

INHALT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	8
3.1	VORLESUNGEN	8
3.2	PRAKTIKA.....	14
3.3	EXKURSIONEN	15
3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN.....	16
4.	PROMOTIONEN.....	29
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	40
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	44
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	72
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	108
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	120
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	125
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	128
9.	LAGEPLÄNE.....	130

1. VORWORT

Liebe Freundinnen und Freunde des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

im Jahr 2023 verzeichnete die Energiewende in Deutschland bedeutende Fortschritte. Mit einer Quote von etwa 52 % bei der Deckung des Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien erreichte man ein bemerkenswertes Ergebnis. Gleichzeitig stieg die installierte Leistung der erneuerbaren Energieanlagen um 17 GW auf etwa 170 GW an. Besonders erwähnenswert ist der Anstieg der Solaranlagen um 14 GW, der im Vergleich zum Vorjahr eine Verdopplung darstellt. Obwohl diese Zahlen noch nicht ausreichen, um die klimapolitischen Ziele rechtzeitig zu erreichen, deutet der deutlich positive Trend in die richtige Richtung. Die beschlossenen und eingeleiteten Änderungen und Weiterentwicklungen im regulatorischen Bereich, wie das Gebäudeenergiegesetz, das Energieeffizienzgesetz, der "Deutschlandpakt" zur Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsverfahren, die Neuausgestaltung des §14a des EnWG sowie die Stromspeicherstrategie des Bundeswirtschaftsministeriums, sollen die Energiewende weiter vorantreiben. Es bleibt zu hoffen, dass dieser Trend auch in Zeiten knapper Kassen weiter anhält.

Leider stellen nicht nur finanzielle Ressourcen, sondern auch der Fachkräftemangel ein Hindernis dar. Um Schüler*innen die Attraktivität des Ingenieurberufs im Bereich der Energiewende zu verdeutlichen, haben wir einen Tag der Erneuerbaren Energien veranstaltet. Die zentrale Veranstaltung war ein Kolloquium, bei dem Absolventen des Studiengangs Erneuerbare Energien ihre Arbeitgeber und Tätigkeitsbereiche vorstellten. Dies wurde durch verschiedene Institutsbesichtigungen und einen Markt der Möglichkeiten flankiert, bei dem Unternehmen der Energiewende ihre Arbeit präsentierten. Dadurch erhielten die zahlreich teilnehmenden Schüler*innen die besten Gelegenheiten, mit den Akteuren der Energiewende zu sprechen und das breite Spektrum kennenzulernen, um eine fundierte Ausbildungsentscheidung zu treffen. Wir hoffen, dass solche Informationsveranstaltungen Früchte tragen und die Anzahl der Studienanfänger*innen gesteigert werden kann.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir wieder auf ein gelungenes Jahr zurückblicken. Es wurden 32 wissenschaftliche Publikationen in Konferenzbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht, die unsere Forschungsaktivitäten eindrucksvoll dokumentieren. Auch in diesem Jahr können wir vier Kollegen zur erfolgreichen Dissertation gratulieren. Adrian Eisenmann, Manswet Banka, Heiner Früh und Daniel Passow promovierten entsprechend zu den Themen *„Vorhersage und Minderung von Problemen der Strom- und Spannungsqualität durch Einsatz von künstlicher Intelligenz“*, *„Multi-Agenten-basierte Strategien zum Teilnetzbetrieb und zur Unterstützung des Netzwiederaufbaus aus Verteilnetzen“*, *„Aktiver Verteilnetzbetrieb zur systemdienlichen Nutzung von betrieblichen Flexibilitäten“* und *„Autarkes Zustandsmonitoring von Kabelmuffen auf Basis integrierter Teilentladungs- und Temperatursensorik“*. Dr. Daniel Passow erhielt für seine Dissertation den Preis für herausragende Dissertationen von der Dr. Wilhelmy-Stiftung. Prof. Rudion wurde für

eine weitere Amtszeit in den Vorstand des Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V. gewählt.

Wir haben einige unserer Projekte erfolgreich zu Ende führen können. Dabei wurden die durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekte flexQgrid, ZÜbReNe, E-DropSep und Lebensdauermodell für Wicklungsisolierung und das durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr geförderte Projekt TruckConnect abgeschlossen. Wir können eine sehr positive Bilanz nach Abschluss dieser Projekte ziehen und bedanken uns bei den Fördergebern sowie Projektpartnern für eine hervorragende Unterstützung. Gleichzeitig haben wir das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt Bid-E-V gestartet.

Das Jahr 2023 brachte auch einige personelle Veränderungen am Institut. Unsere erfahrenen Mitarbeiter*innen Chandra Beura, Jonas Graf und Zeenat Hanif haben das Institut verlassen. Neu in unserem Team der wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen begrüßen wir Johannes Beck, Jonas Bux, Yang Hu, Stefan Köbel, Lucia Schnee, Emir Sulejmani und Henrik Wissel. Wir wünschen allen ehemaligen IEHler*innen alles Gute und viel Erfolg bei ihren neuen Beschäftigungen und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit unseren neuen und alten Mitarbeiter*innen.

Allen Freund*innen, Unterstützer*innen und Kooperationspartner*innen des IEH möchten wir herzlich für die gemeinsame Arbeit und Hilfe danken. Besonderer Dank gilt jenen Firmen, die uns durch Aufträge und Spenden unterstützt haben sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg und der deutschen Forschungsgesellschaft (DFG).

Wir freuen uns, wenn dieser Jahresbericht dazu beitragen kann, neue Impulse zu setzen, Kontakte zu knüpfen und mit allen Freund*innen des IEHs in Verbindung zu bleiben. Ganz besonders möchten wir dazu auch wieder auf das wertvolle Kapitel der studentischen Arbeiten hinweisen, zu denen wir auch wieder in diesem Jahresbericht Kurzfassungen der abgeschlossenen Masterarbeiten präsentieren.

Stuttgart, im März 2024

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

PREFACE

Dear friends!

In 2023, the energy transition in Germany made significant progress. With a quota of around 52% of gross electricity consumption covered by renewable energies, a remarkable result was achieved. At the same time, renewable installed capacity increased by 17 gigawatts (GW) to a total of around 170 GW. Particularly noteworthy is the growth in solar capacity, which amounted to 14 GW and doubled compared with the previous year. These figures are not yet sufficient to achieve the climate policy targets on time, but the clearly positive trend is moving in the right direction. The German government has adopted and passed energy policy amendments and new regulations to drive forward the energy transition such as the Buildings Energy Act (GEG), the Energy Efficiency Act, the Pact for Accelerating Planning, Approval and Implementation – a central component of the “Pact for Germany”, the revision of paragraph 14a of the Energy Industry Act (EnWG) and the Electricity Storage Strategy tabled by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. Hopefully this trend will continue even in times facing tight budgets.

Unfortunately, financial resources and the ongoing shortage of highly qualified specialists are posing major challenges to the companies. We have therefore organized a “Day of Renewable Energies” for school-pupils to promote the attractiveness of the engineering profession in the field of energy transition. The central event was a colloquium at which graduates of the study program Renewable Energy Engineering presented their employers and areas of work enhanced by various institute tours and a market of opportunities where companies involved in the energy transition presented their work. This gave the numerous students who attended the event the perfect opportunity to talk to those involved in the energy transition and to gain an insight into various fields of renewable energy engineering in order to make an informed decision about their future careers. We hope that such events will provide useful information and help to increase the number of first-year students.

In the research work we can look back on a successful year. 32 scientific publications were published in conference proceedings and journals, which impressively document our research activities. Also this year, we can congratulate four colleagues on achieving the doctorate degree. Adrian Eisenmann, Manswet Banka, Heiner Früh und Daniel Passow completed their doctorates on the following topics: *„Artificial Intelligence supported Power Quality Prediction and Mitigation“*, *„Multi-Agent Based Strategies for Power System Island Operation and System Restoration Support from Distribution Grids“*, *„Active Distribution System Operation For The Coordinated Provision Of Operational Flexibilities“* and *„Autonomous Condition Monitoring of Cable Joints Based on Integrated Partial Discharge and Temperature Sensors“*. Dr. Daniel Passow received for his dissertation the Dr. Wilhelmy Prize. The prize is awarded annually by the Dr. Wilhelmy Foundation for an outstanding dissertation. Prof. Rudion has been voted to the Board of Management of the Smart Grids-Platform Baden-Württemberg e.V. for a further term of office.

