

Jahresbericht 2024 – 2025

Lehrstuhl für
Hochspannungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

Vorwort

Sehr geehrte Freunde und Förderer des Lehrstuhls, liebe Mitarbeitende, liebe Partnerinnen und Partner,

es freut mich sehr, Ihnen den Jahresbericht des Lehrstuhls für Hochspannungstechnik für die **Jahre 2024 – 2025** übermitteln zu dürfen. Gerne möchten wir Ihnen hiermit einen aktuellen Einblick in unsere Arbeit der vergangenen beiden Jahre ermöglichen und wünschen Ihnen, dass Sie Freude an den spannenden Inhalten haben.

Die **Schwerpunkte unserer Forschungsthemen** leiten sich aus grundlegenden Fragestellungen sowie aus anwendungsorientierten Projekten ab. Hierbei gehen experimentelle Methoden Hand in Hand mit numerischen Verfahren für die Modellbildung und Simulation. Bei der Umsetzung bildet weiterhin eine wesentliche Säule der Tätigkeiten nach wie vor die Ausbildung und Förderung des akademischen Nachwuchses: Trotz der im Allgemeinen schwierigen Verfügbarkeit von Fachkräften konnten wir für unser Team am Lehrstuhl unlängst **einen neuen wissenschaftlichen Mitarbeiter** begrüßen, der sich nun in die Lehraufgaben sowie in die Forschungsprojekte einbringt. Somit konnten wir vor dem Hintergrund des Abgangs dreier Wissenschaftler in die Industrie den wissenschaftlichen Nachwuchs mit rund **3450 zu betreuenden Studierenden** in den letzten beiden Jahren weiterhin erfolgreich durchführen. Allen aktuellen sowie ehemaligen Mitarbeitenden spreche ich ausdrücklich meinen Dank für ihre wertvollen Beiträge, ihr besonderes Engagement und die anregenden Diskussionen im Team aus.

Besonders gratulieren möchte ich auch meinen **drei Promovenden**, die ihre Dissertationen erfolgreich eingereicht und verteidigt haben. Außerdem haben wir im Rahmen von **31 Bachelor- und Masterarbeiten** Studierende bei ihren wissenschaftlichen Arbeiten für ihre Abschlüsse fachlich betreut. Darüber hinaus wurden 17 Studierende in Projektarbeiten erfolgreich begleitet. Ich wünsche den Studierenden weiterhin viel Erfolg in ihrem Studium und auf ihren Karrierewegen.

Unsere **Aufgabenbereiche in der Forschung** erfassen weiterhin die dielektrische Charakterisierung von Isolierstoffen, die numerische Simulation von Entladungen in

Isoliergasen, die Anwendung neuartiger Fehlerdetektionsverfahren sowie mehrere Forschungsvorhaben im Bereich der optischen Messtechnik. Hier nimmt der Forschungsbereich der **Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)** eine wichtige Rolle ein und wir freuen uns über das Interesse an unseren Publikationen in diesen Bereichen. Besonders geehrt wurden in diesem Rahmen zwei Veröffentlichungen mit **Preisen auf der UPEC und EEEIC 2025**. Außerdem werden Forschungstätigkeiten im Bereich HGÜ in unterschiedlichen von Bund und Land NRW geförderten Projekten unterstützt.

In der Lehre führen wir weiterhin **sechs Vorlesungen in den Bachelor- und fünf Vorlesungen in den Masterstudiengängen** durch. Besonders spannend ist dabei die verbesserte Lerninfrastruktur für die Studierenden der neuen Studiengänge im Bachelor, welche wir in den Grundlagen der Elektrotechnik in zwei Semestern begleiten. Aber auch unsere Masterstudierenden kommen nicht zu kurz: Für sie haben wir unsere Vorlesungen grundlegend überarbeitet und ermöglichen ihnen mit der Internationalisierung eine gute Basis für ihren Berufseinstieg.

Ausdrücklich möchte ich mich hier für die hervorragende **Unterstützung durch meine Mitarbeiterinnen** sowie durch meine Kolleginnen und Kollegen in der Fakultät bedanken, die auch mit ihrer Hilfe einen reibungslosen Ablauf bei uns sicherstellen. Ich wünsche Ihnen allen ein frohes Weihnachtsfest und weiterhin viel Erfolg für das kommende Jahr.

Dortmund, Dezember 2025

Frank Jenau

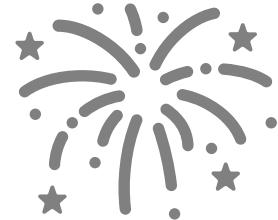


Inhaltsverzeichnis

1 Highlights der Jahre 2024 & 2025	7
2 Mitarbeiter (Stand: Ende 2025)	9
3 Aktuelle Förderprojekte	13
3.1 BIQsens – Integrierte optisch basierte Bi-Quadratur Detektion.	13
3.2 PDPQMS – Partial Discharge and Power Quality Measurement System	14
3.3 Grundlegende Untersuchungen des Einfusses der Morphologie von vernetzten Polyethylenen auf die Akkumulation und Beweglichkeit von Raumladungen	15
4 Veröffentlichungen	17
4.1 Publikationen.....	17
4.2 Promotionen.....	22
5 Studentische Arbeiten.....	29
5.1 Bachelorarbeiten	30
5.2 Masterarbeiten	45
5.3 Projektgruppen, Fachwissenschaftliche Projektarbeiten und Oberseminare.....	53
6 Lehrbetrieb	57
6.1 Vorlesungen	57

7	Geräte/Laborausstattung	66
7.1	Hochspannungs-/Hochstromlabore	66
7.2	DC-Werkstofflabor	69
7.3	Raumladungsmesslabor	70
7.4	Raumladungsmesssystem für koaxiale Kabel.....	71
7.5	Wechselbiegeanlage	73
7.6	Klimaprüfkammer	74
7.7	Optiklabor	75
7.8	Studentische Praktikumslabore	76
7.9	Messsysteme und -einrichtungen	77
8	Veranstaltungen	81
8.1	Tag der offenen Tür.....	81
8.2	SchnupperUni, SchülerUni & Girls Day.....	82
8.3	Tag der Elektrotechnik.....	83

1 Highlights der Jahre 2024 & 2025



Forschung

- ✓ **7 laufende Projekte**
- ✓ **2 abgeschlossene Projekte**
- ✓ **720 Tsd. € öffentliche Fördermittel**
- ✓ **149,5 Tsd. € bilaterale Fördermittel**
- ✓ **2 neue Kooperationen**

Publikationen

- ✓ **3 Dissertationen in 2025**
- ✓ **10 Veröffentlichungen in 2024**
- ✓ **6 Veröffentlichungen in 2025**
- ✓ **1x „Best Poster Session Presentation“**
- ✓ **1x Preis für „Best Presentation by an Author under 30“**

Lehre & Studium

- ✓ **3 abgeschlossene Promotionen**
- ✓ **31 Abschlussarbeiter**
- ✓ **Ca. 3450 betreute Studierende**
- ✓ **10 Vorlesungen**

Wir sind jederzeit über unsere Homepage erreichbar!

Sie finden uns unter

Professur für Hochspannungstechnik (HST) - hst - TU Dortmund

oder über den folgenden QR-Code!



2 Mitarbeiter (Stand: Ende 2025)

Lehrstuhlinhaber

Frank Jenau, Univ.-Prof. Dr.-Ing.



Lehrstuhlgründer

Dirk Peier, Univ.-Prof. em. Dr.-Ing.

Wissenschaftliche Mitarbeitende

Saskia Düsdieker, M.Sc.

Julian Hanusrichter, M.Sc.

Carlos Fernando Hermosilla Morales, M.Sc.

Steffen Kreis, M.Sc.

Tobias Kuhnke, M.Sc.

Karsten Schloßer, M.Sc.

Jannik Noel Sobottka, M.Sc.

Bastian Zimmer, M.Sc.

Technische Mitarbeiter

Joachim Berns, Dipl.-Ing.

Jürgen Brombach, staatl. gepr. Elektrotechniker

Dennis Kriete, staatl. gepr. Techniker Energietechnik

Lehrbeauftragte

Ralf Merte, Dr.-Ing.

Friedhelm Pohlmann, Dr.-Ing.

Tycho Weißgerber, Dr.-Ing.

Ehemalige Mitarbeitende (seit 2024)

Kerstin Friebe, M.Sc.

Saskia Josefine Frobin, M.Sc.

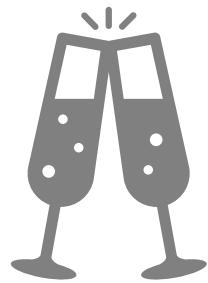
Philipp Huber, M.Sc.

Dustin Cirkel (Sekretariat)



Abbildung 1: Lehrstuhlteam anlässlich des Hochspannungssymposiums 2023

Das Team des Lehrstuhls gratuliert Prof. Jenau zur erfolgreichen Wahl zum Dekan der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik!



**Unsere Fakultät finden Sie unter
<https://etit.tu-dortmund.de/>
oder über den folgenden QR-
Code!**



3 Aktuelle Förderprojekte

Neben bilateralen Forschungsprojekten in den Bereichen Diagnistik, HVDC-Langzeitbelastung und Teilentladungssensorik gibt es am Lehrstuhl die folgenden öffentlich geförderten Forschungsprojekte. Bei näherem Interesse können Sie sich stets gerne bei Prof. Dr. Frank Jenau melden.



3.1 BIQsens – Integrierte optisch basierte Bi-Quadratur Detektion

Förderzeitraum: 2025 -2026

Fördervolumen: 150 Tsd. €

Gesamtvolumen: 167 Tsd. €

Programm: EFRE/JTF NRW Patentvalidierung

Förderkennzeichen: EFRE-20800478



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**

Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Das Ziel des Vorhabens ist die Validierung eines Patentes, welche die Temperaturkompensation und damit die Langzeitstabilisierung von polarimetrischen, optisch basierten Stromsensoren ermöglicht. Durch den Einsatz moderner optischer Stromsensoren ist eine nachhaltige Reduktion des Isolationsbedarfs von Stromwänden möglich, welches die Messtechnik sowohl in Hochspannungsgleichstromanlagen - wie auch Wechselstromnetzen- attraktiv gestaltet. Die Validierung des Patentes läuft in zwei Phasen ab. Innerhalb der Phase 1 wird die zugrunde liegende polarimetrische Auswertung des Messprinzips unter Laborbedingungen validiert und simulativ verifiziert. In Phase 2 wird ein Prototyp verwendet, welcher erste realitätsnahe Messungen erlaubt und eine experimentelle Verifikation liefern soll. Die Fertigung der Optiken er-

folgt zusammen mit der Photonics Foundry aus Bremen unter teilautomatisierten Fertigungsanlagen mit nanometerpräziser Justage der Komponenten. Das Förderprogramm bietet Potenzial in eine dritte Förderungsrunde mit Kooperationsprojekten der Industrie (Wissenstransfer) zu gehen. Interessierte dürfen sich Details gerne bei Prof. Dr. Frank Jenau erfragen.

3.2 PDPQMS – Partial Discharge and Power Quality Measurement System

Förderzeitraum: 2025 -2028

Fördervolumen: 255 Tsd. €

Programm: 8. Energieforschungsprogramm

Förderkennzeichen: 03EI6138C



Bei immer größeren Anteilen erneuerbarer Energien wird es schwieriger, das Stromnetz stabil zu halten. Der Bericht zur Versorgungssicherheit der Bundesnetzagentur vom Januar 2023 stellt dar, dass die ad-hoc-Eingriffe der Netzbetreiber in die Fahrweise der Kraftwerke und Anlagen deutlich zugenommen haben (Verdreibachung in den letzten 5 Jahren. Die Kosten für einen sicheren Netzbetrieb in Deutschland sind in den letzten Jahren ebenfalls stark gestiegen und lagen in 2023 bei knapp 3,1 Milliarden Euro. Die Einbindung der regenerativen Erzeugungsquellen erzwingt eine vermaschte Anwendung der im Übertragungsnetz jungen Gleichstrom(DC)-Technologie, z.B. in Form von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)-Trassen mit Konverterstationen. Darüber hinaus entstehen neue Unsicherheiten durch die nicht plan-

baren Energieabnahmemengen aus dem Netz. Die Diagnose- und Steuerungsmöglichkeiten zur Stabilisierung der Netze sind vor dem Hintergrund der sich ändernden Energielandschaft derzeit noch nicht ausreichend vorhanden. Somit steigt das Risiko von Blackouts. Im Hinblick auf die dargestellten Herausforderungen werden neue Lösungen zur Überwachung der Netzinfrastruktur dringend gebraucht, damit Schäden an den Energieanlagen vermieden und die unterbrechungsfreie Energieversorgung gesichert wird. Mit dem vorliegenden Projekt wird ein integriertes System für ein kontinuierliches OnlineMonitoring von Partial Discharge (Teilentladungen) und Power Quality (Spannungsqualität) in DC- und AC-Hochspannungsübertragungsnetzen entwickelt. Das neue System wird zum ersten Mal eine vernetzte Ermittlung beider Größen an Hochspannungsanlagen in einer Konverterstation ermöglichen und mit neuen Diagnose-Funktionen maßgeblich zur Verbesserung der Versorgungssicherheit im Übertragungsnetz beitragen. Die Entwicklung erfolgt auf der Grundlage eines RC-Spannungssensors basierend auf der SMD (Surface Mounted Devices)-Technologie.

3.3 Grundlegende Untersuchungen des Einflusses der Morphologie von vernetzten Polyethylenen auf die Akkumulation und Beweglichkeit von Raumladungen

Förderzeitraum: 2024-2027

Fördervolumen: 315 Tsd. €

Programm: DFG-Förderung

Projektnummer: 540115060

Gefördert durch



Ziel dieses Projektes ist die grundlegende Erforschung der Wirkzusammenhänge zwischen der Struktur und Morphologie von VPE und der Bildung, Akkumulation und Be-

weglichkeit von Raumladungen unter hoher Gleichspannungsbelastung. Da insbesondere im Falle vernetzter Polyethylenne neben der Struktur (Verzweigungs-, Vernetzungsgrad) auch deren Morphologie (Art, Anordnung und Ausrichtung der Kristalle, Kristallinität, Orientierung) und damit einhergehend deren thermische Eigenschaften (Relaxationstemperaturen, Schmelztemperatur) in weiten Grenzen beeinflussbar sind, werden VPE-Prüfkörper mit definierter Struktur und Morphologie hergestellt, mittels gepulster elektro-akustischer Methode (PEA) hinsichtlich Raumladungsansammlungen analysiert und Struktur-Eigenschafts-Beziehungen abgeleitet. Die Umsetzung dieses Vorhabens erfordert die Expertise und die kooperative Zusammenarbeit der Fachgebiete Polymerwissenschaften und Hochspannungstechnik. Daher wird dieses Projekt in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Biomaterialien und Polymerwissenschaften (BMP) an der TU Dortmund bearbeitet.

4 Veröffentlichungen

Zu den Veröffentlichungen Lehrstuhls gehören Publikationen auf Konferenzen, Journalartikel sowie erfolgreich verteidigte Dissertationen. Eine Übersicht bietet Tabelle 1.



Tabelle 1: Übersicht der Publikationen der Jahre 2024 & 2025

Jahr	Konferenzbeiträge	Journalartikel	Dissertationen
2024	8 Paper auf 2 Konferenzen	2 in 2 Journals	0
2025	5 Paper auf 2 Konferenzen	2 in 2 Journals	In: Universitätsbibliothek Dortmund

4.1 Publikationen

Zu unseren Forschungstätigkeiten veröffentlichen wir jeweils nach einem Peer-Review-Prozess unsere Ergebnisse in anerkannten Journals oder präsentieren unsere Forschungen auf internationalen Konferenzen. Gerne laden die jeweiligen Autor:innen und Prof. Dr. Frank Jenau zu einem wissenschaftlichen Austausch bei näherem Interesse zu den Veröffentlichungen ein.

