünschte „normally on“ Verhalten, das JFET-Transistoren typischerweise aufweisen und ihre Anwendung in industriellen Applikationen aus Sicherheitsgründen einschränken kann, wird durch den MOSFET vermieden. Somit können die Vorteile der JFETs, wie beispielsweise eine geringe Eingangskapazität und ein niedriger Durchgangswiderstand, was den Einsatz der Transistoren als Verstärker bei höheren Frequenzen ermöglicht, verwendet werden.

Trotzdem kommt es mit zunehmender Anzahl an Stufen in der Schaltung zu Schwierigkeiten bei der Synchronisation der Schalt Augenblicke der Transistoren, denn diese müssen möglichst gleichzeitig geschaltet werden, um Impulse mit der angestrebten Spannungssteilheit zu erzeugen. Aus diesem Grund ist ein Kompensationsnetzwerk mit einer genauen Auslegung notwendig. Zur Dimensionierung des Ausgleichnetzwerks wurde ein Simulationsmodell erstellt. Für die Simulation wurden die genauen Modelle der Transistoren verwendet. Dieser Ansatz ermöglichte die Auslegung des Kompensationsnetzes, des Vorwiderstandes der Schaltung und des Zwischenkreis-kondensators. Der Vorwiderstand der Anordnung weist einen relativ niedrigen Wert (wenige  $k\Omega$ ) auf und wurde aus Widerständen mit einer hohen Impulsleistung auf einer dafür entwickelten Schaltplatine konstruiert.



**Bild 2:** Entwickelter Vorwiderstand für die Superkaskodenschaltung

Die Schaltung wurde entsprechend getestet. Als Gleichspannungsquelle wurde eine 6 kV-1,2 kW-Quelle verwendet. Es konnten rechteckige Spannungsimpulse mit Steilheitswerten von  $21,4 \text{ kV}/\mu\text{s}$  und einer Amplitude von 3,5 kV erzeugt werden. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt.  $U_{\text{sig}}$  zeigt das Triggersignal der Schaltung.  $U_{\text{ein}}$  und  $U_{\text{DS}}$  stellen entsprechend die Eingangsspannung und die Drain-Source-Spannung der Superkaskode in kV dar.



**Bild 3:** Testergebnisse der Superkaskodenschaltung



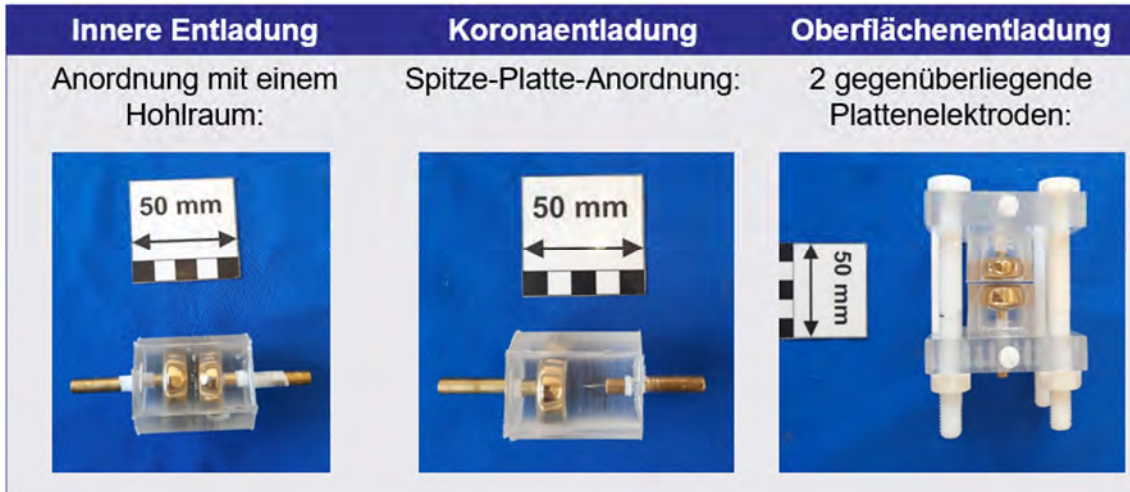
# **Untersuchung zur Charakterisierung von Teilentladungsvorgängen an polymeren Feststoffen unter Gleichspannungsbeanspruchung**

**M.Sc. Javier Torres**

Im Rahmen der Energiewende und der Optimierung des Ressourcenverbrauchs verändern sich die Netzbedingungen sowie die Topologie der elektrischen Energiesysteme ständig. Die Übertragung von elektrischer Energie mit Hochgleichspannungssystemen gewinnt daher zunehmend an Bedeutung. Durch den Einsatz von HVDC-Systemen lassen sich eine bessere Übertragungskapazität bei großen Entfernungen und geringere Verluste bei langen Übertragungstrecken erzielen. Die Beanspruchungen, welchen die Isolierstoffe in HVDC-Systemen unterzogen werden, differieren im Vergleich zu denen, welche bei Wechselspannungsbelastung auftreten.

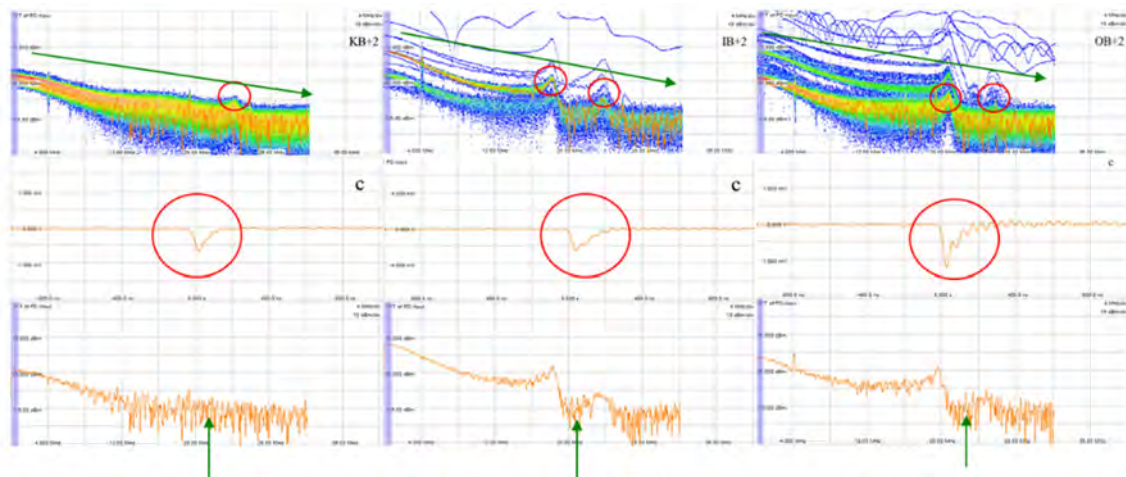
Da die Feldverteilung im Isolierstoff lokal verzerrt werden kann, stellt die Bildung von Raumladungen unter der Einwirkung hoher Gleichspannungen über lange Zeiträume eine potenzielle Gefahr dar. Teilentladungen (TE) können durch diese Feldverzerrungen begünstigt werden und die Alterung der Isolation des HVDC-Systems beschleunigen. Die Detektion von TE und die korrekte Identifizierung der Fehlerart sind daher für die Betriebssicherheit von HDVC-Komponenten äußerst wichtig. Bei Wechselspannungssystemen können die TE-Arten mit relativ hoher Genauigkeit identifiziert werden, bei HVDC ist eine solche Identifizierung allerdings bisher nur begrenzt möglich. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ein Ansatz für die Fehlerartidentifizierung von TE bei Gleichspannungsbeanspruchung untersucht.