We were able to successfully complete some of our projects such as the flexQgrid, ZÜbReNe, E-DropSep und the development of a lifetime model for the winding insulation of electrical machines, which were funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, as well as the project TruckConnect funded by the Federal Ministry for Digital and Transport. We can draw a very positive balance after successful project completion and thank the funding sponsors as well as project partners for their excellent support. At the same time, we launched the new project Bid-E-V funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action.

During the year 2023, there were several personnel changes. Our experienced staff members Chandra Beura, Jonas Graf and Zeenat Hanif have left the Institute. In return, we welcome Johannes Beck, Jonas Bux, Yang Hu, Stefan Köbel, Lucia Schnee, Emir Sulejmani and Henrik Wissel to our scientific team. We wish the former colleagues all the best in their future employment and look forward to working with our new and current team members.

We would like to send our sincere thanks to all our friends, supporters and cooperation partners who have contributed to our success in many ways. In particular we would like to express our gratitude to the partners who supported us with research contracts and donations, to the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV), the Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector Baden-Württemberg and to the German Research Foundation (DFG).

We hope that our annual report will set up new impulses, strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. We would like to draw your particular attention to the chapter on student theses. Abstracts of the completed master's theses you will also find in this annual report.

Stuttgart, March 2024

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

e-mail:

vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de

firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de

Telefon / phone:

+49 (0)711-

Institutsleiter /

Head of Institute:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN

-685-67871

Leiter des Fachgebiets Netzintegration erneuerbarer Energien:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof RUDION

-685-67872

Prof. im Ruhestand:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER

Lehrbeauftragte:

Dr.-Ing. Volker RISCHMÜLLER

Robert Bosch GmbH

Dipl.-Ing. Rainer JOSWIG

Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH

Schneider Electric Energy GmbH

Dr.-Ing. Markus PÖLLER

Moeller & Poeller Engineering GmbH

Hon.-Prof. Dr. Techn. Dr.-Ing. habil. Konstantin PAPAILIOU

Oberingenieure:

M. Sc. Markus MILLER

-685-67869

Dr.-Ing. Michael BELTLE

-685-68061

(Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)

Akademische Mitarbeiter /

Scientific Staff:

M. Sc. Fatemeh AHMADIPOUR

-685-69194

M. Sc. Lars BARONAT

-685-61523

M. Sc. Johannes BECK (ab 01.06.2023)

-685-67803

M. Sc. Chandra Prakash BEURA (bis 31.12.2023)

M. Sc. Paul BURKHARDT

-685-61735

M. Sc. Jonas BUX (ab 01.05.2023)

-685-61722

M. Sc. Deepak DEEPAK

-685-67889

M. Sc. Markus FISCHER

-685-61525

M. Sc. Nelly-Lee FISCHER

-685-69138

M. Sc. Malte GERBER

-685-69168

M. Sc. Jonas GRAF (bis 31.12.2023)

M. Sc. Michaela GRUBER

-685-67868

M. Sc. Zeenat HANIF (bis 31.01.2023)

M. Sc. Chuxuan HE	-685-67857
M. Sc. Yang HU (ab 01.03.2023)	-685-68884
M. Sc. Kevin KRATZ	-685-60832
M. Sc. Stefan KÖBEL (ab 01.02.2023)	-685-69193
M. Sc. Sharon MÜLLER	-685-67875
M. Sc. Felipe PROBST	-685-67885
M. Sc. Jan SCHABEL	-685-67874
M. Sc. Lucia SCHNEE (ab 18.12.2023)	-685-69152
M. Sc. Emir SULEJMANI (ab 12.06.2023)	-685-67804
M. Sc. Inti Runa SUPA STÖLBEN	-685-69139
M. Sc. Charlotte WAGNER	-685-67838
M. Sc. Kathrin WALZ	-685-69196
M. Sc. Henrik WISSEL (ab 01.07.2023)	-685-67845

Sekretariat /

Secretary:

Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:

Janja SCHULZ -685-67870

Annette GUGEL -685-67880

Hochspannungslabor Ostfildern:

Konstanze LINS -685-69175

Buchhaltung /

Accounting:

Elisabeth WEILANDT -685-67876

Technische Angestellte /

Technical Staff:

Erwin BECK, *Mechanikermeister* -685-67847

Lothar EHINGER, *Elektromeister* -685-61526

Timon GOLD, *Zentralwerkstattleiter* -685-67847

Daniel HARTICH, *Mechaniker* -685-67847

Michael HERDTLE, *Mechaniker* -685-69161

Edona KUQI, *Mechanikermeisterin* -685-67847

Hartmut RÖNISCH, *Elektrotechniker* -685-67856

Christian WÖLZLEIN, *IT-Systemkaufmann* -685-67863

3. LEHRE

3.1 VORLESUNGEN

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Elektrische Energietechnik I

Sommersemester, 2 V, 1 S, für 2. Semester Bachelor

- *Aufgabe und Bedeutung der elektrischen Energieversorgung*
- *Energiewandlung in Kraftwerken*
- *Aufbau von Übertragungs- und Verteilnetzen*
- *Betriebsverhalten elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme und Kurzschlussstrombegrenzung*
- *Überspannungen und Isolationskoordination*
- *Sicherheitsfragen*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik I

Wintersemester, 2 V, 2 S, für 5. Semester Bachelor

- *Auftreten und Anwendung hoher Spannungen bzw. Ströme*
- *Einführung in die Hochspannungsversuchstechnik*
- *Berechnung elektrischer Felder*
- *Isolierstoffe*
- *Isolierstoffsysteme in Hochspannungsgeräten*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik II

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Schaltvorgänge und Schaltgeräte*
- *Die Blitzentladung*
- *Repräsentative Spannungsbeanspruchungen*
- *Darstellung von Wanderwellenvorgängen*
- *Begrenzung von Überspannungen*
- *Isolationsbemessung und Isolationskoordination*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION***Elektrische Energienetze I***

Wintersemester, 2 V, 2 S, für 5. Semester Bachelor

- *Aufgaben des elektrischen Energienetzes*
- *Einpolige Ersatzschaltungen der Betriebselemente für symmetrische Betriebsweise*
- *Lastflussberechnung*
- *Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme bei symmetrischem Kurzschluss*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION**M. SC. M. MILLER*****Elektrische Energienetze II***

Wintersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Kennwerte von Drehstrom-Freileitungen und Kabeln*
- *Symmetrische Komponenten*
- *Belastbarkeit von Kabeln*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*
- *Lastflussberechnung*
- *Netzurückwirkungen*
- *HGÜ*

PROF. DR.-ING. K. RUDION***Smart Grids***

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Anforderungen der zukünftigen Energieversorgung*
- *Smart Grid Konzepte (z. B. Virtuelle Kraftwerke, Mikronetze)*
- *Regelung dezentraler Erzeuger, Speicher und Lasten (z. B. Photovoltaik und Elektrofahrzeuge)*
- *Modellierung und Simulation elektrischer Netze*
- *Versorgungsqualität*
- *Netzbetriebsführung und Systemdienstleistungen*
- *Netzanschlussbedingungen*
- *Smart Metering*
- *Informations- und Kommunikationstechnik für Smart Grids*

PROF. DR.-ING. K. RUDION***Planung und Betrieb elektrischer Netze mit dezentraler Einspeisung***

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Grundlagen der Netzplanung mit DEA*
- *Grundlagen des Netzbetriebes*
- *Modellierung der relevanten Betriebsmittel*
- *Windparkmodellierung*
- *Zuverlässigkeitsanalyse von elektrischen Netzen*
- *Aspekte der Elektrizitätswirtschaft und Investitionsbewertung*
- *Liberalisierter Energiemarkt*
- *Systembeobachtbarkeit und PMU*
- *DSA und BlackOut-Prävention*
- *NSM und Versorgungssicherheit*
- *Netzsimulation*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN**DR.-ING. M. BELTLE*****Elektromagnetische Verträglichkeit***