2024

Kerstin Friebe, Frank Jenau	<i>Experimental Qualification and Sensitivity Study of Antipodal Patch Antenna Structures for Orientation independent Detection of Partial Discharges</i> , High Voltage, IET The Institution of Engineering and Technology, Wiley
Kerstin Friebe, Frank Jenau	<i>Evaluation Study on Wavelet Denoising of Antenna-Based PD Measurements in Strong Interference Environments Considering a New Reliability Score of Pulse Detection</i> , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation

Saskia Düsdieker, Tobias Kuhnke, Henry Geisler, Frank Jenau	<i>Design of a Modular 20kV RC Divider based on SMD Components for Power Quality Measurement Using 3D Printing</i> , UPEC 2024, Cardiff, Wales
Saskia Düsdieker, Karsten Schloßer, Til Cramer, Frank Jenau	<i>Risk Assessment Based on Ion Current Measurement on a DC-GIL with Metal Particles</i> , UPEC 2024, Cardiff, Wales
Karsten Schloßer, Tobias Kuhnke, Frank Jenau	<i>Study of the Analysis of Discharge Phenomena by Fluorescent Optical Partial Discharge Sensor under Different Electrical Stresses in Air</i> , UPEC 2024, Cardiff, Wales
Tobias Kuhnke, Frank Jenau	<i>Simulation Model for Incoherent Polarized Light in Spun-Fiber-Optic Current Sensors for The Application in High-Voltage Engineering</i> , UPEC 2024, Cardiff, Wales
Philipp Huber, Frank Jenau	<i>A Turnkey Solution for Computing the Static Breakdown Voltage in HVDC Applications Utilising Atmospheric Parameters</i> , UPEC 2024, Cardiff, Wales
Philipp Huber, Frank Jenau	<i>Innovative Numerical Method for Determining the Critical Space Charge Characteristic and the Ion Current due to Superimposed Voltage Stresses</i> , ETG Berlin (VDE Berlin), Berlin
Julian Hanusrichter, Tobias Kuhnke, Frank Jenau	<i>Surface Leakage Current Analysis of a 500 kV DC Voltage Divider under Natural Environmental Influences</i> , UPEC 2024, Cardiff, Wales
Bastian Zimmer, Frank Jenau, Erwin Burkhardt	<i>Inductive sensor concept for partial discharge monitoring of power cables based on a coil with a magnetic flux concentrator that is less susceptible to saturation effects</i> , ETG 2024 (VDE Berlin), Berlin

2025

Saskia Düsdieker, Steffen Kreis, Frank Jenau, Gabriele Kern- Isberner	<i>Risk Assessment Based on Sensor Fusion for the Ion Current Measurement as a Diagnosis Method for HVDC Systems</i> , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
Philipp Huber, Julian Hanusrichter, Paul Freden, Frank Jenau	<i>Advanced and Robust Numerical Framework for Transient Electrohydrodynamic Discharges in Gas Insulation Systems</i> , MDPI Eng
Tobias Kuhnke, Frank Jenau	<i>Study on the Intrinsic Temperature Compensation of the Polarization Rotation Detection for Industrial Manufacturing of Fiber-Optic Current Sensor</i> , EEEIC / I&CPS Europe, 2025, Chania, Griechenland
Tobias Kuhnke, Frank Jenau, Justin Scheliga	<i>Polarization Rotation Detection for Polarimetric Fiber-Optic Current Sensors</i> , EEEIC / I&CPS Europe, 2025, Chania, Griechenland
Bastian Zimmer, Carlos Fernando Her- mosilla Morales, Frank Jenau	<i>Theoretical Study of Design Aspects of Inductive Partial Discharge Sensors with Focus on the Novel Flux Concentrator Concept</i> , UPEC 2025, London, UK
Karsten Schloßer, Tobias Kuhnke, Nico Blume, Frank Jenau Philipp Ralle, Andreas Steffen	<i>Study of a Fluorescent Optical Sensor for DC Partial Discharge Under Different Wavelength Shifting Materials</i> , EEEIC / I&CPS Europe, 2025, Chania, Griechenland

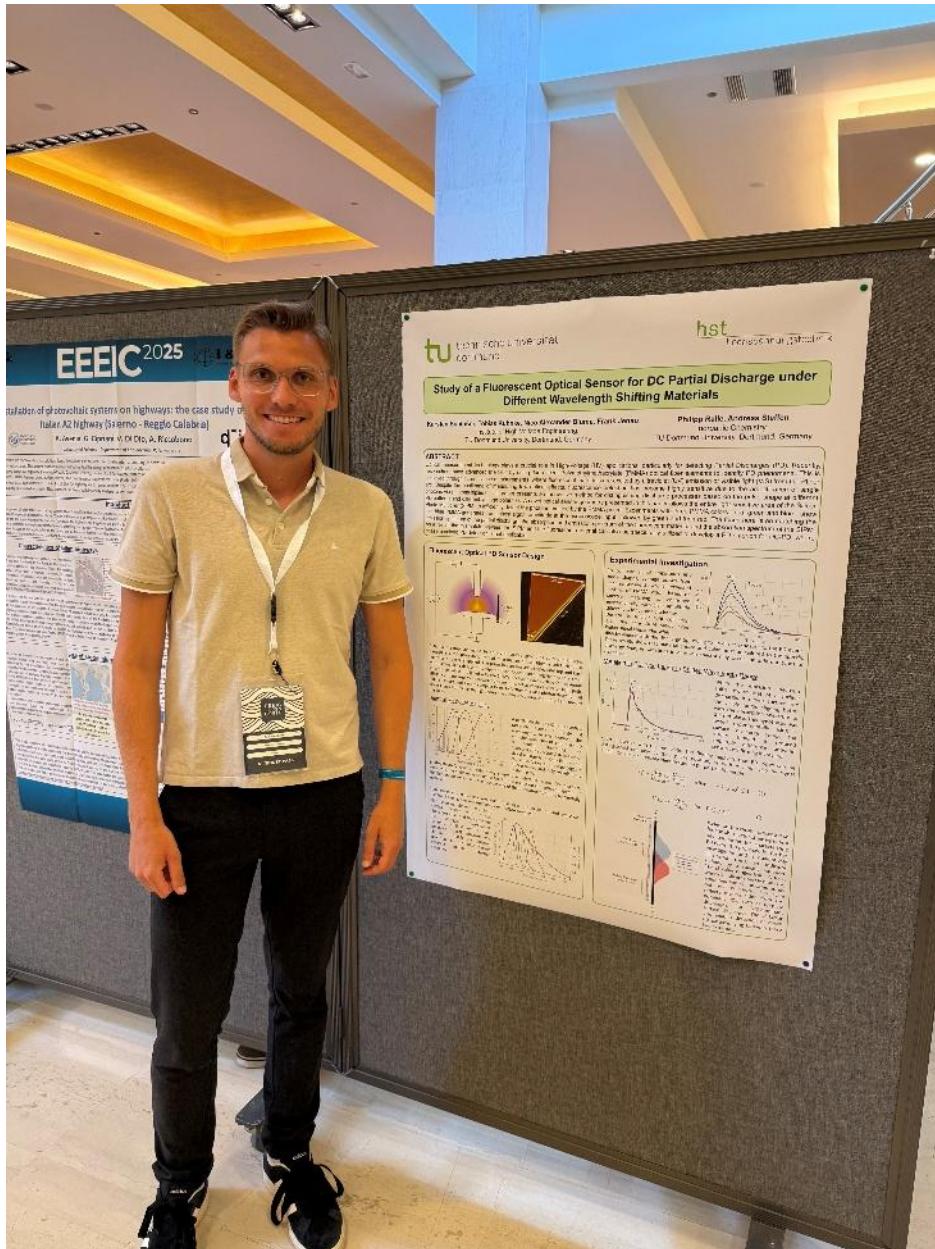


Abbildung 2: „Best Poster Session Presentation“-Preis auf EEEIC 2025

-
- | | |
|-------------------|--|
| Karsten Schloßer, | <i>Measurement of Charged Particle Movement in Insulating</i> |
| Tobias Kuhnke, | <i>Oil using Plastic Scintillating Fibers and Pulse Counting</i> |
| Jan Wimber, | <i>under High DC Voltage, UPEC 2025, London, UK</i> |
| Frank Jenau | |
-

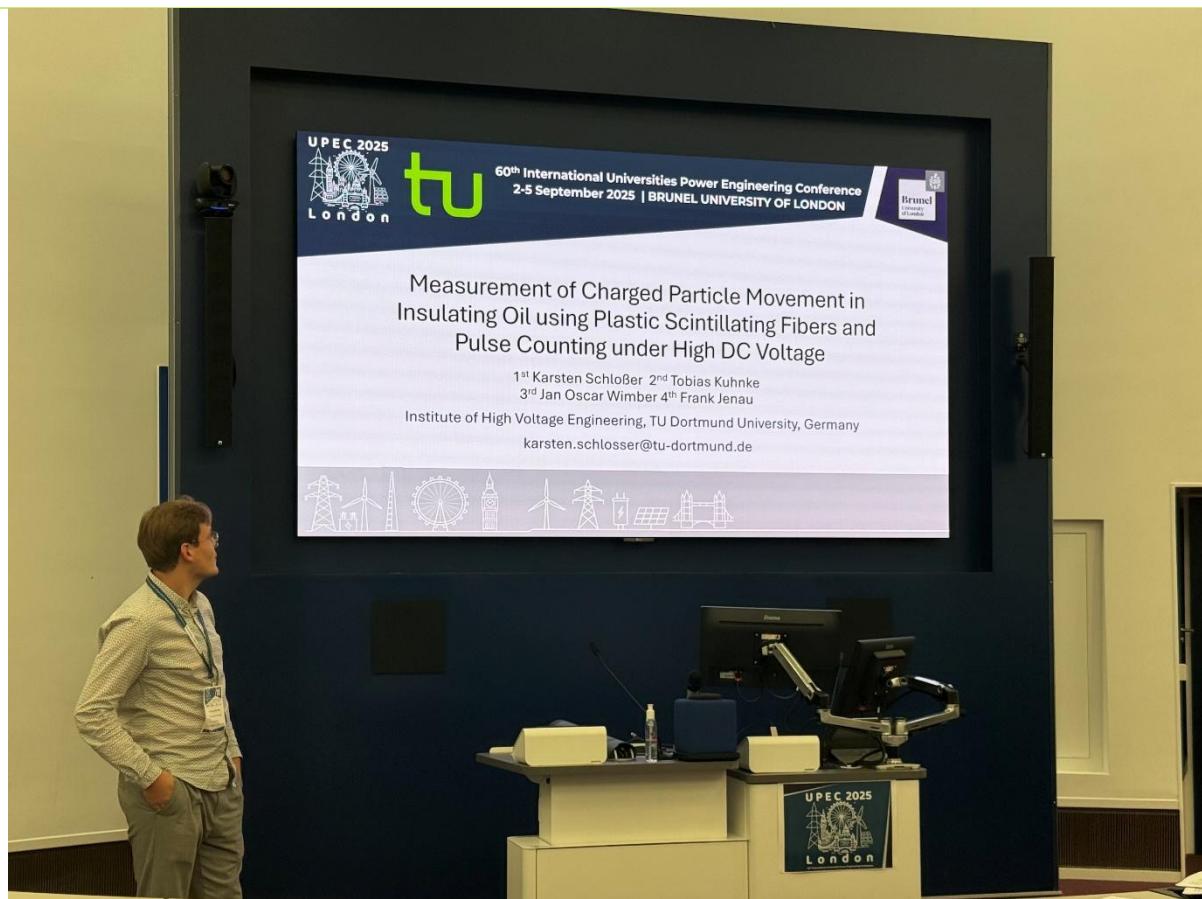


Abbildung 3: „Best Presentation by an Author under 30“-Preis auf UPEC 2025

4.2 Promotionen

Im Jahr 2025 erfreuen wir uns, dass drei Promovierende ihre Prüfungen erfolgreich abgeschlossen haben. Sowohl in der Diagnostik als auch der Numerik im Bereich der HVDC-Anwendungen leisten alle drei Arbeiten einen erheblichen Beitrag zum aktuellen Stand der Wissenschaft.



Dr.-Ing. Kerstin Friebe

Elektromagnetische Teilentladungsdiagnose mit ausrichtungsunabhängigen Patch-Antennen und robusten Entstörungsmethoden, 2025

Die Teilentladungsdiagnose ist ein wichtiger Bestandteil der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und dient der Gewährleistung der Übertragungssicherheit des Energieübertragungsnetzes. Teilentladungen (TE) sind Ionisierungsvorgänge aufgrund überhöhter Feldstärken und stellen ein lokales Versagen der Isolierung dar. Eine Möglichkeit der Erfassung von TE ist die elektromagnetische Erfassung, welche kontaktlos während des Betriebs erfolgt. In Umgebungen mit hohem Störpegel werden die TE-Signale allerdings von schmalbandigen und breitbandigen Störern sowie Rauschen vollständig überlagert. Neben klassischen Filterverfahren und Mittelung bietet hier das Wavelet-Denoising einen Ansatz zur Störreduktion. Im Rahmen des Wavelet-Denoisings wird eine skalierbare und verschiebbare Funktion, die sogenannte Wavelet-Funktion, über das Zeitsignal geschoben. Das Zeitsignal wird in Koeffizienten zerlegt, die dann nach bestimmten Schwellwertregeln zur Störunterdrückung manipuliert werden. Die Bestimmung des Schwellwerts erfolgt durch Verfahren zur Schätzung der Störumgebung. Es erfolgen Untersuchungen zur optimalen Wahl von Wavelet-Funktion, Schätzverfahren und Schwellwertregel. Zur Bewertung der Störreduktion, der Signalverzerrung durch den Entstörungsprozess und der Detektion der TE-Impulse wird ein Verfahren entwickelt, welches in einer Vorstudie mit einem synthetischen eindeutig bekannten Signal durchlaufen und im Anschluss auf die realen Messdaten angewendet wird. Ein spezieller Messaufbau ermöglicht die Validierung der erfolgreichen Isolation der TE-Signale von der Störumgebung durch gezielte Erzeugung von TE und eine parallele leitungsgebundene Referenzmessung.

Klassische Antennenstrukturen wie die logarithmisch periodische Richtfunkantenne werden bereits zur Erfassung von TE genutzt. Aufgrund ihrer Richtcharakteristik ist die Kenntnis über den Entstehungsort der TE erforderlich. Außerdem sind die Maße solcher breitbandigen Strukturen in der klassischen Bauform mit über 2 m in der Anwendung unhandlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden Patch-Strukturen zur ausrichtungsunabhängigen Erfassung von TE entworfen und qualifiziert. Durch Aufbringen von Kupferstrukturen auf ein Dielektrikum sind die benötigten geometrischen Dimensionen für den gleichen Frequenzbereich geringer. Es werden eine logarithmisch periodische Patch-Struktur, eine Hilbert-Fraktal-Struktur sowie eine Flügel-Struktur realisiert. Das Design erfolgt zur Realisierung einer Rundstrahlcharakteristik antipodal. Zur Qualifizierung der Strukturen erfolgt eine Gegenüberstellung der Strukturen hinsichtlich relevanter Antennenparameter, sowie der Eignung zur ausrichtungsunabhängigen Erfassung von TE-Signalen unter Berücksichtigung der Sensitivität gegenüber Ausrichtung und Störumgebung. Zur Bestimmung der Ladungsmenge, die im Rahmen der TE-Diagnose eine relevante Kenngröße zur Zustandsbewertung des Betriebsmittel darstellt, wird ein Kalibrierungsverfahren für die Strukturen entwickelt. Dabei wird zunächst eine geeignete Signalgröße bestimmt und durch Messungen mit Kalibrierimpulsen eine Korrekturfunktion festgelegt. Zur Validierung wird das Verfahren auf TE-Signale angewendet, die mit dem genannten Messaufbau erzeugt und den entwickelten Patch-Strukturen erfasst werden. Zur Bewertung der Genauigkeit der Bestimmung der Ladungsmenge wird diese synchron über einen integrierten Teilentladungsmesskreis nach IEC 60270 gemessen.

**Dr.-Ing. Saskia Düsdieker Die Ionenstrommessung als Diagnosemethode an
HVDC-Systemen unter Verwendung empirischer
und evidenztheoretischer Auswertungsverfahren,
2025**

Der Ausbau des Energieübertragungsnetzes mit Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) erfordert zuverlässige Monitoring- und Diagnosesysteme, um einen stabilen Langzeitbetrieb und somit die gesetzlich geforderte Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Zu den systemkritischen Komponenten gehören u. a. gasisierte Betriebsmittel, die entweder mit Schwefelhexafluorid oder einem alternativen Isoliergas betrieben werden. Da Diagnosen für Isoliergas-gefüllte Betriebsmittel entweder invasiv oder für Gleichspannung noch Gegenstand aktueller Forschungen sind, untersucht diese Arbeit die Eignung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode.

Dazu wird ein Konzept inkl. technischer Spezifikationen entwickelt und an einer Spitzplatte-Anordnung, Koaxialanordnung und einem RC-Spannungsteiler (in SMD-Bauweise in Helixform) unter Laborluft angewandt. Anhand von Referenzdaten erfolgen Vergleiche mit Fehlerprüfungen, die typische Fehlerfälle der Aufbauten nachbilden. Weiterführend sind Messergebnisse mittels empirischen Modells in Anlehnung an Datenauswertungen basierend auf Teilentladungen ausgewertet. Daneben sind evidenztheoretische Modelle dargestellt, die zur Fehlerdetektion und Ursachenunterscheidung unter Berücksichtigung der Datenfusion mit einem Koronaskop geeignet sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ionenstrommessung auf elektrische Feldverzerrungen reagiert und somit auf typische Fehler in den gewählten Aufbauten hinweist. Der Informationsgehalt der Ionenstrommessung wird weiterführend durch die Datenfusion mit Informationen aus Koronaskop-Aufnahmen ergänzt. Darüber hinaus eignen sich beide Modelltypen zur Datenauswertung, zum Stellen einer Diagnose und Risikoermittlung bzgl. des Ausfalls der jeweiligen Anordnung. Somit eignet sich die Ionenstrommessung als Alternative zur Teilentladungsmessung für isoliergasgefüllte HVDC-Systeme. Besonders die einfache Handhabung der Ionenstrommessung und die Auswertung durch empirische und evidenztheoretische Modelle ermöglicht die Anwendung

durch Fachpersonal ohne umfangreiches Expertenwissen. Ausblickend ist die Ionenstrommessung als Diagnosemethode auch automatisiert durchführbar und stellt damit ein Diagnosewerkzeug für HVDC-Anwendungen dar.



Abbildung 4: Promotionsprüfung von Frau Saskia Düsdieker am 29.09.2025; v.l.n.r.: Prof. Dr. Martin Pfost (Vorsitz), Prof. Dr. Frank Jenau (Referent), Fr. Saskia Düsdieker, Prof. Dr. Gabriele Kern-Isberner (Korreferentin)

Dr.-Ing. Philipp Huber

**Neuartiges modulares numerisches Framework
zur Beschreibung von gasförmigen Isolationsstre-
cken bei HGÜ-Anwendungen, 2025**

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der physikalisch fundierten Modellierung und Simulation gasförmiger Isolationsstrecken in Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen (HGÜ), insbesondere unter dem Einfluss neuartiger Spannungsbeanspruchungen. Vor dem Hintergrund der Energiewende und der zunehmenden Anwendung modularer MMC-Konverter entstehen bislang wenig untersuchte Belastungsszenarien, bei denen klassische Verfahren der Isolationskoordination an ihre Grenzen stoßen.