Für die Untersuchung der TE-Vorgänge wurden zunächst unterschiedliche Anordnungen erstellt, welche drei typische Fehlstellen (innere Entladungen, Koronaentladungen und Oberflächenentladungen) in Isoliersystemen nachbilden. Um die statistische Zuverlässigkeit der Versuche zu gewährleisten, wurden mehrere Prüflinge jeder Fehlerart gefertigt. Zur Berücksichtigung des Einflusses des Materials auf das Verhalten der Entladungen wurden Prüflinge aus zwei Polymeren hergestellt. Die Prüflinge wurden anschließend mit Gleichspannung und zum Vergleich auch mit Wechselspannung beansprucht, sodass Teilentladungen auftreten.



**Bild 1:** Prüflinge für die Nachbildung von Fehlstellen in Isoliersystemen

Der Ansatz zur Identifizierung des Fehlers basiert auf der Erkennung von Unterschieden zwischen den gemessenen Spannungsimpulsen, wie in Bild 2 dargestellt. Im oberen Teil des Bildes ist ein Histogramm der schnellen Fourier-Transformationen (FFT) zu sehen. Im rötlich gefärbten Bereich befinden sich die FFT der Impulse, die mit hoher Häufigkeit auftreten und somit für einen bestimmten Fehlertyp repräsentativ sind. Im unteren Teil des Bildes sind die Zeitverläufe sowie die FFT von repräsentativen Impulsen für jede Fehlerart dargestellt. Es wurden Breitband- und Schmalbandmessungen durchgeführt, wobei für jeden Prüfling 1024 Pulse pro Beanspruchungsart aufgezeichnet wurden.



**KE: Spitze-Platte Entladung    IE: Innere Teilentladung    OE: Oberflächenentladung**

**Bild 2:** Unterschiede an den Entladungsimpulsen bei drei unterschiedlichen Entladungsarten

Zur Untersuchung der Eigenschaften des TE-Impulssignals, sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich, wurde eine dreistufige Wavelet-Paket-Transformation bei jedem Impuls durchgeführt. Der Energieanteil jedes Teilbandes sowie die Wavelet-Energieentropie wurden als Merkmalsvektoren extrahiert und als Erlernungsdaten mit einem

Support-Vector-Machine-Algorithmus verarbeitet. Nach dem Trainieren des Algorithmus mit den Eingangsdaten wurde dieser getestet, mittels weiterer TE-Messungen an den Prüfkörpern. Die gemessenen Impulse wurden dann vom Algorithmus klassifiziert.

Die Ergebnisse des Algorithmus wiesen eine ca. 80 % korrekte Identifizierungsrate für die TE-Arten auf, wobei im Allgemeinen bei den breitbandigen Messungen bessere Identifizierungsraten erzielt werden konnten. Bei Wiederholung der Analyse an den Silikonprüflingen konnten ähnliche Ergebnisse erzielt werden und somit konnte die Eignung der Methode für unterschiedliche Materialien evaluiert werden.

# Vergleich von Luft- und Flüssigkeitskühlung für hybrid-elektrische Antriebssysteme aus isolationstechnischer Sicht

**M.Sc. Yunfei Wang**

Mit der fortschreitenden Entwicklung von hybrid- und vollelektrischen Flugzeugen erreichen die Flugantriebssysteme eine Leistung im Megawattbereich. Für effiziente Systeme mit hohen Leistungsdichten werden auch hohe Verlustleistungsdichten in Elektromotor, Umrichter und Batteriespeicher erwartet. Die elektrischen und elektronischen Komponenten des Systems erzeugen große Mengen an Wärme, die abgeführt werden muss, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten. Es gibt eine Reihe von Kühlmethoden, die jeweils einen unterschiedlichen technologischen Reifegrad (Technology Readiness Level: TRL [1...9]) aufweisen. Gemäß der Literatur lassen sich die Methoden in passive und aktive Mechanismen unterteilen. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Kühlmethoden und ihre zugehörigen Medien sowie die TRL für die Luftfahrt aufgeführt.

**Tabelle 1:** Wesentliche Kühlmethoden für hybrid-elektrische Flugzeuge

Kühlmethode	Kühlmedien	TRL
Luftkühlung	Zwangsluft, Stauluft	9
Flüssigkeitskühlung	Öl, Treibstoff, Wasser, Glykol-Wasser Gemische, Synthetische Flüssigkeiten, Kältemittel usw.	>7
Phasenwechselmaterialien	Graphitkohle, Natriumacetat usw.	4-6
Wärmerohre	Wasser, Kältemittel usw.	4-6
Kryogene Kühlung	Flüssigwasserstoff, Flüssigstickstoff usw.	1-3

Nach dem Stand der Technik gibt es neben der Luft- und Flüssigkeitskühlung mit hohem TRL noch andere Kühlmethoden, die in der Luftfahrt eingesetzt werden könnten. Hierzu gehören beispielsweise Kühltechniken auf Basis von Phasenwechselmaterialien, Wärmerohren, thermoelektrischen Effekten, kryogener Kühlung usw. Diese Kühlmethoden befinden sich noch im Stadium der Durchführbarkeitsstudie und sind für die praktische Anwendung noch nicht hinreichend ausgereift.