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Bachelor-/Master-Studierende

- *Einführung, Begriffsbestimmung*
- *EMV-Gesetz*
- *EMV-Umgebung*
- *Allgemeine Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV*
- *Aktive Schutzmaßnahmen*
- *Nachweis der EMV*
- *Einwirkung auf biologische Systeme*
- *EMV im Automobilbereich*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN**DR.-ING. M. BELTLE*****EMV- und Hochspannungsmesstechnik***

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Messung von Spannungen und Strömen*
- *Spektrum- und Netzwerkanalysator*
- *Messung von Feldgrößen*
- *Messung dielektrischer Eigenschaften*
- *Messunsicherheiten, Reduktion von Rauschen / Störeinkopplungen*
- *Prüfvorgänge und statistische Auswerteverfahren*

PROF. DR.-ING. K. RUDION***Expertensysteme in der elektrischen Energieversorgung***

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Einführung in die künstliche Intelligenz*
- *Wissensbasierte Systeme*
- *Wissensrepräsentation und -akquisition*
- *Inferenzmechanismen*
- *Fuzzy-Logik und neuronale Netze*
- *Anwendungsbeispiele*

DR.-ING. V. RISCHMÜLLER***Elektromagnetische Verträglichkeit in der Automobiltechnik
EMV für Elektrofahrzeuge***

Sommersemester, 2 V (2 S), für Master-Studierende

- *Grundlagen der EMV in der Automobiltechnik*
- *EMV-Anforderungsanalyse*
- *EMV-Analyse und -Design für komplexe Systeme*
- *EMV-Messtechnik und -Prüfverfahren in der Automobiltechnik*
- *EMV-Simulation*

DIPL.-ING. R. JOSWIG***Elektrische Verbundsysteme***

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Verbundbetrieb großer Netze*
- *Besonderheiten bei der Kupplung von Netzen*
- *Netzführung, Energie-Dispatching und Netzleittechnik*
- *Netzregelung in Verbundsystemen*
- *Elektrizitätswirtschaftliche Verfahren und Kostenfragen*
- *Stromhandel und Marktliberalisierung*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN**DIPL.-ING. T. RUDOLPH*****Diagnostik und Schutz elektrischer Netzkomponenten***

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Monitoring und Diagnose von Betriebsmitteln*
- *Asset Management*
- *Grundlagen der Schutztechnik*
- *Digitale Schutztechnik*
- *Leittechnik*
- *Kommunikationstechnik*

PROF. DR.-ING. K. RUDION***Seminar Netzintegration erneuerbarer Energien***

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Vortragsübungen für Studierende zu wechselnden Themen*

DR.-ING. M. PÖLLER***Netzintegration von Windenergie***

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Stromerzeugung mit Windenergie*
- *Generatoren für Windenergieanlagen*
- *Netzeinbindung von Windenergieanlagen*
- *Planung und Betrieb von Netzen mit hohem Windenergieanteil*
- *Betrieb von Inselnetzen mit hohem Windenergieanteil*
- *Studien zur Netzintegration von Windenergie*

PROF. DR. TECHN. DR.-ING. HABIL. K. PAPAILIOU***Hochspannungsfreileitungen***

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Planung, Wirtschaftlichkeit, Verlustberechnungen*
- *Leitungskonstanten, natürliche Leistung, HGÜ*
- *Maste und Fundamente; Erdungsfragen*
- *Seile und Armaturen, Hochtemperaturseile, Monitoring*
- *Seilschwingungen*
- *Isolatoren, Kompaktleitungen mit Silikonverbundisolatoren*
- *Bau und Unterhalt*
- *Umweltaspekte, EMV, Korona, Designer-Maste, Hybridleitungen*

**PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION
UND WEITERE DOZENTEN DER FAKULTÄTEN 2, 4 UND 5*****Einführung Erneuerbare Energien***

Wintersemester, 4 V, 2 S, für 1. Semester des gleichnamigen Bachelorstudiengangs

- *Klimaschutz und Erneuerbare Energien*
- *Solarthermie*
- *Photovoltaik*
- *Windenergie*
- *Wasserkraft*
- *Biomasse*
- *Wasserkraft*
- *Smart Grids*

**PROF. DR.-ING. K. RUDION
UND WEITERE DOZENTEN DER FAKULTÄTEN 4, 5, 6 UND 7**
Aspekte Autonomer Systeme

Wintersemester, 4 V, für 1. Semester des Masterstudiengangs Autonome Systeme

- *Autonome Systeme - Übersicht zu Methoden und Verfahren*
- *Verteilte autonome Systeme*
- *Security, Privacy, and Cryptography*
- *Autonomie-Stufen in der Industrie*
- *Kybernetische Methoden für autonome Systeme*
- *AI & Machine Learning*
- *Perzeption in Automotivanwendungen*
- *Signalverarbeitung und maschinelles Lernen*
- *Kognitive Produktionssysteme*
- *Autonome Systeme in der Luftfahrt*
- *Autonome Systeme in Fahrzeugen*
- *Autonome Systeme in der Elektroenergieversorgung*

**PROF. DR.-ING. K. RUDION
UND WEITERE DOZENTEN DER FAKULTÄTEN 5, 6 UND 7**
Aspekte der Elektromobilität

Wintersemester, 4 V, für 1. Semester des Masterstudiengangs Elektromobilität

- *Elektrische Antriebskonzepte für Fahrzeuge*
- *Elektrische Maschinen*
- *Leistungselektronik*
- *Elektrische Netze und Smart-Grids*
- *Fahrzeugtechnik*
- *Speichertechnik*
- *Sensorik und Signalverarbeitung*
- *Kommunikation*

3.2 PRAKTIKA

M. SC. M. MILLER

Grundlagenpraktikum

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik sowie des Studiengangs Erneuerbare Energien im 2. Semester.

Die Versuche unseres Instituts sind:

- *Umwandlung und Übertragung elektrischer Energie*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

M. SC. M. MILLER

Fachpraktikum „Hochspannungstechnik“

Das Fachpraktikum „Hochspannungstechnik“ für Bachelor umfasst z.Zt. Versuche mit folgenden Inhalten:

- *Erzeugung, Messung und Anwendung hoher Wechselspannungen*
- *Erzeugung und Anwendung hoher Stoßspannungen*
- *Ermittlung von elektrostatischen Feldern*
- *Wanderwellen*
- *Elektromagnetische Verträglichkeit*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN / PROF. DR.-ING. K. RUDION

Fachpraktikum „Hochspannungstechnik“ bzw. „Energieübertragung“

Für Master-Studierende werden die Fachpraktika in Form kleiner Projekte durchgeführt.

M. SC. M. MILLER

Praktikum im Studiengang „Erneuerbare Energien“

Das IEH bietet einen Praktikumsversuch an, der die Auswirkungen von Wirk- und Blindleistungsflüssen im Verteilnetz auf die Spannungshaltung verdeutlicht. Weiter wird der Wirkungsgrad eines PV-Wechselrichters bei verschiedenen Betriebspunkten bestimmt.

Außerdem liegt die Gesamtorganisation dieses Praktikums, bei dem sieben Institute verschiedener Fakultäten mitwirken, in unserer Hand.

3.3 EXKURSIONEN

9. Februar 2023

Exkursion zur Firma GA Süd GmbH in Fellbach. Neben einer ausführlichen Firmenvorstellung wurden verschiedene Einblicke in die Leitungsplanung und insbesondere in die Bauausführung gegeben. Teilnehmende waren Studierende der Vorlesung „Hochspannungs-Freileitungen“ sowie externe Gasthörernde der Firma TransnetBW sowie wissenschaftliche Mitarbeiter*innen des IEHs.

14. Juni 2023

Exkursion zur Hauptschaltleitung der TransnetBW in Wendlingen mit Führung durch die Hauptschaltleitung und das angrenzende Umspannwerk für Hörer*innen der Vorlesung „Elektrische Verbundsysteme“.

19. Juli 2023

Exkursion zum Südlink-Informationszentrum in Leingarten mit Vorträgen zu Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung und ihrem Bau sowie einer Führung um das künftige Konvertergelände im Rahmen der Vorlesung „Elektrische Verbundsysteme“.