Im Fokus steht das veränderte elektrische Verhalten gasförmiger Isolierstoffe bei Mischbeanspruchung, etwa durch die Überlagerung von Schaltstoßspannungen mit bestehender DC-Vorbelastung – ein Phänomen, das insbesondere bei Pol-Erd-Fehlern auftritt und normativ bislang unzureichend abgebildet ist.

Zur Analyse wird ein ganzheitliches, modular aufgebautes Simulationsframework entwickelt, das mikroskopische stochastische Monte-Carlo-Modelle mit makroskopischen deterministischen Feldmodellen koppelt. Diese basieren auf konservativen Transportgleichungen und erlauben die effiziente Berechnung zeitlich aufgelöster Stromverläufe unter realitätsnahen Bedingungen.

Ergänzend werden neuartige Verfahren zur Bestimmung des Koronaeinsatzgradienten sowie zur Behandlung von Raumladungsdichten mit Lagrange-Multiplikatoren vorgestellt. Für stark inhomogene Felder und überlagerte Beanspruchungen wird ein bestehendes Leadermodell erweitert

und über eine Kopplung mit dem Koronamodell physikalisch konsistent ergänzt.

Die entwickelten Methoden werden analytisch und experimentell validiert und auf praxisrelevante Anwendungsszenarien übertragen. Im Mittelpunkt stehen die Bewertung von Korona- und Koppelströmen an hybriden HGÜ-Freileitungen sowie die Abstandsdimensionierung unter betrieblich realistischen Bedingungen.

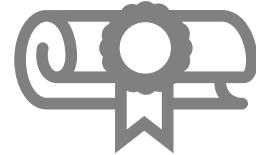
Die Arbeit liefert mit dem entwickelten Simulationsframework ein flexibel einsetzbares Werkzeug zur modellbasierten Analyse komplexer Beanspruchungssituationen. Die gewonnenen Erkenntnisse schließen normative Lücken bei Mischbeanspruchung, verbessern die Prognosefähigkeit elektrischer Feldverläufe und tragen zur sicheren und physikalisch fundierten Auslegung künftiger HGÜ-Systeme bei.



Abbildung 5: Promotionsprüfung von Herrn Philipp Huber am 22.10.2025; v.l.n.r.:
Prof. Dr. Martin Pfost (Vorsitz), Prof. Dr. Frank Jenau (Referent), Hr. Philipp Huber,
Apl. Prof. Dr. Dirk Schulz (Korreferent), Apl. Prof. Dr. Ulf Häger

5 Studentische Arbeiten

Nach wie vor ist eine unserer Kernaufgaben, die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Hier betreuen wir Studierende bei der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen in ihren Bachelor- und Masterarbeiten sowie Projektgruppen und Oberseminaren.



Insgesamt unterstützten wir 20 Bacheloranden und 11 Masteranden, um erfolgreich ihr jeweiliges Studium abzuschließen. Die folgenden Themen haben unsere Studierende dabei bearbeitet:

- Teilentladungsmessung mittels RC-Spannungsteiler für HVDC-Systeme
- Teilentladungsmessung mittels induktivem Wandler
- Optische Teilentladungsmesstechnik
- Raumladungsuntersuchung in Polymeren
- Numerische Berechnung von Entladungen bei unterschiedlichen Belastungen
- Teiletechnologie
- Diagnostik mittels Ionenstrommessung für HVDC
- Ableitstrommessungen & -berechnungen
- Integriertes Qualitätsmanagement.

Bei Interesse zu den Schwerpunkten oder einer spezifischen Arbeit können Sie sich gerne für einen Austausch an Prof. Dr. Frank Jenau wenden.

5.1 Bachelorarbeiten

Unsere Bacheloranden begleiten wir drei Monate während der Bearbeitung ihrer jeweiligen Aufgabenstellungen. Dabei bilden besonders aus, wie eine wissenschaftliche Fragestellung methodisch zu bearbeiten ist und geben aber gleichzeitig die Freiheit, ihre Aufgaben selbständig zu lösen. Auf dieser Grundlage leisten einige Bachelorarbeiten einen wichtigen Beitrag zu den Erkenntnissen und Publikationen des Lehrstuhls.

Mariam Abu Awwad, Untersuchung und Optimierung der Teilentladungsauskopplung an SMD-basierten ohmsch-kapazitiven Spannungsteilern für Teilentladungsmessungen
B.Sc.

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung einer Untereinheit eines ohmsch-kapazitiven Spannungsteilers. Die zu optimierende Untereinheit ermöglicht es, Teilentladungen über eine Induktivität im Rahmen der Spannungsmessung auszukopeln. Des Weiteren erfordern die Rahmenbedingungen zum Einsatz eines Hochspannungsteilers die Entwicklung eines Schutzkonzeptes für die optimierte Unterspannungseinheit. Abschließend vergleicht die Arbeit die Ergebnisse hinsichtlich der messtechnisch und simulativ erfassten Übertragungsfunktion mit einem kommerziellen Referenzsystem.

Iliass Adinda-Ougba, Erarbeitung und Bewertung eines Schirmkonzeptes für induktive Wandler zur Teilentladungsmessung an Hochspannungskabeln
B.Sc.

In dieser Arbeit wird ein Schirmkonzept für induktive Wandler zur Teilentladungsmessung an Hochspannungskabeln vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Abschirmung von HFCT-Sensoren (High Frequency Current Transformers), um Störsignale bei der Messung zu

minimieren oder vollständig auszuschließen. Für die Messungen werden HFCT-Sensoren eingesetzt, die zur Erfassung und Analyse der TE-Signale dienen. Die Arbeit fokussiert die Konzepte zur Abschirmung der Sensoren, um die Wirksamkeit der Abschirmungskonzepte zu prüfen. Abschließend zeigt die Arbeit mögliche Perspektiven für künftige Studien zur Abschirmung von HFCT-Sensoren bei der Teilentladungsmessung an Hochspannungskabeln auf.

Luke Aschhoff, B.Sc.

Untersuchung und Vergleich der Raumladungsausbildung in vernetzten HDPE-Proben mit unterschiedlich eingestellter Morphologie

Der durch die Energiewende motivierte Netzentwicklungsplan sieht einen großflächigen Ausbau des deutschlandweiten Übertragungsnetzes, insbesondere per Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), vor. Für die Übertragung per HGÜ werden vermehrt Kabel mit einer Polymer-Isolierung eingesetzt. Eine zentrale Problematik stellt dabei die Akkumulation von Raumladungen in Polymer-Isolierstoffen, wie Polyethylen, dar. Dies führt unausweichlich zu Feldverzerrungen und zu einer damit verbundenen beschleunigten Alterung bis hin zur Zerstörung des Kabels. Für die Messung der auftretenden Raumladungen wird häufig die gepulste elektroakustische Methode (PEA) herangezogen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden vernetzte Prüfkörper aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE) im Gegensatz zum häufig eingesetzten Polyethylen niedriger Dichte (LDPE) untersucht. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Struktur und Morphologie der verwendeten Prüfkörper gelegt. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche werden diese mit der beschriebenen Messmethode auf Raumladungsausbildung überprüft und verglichen. Dazu wird zunächst der Einfluss von Restladungen, Verunreinigungen und Ungenauigkeiten untersucht. Abschließend werden Prüfkörper mit unterschiedlich eingestellter Morphologie miteinander verglichen.

Im Zuge der statistischen Auswertungen hinsichtlich polymerwissenschaftlicher Kenngrößen, insbesondere bezüglich des Verstreckungsfaktors λ , kann ein Zusammenhang zwischen der Veränderung der Morphologie und der Raumladungsausbildung festgestellt werden. Auch der Einfluss von Restladungen und Verunreinigungen im Material ist anhand der Messergebnisse als signifikant zu bewerten. Die Messergebnisse legen weitere Untersuchungen zu HDPE-Isolierungen beziehungsweise deren Morphologie nahe.

**Nico Alexander Blume, Optimierung einer numerischen Berechnungsmethode für die Ausbildung eines ionisierenden Kanals
B.Sc.**

Die Bachelorarbeit widmet sich der Untersuchung eines neuen Ansatzes zur optischen Messung von Teilentladungen (TE) unter Verwendung von fluoreszierenden PMMA Prismen, die als optische Adapter fungieren. Mithilfe einer Spitze-Platte-Anordnung zur Erzeugung von verschiedenen Entladungsarten und TE-Pegeln können die Möglichkeiten und Grenzen des optischen Messsystems unter Verwendung verschiedenfarbiger PMMA-Varianten untersucht werden. Mit einem normgerechten Referenz-Messsystem, das zur konventionellen TE-Messtechnik gehört, ist zudem eine Vergleichsmessung zur Ermittlung der Beziehung zwischen dem optischen Messsignal und der praxiserprobten scheinbaren Ladung durchführbar. Die Auswertung dieser Versuche ergibt eine entladungsvorgangs-abhängige Korrelation zwischen dem Integral der optischen TE Impulse und der scheinbaren Ladung. Durch die hohe Abtastrate moderner, digitaler Speicheroszilloskope und die Geschwindigkeit der Ausleseschaltung besteht zusätzlich die Möglichkeit zur Impulsformanalyse.

Jan Borghoff, B.Sc.

**Analyse der Möglichkeiten zur Auskopplung von
Teilentladungen an einem ohmsch-kapazitiven
Spannungsteiler**

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit dem Ansatz, Teilentladungen an einem ohmschkapazitiven Spannungsteiler auszukoppeln. Der kapazitive Pfad des Spannungsteilers stellt für hochfrequente Ströme eine niedrige Impedanz dar, somit kann infolge eines Teilentladungsereignisses ein Strom gemessen werden, der im Zusammenhang mit der Entladung steht. In dieser Arbeit wurden zur Messung der Teilentladungsimpulse Hochfrequenz-Stromwandler verschiedener Windungszahlenverhältnisse und verschiedene Shunt-Widerstände in den Spannungsteiler eingebracht und messtechnisch analysiert. Dabei wurden Sensitivität, Impulsform und die Rückwirkung der Teilentladungsmessung auf die Übertragungscharakteristik des Spannungsteilers untersucht und bewertet. Durch vorbereitende Kleinspannungsmessungen wurden insgesamt 108 Prüflinge (100 Hochfrequenzstromwandler und 8 Shunts) betrachtet. Die Menge der betrachteten Prüflinge wurde nach einer kritischen Bewertung eingegrenzt; die geeignetsten Prüflinge wurden in einem Hochspannungsversuch anhand realer Teilentladungen weitergehend untersucht und bewertet. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass HFCT mit geringen Windungszahlen und Übersetzungsverhältnissen von $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ am besten für die Teilentladungsmessung geeignet sind. Dahingegen erwies sich die Teilentladungsmessung mittels Shunt als eher ungeeignet.

Halil Büyüköztürk, B.Sc.

**Modellierung von Teilentladungen in Luft unter
Berücksichtigung der Mischbeanspruchung von
HVDC**

Das Aufkommen von Teilentladungen bei Netzspannung für HGÜ kann sich durch harmonische Frequenzkomponenten oder Restwelligkeiten verändern. Vor diesem

Hintergrund beschäftigt sich diese Bachelorarbeit mit der Modellbildung von negativen Koronaentladungen unter Einfluss periodischer Spannungsstörung durch harmonische Frequenzen. Das entwickelte numerische Modell wird in verschiedenen Studien hinsichtlich der Entwicklung der Elektronen- und Ionendichte sowie Verschiebung des Potenzials untersucht, um Veränderungen im Teilentladungsverhalten zu erklären.

Rujun Cai, B.Sc.

**Experimental Investigation of Leakage Currents
on Solid Insulators with Contamination Layers un-
der the Load of DC Voltage and Superimposed DC
Voltage**

In this study, the leakage current of insulators with two different artificial contamination layers were investigated. In the first part of the work, the leakage current flowing across two contaminated insulators' surfaces, which generated by the high voltage DC (direct current) under different rH (relative humidity) will be evaluated. And in the second part of the work, the leakage current generated by two kinds of SV (superimposed voltage) will be evaluated. Analysis of the measurement results shows that, there are significant differences in the values of the leakage current propagating across two different contamination layers, when under the same high voltage DC generation, and the style of the contamination layers are an important factor in the fluctuation and value of the current curve, while for the leakage current value in SV measurement shows that, the degree of the contamination plays a more important role. This study provides a new perspective on the problem of leakage currents on contaminated insulator for HVDC (high voltage direct current) power, and although the study is limited to two samples of contamination layers, the evaluation and assumptions about the results of the measurement can still be used as a foundational model for further exploration in the future.

Philipp Dornseifer, B.Sc. Untersuchung und Vergleich der Raumladungsausbildung in vernetzten PE-Proben mit unterschiedlicher Kristallinität und Morphologie

Der Netzentwicklungsplan sieht in Deutschland einen Ausbau der Hochspannungs-gleichstromübertragung (HGÜ) vor. Dabei werden die HGÜ-Trassen zu einem erheblichen Teil als Kabeltrassen gebaut. Daher wird das Verhalten von Polymerisoliersystemen, insbesondere von Polyethylenen, im Gleichspannungsfall untersucht. Der zentrale Bestandteil der Forschung nach geeigneten Kabelisolierungen bei Gleichspannungsbelastung ist die Untersuchung der Raumladungsansammlung. Die gepulste elektro-akustische Methode (PEA) ermöglicht die örtliche und zeitliche Beobachtung der Raumladungen in der Isolierung. In dieser Arbeit wird die Raumladungsansammlung in Abhängigkeit der Morphologie und Kristallinität verschiedener Polyethylen (PE) untersucht. Es werden die Werkstoffe Low-Density-PE (LDPE), Low-Linear-Density-PE (LLDPE) und High-Density-PE (HDPE) verwendet. Diese weisen eine unterschiedliche Morphologie auf, bedingt unterschiedliche Kristallinität. Außerdem wird eine weitere Variation des Kristallanteils der Werkstoffe durch den Herstellungsprozess erreicht, indem die Abkühlung der Werkstoffe schlagartig oder langsam verläuft. Messtechnisch erfassst werden die Raumladungsausbildungen bei 10 kV/mm, 20 kV/mm, 30 kV/mm und 40 kV/mm für jeweils 30 Minuten, wobei nach der letzten Feldstärkebelastung im Messzyklus das Abbauverhalten der Raumladungen in den Proben bei einer angelegten Feldstärke von 0 kV/mm für weitere 60 Minuten aufgenommen wird. Zusätzlich werden für einige Proben zusätzliche Langzeitmessungen bei 40 kV/mm für 10 Stunden durchgeführt. Für die Auswertung der Messergebnisse werden der Field-Enhancement-Factor (FEF), die energetischen Trap-Tiefen, die gefangenen Ladungsträger in den traps und die Steigung der kumulierten Ladung als Kriterium verwendet. Die statistische Auswertung der vier Kriterien ergab keinen linearen Zusammenhang zwischen dem Kristallanteil eines Werkstoffs und der Raumladungsansammlung. Es gibt starke Indizien

dafür, dass der Kristallanteil, im Vergleich zwischen den Werkstoffen und auch innerhalb eines Werkstoffs mit unterschiedlicher Kristallinität, nur einen geringen Einfluss auf die Raumladungsausbildung hat.

Steffen Grawe, B.Sc.

Entwicklung eines Transimpedanzverstärkers für optische Teilentladungsmessung

Die Bachelorarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Transimpedanzverstärkers (TIV) für optische Teilentladungsmessungen. Die Entwicklung umfasst die Analyse des aktuellen Zustandes der optischen Teilentladungsmesstechnik, die grundlegende Konzeptionierung eines auf den Anwendungsfall optimierten Transimpedanzverstärkers sowie die Simulation von Schaltungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit. Nach Messungen zur Festlegung des Status quo und zur Analyse des Optimierungspotenzials wird ein Anforderungskatalog an den zu konzeptionierenden TIV formuliert. Im Fokus stehen dabei eine hinreichende Empfindlichkeit bei der Detektion von Strömen sowie eine verlässliche Verstärkung über ein breites Frequenzspektrum. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird ein Schaltungskonzept ausgewählt und in Form eines Prototyps realisiert. Im Anschluss werden mit dem Prototyp erneut optische Teilentladungsmessungen durchgeführt und die Messergebnisse hinsichtlich Quantität und Qualität mit den eingangs erfassten Referenzmessungen verglichen. Abschließend wird das Konzept anhand der Erfüllung des Anforderungskatalogs hinsichtlich seiner Eignung für optische Teilentladungsmessungen bewertet.

Jonas Hellwig, B.Sc.

Erstellung und Bewertung einer Luftspule zur Detektion von Teilentladungen in Mittelspannungsnetzen

Wegen des zunehmenden Ausbaus erneuerbarer Energien sowie der zunehmenden Elektrifizierung der Mobilität entsteht eine höhere Auslastung der Verteilnetze. Da die Stromversorgung gerade in urbanen Regionen durch Stromkabel gewährleistet wird, ist die Zustandsüberwachung der Stromkabel sinnvoll. Diese Überwachung erfolgt durch Detektion von Teilentladungen. Die Teilentladungsmessung ist nach DIN EN 60270 möglich und es besteht zusätzlich die Möglichkeit, Teilentladungen mithilfe induktiver Messsensoren zu detektieren. Gerade HFCT haben sich als induktive Messsensoren bewährt. Jedoch können diese bei hohen Betriebsströmen in Sättigung getrieben werden. Deshalb befasst sich diese Bachelorarbeit mit der Entwicklung eines nicht-standardisierten Messsensorsensors mit Luftspule zur Detektion von Teilentladungen. Diese Sensoren haben den Vorteil, dass sie nicht in Sättigung getrieben werden und sich deshalb bei sehr hoher Nennstrombelastung besser zur Detektion von Teilentladungen eignen. Vor diesem Hintergrund werden unterschiedliche Messsensoren hinsichtlich der Geometrie und Wicklungszahl erstellt. In einer Voruntersuchung werden diese untereinander und mit einem HFCT mit Flusskonzentrator verglichen. Danach erfolgt eine Analyse der Luftspulensor im Sättigungsbereich des HFCT mit Flusskonzentrator, um den Arbeitsbereich der Luftspulensorsoren einzugrenzen. Darauffolgend werden die Messsensoren mithilfe realer Teilentladungen analysiert.