Die Spannungen der Motoren und Generatoren in hybriden elektrischen Antriebssystemen können Tausende von Volt erreichen, was zu großen Wärmeverlusten in den Wicklungen führt. Aktuell werden hier zwei Möglichkeiten zur Kühlung der Motorwicklungen parallel verfolgt. Zum einen eine Luftkühlung der Wicklungen, zum anderen eine Flüssigkeitskühlung. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile. Die Luftkühlung wird je nach Energieverbrauch des Kühlsystems in aktive und passive Kühlung unterteilt. Beim Vergleich von passiver Luftkühlung (natürliche Konvektion) und aktiver Luftkühlung (erzwungene Konvektion) ist der Wärmeübergangskoeffizient bei aktiver Kühlung üblicherweise viel höher. Passive Luftkühlung ist daher für Anwendungen mit ho-

hen Wärmeverlusten und kompakten Anordnungen weniger geeignet. Bei der Flüssigkeitskühlung lassen sich zwei Arten zur Aufnahme von Wärme unterscheiden, nämlich die direkte und die indirekte Kühlung. Bei der indirekten Flüssigkeitskühlung wird die Wärme über einen an der Wärmequelle angeordneten Flüssigkeitskanal an das Kühlmittel übertragen. Im Gegensatz dazu basiert die direkte Flüssigkeitskühlung auf dem direkten Kontakt zwischen der Kühlflüssigkeit und der Bauteiloberfläche. Im Allgemeinen bewirkt die direkte Flüssigkeitskühlung eine bessere Kühlung und damit eine höhere Leistung des Antriebssystems.

Neben der Kühlleistung gibt es auch Unterschiede in der elektrischen Isolierung zwischen Luftkühlung und direkter Flüssigkeitskühlung. Im Allgemeinen weist trockene Luft bei Raumtemperatur und normalem Luftdruck gute Isoliereigenschaften auf. Die Durchschlagfestigkeit von Luft kann bis zu 30 kV/cm erreichen. Nach einem Durchschlag können die Isoliereigenschaften der Luft sofort und automatisch wiederhergestellt werden. Allerdings wird die Durchschlagsspannung des Luftspalts und der äußeren Isolierung der elektrischen Komponenten neben der Feldhomogenität durch Umweltfaktoren wie Luftdruck, Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst. Beispielsweise lagern sich bei hoher Luftfeuchtigkeit Wassermoleküle an der Isolierstoffoberfläche ab, was zu einer erhöhten Leitfähigkeit der Oberflächen beziehungsweise zu einem verminderten Oberflächenwiderstand führt. Die Leitfähigkeit fördert die Elektronenbeweglichkeit und Ladungen verteilen sich auf der gesamten Isolierstoffoberfläche. Dies führt zu vielen kleinen Entladungsimpulsen und schließlich zu einem elektrischen Durchschlag oder einem Isolationsausfall. Außerdem können der in der Kühlluft enthaltene Sand und Staub mit hoher Geschwindigkeit die Isolierstoffoberfläche erodieren, was zu Verschleiß des Isoliermaterials führt. Schließlich kann der Salznebel in der Seeluft Elektrolyte auf den Oberflächen von Isolierstoffen und Metallen bilden, was die korrosive Wirkung beschleunigt und die Isoliereigenschaften beeinträchtigt.

Bei der direkten Flüssigkeitskühlung elektrischer Komponenten müssen die Anforderungen an die elektrische Isolierung berücksichtigt werden. Transformatoröle, Turbinenöle sowie fluorierte dielektrische Flüssigkeiten sind für die direkte Flüssigkeitskühlung geeignet. Transformatoröle können aufgrund ihrer ausgezeichneten Isolationseigenschaften die Isolieranforderungen vom Hochleistungsmotor und -generator mit direkter Flüssigkeitskühlung erfüllen. Die Durchschlagfestigkeit des behandelten Isolieröls kann etwa bis zu 30 kV/mm betragen und ist damit wesentlich höher als die von Luft. Zudem eignen sich Isolieröle vor allem für den Betriebstemperaturbereich von 0 bis 150 °C. Werden die Isolieröle über den beschriebenen Temperaturbereich hinaus eingesetzt, so erfahren diese eine beschleunigte Alterung. Die infolge der Alterung entstehenden Alterungsprodukte können sich negativ auf die isolierenden Eigenschaften auswirken. Beispielsweise könnte eine erhöhte Menge an gelöstem Wasser oder gelösten Gasen aufgrund hoher Druck- und Temperaturänderungen zu einer Blasenbildung führen, welche die elektrische Festigkeit reduzieren.

## **Auswahl der Kühl- und Isoliermedien für hybrid-elektrische Anwendungen**

**M.Sc. Yunfei Wang**

Vor dem Hintergrund der Reduzierung der Treibhausemissionen werden immer mehr innovative Technologien in der Luftfahrt gefordert. Durch den Einsatz von hybrid-elektrischen sowie voll-elektrischen Antriebstechnologien besteht die Möglichkeit, fossile Brennstoffe teilweise oder vollständig aus der Luftfahrt, insbesondere auf kurzen bis mittleren Strecken, zu verdrängen.

Eine der technischen Herausforderungen bei hybrid-elektrischen Antriebssystemen ist der Umgang mit der Wärme, die während des Betriebs entsteht. Das Thermomanagementsystem ist für die Wärmeabfuhr zuständig und dient zur Steuerung der Wärmeübertragung zwischen der Wärmequelle und der Wärmesenke, um die Temperatur der Teilsysteme und Komponenten des Flugzeugs innerhalb des erforderlichen Temperaturbereichs zu halten. Daher ist die Auswahl eines geeigneten Kühlmediums für ein effizientes und stabiles Antriebssystem entscheidend.

Derzeit ist Flüssigkeitskühlung in der Luftfahrtindustrie weit verbreitet. Die Luftfahrtindustrie hat die Anforderungen an Kühl- und Isolierflüssigkeiten, dass diese kühlend, isolierend, schmierend und einbettend sein sollen. Zudem stehen vor allem ein Medium mit einer signifikant hohen Wärmeleitfähigkeit zur Gewährleistung einer effizienten Kühlung im Vordergrund sowie eine geringe Brandgefahr in Kombination mit einer hinreichenden elektrischen Festigkeit. Die Kühl- und Isolierflüssigkeiten für die Anwendung in der Luftfahrt sollten eine gute thermische Stabilität und Oxidationsbeständigkeit aufweisen, um Alterung zu vermeiden und eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Die Kühl- und Isolierflüssigkeiten unterliegen dementsprechend hohen Anforderungen im Bereich Sicherheit. Nach Möglichkeit sollen die Flüssigkeiten nicht-brennbar, ungiftig und nicht klimaschädlich sein. Eine weitere Anforderung an die Kühl- und Isolierflüssigkeit für den Einsatz in der Luftfahrt ist, dass die Flüssigkeit neben großen Temperaturschwankungen ebenfalls starken Druckänderungen, die das Ausperlen von Gasblasen begünstigen können, standhalten muss.