21. Juli 2023:

Exkursion zur IAV in Heimsheim mit Führung durch die EMV-Halle für Hörer*innen der Vorlesungen „Elektromagnetische Verträglichkeit“, „Elektromagnetische Verträglichkeit für Elektrofahrzeuge“ und „EMV in der Automobiltechnik“.

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 01.11.2022 bis 31.10.2023:

Beck, Johannes

Zeitreihenbasierte Simulation von Elektromobilitätslasten auf Gemeindeebene anhand von realem Nutzungsverhalten an Ladepunkten in Baden-Württemberg

Für die Berechnung der Last im Stromnetz durch den Hochlauf der Elektromobilität ist die Simulation deren Lastprofile erforderlich. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Simulation von Ladepunkten anhand von realen Nutzungsdaten. Aus der Simulation der Ladevorgänge werden Lastprofile an Ladepunkten abgeleitet. Durch die Charakterisierung der Ladepunkten werden einzelne Lastprofile kombiniert, um eine Gruppe von Ladepunkten anhand von Standardlastprofilen zu repräsentieren. Diese werden anschließend genutzt, um die Elektromobilitätslast auf Gemeinde- und Postleitzahlebene in Baden-Württemberg für verschiedene Szenarien zu modellieren. Hierzu wird der Energiebedarf der Elektromobilität berechnet, um anschließend den Strombedarf abzuschätzen, indem die Standardlastprofile entsprechend des zu erwartenden Energiebedarfs skaliert werden.

Time series-based simulation of electromobility loads at community level based on real usage behavior at charging points in Baden-Württemberg

Calculating the additional load on the power grid due to the ramp-up of electric vehicles requires the simulation of their load profiles. This work focuses on the simulation of charging processes at charging points based on real usage data. Individual load profiles are combined to represent a group of charging points using standard load profiles. These are used to model the electromobility load at the municipality level in Baden-Württemberg for different scenarios. Therefore, the energy demand of electromobility is calculated in order to subsequently estimate the electricity demand by scaling the standard load profiles according to the expected energy demand.

Boeckstegers, Sven

Untersuchung des Q-on-Demand Potentials zur Betriebsoptimierung in Verteilnetzen

Die Bereitstellung von Systemdienstleistungen verlagert sich durch den Rückbau großer Kraftwerke und den Ausbau dezentraler Energieanlagen immer mehr in den Verantwortungsbereich der Verteilnetzbetreiber. Auch für die Blindleistungsbereitstellung werden deshalb alternative Lösungen benötigt. Mit der Technologie „Q-on-Demand“ werden Wechselrichter dazu befähigt in einem weitaus größeren Maßstab Blindleistung bereitzustellen und eröffnen damit die Möglichkeit neue Aufgaben im Netzbetrieb zu übernehmen. In dieser Arbeit werden zunächst die technischen Grenzen der Wechselrichter ermittelt. Anschließend werden mithilfe linearer Optimierung die Potentiale von Q-on-Demand in einem Niederspannungs-Testnetz zu ermitteln. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass eine deutlich höhere Blindleistungsbereitstellung an die überlagerte Netzebene möglich ist.

Investigation on the Q-on-Demand potential in active distribution networks

The evolving energy landscape, characterized by the expansion of decentralized energy generation, calls distribution network operators to embrace a crucial role in system service provision. Alternative solutions for the provision of reactive power are therefore also required. The technology "Q-on-demand", however, empowers inverters to supply reactive power at an unprecedented scale and thus open up new grid management possibilities. This thesis assesses the technical boundaries of inverters, then deploys a refined operating range model to evaluate Q-on-demand potential in a low-voltage test grid, utilizing linear optimization. Results demonstrate the technology's capacity to significantly amplify reactive power supply to the higher-level grid.

Bux, Jonas

Isolationsverhalten von Foliensystemen unter pulsweitenmodulierter Spannung

Die vorliegende Arbeit untersucht das Isolationsverhalten von Folienkondensatoren, deren Alterungsfaktoren und die daraus abgeleiteten Einflussparameter unter pulsformiger Prüfspannung. Für das im Folgenden beschriebene Hauptprojekt leistet diese Arbeit entsprechende Vorarbeiten und betrachtet dazu zum einen die Eignung bestehender Prüfsetups und Messsysteme für die notwendigen Untersuchungen. Zum anderen wird anhand erster Vorversuche mit kapazitiven Prüflingen eine Vorauswahl derjenigen Parameter getroffen, die für die elektrische Alterung als am kritischsten gelten.

Electrical Isolation of thin films at PWM voltage stress

This thesis examines the insulation behavior of film capacitors, their aging factors and the influencing parameters derived from them under pulsed test voltage. For the main project described in the following, this work carries out corresponding preliminary work and, on the one hand, considers the suitability of existing test setups and measurement systems for the necessary investigations. On the other hand, on the basis of preliminary tests with capacitive test specimens, a preselection of those parameters is made which are considered to be most critical for electrical aging.

Gaddikeri, Sudheendra

Untersuchung der Signalintegrität des Messaufbaus für gestrahlte Emissionsmessungen nach CISPR 25

In dieser Arbeit wird untersucht wie der Messaufbau für die Messung gestrahlter Emissionen nach CISPR 25 (ALSE-Methode) die Signalintegrität eines Bussystems beeinflusst und ob dies wiederum einen Einfluss auf die abgestrahlten Emissionen hat. Zu diesem Zweck wird ein möglichst einfacher Messaufbau mit einem Aufbau verglichen, bei dem der Prüfkabelbaum durch Stecker und Durchführungen verändert wird. Diese Veränderungen können zu verschliffenen Flanken oder Reflexionen aufgrund von Fehlanpassungen führen.

Investigation of signal integrity of measurement setups for radiated emission measurements according to CISPR 25

This thesis examines how the test setup for measuring of radiated emissions according to CISPR 25 (ALSE method) influences the signal integrity of a bus system and

whether this in return has an influence on the radiated emissions. For this purpose, the simplest possible measurement setup is compared with a setup in which the test harness is modified by plugs and feedthroughs. These changes can lead to smoothed edges or reflections due to mismatch.

Gösling, Thomas

Vergleich von verschiedenen Gleichrichter-Topologien für dynamische, induktive Energieübertragung in einer Power-Hardware-in-the-Loop-Umgebung

Elektrofahrzeuge können über eine induktive Ladestraße während der Fahrt geladen werden. Für eine solche induktive Ladestraße ist eine stabile, effiziente und zuverlässige Stromversorgung wichtig. In dieser Arbeit wurden mithilfe von Power-Hardware-in-the-Loop Simulationen die Spannungsqualität der Gleichspannung für die Versorgung einer induktiven Ladestraße für einen passiven und einen aktiven dreiphasigen Gleichrichter untersucht. Dazu wurden die Frequenzanteile sowie der Gleichanteil und die transienten Spannungserhöhungen/ -einbrüche der Gleichspannung betrachtet. Die Systeme wurden mit MATLAB Simulink auf einem Echtzeitsimulator simuliert und mit einem Leistungsverstärker mit einer induktiven Ladestraße gekoppelt.

Comparison of Different Rectifier Topologies for Dynamic Inductive Power Transfer in a Power Hardware in the Loop Environment

Electric vehicles can be charged while driving via a wireless power transfer system. A stable, efficient and reliable power supply is important for such an inductive charging line. In this work, power hardware-in-the-loop simulations were used to investigate the voltage quality of the DC voltage for the supply of an inductive charging line for a passive and an active three-phase rectifier. For this purpose, the frequency components as well as the DC component and the transient voltage increases/dips of the DC voltage were considered. The systems were simulated with MATLAB Simulink on a real-time simulator and coupled with a power amplifier to a wireless power transfer system.