Furkan Imamoglu, B.Sc.

Analyse der Teilentladungsortung mittels induktiver Sensoren an Energiekabeln der Mittelspannungsebene

Die Bachelorarbeit thematisiert die Teilentladungsortung mittels induktiver Sensoren

an Energiekabeln der Mittelspannungsebene. Dazu werden mögliche Messverfahren vorgestellt, um Teilentladungen zu lokalisieren. Zu diesen Verfahren gehört die Ortung der Teilentladung mittels der Polarität und der Laufzeit. Diese Methoden dienen zur frühzeitigen Erkennung möglicher Defekte an der Isolation des Energiekabels. Nach dem Einleiten der vorliegenden Arbeit folgen die theoretischen Grundlagen, um ein grundlegendes Verständnis für das Thema zu schaffen. Für die Messungen werden HFCT-Sensoren eingesetzt, um dadurch die Signale aufzunehmen und zu analysieren. Im weiteren Verlauf wird der Messaufbau und das Messsystem genauer erläutert, wobei insbesondere auf die verwendeten HFCT-Sensoren eingegangen wird. Der Hauptteil beinhaltet die Messverfahren zur Ortung der Teilentladungen, gefolgt von einer Bewertung und Validierung der Ergebnisse, wodurch die Zuverlässigkeit und die Qualität der Messverfahren zur Teilentladungs-Ortung geprüft werden. Zuletzt erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und zugleich ein Ausblick auf mögliche weiterführende Untersuchungen zur Ortung von Teilentladungen mittels induktiver Sensoren.

**Katharina Menegon, Qualifikation eines Verfahrens zur Kalibrierung
B.Sc. optisch basierter Teilentladungssensoren**

In dieser Bachelorarbeit wird das Verhalten optisch gemessener Teilentladungen einer Spitze-Platte Anordnung in Luft unter positiver und negativer Gleichspannungsbeaufschlagung experimentell untersucht und unter Zuhilfenahme der Matlab Software analysiert und ausgewertet. Um ein tieferes Verständnis der Photodetektion über szintillierende Fasern und einen Silizium-Photomultiplizierer zu erlangen, werden die Teilentladungen zunächst für sich beobachtet. Damit qualifiziert werden kann, welche Kenngrößen dieser Detektionsmethode sich für eine Kalibrierung eignen könnten, werden die TE bei unterschiedlichen Abständen der szintillierenden Fasern zum Teilentladungsentstehungsort, gemessen. Die Kenngrößen, die in dieser Untersuchung analysiert werden, sind die Impulsformcharakteristiken, wie die Spannungsamplitude, die Anstiegszeit, die Abfallzeit und die Impulsbreite. Um den

Vergleich mit einem Referenzsystem aufzustellen, wird der Versuchsaufbau für die optische Messung von Teilentladungen um einen, normkonformen elektrischen Messkreis, erweitert. Auf diese Weise werden die Ladungen, wie auch die Spannungs- und Photonenstrom Amplituden, der jeweiligen Messmethoden miteinander verglichen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll eine Aussage zu möglichen linearen Kenngrößen, die sich für ein Verfahren zur Kalibrierung der optischen Messmethode eignen, getroffen werden.

Julius Mennemeier, B.Sc. Ermittlung und Auswertung von Ableitströmen und Langzeitstabilität an einem SMD-basierten 500 kV DC-Spannungsteiler

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird ein SMD-basierter 500 kV DC-Spannungsteiler im Prüffeld als „Device Under Test“ (DUT) für mögliche Belastungsszenarien von HGÜ-Einrichtungen untersucht. Dazu wird der Ableitstrom über die äußere Isolierung des Spannungsteilers über mehrere Wochen ermittelt, während simultan verschiedene Wetterdaten wie Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, usw. aufgezeichnet werden. Es erfolgt ein Vergleich der zeitlichen Verläufe von Ableitstrom und Wetterdaten, wodurch zunächst ermittelt werden soll, welche Parameter den Ableitstrom signifikant beeinflussen. Nach Ermittlung der signifikanten Parameter werden diese im Zusammenhang mit dem Ableitstrom quantitativ analysiert, um deren Einfluss zu gewichten. Einen weiteren Aspekt der Analysen stellen sequenzielle Spannungssteigerungsversuche dar, in welchen die Versorgungsspannung des Spannungsteilers stufenweise erhöht wird. In Abhängigkeit der Versorgungsspannung werden auch die Ausgangsspannung, der Ausgangstrom und der Ableitstrom des Spannungsteilers gemessen und protokolliert, um deren Verhalten bei verschiedenen Spannungsniveaus zu analysieren.

Samuel Reichmann, B.Sc. **Modellbasierte Analyse eines induktiven Sensorkonzeptes zur Teilentladungsüberwachung unter Berücksichtigung der Sättigungseigenschaften**

Teilentladungen gelten als frühe Anzeichen für Defekte und Alterungsprozesse in Betriebsmitteln des Übertragungsnetzes. Aufgrund ihrer schweren Messbarkeit und Ortung bleiben sie häufig unentdeckt und führen in der Folge zu Betriebsausfällen. Durch eine effiziente Erfassung und kontinuierliche Überwachung von Teilentladungen könnten Netzbetreiber Teilentladungen frühzeitig erkennen und durch Prävention viele Netzstörungen verhindern. Ergänzend zur etablierten konventionellen Teilentladungsmessung konzentriert sich die aktuelle Forschung deshalb auf innovative Messmethoden, die eine wirtschaftliche Online-Überwachung von Teilentladungen ermöglichen. Neben dem Kostenfaktor steht dabei vor allem die zuverlässige Detektion im Vordergrund. Eine zentrale Herausforderung stellt hierbei die mögliche Sättigung der Sensoren durch den Betriebsstrom dar. Gegenstand dieser Arbeit ist deshalb die Analyse des Luftspalteinflusses auf die Sättigung und die Messempfindlichkeit verschiedener Kernkonfigurationen. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell erweitert, das sowohl das Sättigungsverhalten als auch den Einfluss auf die Empfindlichkeit analysieren kann.

Yagiz Sarapli, B.Sc. **Numerische Modellbildung und Analyse des Temperatureinflusses von Ableitströmen in Fremdschichten auf Feststoffoberflächen**

In dieser Bachelorarbeit wird die numerische Simulation von Ableitströmen und deren thermischen Auswirkungen auf ein vereinfachtes Modell sowie auf Isolatoren aus glasfaserverstärktem Silikonkautschuk (SIR) unter realistischen Verschmutzungsbedingungen untersucht. Im Fokus stehen die Joule'sche Erwärmung, Veränderungen in der Leitfähigkeit, Feldverzerrungen und die Bildung von Trockenbän-

dern. Durch Anwendung der Finite-Elemente-Methode wurden in COMSOL Multiphysics mehrstufige 2D-Simulationen mit unterschiedlichen Verschmutzungsszenarien durchgeführt, die von homogenen bis zu inhomogenen Fremdschichten umfassen. Für die Analyse wurden die Stromdichte, die Temperaturverteilung und die elektrischen Felder untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine eindeutige Korrelation zwischen der Erhöhung der lokalen Temperatur und dem Auftreten kritischer Hot-spot-Zonen. Daher trägt die Arbeit dazu bei, ein besseres Verständnis der elektrothermischen Belastung von verschmutzten Isolatoren zu gewinnen und potenzielle Risikobereiche zu identifizieren.

Lars-Arne Schmidt, B.Sc. Untersuchung mineralischer Isolieröle mittels szintillierender Werkstoffe

Diese Bachelorarbeit widmet sich der Untersuchung eines neuen Ansatzes zur optischen Messung von Ionisationsprozessen in Isolierölen unter Verwendung von drei szintillierenden Fasern. Mithilfe von zwei Elektroden in einer Prüfzelle, gefüllt mit Isolieröl, wird ein elektrisches Feld erzeugt. Die szintillierenden Fasern sind zwischen den Elektroden geführt. Durch die Interaktion geladener Teilchen und ionisierender Strahlung mit den szintillierenden Fasern wird ein Lichtblitz erzeugt. Mit dem Referenzmesssystem, der PDC-Analyse, ist zudem eine Vergleichsmessung zur Ermittlung des praxiserprobten Polarisationsstroms, angeschlossen. Die Auswertung der optischen Messsignale als Zählrate, Amplitude und Ladung und dem Polarisationsstrom zeigt einen nichtlinearen Strom- und Zählratenverlauf bei steigender Verunreinigung. In den meisten Fällen besteht eine qualitative Übereinstimmung zwischen dem Polarisationsstrom und der Zählrate, sodass steigende Polarisationsströme mit erhöhten Ionisationsraten korrelieren. Dennoch treten teilweise signifikante Abweichungen zwischen den beiden Messgrößen auf und dieses Verhalten ist nicht durchgängig reproduzierbar.

Luka von Rüden, B.Sc.

Auslegung eines kapazitiven Spannungs-Messsystems zur Teilentladungsdetektion an Energiekabeln der Mittelspannungsebene

In der Arbeit erfolgt die Analyse eines kapazitiven Spannungssensors, um sein Übertragungsverhalten zu ermitteln. Auf dieser Grundlage wird im Labor der Aufbau zur Messung der Teilentladungen (TE) mit kapazitivem Spannungssensor um entsprechende Filter erweitert. Zunächst wird dabei mithilfe eines Testsignals die Funktionsfähigkeit des Aufbaus sichergestellt. Des Weiteren werden die Störungen gemessen, die ohne TE-Quelle im Messaufbau entstehen, um diese dem TE-Signal gegenüberzustellen und zu bewerten, wie gut dieses vom Rauschen unterscheidbar ist. Im Anschluss werden zur Bewertung der Sensitivität des Sensors sowohl TE mit einer scheinbaren Ladung größer 1 nC als auch kleiner 1 nC untersucht. Zur verlässlichen Erfassung von TE mit einer scheinbaren Ladung kleiner als 800 pC wird ein zusätzlicher Hochfrequenz-Stromwandler (HFCT) verbaut. Dieser HFCT wird auch zur Messung von 41,5 m entfernten TE verwendet, dessen Erfassung zur Beurteilung der Sensitivität ebenfalls hilfreich ist. Nach einer TE-Messung auf benachbarten Phasen, welche nicht die TE-Quelle enthalten, wird zuletzt eine Hohlraumordnung im Messaufbau integriert, um auch innere TE auf ihre Messbarkeit zu überprüfen. Bei allen Messungen erfolgt ein regelmäßiger Vergleich der Messung mit dem Normaufbau gemäß DIN EN 60270. Dies ermöglicht die Plausibilitätsprüfung der vorgenommenen Messung.

Jan-Oscar Wimber, B.Sc. Isolierölanalyse mittels szintillierender Werkstoffe

Die Bachelorarbeit widmet sich der Untersuchung eines neuen Ansatzes zu optischen Messung von Leitungsprozessen in Isolieröl unter Verwendung einer szintillierenden Faser. Mithilfe einer Testzelle wird ein elektrisches Feld in einem Ölspalt erzeugt. Interaktionen von geladenen Teilchen mit der Faser erzeugen Lichtblitze, die mit einer angeschlossenen optischen Messtechnik detektiert werden. Mit einem

Referenzmesssystem ist eine Vergleichsmessung mit elektrischen Messgrößen möglich. Die Auswertung der Versuche ergibt, dass die untersuchten optischen Messgrößen nur bedingt geeignet sind, um die Leitungsprozesse abzubilden. Nicht bei allen Größen ist ein Zusammenhang mit der angelegten Feldstärke feststellbar und die Messwerte weisen zum Teil sehr große Schwankungen auf.

Mathis Windmüller, B.Sc. Analyse von alternativen Sensorpositionen für induktive Teilentladungsmessung an Mittelspannungskabeln

In dieser Arbeit werden alternative Montagepositionen für induktive Hochfrequenz-Stromwandler (HFCT) für die Verwendung in Mittelspannungsschalschränken untersucht. Die HFCT-Sensoren sollen als kostenoptimierte Lösung zur Detektion von Teilentladungen an Mittelspannungskabeln eingesetzt werden. Dabei findet die Montage der Sensoren um den geerdeten Schirm des Kabels, den Innenleiter sowie das gesamte Kabel statt. Ziel der Arbeit ist es, durch Analyse der erfassten Messdaten die einzelnen Sensorpositionen zu bewerten, und durch mögliche Kombination eine eventuelle Ortung der Fehlstelle zu ermöglichen. Dazu werden im Labor möglichst realitätsnahe TE durch verschiedene Fehlstellen an einem Leiter erzeugt, und gleichzeitig mit drei selbst konstruierten HFCT an den beschriebenen Sensorpositionen aufgenommen. Dabei werden sowohl Kabelinterne TE durch einen defekten Endverschluss des Kabels, als auch externe TE im Schaltschrank untersucht. Zum Vergleich der gewonnenen Messdaten wird zusätzlich eine normkonforme Messung durchgeführt. Die Analyse der Messdaten der einzelnen Sensorpositionen erfolgt sowohl über einen Vergleich der Amplituden der induzierten Spannungen, als auch über eine Auswertung mittels Fast-Fouriertransformation zur Identifikation über die enthaltenen Frequenzen. Weiterführend wird eine Idee zur Ortung über die Bildung der Differenz zwischen den Sensoren vorgestellt. So entstehen Thesen zu Möglichkeiten der TE-Ortung.

Ivan Zota, B.Sc.

Erweiterung eines Sensorfusion-Modells zur Anwendung auf die Ionenstrommessung als Diagnosemethode

Die Überprüfung und Gewährleistung der Funktionsfähigkeit von Komponenten in Hochspannungsgleichstromübertragungsnetzen (HGÜ), die gasisolierte Betriebsmittel nutzen, stellt eine erhebliche Herausforderung im Bereich der Hochspannungstechnik dar. Im Vergleich zu anderen Technologien in diesem Sektor, in denen umfangreiche mehrjährige Erfahrungswerte vorhanden sind, weist die HGÜ einen unzureichenden Datenbestand auf. Diese Arbeit zielt darauf ab, eine Erweiterung eines evidenztheoretischen Modells zu implementieren. Der Hauptfokus liegt auf der Automatisierung der Analyse von Koronaskopaufnahmen sowie der Entwicklung eines Punktesystems zur Auswertung der Ergebnisse.

5.2 Masterarbeiten

Unsere Masteranden begleiten wir sechs Monate und geben ihnen die Möglichkeit, tief in ein wissenschaftliches Thema einzusteigen. Ihre Ergebnisse leisten dabei ebenfalls einen wichtigen Beitrag zu den Forschungsergebnissen und Publikationen des Lehrstuhls.



**Pascal Lukas Bergner,
M.Sc.**

**Entwicklung und Bewertung einer kompakten
Messeinrichtung für transiente Signale unter stör-
kritischen Umgebungsbedingungen**

Die Untersuchung von Alterungsprozessen in elektrischen Isoliersystemen gewinnt zunehmend an Bedeutung, insbesondere vor dem Hintergrund der verstärkten Anwendung impulsförmiger Spannungsbelastungen. Herkömmliche Materialbewertungen basieren jedoch nahezu ausschließlich auf sinusförmigen Spannungsprüfungen, wodurch wesentliche dynamische Aspekte realer Betriebsbedingungen unberücksichtigt bleiben. Die derzeit kommerziell verfügbaren Messeinrichtungen erfüllen zentrale Kriterien zukünftiger Anforderungen nicht vollständig. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird daher eine kompakte Messeinrichtung für transiente Signale unter störkritischen Umgebungsbedingungen entwickelt und bewertet, die für impulsförmige Spannungsprüfungen eingesetzt werden kann. Das Konzept sieht vor, dass kostengünstige Mikrocontroller parallelisiert auf einer gemeinsamen, kompakten Leiterplatte (PCB) abtasten, um eine möglichst hohe Abtastrate zur Erfassung transienter Signale zu erreichen. Im prototypischen Aufbau werden diese Mikrocontroller durch einen Bridge-Computer zeitversetzt gestartet und zusätzlich mit Energie versorgt. Die erfassten Daten werden anschließend über Lichtwellenleiter (LWL) zur weiteren Auswertung und Analyse übertragen.

Edona Callpani, M.Sc.

Auslegung eines breitbandigen ohmsch-kapazitiven Hochspannungsteilers auf SMD-Platinenbasis für Power Quality- und Teilentladungsmesszwecke

Zur Messung der Spannungsqualität werden ohmsch-kapazitive Spannungsteiler verwendet, die im Idealfall ein frequenzunabhängiges Teilverhältnis aufweisen. Allerdings beeinflussen parasitäre Größen, wie z. B. Streukapazitäten und Streuinduktivitäten das Teilverhältnis, sodass dieses nicht ideal frequenzunabhängig ist. Im Hochfrequenzbereich zwischen 500 kHz und 10 MHz können RC-Spannungsteiler, analog zu Koppelkondensatoren, zur Auskopplung von Teilentladungsimpulsen verwendet werden. Innerhalb der Masterarbeit wird ein modularer RC-Spannungsteiler auf Basis von SMD-Komponenten auf einer Platine für 20 kV erarbeitet und gefertigt. Anschließend erfolgt die Integration eines Hochfrequenzstromwandlers in den Erdpfad des Spannungsteilers mit abschließender Charakterisierung des Systems auf Basis von Simulation- und Messdaten.

Carlos Fernando Hermosilla Morales, M.Sc.