Zur Auswahl einer geeigneten Kühl- und Isolierflüssigkeit wurden dem Kooperationspartner Rolls-Royce drei Arbeitsschritte unternommen. Zunächst wurden die für jedes Teilsystem verfügbaren Kühlmethoden untersucht und die technischen Daten der einsetzbaren Kühlflüssigkeiten gesammelt. Im zweiten Schritt wurden die Flüssigkeiten nach den thermischen Anforderungen des Antriebssystems (z. B. Betriebstemperaturgrenzen der Komponenten, niedrigste Umgebungstemperatur  $-40\text{ °C}$ ) gefiltert. Schließlich wurden die thermischen und elektrischen Eigenschaften der Flüssigkeiten verglichen. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Flüssigkeiten wurden die Kühl- und Isoliermedien ausgewählt, die weiter untersucht und getestet werden sollten. In der folgenden Tabelle 1 sind die detaillierten Ausschlusskriterien aufgeführt.

**Tabelle 1:** Ausschlusskriterien der Kühl- und Isolierflüssigkeiten

<b>Ausschlusskriterien</b>	
1.	Der Flammpunkt der Kühlflüssigkeit muss höher als die Betriebstemperatur der Systemkomponenten sein.
2.	Der Stockpunkt der Kühlflüssigkeit muss unter der niedrigsten Umgebungstemperatur liegen.
3.	Zur besseren Kühlung werden Kühlflüssigkeiten mit geringerer Viskosität bevorzugt.
4.	Bei direkter Flüssigkeitskühlung muss die Kühlflüssigkeit dielektrisch isoliert sein.
5.	Zur Auswahl sollte die Beständigkeit der Kühlflüssigkeit bei Dauerbelastung unter Teamfaktoren (z.B. bei anderen Anwendungen) bekannt sein.
6.	Die Kühlflüssigkeit muss mit den Materialien des Kühlsystems und den Materialien der Systemkomponenten verträglich sein.

Für den Einsatz als Kühl- und Isoliermedium in der Luftfahrt können verschiedene Flüssigkeiten ausgewählt und erprobt werden. Im Bereich der Hochspannungstechnik werden in den letzten Jahren vermehrt alternative Isolierflüssigkeiten eingesetzt. Dies sind beispielsweise Gas-to-Liquid Öle (GTL Öl), synthetische und natürliche Esterflüssigkeiten oder Silikonöle. Ein Vorteil dieser Isolierflüssigkeiten im Gegensatz zum konventionellen Mineralöl besteht in einem erhöhten Flamm- und Brennpunkt und einer besonderen Alterungsfestigkeit. Ester-Isolierflüssigkeiten besitzen hingegen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eignen sich vor allem für höhere Betriebstemperaturen.

In der Luftfahrtindustrie werden Turbinenöle bereits zur Schmierung und Kühlung der mechanischen Komponenten von Flugzeugtriebwerken wie Lagern und Getrieben verwendet. Typischerweise haben Turbinenöle einen Flammpunkt von bis zu 220 °C, so dass diese eine ausgezeichnete Oxidations- und Thermostabilität für eine langfristige Leistung aufweisen. Gleichzeitig sind Turbinenöle mit niedriger Viskosität ideal für den Einsatz in Umgebungen mit niedrigen Temperaturen. Zusätzlich haben Turbinenöle auch gewisse Isoliereigenschaften und können zur Kühlung und Isolierung elektrischer Komponenten in Generatoren und Elektromotoren eingesetzt werden. Allerdings enthalten Turbinenöle eine Reihe von Additiven zur Verbesserung der Korrosions- und Verschleißfestigkeit, was zu einer Verringerung der elektrischen Festigkeit der Turbinenöle führen könnte. Deshalb müssten die Turbinenöle vor allem in Hinblick auf eine ausreichend hohe elektrische Festigkeit untersucht werden.

Neben den kohlenwasserstoffbasierten Flüssigkeiten sollten auch polare Flüssigkeiten, die als Kühlmittel in verschiedenen Gebieten Anwendung finden, untersucht und erprobt werden. Die fluorierten dielektrischen Flüssigkeiten sind reaktionsträge, nicht brennbar und elektrisch nicht leitend. Dies erhöht die Sicherheit des Kühlsystems. Außerdem haben diese Flüssigkeiten einen niedrigen Siedepunkt. Beim Verdampfen der Flüssigkeit wird den elektrischen Komponenten eine große Menge an Wärme entzogen. Daher eignen sich diese Flüssigkeiten für die ein- und zweiphasige Tauchkühlung von empfindlicher Leistungselektronik und Batterien.



## 7 Konferenzen und Exkursionen

### Teilnahme an Konferenzen

Mit der Eindämmung der Corona-Pandemie konnten dieses Jahr verstärkt nationale und internationale Konferenzen in Präsenz stattfinden, die in vorherigen Jahren in hybrider Form stattfanden oder komplett ausfallen mussten. Daher konnte das Team des Schering-Instituts nach längerer Zeit an unterschiedlichen Konferenzen teilnehmen und eigene Forschungsergebnisse vor nationalem und internationalem Publikum präsentieren sowie auch mit anderen Forschern aus aller Welt direkt in Kontakt treten.

Dieses Jahr wurden Beiträge des Schering-Instituts auf 3 Fachkonferenzen vorgestellt. Zu diesen gehören die Konferenzen *International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* in Spanien, die *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)* in Japan, sowie die letzte diesjährige nationale Konferenz *VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2022* in Berlin, die vom 08.11 - 10.11.22 stattfand.