Hajek, Jonathan Lukas

Modellbasierte Untersuchung der Auswirkungen von bidirektionalem Laden auf die Batterie und Fahrzeugkomponenten von elektrischen Transportern

Model-based investigation of the bidirectional charging impact on the battery and vehicle components of electric vans

Köbel, Stefan

Analyse von Lade- und Lastprofilen für ein prognosebasiertes Lademanagement in einem Mehrparteienhaus

Durch den Hochlauf der Elektromobilität werden Ladeinfrastrukturen zukünftig vorausschauend optimierende Lademanagementsysteme benötigen, um die beschränkte Netzanschlussleistung intelligent auf die zu ladenden Elektrofahrzeuge aufzuteilen. Dafür sind Prognosen zur Gebäudelast und dem Ladeverhalten notwendig. In der Arbeit wird für einen realen Anwendungsfall eine Datenanalyse durchgeführt und eine Gebäudelast- sowie eine Ladeprognose umgesetzt. Die für die

Gebäudelastprognose erreichte Güte wird für ein Prognosefehler berücksichtigendes Lademanagement als ausreichend gut erachtet. Für die Ladeprognose wird hingegen noch Optimierungsbedarf gesehen, bevor sie produktiv eingesetzt werden kann. Es wird gezeigt, dass eine statische Auswertung von aussagekräftigen Ladeparametern eine Grundlage für eine alternative Ladeprognose bilden kann.

Analysis of charging and load profiles for a forecast-based charging management in a multi-party building

As a result of the ramp-up of electromobility, charging infrastructures will in future require forward-looking, optimizing charging management systems in order to intelligently allocate the limited grid connection power to charging electric vehicles. This requires forecasts of building load and charging behavior. For this purpose, a data analysis was performed for a real use case and a building load as well as a charging forecast was implemented in this work. The obtained MAE of 28 % for the building load forecast is considered to be sufficiently good for a charging management considering forecast errors. However, there is still a need for optimization for the charging forecast before it can be used productively. It was shown that a static evaluation of meaningful charging parameters can form a basis for an alternative charging forecast.

Kratz, Kevin

Untersuchung der netzdienlichen Flexibilitätsbereitstellung durch Elektrofahrzeuge in einem Verteilnetz

Aufgrund der zunehmenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen erhöht sich auch die Belastung für das Stromnetz durch die damit verbundenen Ladevorgänge. Gerade private Ladevorgänge bieten dabei ein Flexibilitätspotential, um durch intelligente Steuerung das Stromnetz zu entlasten und damit die Durchdringung zu erhöhen. Dazu wird ein reales Verteilnetz hinsichtlich einer netzdienlichen Steuerung untersucht, welche in zwei verschiedenen Ansätzen durch ein lineares Optimierungsproblem beschrieben ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Durchdringung durch die netzdienliche Steuerung im Vergleich zu einem ungesteuerten Ladeverhalten erhöht werden kann und sich die Netzbelastungen reduzieren lassen. Bidirektionales Laden erhöht dabei das Potential des netzdienlichen Lademanagements zusätzlich.

Investigation of grid-serving flexibility provision by electric vehicles in a distribution grid

Due to the increasing penetration of electric vehicles, the loading on power grids is also increasing as a result of the associated charging processes. Especially private charging processes offer a flexibility potential to relieve the power grid through intelligent control and thus increase the penetration. For this purpose, a real distribution network is investigated with respect to grid-serving control, which is described in two different approaches by a linear optimization problem. The results show that the penetration can be increased by grid-serving control compared to an uncontrolled charging behavior and that the grid loads can be reduced. Bidirectional charging further increases the potential of grid-serving charging management.

Kutteruf, Jonas

Application of Neural Networks in PartialDischarge Localization in Power Transformers

Partial discharge monitoring is integral to securing the reliable operation of power transformers. Ultra-high frequency sensors can measure the electromagnetic signals of partial discharges and by using the trilateration equation, the location of the partial discharge can be estimated. However, due to complex signal propagation in the power transformer, this method lacks accuracy. In a previous project, Emre Tozan created a neural network to predict the location of partial discharges in an electromagnetic simulation model of a five limb power transformer. The prediction model achieved satisfactory results for partial discharge sources included in the training data. Concerning practical implementations, the accuracy for sources not included in the training data and therefore unseen is decisive. For this metric, the model showed less accuracy. In this master thesis, the neural network is refined to predict unseen sources. The prediction model was improved in three steps. First, the training dataset was increased by enhancing the number of partial discharge sources. Following that, additional features were derived from the time-series measurements. Lastly, hyperparameter optimization was used to specialize the model on predicting unseen sources.

Lin, Sheau-Yu

Untersuchung von Flexibilitätsabrufen beim Laden von Elektrofahrzeugen

Die steigende Anzahl von Elektrofahrzeugen führt zu einem erhöhten Energiebedarf von Privathaushalten und damit im gesamten Niederspannungsnetz. Während Ladevorgänge das Stromnetz belasten können, bieten sie auch ein vielversprechendes Potenzial für Energieflexibilität. In dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, die Messdaten aus einem realen Verteilnetz und synthetische Profile der Positionen von Elektrofahrzeugen nutzt, um die Auswirkungen von Faktoren wie der Durchdringungsrate von Elektrofahrzeugen, der Ladeausrichtung und Ladeszenarien auf die verfügbare Flexibilität durch Elektrofahrzeuge zu bewerten. Darüber hinaus werden auch die erhöhten Ladebedarfe nach einem Abruf der Flexibilität untersucht. Die Ergebnisse unterstreichen das signifikante Potenzial von bidirektionalem Laden und gesteuerten Ladeverfahren für ein effizientes Lastmanagement und die Bereitstellung von Flexibilität in Verteilnetzen. Sie betonen auch die Bedeutung der Berücksichtigung der Leistungsgrenze des Transformators für effektive Flexibilitätsanwendungen.

Investigation of Flexibility Use During Electric Vehicle Charging

The growing number of electric vehicles is driving a greater power demand for residential charging. While their charging loads can strain the power grid, they also offer a promising potential for energy flexibility. This thesis introduces a methodology that utilizes the measurement data within a real distribution system and synthetic EV position profiles to evaluate the impacts of factors such as electric vehicle penetration rates, charging direction, and charging scenarios on the available flexibility provided by electric vehicles. Furthermore, the increased charging demands following the flexibility pro-

vision are also assessed. The results highlight the significant potential of bidirectional charging and controlled charging strategies for effective load management and flexibility provision in distribution systems. They also underscore the importance of considering the power limit of the transformer for effective flexibility applications.

Nnabuo, Jesse

Messung und Modellierung der HF-Impedanz an elektrischen Traktionsmaschinen im passiven und aktiven Zustand

Unter dem Begriff der Maschinenemulation versteht man die Simulation und Nachbildung des Klemmenverhaltens elektrischer Maschinen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Messung und Modellierung der HF-Impedanz an elektrischen Traktionsmaschinen, um so das frequenzabhängige Klemmenverhalten realer elektrischer Traktionsmaschinen nachzubilden und zu modellieren. Dazu werden Messmethoden zur Impedanzmessung bewertet und Messungen an einer elektrischen Traktionsmaschine im passiven und aktiven Zustand durchgeführt, um ein lastabhängiges Impedanzverhalten zu untersuchen. Darüber hinaus werden Impedanzmodelle verschiedener Maschinentypen recherchiert und ein Impedanzmodell entwickelt, das die Gleich- und Gegentaktimpedanz der untersuchten elektrisch erregten Synchronmaschine nachbilden soll.

Measurement and modelling of the RF impedance of electric traction machines under passive and active operating conditions

The term machine emulation refers to the simulation and emulation of the terminal behavior of electrical machines. This thesis deals with the measurement and modeling of the RF impedance of electric traction machines in order to reproduce and model the frequency-dependent terminal behavior of real electrical traction machines. For this purpose, measurement methods for impedance measurement are evaluated and measurements are carried out on an electric traction machine under passive and active operating conditions in order to investigate load-dependent impedance behavior. In addition, impedance models of different machine types are researched and an impedance model is developed to simulate the common-mode and differential-mode impedance of the investigated electrically excited synchronous machine.