Modellbasierte Analyse eines induktiven Sensorskonzeptes zur Teilentladungsüberwachung mittels simulativer Parameterstudien

Diese Masterarbeit behandelt ein innovatives und nicht genormtes Konzept zur Teilentladungsmessung in Anwendungen der Mittel- und Hochspannungstechnik. Ziel dieser Arbeit ist die Analyse, wie geometrische, strukturelle und raumbezogene Parameter das Verhalten von Hochfrequenz-Stromwandler-Sensoren beeinflussen. Vier Strukturvarianten werden modelliert: ein Vollkern, ein Kern mit Luftspalten sowie zwei Flusskonzentratoren. Diese werden in COMSOL Multiphysics® simuliert und mithilfe parametrischer Studien ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Empfindlichkeit in hohem Maße von der Position des Primärleiters sowie von der gewählten Kernstruktur abhängt. Flusskonzentratoren zeigen eine besonders hohe

Empfindlichkeit, insbesondere bei vergrößertem Kernvolumen. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse auf Optimierungspotenzial im Hinblick auf den Materialeinsatz hin. Diese Arbeit bietet einen neuartigen Ansatz zur Bewertung struktureller Konfigurationen und liefert eine belastbare Grundlage für zukünftige Untersuchungen.

Albino Kaziu, M.Sc.

**Experimental Investigation of Leakage Currents
on Solid Insulators with Contamination Layers un-
der specific Voltage Load Scenarios**

This work examines the influence of environmental conditions on surface currents in impurity loaded homogeneous insulators. The use of Hybrid Parallel HVAC/HVDC is currently an interest of research, with one insulator under specific 30 kV DC and the other 30 kV, 50 Hz AC stress. To determine the leakage currents and the circumstances of their occurrence more precisely, an experimental investigation together with a numerical modeling using COMSOL multiphysics is represented in this work. Initially in this thesis fundamentals of high voltage engineering are introduced. Further, the essentials of the line insulators are explained along with their role and the effects that possible pollution layers accumulated with time during the operation can have. In this work, the artificial pollution layer under investigation is sodium chloride in combination with kaolin. The measurement equipments and the environment of which the experiments are performed in TU Dortmund's Hochspannungstechnik laboratories are described. The short term results are compared and explained with the relevant literature by numerical analysis using COMSOL software. One week long term measurements are also conducted in the laboratory conditions. In addition, a data driven prediction approach is introduced to estimate breakdown times and critical current levels based on measured RMS leakage currents. By employing regression based trend analysis, this method enables the forecasting of insulator performance and potential failure under continued stress. Such predictive capability not only reduces the need for extensive repeated testing, but also lowers operational costs and supports more efficient maintenance planning by identifying optimal re-

placement intervals before critical failure occurs. A prototype of this machine learning pipeline is conducted in MATLAB based on the data of the long term measurements. In the end conclusions of the experimental and numerical method, together with the data driven prediction approach are analyzed.

Steffen Kreis, M.Sc.

Aufbau eines evidenztheoretischen Modells zur Anwendung auf die Ionenstrommessung als Diagnosemethode

Diagnosemethoden sind in der Hochspannungstechnik essenziell, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Durch Verbesserungen dieser Methoden werden potenzielle Fehler früher erkannt und behoben, was nicht nur Kosten senkt, sondern auch die Power Quality im Übertragungsnetz steigert. Diese Arbeit zeigt, wie die Ionenstrommessung als Messmethode im Rahmen von Risikoermittlungen eingesetzt wird, damit bessere Diagnoseergebnisse erlangt werden. Dazu wird ein Berechnungsmodell entwickelt, welches die Ergebnisse der Ionenstrommessung mit anderen Erkenntnissen zusammenführt. Zur Erreichung dieses Ziels werden Ionenstrommessungen an einem Laboraufbau durchgeführt, um Aussagen über Verunreinigungen durch Metallpartikel innerhalb des Laboraufbaus zu treffen. Es wird eine Spitze-Platte-Anordnung verwendet, die anstelle von Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik, wie beispielsweise gasisolierten Schaltanlagen (GIS), betrachtet wird. Die Ergebnisse der Messungen werden mit Bildern von Teilentladungen (TE) kombiniert, die während der Versuchsdurchführung aufgenommen werden. Die Kombination erfolgt durch ein Berechnungsmodell auf Basis der Evidenztheorie. Ein zentraler Aspekt des Modells ist die Erstellung eines gemeinsamen Wahrnehmungsrahmens für die Ionenstrommessung und die TE-Bilder. Nach der Kombination werden Schlussfolgerungen für die Wartung und Instandhaltung des betrachteten Betriebsmittels gezogen. Abschließend erfolgen eine Bewertung des Modells und ein Vergleich mit bestehenden Methoden zur Risikoermittlung an gasisolierten Schaltanlagen.

Sebastian Plötz, M.Sc.

Experimentelle Untersuchung von Teilentladungen unter Mischbeanspruchung und Entwicklung einer Methode zur Teilentladungsdiagnose

Ohmsch-kapazitive Spannungsteiler können mit HFCT's oder der rein induktiven Teilentladungsmessung kombiniert werden Netzspannungen hinsichtlich Restwellenlängen und Oberschwingungen zu untersuchen. Die Masterarbeit untersucht wie sich das Verhalten bei Gleichspannung mit Restwelligkeit, sowie Gleichspannung mit harmonischen Oberschwingungen verhält und entwickelt auf Basis der Erkenntnisse eine Analysemöglichkeit für die Teilentladungsdiagnose in einem Teilentladungsmesskreis bei Gleichspannung bei synthetischer Restwelligkeit zwischen 1-4%. Die Ergebnisse stellen eine Referenzmessung dar anhand dessen unbekannte Teilentladungsprüflinge in einer Blindstudie eingeordnet werden.

David Ripka, M.Sc.

Analyse und Bewertung eines induktiven Sensorkonzeptes zur Teilentladungsüberwachung unter Berücksichtigung der Sättigungseigenschaften

Durch den zunehmenden Ausbau erneuerbarer Energien werden Verteilnetze immer stärker ausgelastet. Der Ausfall eines Betriebsmittels durch Alterungserscheinungen und Erosion kann daher weitreichende Folgen für die Netzstabilität haben. Eine Zustandsüberwachung ist deshalb sinnvoll und wird insbesondere durch die Teilentladungsdiagnose ermöglicht. Neben der konventionellen Teilentladungsmessung kommen auch induktive Teilentladungssensoren zum Einsatz, die nach dem Prinzip der magnetischen Kopplung arbeiten. Sollen diese Sensoren für das Online-Monitoring verwendet werden, können jedoch hohe Betriebsströme die induktiven Sensoren in Sättigung treiben und so eine Teilentladungserfassung verhindern. In dieser Arbeit wird daher ein neuartiger induktiver Sensor untersucht, der aufgrund seiner besonderen Kerngeometrie erst bei höheren Strömen in Sättigung gerät als vergleichbare induktive Teilentladungssensoren. Der Sensor wird hinsichtlich seiner

Sättigungseigenschaften und Messempfindlichkeit gegenüber Teilentladungen analysiert und bewertet. Die Bewertung erfolgt dabei stets im Vergleich mit gängigen induktiven Teilentladungssensoren mit Luftspalt.

Kübra Sari, M.Sc.

Methodische Entwicklung eines integrierten Managementhandbuchs unter Berücksichtigung der normativen Anforderungen

In der vorliegenden Masterarbeit wird am Beispiel der WEISSGERBER engineering GmbH die methodische Entwicklung eines integrierten Managementhandbuchs untersucht. Die Basis für diese Thematik bildet die Analyse der ergänzenden Normen, darunter ISO 14001, ISO 45001, ISO 50001, ISO 55001, ISO 27001 sowie der Richtlinie ISO 26000. Die Entwicklung des Konzepts basiert auf einem adaptiven Vorgehen und beschreibt die Ausarbeitung von Schritten zur potenziellen Realisierung eines integrierten Managementhandbuchs. Im Anschluss erfolgt die Anwendung dieser Schritte am bereits bestehenden QM-Handbuch von WEISSGERBER engineering GmbH. Das Ziel besteht darin, ein einheitliches, strukturiertes Dokument zu erstellen. Dieses soll die genannten Managementsysteme in einem Handbuch abbilden, das keine Redundanzen enthält. Zusätzlich soll es ein Rechtskataster bereitstellen, welches an die Unternehmensprozesse angepasst ist. Die Ausarbeitung zeigt, dass solch ein IMH große Vorteile für die Rechtssicherheit und Effizienz bieten kann, was wiederum den Anwender in vielerlei Hinsichten unterstützt. Sie ist allerdings in der praktischen Realisierung mit hohem Aufwand und organisatorischen Hürden verbunden, die es zu überwinden gilt. Trotz dessen bietet der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz eine gute Ausgangslage für künftige Vorhaben.

Justin Scheliga, M.Sc.

Untersuchung einer optisch basierten Temperaturkompensation für die polarimetrische optische Strommessung mit HiBi-Spun Fasern

Highly Birefringent Spun-Optic Fibers (HiBi-Spun Fibers) sind stark Anisotrope optische Glasfasern, welche in der optischen Strommesstechnik als zirkular polarisationserhaltenes Element verwendet werden. Ihre Verwendung führt zu Unempfindlichkeit gegenüber Biegung und Vibrationen, bringen jedoch den Nachteil hoher Komplexität und Verlust in Sensitivität mit sich. Die Masterarbeit umfasst die Implementierung eines Berechnungsmodells für HiBi-Spun Fasern auf Basis der Coupled-Mode Theorie sowie einer anschließenden experimentellen Validierung der Faserkenngrößen. Auf Basis der Berechnungsmodells und der Experimentellen Aufbauten erfolgt die Validierung eines Patentes zur polarimetrischen Auswertung des Faraday-Effektes mit Anwendung von HiBi-Spun Fasern.

Katrin Veith, M.Sc.

Untersuchung der Ionenstrommessung als Diagnosemethode zur Anwendung auf einen Hochspannungsteiler

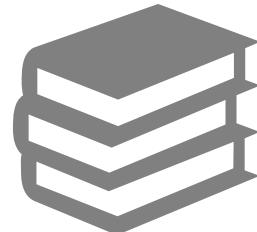
Vor dem Hintergrund der Energiewende gewinnt die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) an Bedeutung. Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist die Messung der Power Quality essenziell. Betriebsmittel, die diese Aufgabe übernehmen, sind Alterungsprozessen unterworfen, sodass ebenso Monitoring und Diagnoseprozesse notwendig sind. In dieser Arbeit wird die Ionenstrommessung als potenzielle Diagnosemethode für gasisolierte Betriebsmittel analysiert. Ionenströme verschiedener Fehlerbilder, wie leitfähige Partikel und Spitzenbildung, werden experimentell ermittelt und ausgewertet. Eine numerische Simulation in COMSOL Multiphysics® ergänzt diese Daten. Auf Basis der durchgeführten Messungen wird ein Zustandsbewertungsmodell für gasisolierte Betriebsmittel, wie einen RC-Hochspannungsteiler, entwickelt. Dieses Modell ermöglicht eine zustandsbasierte

Risikokategorisierung unter Betrachtung von Teilentladungen und der damit einhergehenden Ionenströme. Um den Einfluss der Temperatur auf die Raumladungsausbildung bei Gleichspannungsbelastung im Lastbetrieb zu untersuchen, wird ein Messverfahren genutzt, bei dem die Raumladungen durch einen elektrischen Impuls ausgelenkt werden und sich aufgrund dessen eine akustische Welle durch die Kabelisolierung ausbreitet. Die akustische Welle wird daraufhin in ein Spannungssignal umgewandelt, welches sich proportional zur Raumladungsdichte verhält. Die akustische Welle wird aufgrund von akustischen und thermischen Eigenschaften der Kabelisolierung beeinflusst. Dieser Einfluss wird in dieser Arbeit anhand eines akustischen Korrekturverfahrens beseitigt. Das akustische Korrekturverfahren wird zunächst anhand von künstlich erzeugten Raumladungsmesssignalen angewendet, um die Güte der Korrektur zu beschreiben und anschließend mit der Korrektur der realen Messsignale zu vergleichen.

Bei der Korrektur der realen Raumladungsmesssignale zeigen sich signifikante Unterschiede zu der Korrektur der künstlichen Raumladungsmesssignale. Daher werden die akustischen Eigenschaften der verwendeten Kabelisolierung des HGÜ-Modellkabels untersucht und festgestellt, dass diese keine signifikanten Temperaturabhängigkeiten aufweisen. Abschließend wird die Raumladungsentwicklung unter den verschiedenen Temperaturen untersucht. Mit Zunahme der Temperatur bilden sich innerhalb der Kabelisolierung in der Nähe der Elektroden zunehmend Homocharges aus, die die Oberflächenladungsdichten und somit die elektrische Feldverteilung beeinflussen.

5.3 Projektgruppen, Fachwissenschaftliche Projektarbeiten und Oberseminare

Unsere Projektgruppen, Projektarbeiten und Oberseminare unterstützen in der Forschung durch ihren wichtigen Beitrag in der Recherche und Projektierung der Recherchergebnisse. Hierbei stellen sich unsere Studierende aktuellen wissenschaftlichen Fragestellungen und tragen somit zur Forschung und Entwicklung der einzelnen Projekte bei. Den Abschluss der jeweiligen Recherchen bildet die schriftliche Ausarbeitung sowie ein fachspezifischer Vortrag mit anschließender Diskussion.



**Tianlei Feng, Pratikshya Mohanty, Carsten Marcel Höseler,
Shihan Zhang, Tarun Zutshi, Alexander Bröckling, Alagupriya Thiagarajan**

Investigations of Insulating Media Under High Electric Field Strengths in HVDC Systems

High Voltage Direct Current (HVDC) power lines have shown themselves to be a viable alternative to the standard AC variant but they come with their own challenges. In this report, we have investigated some of the challenges such a power line faces and implemented simulations to further analyse them. With these simulated results different predictions can be made about the power lines, their conditions, how to catch failures and to improve the technology for the future. For this, the report is split into 3 tasks each taking a look at different aspects of HVDC power lines and how to use the simulated results. The first section explores how to simulate the electric fields and space charge density, in the space around a power line, which can result in a corona discharge. In the second section, a wide band antenna model is built for electromagnetic detection using finite element software to analyse the effect of different parameter variations on the partial discharge of HVDC cables. The third section uses FEM software to model various characteristics of the pollution layer on the insulator surface, inside the environment air cylinder and studies its effect on the leakage current density of HVDC insulators. The simulations described thus in the first and third section deal with

the degradation and break down of the insulation of the power line, while the simulations in section 2 can be used to study a way to register the failure of these insulators. As such together, they can be seen to describe a way to investigate a HVDC power line for insulator failure and how to register it.

Lars-Arne Schmidt, B.Sc.

Gleich- und Mischfeldbeanspruchung in HGÜ-Systemen

Die Projektarbeit untersucht die Beanspruchungen von HGÜ-Systemen durch Gleich- und Mischfelder. Gleichfelder, die bei Gleichspannung und Gleichstrom entstehen, führen zu lokalen Felderhöhungen und erhöhter elektrischer Beanspruchung des Isoliersystems. Die elektrische Feldverteilung und die Leitfähigkeit der Isolationsmaterialien unter Gleich- und Mischfeldbelastungen, einschließlich Blitz- und Schaltstößen sowie langsamen vorderen Überspannungen, wird analysiert. LCL-Filter zur Reduktion harmonischer Verzerrungen und Überspannungsableiter zum Schutz der Isolierung wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Mischfeldbeanspruchungen erhebliche Herausforderungen darstellen und geeignete Schutzstrategien erfordern. Besonders kritisch ist die 2,1-fache Belastung durch Blitz- und Schaltimpulse, die die Systemintegrität gefährden. Der Einsatz von Überspannungsableitern und eine detaillierte Isolationskoordination sind essenziell für den sicheren Betrieb von HGÜ-Systemen. Diese Studie bietet Einblicke in die Optimierung und Sicherheit von HGÜ-Systemen und unterstreicht die Bedeutung spezifischer Prüfmethoden und Schutzmaßnahmen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit.

**Saeid Ghobadi, Moath Al Dweekat, Zakia Henini, Kavya Vaikundan,
Soumia Elhayal**

Commissioning of a measuring system for conductivity measurements on insulating materials for high-voltage direct current transmission (HVDC)

Ziel der Projektgruppe ist die Wiederinbetriebnahme eines Messsystems für die Bestimmung der Leitfähigkeit von Isolierstoffen, die in Isoliersystemen für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zum Einsatz kommen. Dazu werden die einzelnen Komponenten wie die Hochspannungsquelle, die Filterschaltung, der Hochspannungsteiler, das Voltmeter und das Picoamperemeter auf ihre Funktion geprüft und im jeweiligen Betriebsbereich untersucht. Für die durchschlagsfreie Messung der Leitfähigkeit wird eine Elektrodenanordnung mit Schutzring und Rogowski-Profil anhand von Vorarbeiten rekonstruiert. Für alle Komponenten kann die Tauglichkeit für den geplanten Einsatz im Messsystem nachgewiesen werden. Das Messsystem kann anschließend in Betrieb genommen werden, sodass abschließend die Funktion des Gesamtsystems mithilfe von Testmessungen an PMMA als Referenzmaterial nachgewiesen werden kann.

Luis Siegert, Stefan Bühner, Pauline Segbert, Jan Lehmköster

Analyse von Fehlern in vermaschten Hochspannungsgleichstromübertragungsnetzen

Die Ergebnisse des Oberseminars wurden in einem Fachvortrag am Lehrstuhl veröffentlicht.

6 Lehrbetrieb

6.1 Vorlesungen

6.1.1 Grundlagen der Elektrotechnik 1 & 2



Dozent: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

Umfang: gesamt: 9 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 4 SWS; Übung: 2 SWS; Seminar: 2 SWS; Praktikum:
1 SWS

Turnus: Für manche Studiengänge ist diese Veranstaltung auf Sommer- und Wintersemester aufgeteilt.