### Besuch der IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)

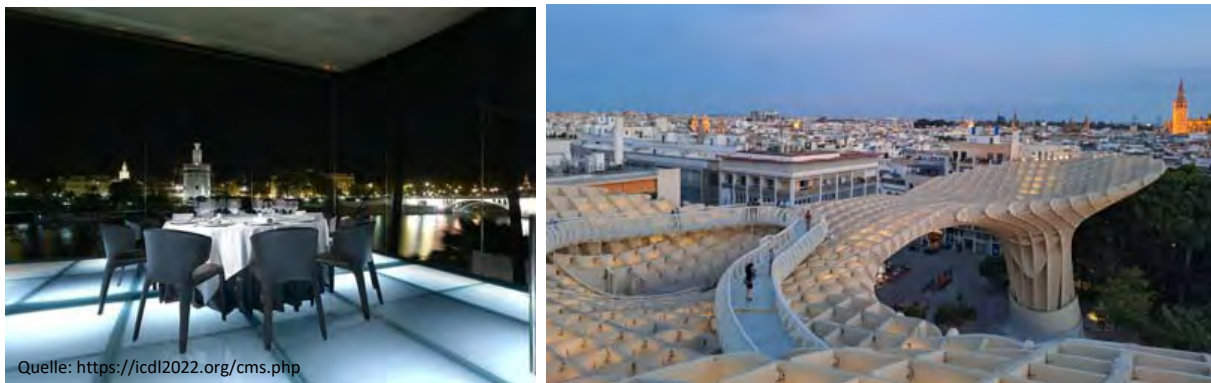
Nachdem die ICDL durch die Corona-Pandemie ein Jahr pausiert hat, fand sie dieses Jahr vom 29.05.2022 - 02.06.2022 in Spanien an der Universität Sevilla statt. Es nahmen ca. 200 Besucher teil, die unter guten Wetterbedingungen von 34 Grad anreisen und die Zeit vor Ort genießen konnten, was in Bild 1 verdeutlicht ist.



**Bild 1:** Konferenzteilnehmer\*innen der Konferenz vor der Escuela Superior de Ingenieria in Sevilla

Die ICDL versteht sich als forschungsorientierte Konferenz und bietet eine Plattform für Diskussionen und Austausch von Ideen und Ergebnissen sowie praktischen Erfahrungen zu den Eigenschaften und Anwendungen von isolierenden Flüssigkeiten. Besonderes Augenmerk wird auf Fluidodynamik, Elektrische Entladungen und Durchschläge sowie neue Erkenntnisse in der Grundlagenforschung gelegt.

Das Programm beinhaltete neben den Fachvorträgen, ein Cigré-Tutorial, das sich mit den Anforderungen und Prüfnormen für dielektrische Flüssigkeiten aus der Sicht von Transformatorenkonstrukteuren befasste und das Verhalten dielektrischer Flüssigkeiten unter verschiedenen elektrischen Beanspruchungen thematisierte. Daneben wurde das Rahmenprogramm durch gemeinsame Abendveranstaltungen abgerundet, die einen lockeren Rahmen zum regen Gedankenaustausch und Vernetzen boten (siehe Bild 2). Hierzu gehörten die Eröffnungs-Exkursion zum Metrosol - Setas de Sevilla und die Exkursion zum Alcázar, der mittelalterlichen Königspalast von Sevilla. Abgerundet wurde das Rahmenprogramm mit einem Abschluss-Dinner an der Guadalquivir.



**Bild 2:** Das Gala-Dinner (links) und Metrosol - Setas de Sevilla (rechts)

Auf der 5-tägigen Konferenz wurde das Schering-Institut durch Frau Homeier und Frau Özdemir mit jeweils einem Konferenzbeitrag vertreten. Frau Homeier stellte ihre neuesten Ergebnisse zum Thema „Modified Dissolved Gas Analysis with Additional Detection of Higher Hydrocarbons for Transformer Fault Diagnosis“ im Rahmen eines Vortrags vor. Frau Özdemir hielt ebenfalls zu ihrem Forschungsschwerpunkt „Investigation of the Diffusion Behaviour of Different Acid Configurations in Insulating Paper in a Closed Transformer System“ einen Vortrag.

## VDE Hochspannungstechnik 2022

Nach einer reinen Onlineveranstaltung in 2020 fand dieses Jahr zum ersten Mal seit 2018 die Fachtagung „VDE Hochspannungstechnik“ in Berlin vom 08.11.2022 bis 10.11.2022 wieder in Präsenz statt. Am ersten Konferenztag wurde in Tutorials ein Einblick in den Arbeitsstand verschiedener Cigré Arbeitsgruppen gegeben. Hierbei ging es unter anderem um die Besonderheiten von Vor-Ort Inbetriebnahmen von Leistungstransformatoren in Japan und China oder um neue Prüfmöglichkeiten von kunststoffisolierten Energiekabeln. Am zweiten und dritten Konferenztag wurden in parallelen Sessions neue Erkenntnisse aus den Bereichen Prüfen und Messen, Werkstoffe und Isoliersysteme, Diagnose von Transformatoren und anderen Themengebieten der Hochspannungstechnik vorgestellt und diskutiert. Die Schwerpunkte lagen dabei in diesem Jahr auf neuen Technologien im Hinblick auf die Digitalisierung und die Energiewende. Die Mitarbeitenden des Schering-Instituts haben in diesem Jahr insgesamt sechs Veröffentlichungen zu den Themen Asset-Management, der Alterung von polymeren Isolierstoffen und zur Diagnose und Untersuchung von Transformatoren vorgestellt (siehe Bild 1).



**Bild 1:** Präsentation von Frau Homeier zu höherwertigen Kohlenwasserstoffen

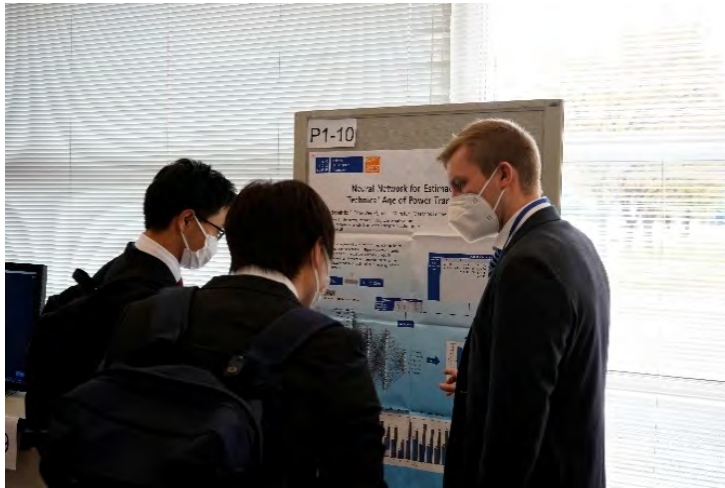
Fast alle Doktorandinnen und Doktoranden des Schering-Instituts konnten an der Veranstaltung teilnehmen und genossen neben den interessanten Diskussionen auch die Abendveranstaltung (siehe Bild 2).