Schnee, Lucia

Weiterentwicklung einer Methodik zur Netzintegration elektrischer Lkw und Quantifizierung von deren Flexibilitätspotential

Diese Masterarbeit thematisiert die Netzintegration elektrischer Lastkraftwagen (E-Lkw) in Baden-Württemberg mit Fokus auf deren Flexibilitätspotential. Hierfür wird zunächst das Fahrverhalten von E-Lkw und die für die Hochrechnung auf ganz Baden-Württemberg benötigte Stichprobe an Fahrzeugen näher beleuchtet. Im Weiteren wird der perspektivische Ladebedarf regionalisiert und in Bezug zu vorhandener Netzinfrastruktur gesetzt. Die Betrachtung des Flexibilitätspotentials wird in zwei Kategorien aufgegliedert. Zum einen wird die durch E-Lkw maximal bereitstellbare Flexibilität in Bezug auf Zeit und Leistung dargestellt. Zum anderen wird die Flexibilität

in den konkreten Anwendungsfällen Lastglättung und Teilnahme am Regelenergiemarkt erprobt.

Further Development of a Methodology for a Grid Integration of Electric Trucks and Quantification of their Flexibility Potential

This thesis deals with the grid integration of electric trucks with a focus on their flexibility potential. Therefore, the driving behavior of trucks and the sample of vehicles required for the extrapolation are examined in more detail. Afterwards, the perspective charging demand is regionalized. The consideration of the flexibility potential is broken down into two categories. On the one hand, the maximum flexibility that can be provided by electric trucks is presented in terms of time and power. On the other hand, the flexibility is tested in application cases like load shifting and participation in the control energy market.

Sulejmani, Emir

Untersuchung und Minimierung der elektromagnetischen Emissionen eines induktiven Kfz-Ladesystems

Der fahrzeugbedingte Luftspalt, der Offset zwischen Boden- und Fahrzeugspule als auch der Ladezustand der Batterie verursachen verschiedene leitungs- und feldgebundene Störaussendungen rund um das induktive Kfz-Ladesystem. Diese Masterarbeit befasst sich mit der Untersuchung dieser Störaussendungen anhand eines vorhandenen WPT-Systems, aufgebaut nach der SAE-Norm J2954. Mit Hilfe einer elektrischen Charakterisierung des Systems inklusive dessen Impedanzverhalten, werden mögliche Störpfade beschrieben und analysiert. Anschließend werden die Gleich- und Gegentaktstörungen bei verschiedenen Spulenoffsets untersucht und in Verbindung zu dem abgestrahlten Magnetfeld gesetzt. Das EMV-Verhalten wird hierbei in einem Frequenzbereich zwischen 9 kHz bis 30 MHz untersucht. Abschließend werden geeignete EMV-Optimierungsmaßnahmen vorgestellt, um die aktuellen Grenzwertvorschläge für das H-Feld von WPT-Systemen einzuhalten.

Investigation and reduction of electromagnetic emissions of an automotive inductive charging system

The vehicle-related air gap, the offset between the ground coil and the vehicle coil, as well as the state of charge of the battery, cause various conducted and field-bound interference emissions around the inductive vehicle charging system. This master thesis deals with the investigation of these emissions using a WPT system, which was built according to the SAE standard J2954. By an electrical characterization of the system including its impedance behavior, possible interference paths are described and analyzed. Subsequently, the common-mode and differential-mode disturbances at different coil offsets are investigated and related to the radiated magnetic field. Here, the EMC behavior is investigated between 9 kHz to 30 MHz. Finally, suitable EMC optimization methods are presented to comply with the recent proposed limits for the H-field of WPT systems.

Trolliet, Erik

Untersuchung von thermischen neuronalen Netzen zur Verbesserung der Vorhersage der Öltemperatur bei Transformatoren

Das (n-1)-Kriterium wird oft im Stromnetz angewendet, um die Sicherheit des Stromnetzes zu gewährleisten. Es besagt, dass das Netz auch bei Ausfall eines Betriebsmittels noch stabil sein muss. Um hohe Investitionen in größere Transformatoren zu vermeiden, die dann weit unter ihrer Kapazität betrieben werden, wäre es möglich, kurzfristig Lasten zuzulassen, die das (n-1)-Kriterium verletzen. Um die Sicherheit des Stromnetzes zu gewährleisten, muss jedoch abgeschätzt werden, wie der Transformator auf diese Überlast reagiert und ob er der zusätzlichen Belastung standhalten kann, wenn der Paralleltransformator ausfällt. Eine Möglichkeit, dies zu tun, ist eine möglichst genaue thermische Modellierung. Es gibt bereits eine Reihe von physikalischen Modellen, die die Temperaturen im Transformator mit angemessener Genauigkeit vorhersagen können. Durch die Kombination von neuronalen Netzen und einer Differentialgleichung, welche die physikalischen Zusammenhänge darstellt, entsteht ein thermisches neuronales Netz (TNN). Dieses wurde ursprünglich für die thermische Modellierung einer Synchronmaschine entwickelt, kann aber auch für Transformatoren verwendet werden. Das TNN ist eine gute Alternative, wenn viele Trainingsdaten vorhanden sind. Es hat jedoch Probleme, wenn sich die Auslastung im Training und Test stark unterscheidet.

Investigation of thermal neural networks to improve oil temperature prediction in transformers

The (n-1) criterion is often applied in the power grid to ensure the safety of the network. It states that the network must remain stable even if one operating resource fails. To avoid high investments in larger transformers, that would then be operated far below their capacity, it would be possible to allow loads that violate the (n-1) criterion in the short term. However, to ensure the safety of the power grid, it must be estimated how the transformer reacts to this overload and whether it can withstand the additional load if the parallel transformer fails. One way to do this is through the most accurate thermal modeling possible. There are already several physical models that can predict the temperatures in the transformer with reasonable accuracy. By combining neural networks and a differential equation that represents the physical relationships, a thermal neural network (TNN) is created. This was originally developed for the thermal modeling of a synchronous machine, but can also be used for transformers. The TNN is a good alternative when many training data are available, but has problems when the utilization in training and testing differs greatly.

Wissel, Henrik

Implementierung einer Infrastruktur zur netzdienlichen Steuerung betrieblicher Flexibilitäten

Die steigende Verbreitung von Elektromobilität, Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen im Niederspannungsnetz stellt Netzbetreiber vor Herausforderungen. Das Forschungsprojekt Park4Flex beabsichtigt, Flexibilitätpotenziale von Elektrofahrzeugen in den Netzstabilisierungsprozess einzubinden. Diese Arbeit bietet einen Überblick über aktuelle Standards und Normen sowie die Entwicklung einer Infrastruktur zur Steuerung von Flexibilität während eines Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen. Dazu wird eine Schnittstelle zwischen einem Energievermarkter und einer Ladeinfrastruktur in der Programmiersprache Python implementiert. Die Auswertung der Normen zeigt einen Bedarf an Standardisierung und Vereinheitlichung der Kommunikationsschnittstellen. Die Realisierung der Infrastruktur zur Nutzung der Flexibilität von Ladefahrzeugen ist möglich, jedoch gibt es Probleme mit der Plausibilität der abgefragten Fahrzeugparameter.

Implementation of an infrastructure for a grid-serving control of operational flexibilities

The increasing spread of electromobility, heat pumps and photovoltaic systems in the low-voltage grid poses challenges for grid operators. The Park4Flex research project aims to integrate the flexibility potential of electric vehicles into the grid stabilization process. This thesis provides an overview of current standards and norms as well as the development of an infrastructure to control flexibility during a charging process of electric vehicles. For this purpose, an interface between an energy marketer and a charging infrastructure is implemented in the Python programming language. The evaluation of the standards shows a need for standardization and unification of the communication interfaces. The implementation of the infrastructure to use flexibility of charging electric vehicles is possible, but there are problems with the plausibility of the queried vehicle parameters.