Die Veranstaltung *Grundlagen der Elektrotechnik* ist in den Studiengängen Elektrotechnik und Informationstechnik, Informations- und Kommunikationstechnik und Wirtschaftsingenieurwesen ein Pflichtmodul. Weiterhin stellt die Veranstaltung für Studiengänge mit Schwerpunkt Elektrotechnik, wie z. B. angewandte Informatik oder Lehramt Elektrotechnik, ein Wahlpflichtmodul dar. Darüber hinaus wird die Veranstaltung von Studierenden besucht, welche sich dieses als Nebenfach anerkennen lassen können. Hierzu zählen z. B. Studierende der Studiengänge Statistik und Technomathematik.

Mit dem Ziel fortgeschrittene Veranstaltungen der Elektrotechnik und Informationstechnik verfolgen zu können, wird den Studierenden im Rahmen der Veranstaltung Grundlagenwissen über elektrische und magnetische Felder sowie lineare passive Gleichstrom- und Wechselstromschaltungen vermittelt. Die Vorlesungsinhalte lassen sich thematisch in die folgenden sechs Blöcke gliedern: Lineare Netze (einfache Widerstandsnetzwerke, reale Quellen und Verbraucher, Analyse umfangreicher Netzwerke, schematische Verfahren wie Maschenstrom- und Knotenpotentialverfahren), Wechselstromlehre (sinusförmige Vorgänge, Frequenzbereichsanalyse, Energie und Leistung), Elektrostatik (Ladung, Feld, Flussdichte, Fluss, Grenzflächenverhalten, Polarisation und Kapazität), stationäres elektrisches Strömungsfeld, Magnetostatik (magnetische Felder, magnetische Kräfte, magnetischer Fluss, Durchflutung, magnetischer

Kreis, Induktivität) und zeitlich veränderliches Magnetfeld. Darüber hinaus wird ein kurzer Überblick über die Maxwell'schen Gleichungen, die Vierpoltheorie und die verschiedenen Stromleitungsmechanismen gegeben.

Zusätzlich zu Vorlesung und Übung wird ein Praktikumsversuch angeboten. Im Rahmen dessen erfolgt eine praxisorientierte Vertiefung der theoretisch erworbenen Kenntnisse. Darüber hinaus erhalten die Studierenden die Möglichkeit sich mit grundlegenden Messgeräten (z. B. Oszilloskope) vertraut zu machen.

Die Veranstaltung wird mit einer dreistündigen Modulprüfung abgeschlossen, wobei für eine Zulassung zur Modulprüfung Studienleistungen zu erbringen sind. Neben dem Praktikumsversuch, welcher für einen Teil der Studierenden eine Studienleistung darstellt, werden im Semesterverlauf zwei Pflichtübungen angeboten, von denen die Studierenden mindestens eine bestehen müssen, um zur Modulprüfung zugelassen zu werden.

Zusätzlich zu Vorlesung und Übung wird ein eweils Praktikumsversuch angeboten. Im Rahmen dessen erfolgt eine praxisorientierte Vertiefung der theoretisch erworbenen Kenntnisse. Darüber hinaus erhalten die Studierenden die Möglichkeit sich mit grundlegenden Messgeräten (z. B. Oszilloskope) vertraut zu machen.

Die Veranstaltung wird mit einer dreistündigen Modulprüfung abgeschlossen, wobei für eine Zulassung zur Modulprüfung Studienleistungen zu erbringen sind. Neben dem Praktikumsversuch, welcher für einen Teil der Studierenden eine Studienleistung darstellt, werden im Semesterverlauf zwei Pflichtübungen angeboten, von denen die Studierenden mindestens eine bestehen müssen, um zur Modulprüfung zugelassen zu werden.

6.1.2 Technologie des Energietransports

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Wintersemester



Die Veranstaltung *Technologie des Energietransports* bildet zusammen mit der Veranstaltung Betrieb und Aufbau von Netzen das Modul Energiesystemtechnik und Netzbetriebsmittel. Die Veranstaltung richtet sich an Studierende im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik mit dem Schwerpunkt *Elektrische Energietechnik* sowie Studierende des Bachelor-Studiengangs Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Profil Management elektrischer Systeme.

Thematisiert werden in diesem Modul die elektrotechnischen Anforderungen, die an Anlagen der Energieübertragung auf Hochspannungsebenen gestellt werden. Nach den feldtheoretischen Grundlagen ist die Optimierung des elektrischen Feldes, einhergehend mit der elektrischen Festigkeit verschiedener Isoliermedien, ebenso Bestandteil der Veranstaltung, wie ein Überblick über die verwendeten Netzkomponenten. Mit den Bereichen der Prüfquellen und der zwingend nötigen Messtechnik erfolgt ein Ausblick in Richtung der Hochspannungstechnik.

6.1.3 Messtechnik

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

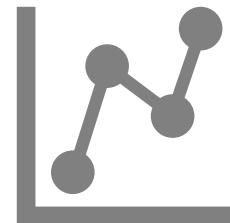
Umfang: gesamt: 5 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2,5 SWS; Übung: 1,5 SWS;

Praktikum: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Wintersemester

Die Vorlesung *Messtechnik* richtet sich an Studierende des Bachelor-Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik sowie der Bachelor-Studiengänge Wirtschaftsingenieurwesen und Informatik.

Im Veranstaltungsbereich *Messtechnik* geht es um die quantitative Erfassung elektrotechnischer Größen wie Strom und Spannung, sowie der Ermittlung des damit verbundenen Messfehlers. Nach einer Einführung in die Grundbegriffe der Messtechnik erfolgt die Beschreibung der Eigenschaften konventioneller Messgeräte. Da diese im Allgemeinen auf eine bestimmte Messbandbreite ausgelegt sind, erfolgt anschließend die Vermittlung von Kenntnissen zur Messbereichserweiterung. Weitere



Themengebiete sind Brückenschaltungen und die Leistungsmessung. Abschließend werden die zur Messung elektrischer Größen unabdinglichen Messleitungen behandelt. Als Studienleistung müssen Studierende das vorlesungsbegleitende Praktikum des Moduls durchführen (nicht Wirt.-Ing.-Studierende).

6.1.4 Elektrotechnik und Kommunikationstechnik

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze



Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Sommersemester

Die Veranstaltung *Elektrotechnik und Kommunikationstechnik* richtet sich an Studierende der Studiengänge Maschinenbau, Logistik und Informatik, die kein Nebenfach Elektrotechnik gewählt haben. Im Modul vermittelt der Lehrstuhl für Hochspannungstechnik die grundlegenden Kenntnisse aus den zentralen Bereichen der Elektrotechnik. Ergänzt wird das Programm durch Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze (Arbeitsgebiet Datentechnik), der die Grundlagen der Kommunikationstechnik beisteuert. Pro Semester nehmen bis zu 1000 Studierende an der Veranstaltung teil.

Nach erfolgreichem Abschluss kennen die Studierenden die für die elektrische Energieversorgung und die elektronische Schaltungstechnik relevanten physikalischen Phänomene und sind in der Lage, einfache elektrotechnische Rechenverfahren anzuwenden. Außerdem sind ihnen wesentliche Systeme der Kommunikationstechnik vertraut, so dass sie deren Einsatzmöglichkeiten beurteilen können. Die behandelten Inhalte umfassen Gleichstromkreise, Grundlagen von Wechselstromkreisen, Halbleiterbauelemente, die Realisierung von Grundschaltungen, Logikfamilien und Ausgangsstufen sowie Transportmedien und Nachrichtenübertragung.

6.1.5 Hochspannungstechnik

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Wintersemester



Die Veranstaltung *Hochspannungstechnik* richtet sich an Studierende des ersten Master-Semesters und bildet zusammen mit der Veranstaltung *Leistungselektronische Schaltungen* eines der Basis-Module des Master-Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik.

Den Studierenden werden im Rahmen dieser Veranstaltung die Grundlagen der Hochspannungstechnik und der zugehörigen Prüfmethodik vermittelt. So werden die Entstehung von Überspannungen und der Schutz gegen derartige Belastungen genauso thematisiert, wie die Erzeugung und Messung hoher Wechsel-, Gleich-, Impuls- und Stoßspannungen. Einen weiteren Bestandteil bildet die Planung von Hochspannungslaboratorien und abschließend wird die Teilentladungsmesstechnik und -diagnose als wichtiges Kriterium in der Isoliersystembewertung vorgestellt.

Nach Abschluss dieser Veranstaltung verfügen die Studierenden über ein fundiertes Wissen bezüglich vieler Fragestellungen im Bereich hochfeldbelasteter Isoliersysteme. Sie können elektrische und magnetische Felder charakterisieren, optimieren und die Auswirkungen auf die Festigkeit von Hochspannungs-isolierungen beurteilen. Ebenfalls verfügen die Studierenden über theoretische Kenntnisse über die wesentlichen Komponenten eines Hochspannungsprüffeldes, wie Spannungserzeuger und -teiler sowie weitere spezialisierte Messsysteme.

6.1.6 Ausgewählte Kapitel Hochspannungstechnik

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Sommersemester



Die Veranstaltung *Ausgewählte Kapitel der Hochspannungstechnik* richtet sich an Studierende des zweiten Master-Semesters. Insbesondere hochspannungsinteressierte Studierende haben hier die Möglichkeit ihre Kenntnisse aus dem Basismodul *Hochspannungstechnik* zu vertiefen und mit aktuellen Forschungsfragen der Hochspannungstechnik vertraut zu werden.

Der Besuch dieser Lehrveranstaltung vermittelt den Studierenden detaillierte Kenntnisse über ausgewählte Betriebsmittel der Energieübertragungssysteme. Sie werden mit dem konstruktiven Aufbau und der elektrischen Auslegung vertraut gemacht und erlernen die technologischen Randbedingungen, die an hochspannungstechnische Geräte gestellt werden. Die Teilnehmenden erarbeiten Verfahren und Methoden der mess- und prüftechnischen Qualitätssicherung und der Diagnostik an Hochspannungsgeräten. Beispiele und Anwendungen vertiefen das Gelernte und stellen den Bezug zur betrieblichen Praxis her.

6.1.7 Innovative Isoliersysteme

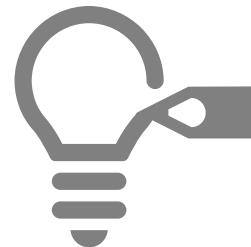
Dozenten: Dr.-Ing. Friedhelm Pohlmann,

Dr.-Ing. Ralf Merte

Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),

davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Sommersemester



Die Veranstaltung *Innovative Isoliersysteme* ist ein Wahlpflichtmodul im Master-Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik mit dem Studienschwerpunkt *Elektrische Energietechnik* sowie im Master-Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen mit der Vertiefung Management elektrischer Netze.

Beide externen Dozenten der Vorlesung sind in großen Industrieunternehmen tätig und vermitteln so nicht nur theoretische Inhalte, sondern auch die Anwendung dieser Inhalte in der Praxis. Thematisiert werden im Rahmen der Veranstaltung die technischen Beanspruchungen und die Alterung eines Isoliersystems sowie die damit einhergehende Auslegung. Die Verfahren zur Fertigung, Qualifizierung, und Zustandsdiagnose

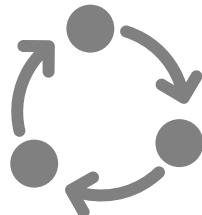
von Isoliersystemen sind ebenso Thema der Veranstaltung wie neuartige und innovative Ansätze der Isolierstofftechnik. Die Übung findet in Form von vorlegungsbegleitenden Exkursionen statt, bei denen die Studierenden die in der Vorlesung vorgestellten Inhalte in der praktischen Anwendung erleben können. Die Veranstaltung ist in den letzten Jahren mit einer mündlichen Prüfung abgeschlossen worden, welche eine weitere Übung zur Vermittlung energietechnischer Inhalte durch die teilnehmenden Studierenden darstellt.

6.1.8 Entwicklungsmethoden und Qualitätssicherungssysteme

Dozent: Dr.-Ing. Tycho Weißgerber

Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Sommersemester



In der aktuellen Produktentwicklung nimmt die Qualitätssicherung einen immer wichtigeren Stellenwert ein, um sich gegen Mitbewerber am Markt abzusetzen. Ersichtlich ist dies unter anderem an der oft erwähnten Zertifizierung nach ISO 9001. Den Studierenden des Masterstudiengangs Elektro- und Informationstechnik sowie des Masterstudiengangs Wirtschaftsingenieurwesens werden in dieser Veranstaltung die Grundlagen der Qualitätssicherung praxisbezogen nahegebracht. So werden Methoden erlernt, die im Entwicklungsprozess von Produkten frühzeitig zur Sicherung der Qualität des Endproduktes ansetzen und wie diese anzuwenden sind. Dabei können verschiedene Qualitätsphilosophien zur Anwendung kommen, die sich auf einzelne Prozessabläufe und Führungsstile auswirken. Als wichtige Methoden der Qualitätssicherung werden die sogenannte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), das Verfahren des Design of Experiments und die Zuverlässigkeitbestimmung vorgestellt.

Die Teilnehmenden verfügen nach erfolgreichem Abschluss der Veranstaltung über Kompetenzen zur Erzeugung von Qualität während des Entwicklungsprozesses, die

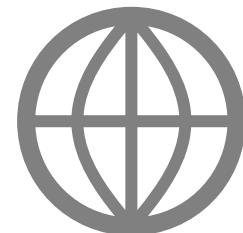
auch Kenntnisse über Führungsstile, Kommunikationsmethoden und Mitarbeitermotivation einschließen. Diese Fähigkeiten helfen den Absolventen schlankere Entwicklungs- und Produktionsstrukturen in der Praxis einzuführen und zu kontrollieren.

6.1.9 Optosensorik für Energieanlagen

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Frank Jenau

Umfang: gesamt: 3 Semesterwochenstunden (SWS),
davon Vorlesung: 2 SWS; Übung: 1 SWS

Turnus: Jährlich zum Wintersemester



Die Veranstaltung *Optosensorik für Energieanlagen* richtet sich an Studierende des Master-Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik sowie des Master-Studiengangs Wirtschaftsingenieurwesen mit der Vertiefung Management elektrischer Systeme.

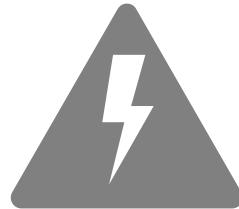
Vermittelt werden Grundlagen und Möglichkeiten der praktischen Umsetzung zur unkonventionellen Erfassung elektrischer Größen auf Basis von optischen Effekten. Neben den nötigen mathematischen Grundlagen sind die sensorischen Effekte ein Hauptbestandteil dieser Veranstaltung. Darunter fallen die thermische, mechanische und elektrische Beeinflussung der elektromagnetischen Welle in Form von Licht. Die dafür nötigen Komponenten werden ebenso behandelt, wie die Erfassung der Messdaten und Auswerteverfahren.

Nach erfolgreicher Absolvierung kennen die Studierenden die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen optischer Sensoren als exemplarischer Bestandteil von Überwachungs- und Schutzeinrichtungen. Sie können eigenständig optische Messanordnungen für gegebene Messaufgaben entwickeln und haben die Fähigkeit verschiedene Sensortechnologien bezüglich spezifischer Vor- und Nachteile zu bewerten.

7 Geräte/Laborausstattung

7.1 Hochspannungs-/Hochstromlabore

Es stehen insgesamt zehn geschirmte und zum Teil DKD-zertifizierte Hochspannungslabore zur Verfügung. Es können Versuche mit Wechsel- und Gleichspannung, sowie Impulsspannung durchgeführt werden.



Folgende Anlagen stehen zur Verfügung:

7.1.1 Wechselspannungsprüfstationen (Auszug)

- 350 kV bei 430 mA
- 200 kV bei 125 mA
- 120 kV bei bis zu 3,5 A, kapazitiv
- 100 kV bei 50 mA, jeweils in vier verschiedenen Kleinlaboren

Alle Wechselspannungsprüfstationen verfügen über die notwendige Messtechnik zur Spannungs- und Teilentladungsmessung. Für die Durchführung von studentischen Praktika steht ein auf didaktische Zwecke zugeschnittenes 100 kV-Labor zur Verfügung. In den Kleinlaboren können durch hochspannungstechnische Bauelemente verschiedene Prüfaufbauten, z. B. zur Erzeugung von Gleich- und Stoßspannungen, realisiert werden.



Abbildung 6: 200 kV-Prüftransformator

7.1.2 Gleichspannungsprüfungen (Auszug)

- 140 kV bei 20 mA bei positiver und negativer Polarität über Gleichrichtung
- 100 kV bei 20 mA bei positiver und negativer Polarität über hochpräzise Spannungsquellen, Restwelligkeit < 0,001 % $U_N \pm 50 \text{ mV}$
- 1.200 kV bei 150 mA bei positiver und negativer Polarität in der Halle des HGÜ-Testzentrums oder als Freiluftanlage

Alle Gleichspannungsprüfsysteme können auch zur Teilentladungsmessung bei Gleichspannung eingesetzt werden. Teilweise verfügen die Anlagen über die Möglichkeit der Ansteuerung und des Auslesens der Messwerte über externe Rechner, so dass automatisierte Prüfabläufe implementiert und dokumentiert werden können.