**Bild 2:** Schering-Team bei der Abendveranstaltung

## Besuch der internationalen Konferenz für Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)

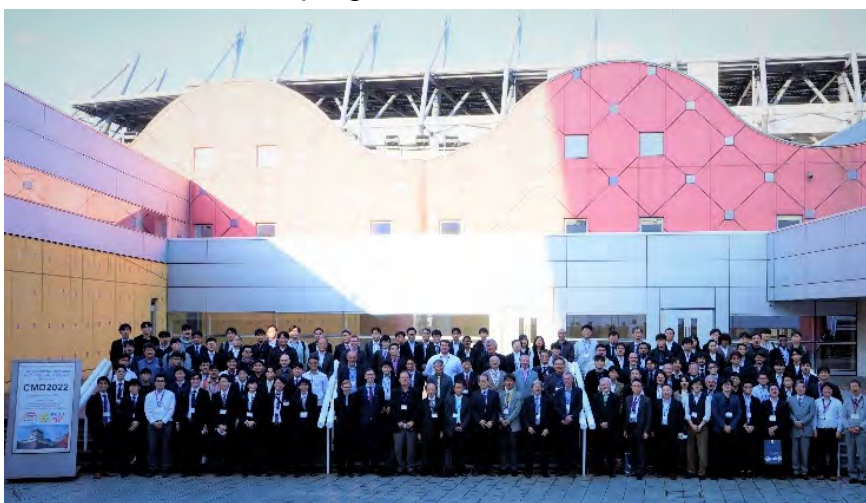


**Bild 1:** Herr Schnittker im wissenschaftlichen Austausch

Die neunte internationale Konferenz für Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) fand vom 13.-18. November 2022 in Kitakyushu, Japan statt. Aufgrund der extremen Einreisebeschränkungen, die Japan wegen der Coronapandemie verhängt hatte, war lange unklar, ob die Konferenz nur online stattfinden würde. Nachdem die Einreisebeschränkungen zum 11. Oktober gelockert wurden, konnten die Reisevorbereitungen starten. Schwerpunkte der Konferenz

sind die Überwachung, Fehlerdiagnose und Alterungsbewertung von elektrischen Energieanlagen, insbesondere die Teilentladungs- und Raumladungsmessung, Methoden effektiver Instandhaltung, Einsatz von KI-Technologien sowie Sensortechnologien. Die hybrid stattfindende Konferenz zählte 272 Teilnehmer (212 vor Ort und 60 online) mit 178 präsentierten Beiträgen. Herr Schnittker stellte den Beitrag „Neural Network for Estimating the Technical Age of Power Transformers“ vor.

Neben den Präsentationen gab es auch interessante Workshops z. B. zur Verwendung von Weibull-Verteilung für die Entscheidungsfindung im Asset Management oder zum Bau von Messeinrichtungen zur Messung von Raumladungen in realen Hochspannungskabeln. Eine Exkursion zum Batteriespeicherkraftwerk Buzen (50MW, 300MWh) rundete das Rahmenprogramm ab. Eine interessante Neuerung war auch das „Demo



**Bild 2:** Teilnehmer der CMD 2022 in Kitakyushu, Japan

Event“ in der angegliederten Fachaussstellung. Dafür hatten die Gastgeber extra ein Hochspannungsversuchsfeld in der Ausstellungshalle eingerichtet und die ausgestellten Teilentladungsmess- und Ortungsgeräte verschiedener Hersteller konnten direkt miteinander verglichen werden.



## Transformer Life Management Tagung

Die diesjährige Transformer-Life-Management Tagung, welche jährlich an wechselnden Orten in Deutschland ausgetragen wird, fand am 19. und 20. September im bayerischen Bad Gögging statt. Die Fachtagung, organisiert in Kooperation zwischen der Firma Energy Support GmbH, Hitachi Energy Germany AG und dem Schering-Institut, welches für den wissenschaftliche Vorsitz und die Tagungsleitung verantwortlich ist, zählte in diesem Jahr mehr als 200 Teilnehmer und 29 Fachaussteller. Neben den in fünf Themenblöcke unterteilten Fachvorträgen fanden vier Workshops aus den Themenbereichen Asset-Management, Transformatoren-Datenbanken, Monitoring und „Transformers Go Green“ statt, sowie erstmalig eine Poster Session mit Beiträgen zu aktuellen Themen aus der universitären Forschung.



**Bild 1:** TLM 2022 in Bad Gögging

Aufgrund klimapolitischer Ziele und einem stetigen, technologischen Fortschritt gehen in der Energieversorgung neue Herausforderungen einher, vor allem im Bereich der Versorgungssicherheit. Im elektrischen Energieversorgungsnetz stellen Transformatoren ein wichtiges Betriebsmittel zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie dar und verbinden die verschiedenen Spannungsebenen des Stromnetzes miteinander. Demnach steht die Betriebssicherheit von Transformatoren im direkten Zusammenhang mit einer sicheren und effizienten Energieversorgung. Das neue Zeitalter in der elektrischen Energietechnik stand in diesem Jahr auf der Tagesordnung, wie auch

neue Technologien, beispielsweise die Elektrifizierung der Seeschifffahrt, zukünftige Gleichspannungssysteme sowie Traktions- und Spezialtransformatoren. Zudem standen die weiteren Themenblöcke Zustandsdiagnose und Monitoring, Isolierflüssigkeiten für Transformatoren und das Lebensdauermanagement im Mittelpunkt, mit dem Ziel eines zuverlässigen Transformatorbetriebs, einer optimalen Wartung, einer hohen Betriebssicherheit und einer langen Lebensdauer.

Demnach spricht die TLM, wie bereits bei vorherigen Veranstaltungen, Experten, Betreiber, Hersteller, Zulieferer, Aussteller und Wissenschaftler an und bietet eine ausgezeichnete Plattform zur Diskussion von Problemen und Herausforderungen, zum Austausch der neusten Entwicklungen im Bereich der Transformatortechnik und zum Pflegen und der Erweiterung des eigenen Netzwerkes.

Die Vorbereitungen für die nächste Fachtagung haben bereits begonnen. Die TLM 2023 wird am 18. und 19. September im Mercure Hotel Maininsel in Schweinfurt stattfinden. Neben den wie immer interessanten Beiträgen wird es auch wieder ein hochspannendes Abendprogramm geben.