Wolters, Jorim

The Use of Pathfinding Algorithms for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers

The introduction of AI to monitoring systems for partial discharge localization in power transformers can help create a robust and reliable system with great usability and accuracy. Training the AI with actual experimental data is a costly and time-consuming endeavor lacking in variety of power transformers. Producing the training data utilizing simulation software is a computationally expensive as well as time-consuming method, though the results are accurate. In order to bypass the timely and computationally expensive process of simulating data or collecting it from experiments, a tailored pathfinding algorithm can help create the necessary training data for an AI-based monitoring system for partial discharges in power transformers.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 01.11.2022 bis 31.10.2023:

NAME	THEMA
Ali, Taiseer Alhag (*)	Untersuchung des Parametereinflusses einer Windturbine auf Systemstabilität Investigation of Wind Turbine Controller Parameters on System Stability.
Alsibaie, Mohamed Ossama (*)	Untersuchung der Spannungsqualität in einem Niederspannungsnetz bei der Integration einer leistungsstarken Ladeinfrastruktur. Investigations on the power quality in a low-voltage grid considering the integrations of a high-power charging point.
Bayer, Svenja (*)	Quantifizierung und Analyse des Flexibilitätspotentials elektrischer Pkw in Baden-Württemberg. Quantification and analysis of the flexibility potential of electric vehicles.
Benner, Simeon (*)	Untersuchung der elektrischen Distanz für umrichterbasierte Netze Investigation of electrical distance for converter-based power system
Blakaj, Arben (*)	Untersuchung des Einflusses von Parametergrößen auf die thermische Modellierung von Transformatoren Investigation of the influence of parameter sizes on the thermal modeling of transformer
Boeckstegers, Sven (*)	Untersuchungen zur transienten Stabilität im zukünftigen deutschen Übertragungsnetz. Investigation of transient stability in the future German transmission network.
Brenneke, Melina (*)	Analyse von Methoden zur Baseline Erstellung für die Prüfung der Erbringung von Flexibilität von Photovoltaik-Heimspeicher-Systemen Analysis of methods to determine a baseline for verification of provided flexibility of domestic photovoltaic-storage-systems
Dölzer, Niclas (*)	Entwurf und Implementierung einer Regelung für eine elektrische Maschinenemulation. Design and implementation of control system for an electrical machine emulation.
Eschmann, Luka (*)	Analyse des Ladebedarfs von E-LKW in Baden-Württemberg und deren Lademanagementpotential Electric Truck Charging Demand Analysis and Charging Management Potential Determination
Federer, Daniel	Einfluss der Schaltgeschwindigkeit auf den Lichtbogenstromabriss in Vakuumschaltern Influence of the switching speed on the arc current chopping in vacuum interrupters

Gebhardt, Fabian	Untersuchung einer elektrischen Stückgutbelieferung im Raum Stuttgart. Investigation of an electrical general cargo delivery in the Stuttgart area.
Gösling, Thomas (*)	Kurative Betriebsoptimierung im Niederspannungsnetz auf Basis aggregierter Flexibilitäten. Curative grid optimization in LV grids using aggregated flexibilities.
Guizeni, Imen	Vergleich des Kurzschlussverhaltens von netzbildenden Umrichtern. Comparison of short-circuit response of grid forming converters.
Karaca, Ahmed	Untersuchung des flexiblen Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen zur optimalen Ausnutzung erneuerbarer Energiequellen. Investigation of the flexible charging behavior for electric vehicles to optimize the use of renewable energy resources
Kasrawi, Mohammad M. A. (*)	Untersuchung der kritischen Fehlerklärungszeit für umrichterbasierte Energiesysteme. Investigation of critical fault clearing time (CFCT) for converter-based power systems.
Körner, Sebastian (*)	Entwicklung eines Maschinenmodells zur Emulation permanentmagneterrgeter Synchronmaschinen. Development of a machine model for the emulation of permanent-magnet synchronous machines.
Kugler, Jan	Modellierung und Analyse des Flexibilitätspotentials von Ladevorgängen elektrischer Lkw an Logistikzentren Flexibility Potential Modelling and Analysis of Electric Truck Charging at Logistics Centers
Lin, Sheau-Yu (*)	Untersuchung der Spannungsqualität eines Elektrofahrzeugs in einer Power-Hardware-in-the-Loop-Umgebung Power Quality Investigations of an Electric Vehicle in a Power Hardware-in-the-Loop Environment
Malz, Janina (*)	Entwicklung einer Aggregationsmethode für Lastprofile von Elektrofahrzeugen auf Höchstspannungsebene. Development of an aggregation method for load profiles of electric vehicles at extra-high voltage level.
Meller, Jonas (*)	Factory Demand Side Management am Beispiel einer flexiblen Fertigungsanlage Factory Demand Side Management in flexible paint shops
Oetoyo, Anisatur Rizqi (*)	Berechnung von Anfangskurzschlussströmen für umrichterbasierte Stromversorgungssysteme Calculation of initial short-circuit currents for converter-based power systems
Paulus, Theresa (*)	Entwicklung eines Konzeptes zur Berechnung des zeitabhängigen Flexibilitätspotentials von elektrischen Fahrzeugen aus synthetischen Lastprofilen. Development of a concept for the calculation of the time-dependent flexibility potential for electric vehicles out of synthetic load profiles.

Perkov, Evgeny	Auslegung eines Strahlers für die Untersuchung des Einflusses elektromagnetischer Strahlung auf den Vakuumschaltlichtbogen Design of a radiator for the investigation of the influence of electromagnetic radiation on the vacuum switching arc
Purins, Ruslan	Untersuchung der Einflussparameter auf die EMV-Emissionen von Elektrofahrzeugen beim AC-Ladevorgang Investigation of the influencing parameters on the EMC emissions of electric ve-hicles during AC charging
Sander, Marlene (*)	Charakterisierung eines umrichterbasierten Energyversorgungssystems. Characterization of converter-based power system
Sautter, Christine	Entwicklung einer Routenoptimierung zur Netzintegration von elektrischen Lkw Development of a Route Optimization for the Grid Integration of Electric Trucks
Schmidt, Marei	Untersuchung der EMV-Dämpfungseigenschaften neuartiger Schirmmaterialien mithilfe von TEM-Zellen. Investigation of EMC attenuation properties of novel shielding materials using TEM cells.
Schnee, Lucia (*)	Quantifizierung und Analyse des Flexibilitätspotentials elektrischer Lkw in Baden-Württemberg Flexibility Potential Quantification and Analysis of Electric Trucks
Schreiner, Luc	Energiebedarfsbestimmung batterieelektrischer Lkw zum potentiellen Einsatz im urbanen Raum Energy estimation of potential battery-operated trucks in an urban area
Schroeder, Jakob (*)	Technische und wirtschaftliche Optimierung eines Batteriespeichereinsatzes in einem Plus-Energie Mehrparteienhaus Technical and Economic Optimization of a Battery Storage Application in a plus-energy multi-party house
Schumacher, Fabian (*)	Entwicklung und Integration einer Strom- und Spannungsmessung in eine elektrische Maschinenemulation. Development and integration of a current and voltage measurement into an electrical machine emulation.
Siemer, Kay Marc (*)	Analyse heuristischer Optimierungsverfahren hinsichtlich der Reduktion elektrischer Belastung von HVAC-Seekabelverbindungen von Offshore-Windkraftparks im Bereich der Anlandungs-Horizontalbohrungen. Analysis of heuristic optimization methods regarding the reduction of the electrical load on HVAC submarine cable connections for offshore wind farms in the area of the landfall horizontal directional drilling.
Škorić, Saša	Untersuchung der Netzintegration von Ladeinfrastruktur für elektrische Lkw an Autobahnraststätten Grid Impact Analysis of Electric Truck Charging Infrastructure at Highway Rest Areas