Abbildung 7: HVDC-Anlage

7.1.3 Hochstromprüfungen

- 10.000 A Wechselstrom (HCTS)
- 4.000 A Gleichstrom

Die Hochstromprüfsysteme können beispielsweise genutzt werden, um Stromwandler zu prüfen oder Prüfkörper durch ohmsche Verluste zu erwärmen. Dazu verfügen die Anlagen teilweise über die Möglichkeit der externen Ansteuerung, so dass eine temperaturabhängige Regelung möglich wird. Dies ermöglicht es unter anderem, Temperaturzyklen zur thermischen Alterung zu durchfahren. Beispielhafte Prüfaufbauten sind in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: 4000 A-Hochstromprüf anlage, hier Einsatz zur thermischen Alterung von Generatorstabisoliersystemen auf Teststäben (links), Heat Cycle Tests System (HCTS) in Anwendung zur thermischen Belastung von Hochspannungskabeln

Stoßspannungs- und Stoßstromprüf anlagen

HGÜ-Testzentrum:

- Blitzstoßspannungen (LI): +/- 3,6 MV (1,2 µs/ 50 µs)
- Schaltstoßspannungen (SI): + 1,7 MV/ -2,6 MV (250 µs/ 2500 µs)
- Very Slow Front Overvoltages (VSFO): +/-600 kV (250 µs/ 50 ms; 5 ms/ 80 ms)
- Überlagerte Impulsspannungsprüfungen (DC+ LI/SI/VSFO) für Kabelprüfungen von Kabeln mit Nennspannungen bis zu 640 kV

AC-Halle:

- 650 kV Blitzstoß- und Schaltstoßspannung (1,2 / 50 µs bzw. 250 / 2500 µs)

Kleinlabore:

- 100 kV Blitzstoß- und Schaltstoßspannung
(1,2/50 µs bzw. 250/2500 µs)
- 100 kA Stoßstrom (8/20 µs)

Alle Stoßspannungs- und Stoßstromprüfsysteme verfügen neben der Messung des Scheitelwertes über die Möglichkeit, den Impulsverlauf aufzuzeichnen. Bei Blitzspannungsprüfungen sind so Auswertungen des Impulses in Anlehnung an gängige Normen möglich.



Abbildung 9: 650 kV-Stoßspannungsgenerator

7.2 DC-Werkstofflabor

An die Betriebsmittel und Werkstoff-Systeme der elektrischen Energieübertragung werden im Zuge der aktuellen Netzentwicklung und Einbindung der HGÜ-Technologie höchste Anforderungen hinsichtlich der Lebensdauer, Verfügbarkeit, Sicherheit sowie der sich im Betrieb einstellenden Gleichstromleitfähigkeit gestellt. Demzufolge ist eine umfassende Charakterisierung der Materialien erforderlich, die es u.a. erlaubt das temperatur- und feldstärkeabhängige Verhalten der Isolierstoffsysteme zu beschreiben. Hierzu ist am Lehrstuhl für Hochspanntechnik ein DC-Werkstofflabor konzipiert und umgesetzt worden, in welchem insbesondere polymere Isolierstoffe mittels Kleinststrommessung untersucht und bewertet werden können. Der räumliche Aufbau (siehe Abbildung 10) ist hierbei so gewählt, dass sämtliche Untersuchungsschritte, angefangen bei der Prüfkörpervorbereitung, über die Prüfkörperkonditionierung bis hin zur materialqualifizierenden Kleinststrommessung und Langzeituntersuchung in einem Labor durchgeführt werden können.

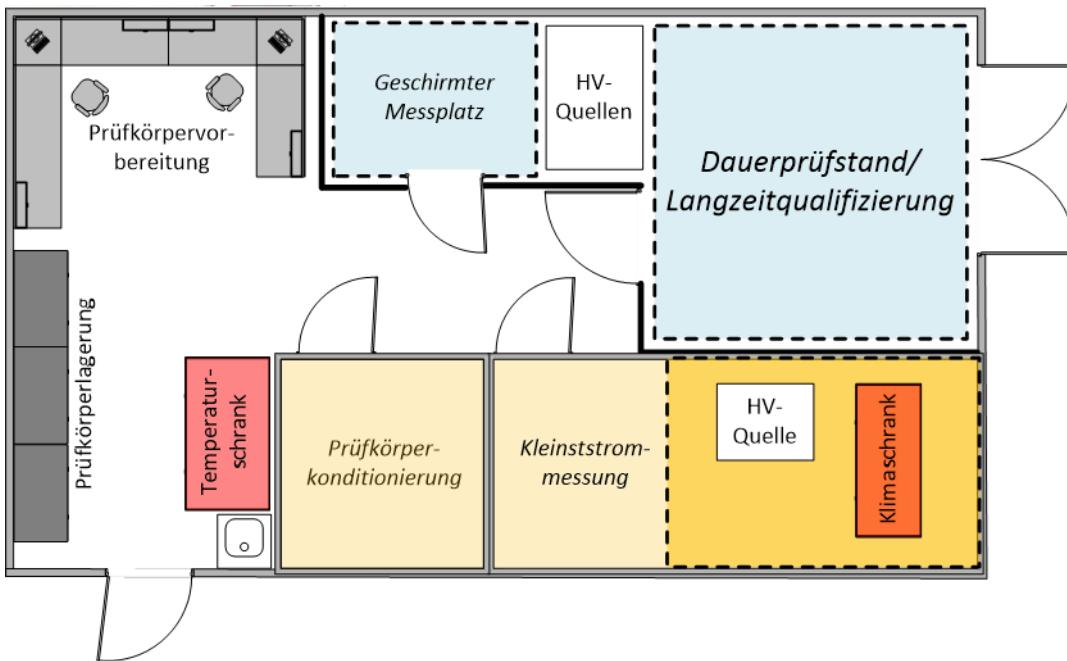


Abbildung 10: Laborübersicht des DC Werkstofflabors

7.3 Raumladungsmesslabor

Eine detaillierte Beschreibung der Ansammlung und Dichte von Raumladungen in polymeren Isolierstoffen nimmt eine zentrale Rolle bei der Bestimmung der elektrischen Feldverteilung und der zuverlässigen Auslegung extrudierter Isolationssysteme in der HGÜ ein.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Labor zur experimentellen Ermittlung von Raumladungen mittels gepulst elektroakustischer (PEA) Methode am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik realisiert. Herzstück dieses Labors bildet ein Raumladungsmesssystem welches u.a. aus einer DC-Quelle (Spellman SL150PN1200), einem digitalen Oszilloskop (Tektronix DPO 5034 B) und einem Impulsgerator (Flechter Type) mit einer Wiederholrate von 150 Hz und Impulsbreite von 10 ns besteht. Die zugehörige Messzelle erlaubt es, Raumladungsverteilungen in Isolierstoffproben bis in den Millimeterbereich bei einer maximal zu applizierenden Spannung von 30 kV mit einer räumlichen Auflösung von ca. 10 µm und einer Genauigkeit von ca. 0,1 C/m³ zu bestimmen. Die Modularität und Auslegung des bestehenden Basissystems sieht zukünftige Erweite-

rungsmöglichkeiten vor, um ebenfalls Isolierstoffproben größerer Dicke und Modellkabel bis hin zu Realkabelgeometrien betrachten zu können. Abbildung 11 zeigt eine Übersicht über das PEA-System und das Raumladungsmesslabor.

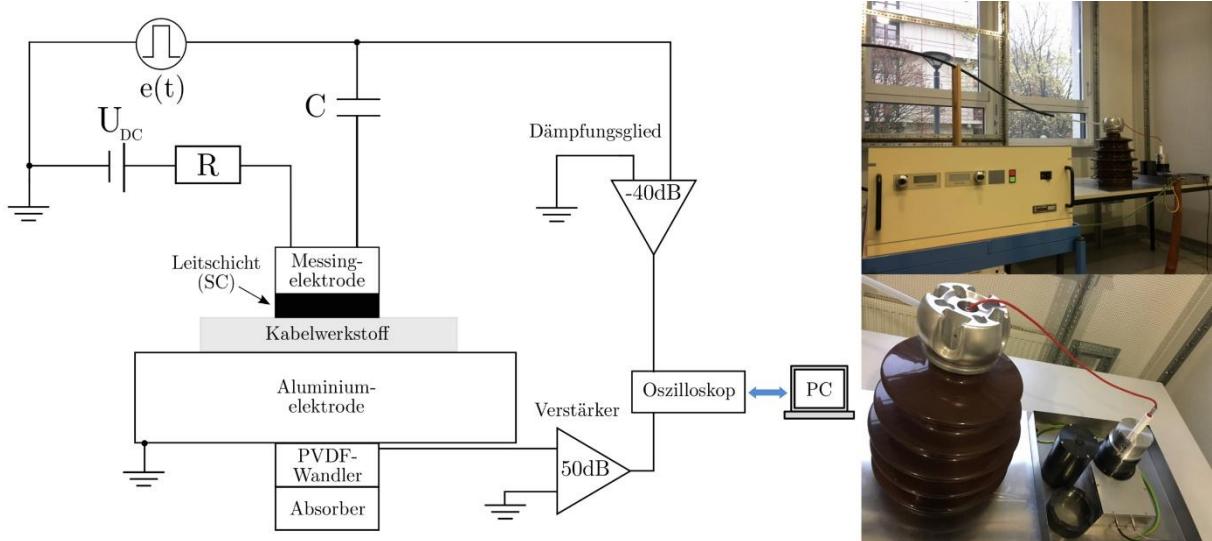


Abbildung 11: Schematischer Messaufbau des PEA-Systems (links), Einblick in das Raumladungsmesslabor (oben rechts), Messzelle des Raumladungsmesssystems (unten rechts)

7.4 Raumladungsmesssystem für koaxiale Kabel

Der Zentrale Anwendungsbereich der Raumladungsmesstechnik ist die Untersuchung von polymeren Isolationssystemen für den Einsatz in der Hochspannungsgleichstromübertragung. Für die Untersuchung von Raumladungsphänomenen in anwendungsnahen Modellkabeln und realen HGÜ-Kabeln wurde das bestehende Raumladungsmesssystem erweitert.

Die Erweiterung besteht aus zwei zusätzlichen Messzellen (Techimp) für die messtechnische Erfassung von Raumladungen mit der PEA Methode. Die eine Messzelle ist für die Untersuchungen von Modellkabeln ausgelegt und hat eine räumliche Auflösung von ca. $40\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Messgenauigkeit von ca. $0,1\text{ C/m}^3$. Die Modellkabel haben Dimensionen im Bereich von herkömmlichen Mittelspannungskabeln mit Isolationsschichten von 3-10 mm. Mit der zweiten Zelle können reale HGÜ-Kabel mit Isolationsschichten im Bereich 6-30 mm vermessen werden. Die Messwerte haben eine räumliche Auflösung von ca. $110\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Messgenauigkeit von ca. $0,1\text{ C/m}^3$. Zum

Messsystem gehören ebenfalls zwei Impulsgeneratoren (Techimp), die mit Impulsbreiten von 40 ns und 110 ns auf die jeweilige Messzelle abgestimmt sind. Zur Applikation der Impulse, die nicht analog zur Messzelle für dünne Schichten über die Hochspannungselektrode stattfinden kann, wird eine zusätzliche Verschaltung mit einer Anpassungsimpedanz genutzt, die den Impuls über den Kabelschirm auf den auf Hochspannungspotential liegenden Innenleiter einkoppelt. Für die Nachbildung des Betriebs mit Gleichspannung werden verschiedene Gleichspannungsquellen genutzt, die die Modellkabel mit Spannungen von bis zu ± 150 kV belasten können. Das Messsystem wird durch ein Oszilloskop (Tektronix DPO 5034 B) zur Messwertaufnahme vervollständigt.

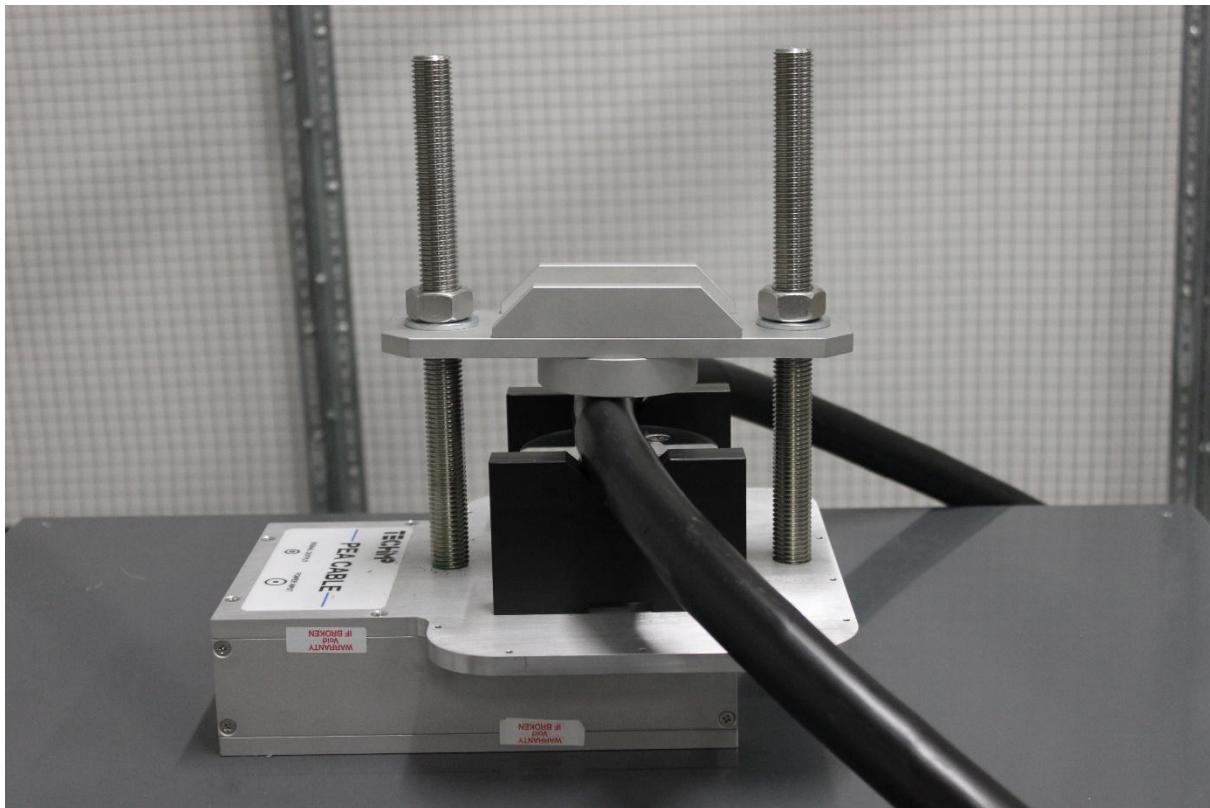


Abbildung 12: Raumladungsmesszelle für Modellkabel mit 10 kV Mittelspannungskabel

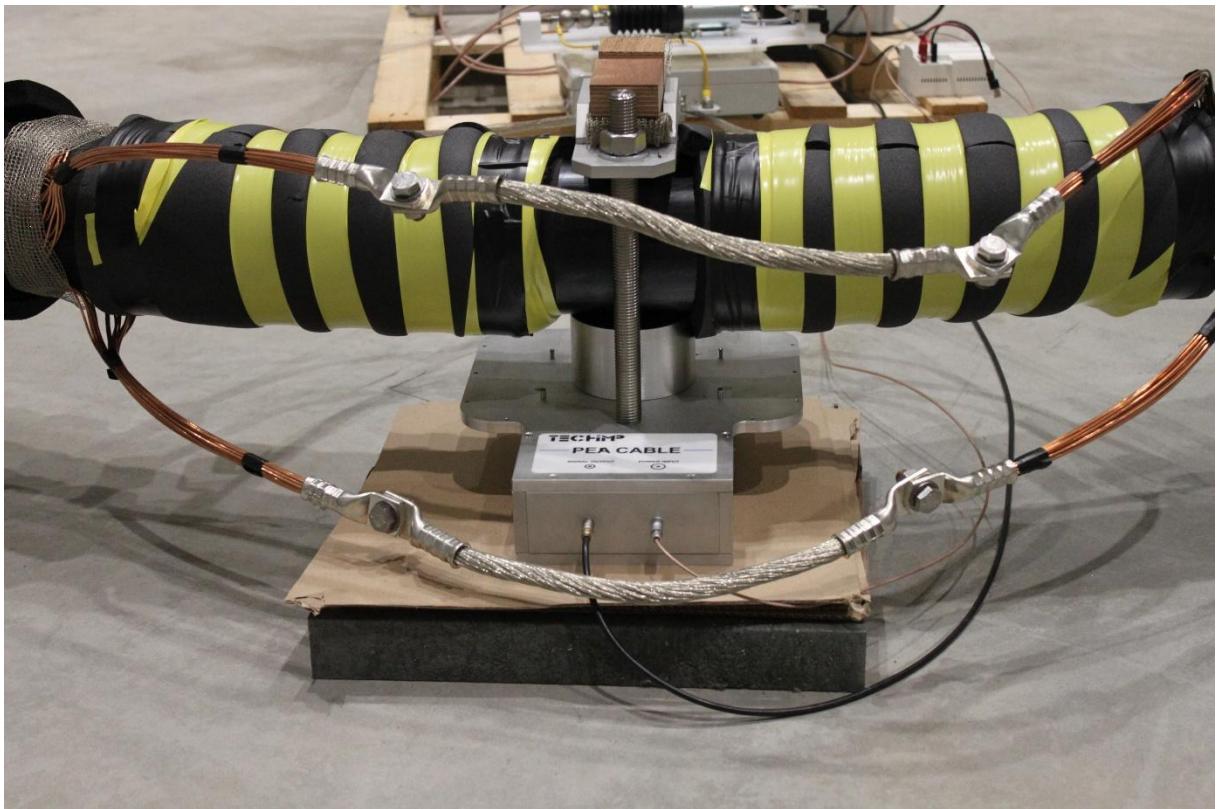


Abbildung 13: Raumladungsmesssystem für ein 525 kV-Kabel im HGÜ-Testzentrum

7.5 Wechselbiegeanlage

Zur realitätsnahen Mehrfachbelastung von Generatorstäben steht eine sogenannte Wechselbiegeanlage zur Verfügung. Hier können bis zu drei Generatorstäbe in originalem Querschnitt einer simultanen elektrischen, mechanischen und thermischen Belastung unterzogen werden, wobei die Parameter unabhängig voneinander eingestellt werden können. So sind Prüfungen bei Temperaturen bis zu +200 °C und einer Spannung von 30 kV möglich. Die Generatorstäbe können mit einer Kraft von maximal 15 kN belastet werden. Somit ist es möglich, Generatorstäbe einer realitätsnahen, aber dennoch beschleunigten Alterung auszusetzen, um so das bestehende Isoliersystem zu optimieren. Abbildung 14 zeigt den Prüfungsraum der Wechselbiegeanlage mit drei eingespannten Generatorstäben.