## Teilnahme an der CIGRE Working Group JWG D1/A2.77

**Kristin Homeier, Moritz Kuhnke**

In der CIGRE Working Group D1/A2.77 wird vor allem die Thematik von Isolierflüssigkeitstests für elektrische Betriebsmittel behandelt, insbesondere der Gas-in-Öl-Analyse, aber auch die Messungen von Furanen, Säuren, Alkoholen sowie weiteren chemischen und physikalischen Messungen als Diagnosemöglichkeiten zur Zustandsbewertung von der festen Isolierstoffkomponente in flüssigkeitsgefüllten elektrischen Betriebsmitteln.

Dazu wurde diese Arbeitsgruppe in drei große Task Forces (TF) untergliedert: TF 1 mit den allgemeinen Messaspekten, TF 2 mit dem Datenmanagement sowie TF 3 mit den Nachbildungen und Fallbeispielen. Die Teilnehmer vom Schering-Institut Herr Prof. Peter Werle, Herr Moritz Kuhnke und Frau Kristin Homeier sind vor allem in der TF 1 und TF 3 aktiv. Herr Prof. Werle leitet die Task Force 1, die sich vor allem auf den Ostwald-Koeffizienten und den Verteilkoeffizienten in der Headspace-Technik spezialisiert hat und zudem auch die Möglichkeiten neuer DGA-Sensoren wie Helium-, NDIR oder photoakustische Detektoren analysiert und verifiziert. Das Schering-Institut hat insbesondere für die Messung von Gaslöslichkeiten besondere Erfahrungen und hat einige Möglichkeiten zur Bestimmung der Gaslöslichkeit entwickelt und erprobt. Mit dieser Erfahrung wurde im Schering-Institut eine vereinfachte, kostengünstige Messmöglichkeit zur Bestimmung des Ostwald-Koeffizienten (OC), die auch in anderen Laboren durchgeführt werden kann, entwickelt, welche auf der DGA mit Vollvakuumgasungseinheit basiert und trotzdem noch eine hinreichende Genauigkeit aufweist. Daneben wurde von Frau Senja Leivo und Herrn Jarkko Larkio von *Vaisalla*, die ebenfalls Teilnehmer der CIGRE Arbeitsgruppe sind, eine einfache Messmethodik entwickelt, die die Bestimmung der Verteilkoeffizienten (PC) in der Headspace-Technik erlaubt.

Die beiden Messmöglichkeiten wurden im Rahmen eines Round Robin Tests (RRT) in Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit mit ausgewählten Flüssigkeiten und Gasen erprobt. Es wurden erste vielversprechende Messergebnisse erzielt. Allerdings haben in dem ersten RRT zum OC nur wenige Labore teilgenommen, sodass hier eine statische Auswertung erschwert wurde. In den letzten Monaten wurde nun ein zweiter RRT durchgeführt, deren Ergebnisse aktuell ausgewertet werden. Dieses Mal nahm eine größere Anzahl an Laboren an dem RRT teil, so dass eine statistische Bewertung begünstigt wird. Nach diesem zweiten RRT wird entschieden, wie es im nächsten Jahr dann weitergeht.

## Exkursion zur Maschinenfabrik Reinhausen

Am Mittwoch, 21.09.2022 besichtigten das Kollegium des Schering-Instituts die Maschinenfabrik Reinhausen (MR) in Regensburg. Nach einer kurzen Begrüßung stellten Herr Dr. Viereck, Herr Kirchner und Herr Gruber zunächst das 1868 gegründete Familienunternehmen MR vor. Anschließend wurde das Funktionsprinzip eines Stufenschalters rekapituliert und ein Schaltvorgang eines Stufenschalters live demonstriert. Weiter stellte Herr Gruber das System ETOS zur Erfassung und Auswertung aller relevanten Betriebsdaten eines Transformators vor. Abschließend präsentierte Herr Dr. Viereck die neueste, vibroakustische Stufenschalterüberwachung. Ein Sensor zeichnet das Vibrationsprofil eines Schaltvorgangs auf und mit Hilfe eines Algorithmus des maschinellen Lernens kann selbstständig ein individueller Grenzwert ermittelt werden. Nach einer Werksführung durch die Stufenschaltermontage konnten bei einem gemeinsamen Mittagessen die Informationen verdaut werden. Die Exkursion wurde mit einer Führung durch das Versuchsfeld von MR mit vertrautem Ölgeruch abgeschlossen.



**Bild 1:** Kollegium des Schering-Instituts sowie Herr Dr. Viereck von MR (links) bei der Besichtigung der Maschinenfabrik Rheinhausen

## 8 Veröffentlichungen

### **Transformers Magazine, Volume 9, Issue 1, Januar 2022**

*Possibility of electric arc detection in power transformers by directly embedded photoconductive elements in the transformer tank*

A. Akbari, R. Sargazi, P. Werle, M. Kuhnke

### **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 29, Issue: 1, pp. 119 – 126, Februar 2022**

*Study of Oil/Pressboard Creeping Discharges under Divergent AC Voltage Part 3: Effects of Temperature and Stress Type*

X. Zhou, P. Werle, E. Gockenbach, M. Imani

### **Water and Energy International, Volume 65r, Issue 1, April 2022**

*Possibility of Electric Arc Detection in Power Transformers by Directly Embedded Photoconductive Elements in the Transformer Tank (Limitations and Obstacles-An experimental investigation)*

R. Sargazi, A. Akbari, M. Kuhnke, P. Werle

### **IEEE Transactions on Plasma Science, Volume: 50, Issue: 9, pp. 3169 – 3177, September 2022**

*Simulation of Negative and Positive Corona Discharges in Air for Investigation of Electromagnetic Waves Propagation*

V. Javandel, A. Akbari, M. Ardebili, P. Werle

### **International Conference on Hydropower and Dams Development for Water and Energy Security – Under Changing Climate, 07. – 09.04.2022, Rishikesh, India**

*Possibility of Electric Arc Detection in Power Transformers by Directly Embedded Photoconductive Elements in the Transformer Tank (Limitations and Obstacles - An experimental investigation)*

R. Sargazi, A. Akbari, M. Kuhnke, P. Werle

### **IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), 29.05. – 02.06.2022, Seville, Spain**

*Investigation of the Diffusion Behaviour of Different Acid Configurations in Insulating Paper in a Closed Transformer System*

B. Özdemir, Y. Wang, P. Werle

*Modified Dissolved Gas Analysis with Additional Detection of higher Hydrocarbons for Transformer Fault Diagnosis*