Abbildung 14: Innenraum der Wechselbiegeanlage. Waagerecht drei in die Anlage eingespannte Generatorstäbe

7.6 Klimaprüfkammer

Für die Untersuchung äußerer klimatischer Einflüsse steht am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik eine Klimakammer zu Verfügung. Im Prüfungsraum mit Abmessungen von $6 \times 2 \times 2$ m kann eine Temperatur zwischen -40°C bis $+180^{\circ}\text{C}$ und eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 15 % und 95 % eingestellt werden. In den Prüfungsraum eingebauchte Prüflinge werden über eine Hochspannungsdurchführung vom benachbarten Maschinenraum mit einer Wechsel- oder Gleichspannung bis zu 100 kV beaufschlagt. Durch die Möglichkeit, neben der Temperatur auch die Luftfeuchtigkeit zu regeln, sind realitätsnahe Untersuchungen an wetterbeanspruchten Anordnungen möglich. Aus Abbildung 15 sind die äußeren Dimensionen der gesamten Prüfanlage ersichtlich. Um auch sperrige Prüfgüter in den Prüfungsraum einbringen zu können, befindet sich die Tür an der Kopfseite der auf einem ISO-Container basierenden Anlage. Darüber hinaus besteht seit Frühjahr 2023 die Möglichkeit, Prüflinge mit Stickstoff und Sauerstoff zu spülen und zu befüllen.



Abbildung 15: Klimakammer. Außenansicht (links) und Sicht in den Prüfungsraum mit exemplarischem Hochspannungsisolator als Prüfling (rechts)

7.7 Optiklabor

Optische Sensoren zeigen gegenüber klassischen induktiven Wandlern Vorteile, die gerade in Mittel- und Hochspannungsnetzen auf besonderes Interesse stoßen. So besitzen optische Strom- und Spannungssensoren eine intrinsische Isolierung, die eine einfache Skalierung auf beliebige Spannungsebenen erlaubt. Für die Konstruktion und Untersuchung von optischen Elementen und Sensoren stehen im Optiklabor verschiedene Werkzeuge und Gerätschaften zur Verfügung. Zurzeit liegt der Fokus auf der optisch basierten interferometrischen In-Line Messung des Faraday Effektes mit polarimetrischer Auswertung. Zu diesem Zweck entstand in den letzten Jahren ein optischer Aufbau zur Messung der Faserempfindlichkeit an HiBi-Spun Fasern sowie das Knowhow zur Fertigung von In-Line $\lambda/4$ -Faserverzögerern. Die Messung der Faserempfindlichkeit ist live während des Spleißvorganges der Faserverzögerer möglich um den Prozess ideal zu überwachen. Zu diesem Zweck wird ein Ericsson FSU 995 PM Spleißgerät und ein 3-Achsen V-Nut Furukawa Spleißgerät verwendet. Das Optik-Labor ist zudem mit diversen Leistungsmessern für 1310 nm und 1550 nm ausgestattet. Achromatische Fiber-Ports und Fiber-Benches von Thorlabs sowie Polarisationsopti-

sche Elemente und faseroptische Elemente wie Zirkulatoren und In-Fiber Polarisatoren können die Aufbauten beliebig erweitern. Alle Elemente können z.B. genutzt werden, um die lineare Doppelbrechung von Polarisatiaonserhaltenden Fasern am Gitterspektrometer zu ermitteln oder den Faraday-Effekt zu messen. Das Optik-Labor verfügt über eine Superluminesenzdiode mit gaußförmigem Spektrum mit Ausgangsleistung 30 mW für 1310 nm sowie speziellen Glasfasern wie HiBi-Spun Fasern (BowTie, Elliptisch) und Polarisationserhaltende Fasern (Elliptisch, BowTie, Panda). Neben der optischen Strommessung wurden Kompetenzen in der fluoreszenzbasierten Teilentladungsmessung aufgebaut. Das Optiklabor beherbergt Werkzeuge, um fluoreszierende Kunststofffasern zu polieren und bspw. mit Photomultiplizierern präzise zu verkleben. Zur Untersuchung der Fluoreszenzeigenschaften der Kunststofffasern wurde ein Aufbau mit verschiedenen Freistahl gekoppelten LED's (UV bis rote Abstrahlung) sowie diversen Transimpedanzverstärkern realisiert.

7.8 Studentische Praktikumslabore

Für die Durchführung zahlreicher hochspannungsthematisierende Laborpraktika steht ein Labor mit einem 100 kV-Prüftransformator zur Verfügung. Das Labor ist komplett mit einem Sicherheitskäfig ausgestattet und es können Gleich-, Wechsel- und Blitzstoßspannungen im zweistelligen Kilovolt-Bereich erzeugt und gemessen werden. In dem 100 kV-Praktikumslabor werden insbesondere die sicherheitsrelevanten Aspekte für die Durchführung von Hochspannungsversuche vermittelt und praktisch im Labor angewendet. Die Praktika dienen zur Vermittlung der Diagnosemethoden für die Zustandsbewertung von Isolierstoffen, als auch der Vermittlung der gasphysikalischen Grundlagen bei der Entstehung von Teilentladungen unter Berücksichtigung des Polaritätseffektes. Das generelle Erzeugen und Messen von hohen Wechsel- und Stoßspannungen wird praktisch thematisiert.



Abbildung 16: 100kV-Praktikumslabor

Neben dem Hochspannungs-Praktikumslabor (100 kV) steht ein studentisches Labor mit 16 Arbeitsplätzen zur Verfügung. Jeder Arbeitsplatz ist mit mehreren Anschlüssen (Standard-Netzspannung von 230 V) und entsprechender Sicherheitstechnik ausgestattet, sodass vor allem Grundlagenveranstaltungen betreffende Praktikumsversuche, wie beispielsweise im Rahmen von Grundlagen der Elektrotechnik, Energietechnik oder Messtechnik, in diesem Labor durchgeführt werden.

7.9 Messsysteme und -einrichtungen

Zur Messung verschiedener elektrischer und dielektrischer Parameter, sowie zur Charakterisierung von Materialeigenschaften stehen unter anderem folgende Messeinrichtungen zur Verfügung:

- Analoge und digitale Mess- und Analysesysteme für Teilentladungsmessung bei Wechsel- und Gleichspannung
- Optische und akustische Teilentladungsdetektoren

- Widerstandsmesssysteme von einigen $m\Omega$ bis $T\Omega$
- L-C-R-Meter bis zu einer Testfrequenz von 10 MHz
- Analoge und digitale frequenzvariable $C/\tan \delta$ -Messsysteme
- Feststoff-Messzelle zur $C/\tan \delta$ -Bestimmung von Feststoffen bei Variation des Umgebungsdrucks und der Temperatur
- Flüssigkeits-Messzelle zur Leitfähigkeits- und $C/\tan \delta$ -Bestimmung in Anlehnung an Norm
- Prüfanordnungen zur Bestimmung der Durchschlagsspannung von Feststoffen und Flüssigkeiten
- Schutzringanordnungen verschiedener Dimension für Feststoffe und Flüssigkeiten zur Leitfähigkeitscharakterisierung
- Geräte der Hochfrequenz-Messtechnik, einsetzbar für EMV-Messungen:
 - Signalgeneratoren bis 2 GHz
 - Leistungsverstärker bis 100 W bei 1 GHz
 - Leistungsmessgeräte
 - Messempfänger bis 3 GHz
 - Antennen und Feldsonden bis 18 GHz
 - Netzwerkanalysator von 1 Hz bis 50 MHz & 300 kHz bis 8,5 GHz
- Vollgeschirmte Messplätze verschiedener Größen



Abbildung 17: Anordnungen zur Materialuntersuchung: Kugelkalotten zur Bestimmung der Durchschlagsspannung von Flüssigkeiten (links), Schutzring-Anordnung zur tan δ-Messung von Flüssigkeiten (mittig), Messzelle zur Bestimmung des tan δ von Feststoffen

8 Veranstaltungen

Unser Lehrstuhl begleitet nicht nur Studierende während des Bachelor- und Masterstudiums, sondern bietet Einblicke ins Studium für Schüler:innen bei unterschiedlichen Veranstaltungen. Außerdem präsentieren wir unsere Arbeiten auch im Rahmen des Tags der offenen Tür der TU Dortmund.



8.1 Tag der offenen Tür

Turnus: jährlich, 1. Novemberwochenende

Zum Tag der offenen Tür an der TU Dortmund bieten wir sowohl Führungen durch unser HGÜ-Testzentrum als auch eine praktische Vorführung von Entladungsphänomenen in unseren Hochspannungslaboren an. Beide Veranstaltungen richten sich an ein breites Spektrum von Interessent:innen aller Altersstufen und setzen kein Vorwissen voraus. Ob angehenden Studierenden der Elektrotechnik oder Fachfremden mit Interesse an Prüftechnik und Experimenten der Hochspannungstechnik, wir zeigen und erklären allen gerne unsere Ausstattung und Forschungsthemen. Dabei gehen wir auch auf Fragen ein, die zu den Vorführungen oder auch zu anderen Themen der Hochspannungstechnik gestellt werden.

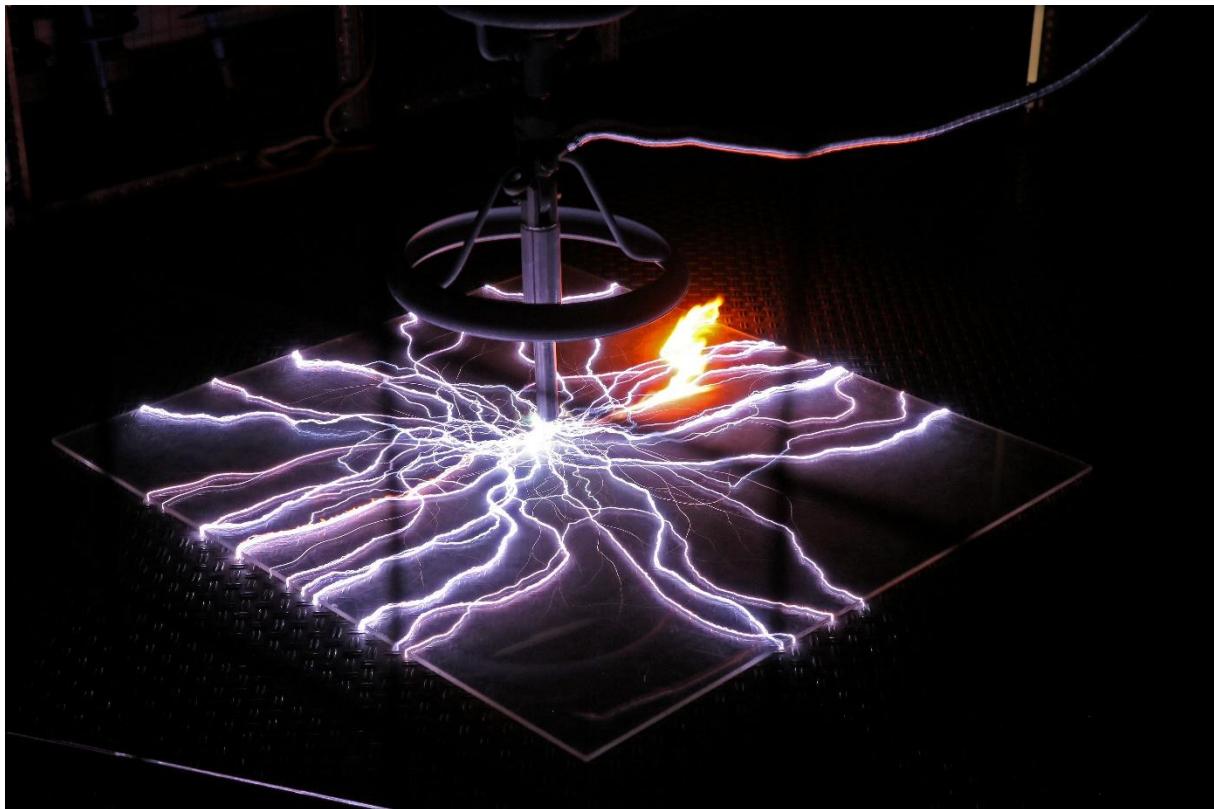


Abbildung 18: Entladungsphänomene am Tag der offenen Tür

8.2 SchnupperUni, SchülerUni & Girls Day

Im Rahmen unterschiedlicher Veranstaltungen für Schüler:innen ab der zehnten Klasse führen wir in unseren Laboren ausgewählte Hochspannungsexperimente vor. Hierbei gewinnen die Schüler:innen einen Einblick in die labortechnische Arbeit und erfahren, was bei Hochspannung alles zu beachten ist. Dabei erzeugen wir besonders gerne „Blitze“ im Labor und erklären, wie wir die genutzte Technik in der Forschung einsetzen, um die Energiewende mitzustalten.

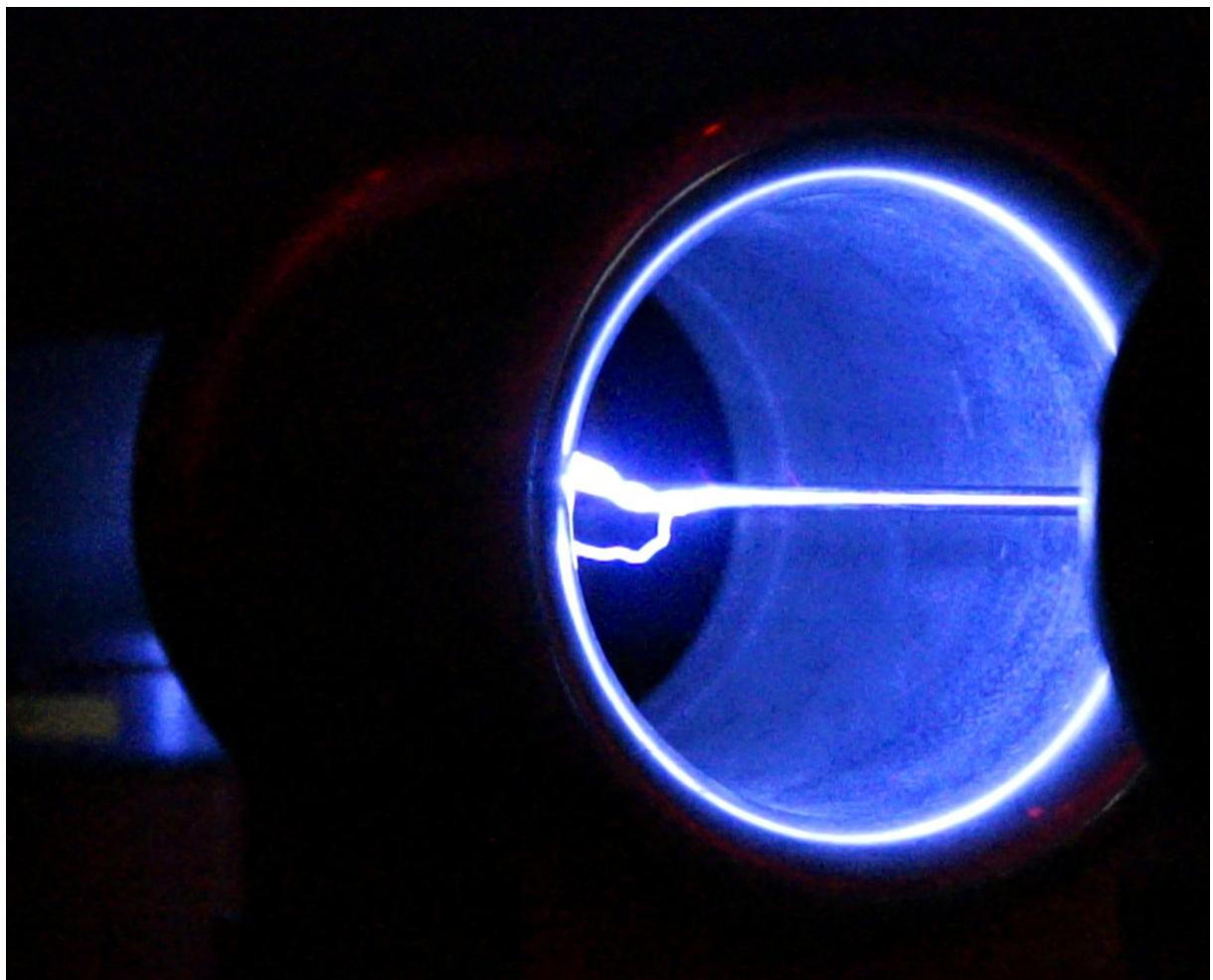


Abbildung 19: „Blitze“ im Labor für interessierte Schüler:innen

8.3 Tag der Elektrotechnik

Turnus: jährlich zur akademischen Jahresfeier der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Im Rahmen der akademischen Jahresfeier der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik beteiligt sich unser Lehrstuhl an den Vorträgen der einzelnen Professuren und bietet einen Einblick in aktuelle Forschungsthemen. Interessierte können hier zu allen wissenschaftlichen Fragestellungen in den Austausch gehen.