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

*Determination of Partition Coefficients of Gases for Insulation Liquids - Results of a CIGRE WG Round Robin Test*

S. Leivo, J. Larkio, P. Werle, F. Scatiggio

**IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 03. – 07.07.2022, Palermo, Italy**

*Set-Up for Space Charge Measurement with LIPP-Method During Aging of Polymeric Insulating Materials Under High DC Voltage*

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

**CIGRE 2022, 28.08. – 02.09.2022, Paris, France**

*Novel Fiber Optic Sensor Technology for Determining the DP Value of Insulation Paper for Transformers*

T. Münster, P. Werle, K. Hämel, J. Preusel

**IEEE International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), 06. – 08.09.2022, Pilsen, Czech Republic**

*Review on Space Charge Induced Aging and Voltage Endurance Tests of Polymeric Insulating Materials Under High DC Voltage*

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

**Transformer Life Management (TLM), 19. – 20.09.2022, Bad Gögging, Deutschland**

*Bildung von C4- und C5-Kohlenwasserstoffen als Fehlertypen in Isolierflüssigkeiten unter verschiedenen Fehlerszenarien in Leistungstransformatoren*

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

*Untersuchung des Diffusionsverhaltens von verschiedenen Säurekonfigurationen in Papier-Öl-Isolierungen*

B. Özdemir, Y. Wang, P. Werle

*Abschätzung des technischen Alters von Leistungstransformatoren mit einem neuronalen Netz*

H. Schnittker, P. Werle, T. Münster, M. Lottner

*Prediction of DP-Value of Power Transformers based on Machine Learning*

S. Schreiter, H. Lohmeyer, P. Werle, F. Derbel

*Möglichkeiten und Grenzen etablierter diagnostischer Verfahren*

S. Schreiter, H. Lohmeyer, F. Derbel, P. Werle

**Fachtagung VDE Hochspannungstechnik, 08. – 10.11.2022, Berlin Deutschland**

*Concept for Long-Term Space Charge Measurement of Polymeric Insulating Materials Under High DC Voltage Stress*

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

*Entstehung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen neben konventionellen Fehlern in der Isolierflüssigkeit von Leistungstransformatoren*

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

*A new method for health index determination for power transformers*

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

*Klassifikation von Messungen an Leistungstransformatoren*

H. Schnittker, M. Moh'd, P. Werle, M. Westbomke, T. Münster, M. Lottner

*Möglichkeiten und Grenzen diagnostischer Verfahren bei betriebsgealterten Transformatoren*

S. Schreiter, H. Lohmeyer, P. Werle

*On-Site Assembly, On-Site Rebuild, and On-Site High Voltage Testing of Power Transformers*

P. Werle

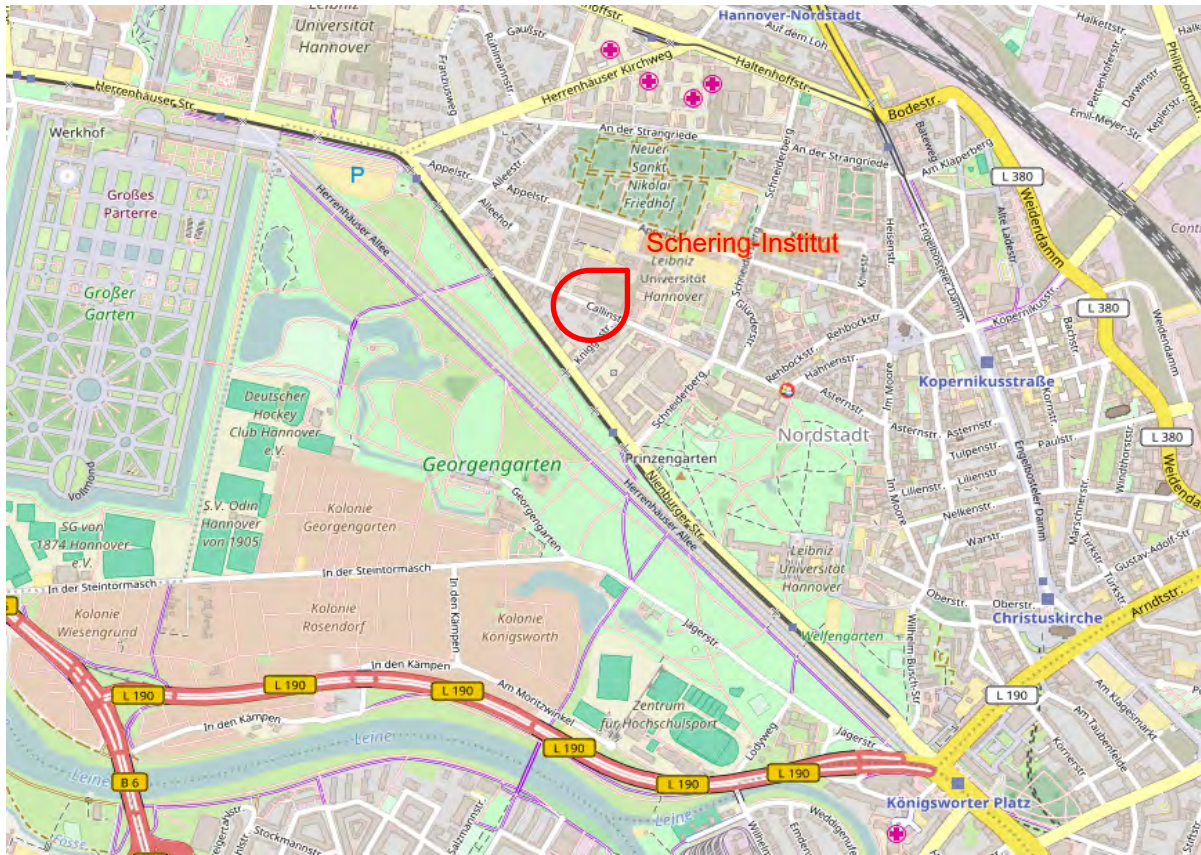
**IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 12. - 18.11.2022, Kitakyushu, Japan**

*Neural Network for Estimating the Technical Age of Power Transformers*

H. Schnittker, P. Werle, T. Münster, M. Lottner



## 9 Lageplan und Ausstattung



### Ausstattung

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

## Forschungsarbeiten

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](http://www.ifes.uni-hannover.de)  
[schering@ifes.uni-hannover.de](mailto:schering@ifes.uni-hannover.de)