Song, Han (*)	Stromabrissverhalten neuartiger Kontaktwerkstoffe in Vakuumschaltern mit überlagertem Magnetfeld Current chopping behavior of new contact materials in vacuum interrupters with superimposed magnetic field
Soyal, Tahir (*)	Analyse der EMV-Wechselwirkungen im HV System eines Elektrofahrzeugs beim Ladevorgang EMC-Analysis of the HV-Components from an EV during the Charging Process
Stehle, Florian (*)	Nachbildung harmonischer Emissionen eines Wechselrichters in einer Power-Hardware-In-The-Loop Umgebung. Emulation of harmonic emissions of an inverter in a Power-Hardware-In-The-Loop setup.
Steinle, Florian (*)	3D-Feldsimulation eines CISPR 25 Komponententests (ALSE-Methode) 3D field simulation of a CISPR 25 component test (ALSE method)
Stöferle, Florian (*)	Analyse und Modellierung von Parkvorgängen zur Flexibilitätsabschätzung Analysis and modelling of parking operations for flexibility estimation
Tzakova, Iwana (*)	Bestimmung Kosten optimierter Stromnetztopologien für Schnellladeparks mittels Verringerung der elektrischen Verluste unter Berücksichtigung baulicher und betrieblicher Aspekte. Cost determination of optimized power grid topologies for fast charging parks by reducing electrical losses considering constructional and operational aspects.
Ulherr, Felix (*)	Beeinflussung des Vakuumschaltlichtbogens durch elektromagnetische Wellen Influencing of the vacuum switching arc by electromagnetic waves
Wissel, Henrik (*)	Zeitreihendekomposition und Clustering von Lastgängen unterschiedlicher Ortsnetzstationen zur frühzeitigen Netzausbauplanung auf Niederspannungsebene Time series decomposition and clustering of load curves of different local grid stations for early grid expansion planning on low voltage level
Zhang, Lixiaoqing (*)	Entwicklung eines Prüfaufbaus zur EMV-Messung von Elektrofahrzeugen beim DC-Laden Development of a test setup for EMC measurement of electric vehicles during DC charging

4. PROMOTIONEN

- **Vorhersage und Minderung von Problemen der Strom- und Spannungsqualität durch Einsatz von künstlicher Intelligenz**

M.Sc. Adrian Eisenmann

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Bin Yang

Universität Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung:

20.03.2023

Nichtlineare Eigenschaften moderner Netzelemente sowie eine veränderte Impedanzcharakteristik in modernen Stromnetzen stellen eine zunehmende Herausforderung für Netz- und Anlagenbetreiber dar. Neue Verfahren zur Regelung der Spannungsqualität sind erforderlich, um das Stabilitätsniveau von Netzen mit einer hohen Durchdringung aktiv gesteuerter, leistungselektronischer Anwendungen aufrechtzuerhalten. Der vorgeschlagene Algorithmus bietet einen datengetriebenen Ansatz für die Vorhersage kritischer Netzzustände, ohne dass detaillierte Informationen der zugrunde liegenden Infrastruktur erforderlich sind. Darüber hinaus wird eine Methodik vorgestellt, die etablierte Netzfilter potentiell durch intelligente Steuerung der netzhäufigen Flexibilität ergänzt oder ersetzen kann. Das erweiterte Prädiktionsmodell zur Vorhersage von Spannungsqualitätsproblemen baut auf interdisziplinäre Speicherkonzepte, um adaptierte Gedächtnismuster mittels Methoden der künstlichen Intelligenz zu synthetisieren. Die Hebung des Potentials großer, historischer Datensätze ermöglicht die Steigerung der Genauigkeit des entwickelten Modells für Zeitreihenregression. Daneben wird eine aktive Lastmanagementmethode zur Verbesserung der Spannungsqualität moderner Stromnetze, die durch ein hohes Maß an Flexibilität und Kommunikativität zwischen den Netzelementen definiert sind, vorgestellt. Diese neuen Freiheitsgrade ermöglichen neuartige Verfahren zur Verbesserung des Netzzustands. Ein erweiterter, genetischer Algorithmus zur intelligenten Betriebsplanung aktiv gesteuerter Lasten bildet dabei die Basis der Netzoptimierung. Die Zielfunktion schränkt hierbei die Komplexität des adressierten Optimierungsproblems hoher Kardinalität durch Übersetzung der multiplen Fitnessfunktionen des genetischen Algorithmus in ein Minimierungsproblem ein. Damit können mehrere, gegenläufige Ziele adressiert werden, um die Pareto Menge im Lösungsraum durch Anwendung des elitären, non-dominated NSGA-II-Algorithmus zu identifizieren. Eine Fallstudie zeigt die Anwendung auf ein vereinfachtes Industrienetz mit fünf aktiv gesteuerten Lasten, wodurch die harmonischen Verzerrungen gesenkt und gleichzeitig die Produktivität des zugrundeliegenden Industrieprozesses aufrechterhalten werden kann. Probleme wie vorzeitige Alterung von Komponenten, Fehlverhalten angeschlossener

Messeinrichtungen und Steuerungen sowie die Reduzierung von Verlusten durch Minimierung von Spannungs- und Stromverzerrungen können daher mittels der vorgeschlagenen Ansätze adressiert werden.

- **Artificial Intelligence supported Power Quality Prediction and Mitigation**

M.Sc. Adrian Eisenmann

Nonlinear characteristics of modern grid elements as well as a noticeable divergence of the impedance characteristics in modern electrical grids are rising as a major challenge for grid and plant operators. New forms of power quality management are needed to sustain the common stability level for grids with a high penetration of actively controlled power electronic applications. The proposed algorithm therefore provides a fully data driven approach for the prediction of critical grid states due to poor power quality without the need for detailed infrastructural information, which is oftentimes unavailable. Apart from that, a methodology with the potential to complement or even substitute conventional filter measures is presented to mitigate the grid disturbances via smart demand-side-integration by using the grid inherent flexibilities via smart operation of the grid elements. The main concept of the enhanced prediction algorithm is to synthesize memory techniques derived from interdisciplinary concepts into artificial intelligence methods to overcome the constraint of a limited data space in the history window of the applied deep learning prediction model. Memory patterns adapted from multiple fields of research are combined and transferred to artificial intelligence-based methods to enable long-term consideration of information in form of a nonvolatile memory model to further enhance the accuracy of the developed time series regression. Alongside, a power quality mitigation method via smart demand-side-management is presented to deploy an active measure for improving the state of modern electrical grids, defined by a high level of interaction and communication between the grid elements. The approach is based on a genetic algorithm guided optimization for smart operational planning of actively controlled loads. The objective function narrows down the complexity of the addressed high cardinality optimization problem by translating the fitness functions of the genetic algorithm into a minimization problem, thus addressing multiple, even competing objectives to find the Pareto optimal frontier in the solution space by applying the elitist, non-dominated NSGA-II algorithm. A case study displays the application to a simplified industrial grid with five actively controlled machines, lowering the harmonic distortion levels while maintaining the productivity of the fundamental industrial process. Problems such as premature ageing of components, faulty behaviour of connected measurement and control units as well as the reduction of losses by minimisation of voltage and current distortion can therefore be addressed by the proposed approaches, thus increasing the power quality in the electrical grid.

- **Multi-Agenten-basierte Strategien zum Teilnetzbetrieb und zur Unterstützung des Netzwiederaufbaus aus Verteilnetzen**

M.Sc. Manswet Banka

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion

Mitberichterin: Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Technische Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung: 10.10.2023

Die Arbeit adressiert die Unterstützung der Netzführung nach Störungen und während des Netzwiederaufbaus durch aktive Verteilnetze. Die herkömmlichen Strategien des Netzwiederaufbaus nutzen bisher das steigende Potential der auf Verteilerebene installierten Erzeuger nicht aus. Dies wird jedoch mit einer fortschreitenden Dezentralisierung der Erzeugung notwendig werden.

In der Arbeit ist ein System dargestellt, das aus einem virtuellen Bereich in Form eines Multi-Agenten-Systems und aus einem Bereich des elektrischen Energieversorgungssystems in Form eines 20-kV-Netzgebiets besteht. Das Multi-Agenten-System ist für die hochautomatisierte Koordination des Betriebes im Netzgebiet während einer Störung im überlagerten Netz verantwortlich. Das System weist dabei drei Hauptfunktionalitäten auf: Es soll ein stabiles Teilnetz bei drohendem Blackout bilden können und dabei das Teilnetz hochfahren, falls die Teilnetzbildung nicht erfolgreich ist. Ist dies der Fall, soll sich das Teilnetz mit dem überlagerten Netz resynchronisieren, wenn der Fehler behoben wurde. Die vorgeschlagenen Konzepte, in denen diese Funktionalitäten implementiert sind, wurden simulativ in speziell dafür vorbereiteter Ko-Simulationsumgebung untersucht. Hierbei wurden für die Definition der Last-/Erzeugungsvarianten unter anderem die Prognosen aus dem Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan 2035 verwendet.

Bei der Modellierung des elektrischen Bereiches wurden wichtige Aspekte wie Kommunikationslatenzen bei der zeitkritischen Teilnetzbildung, der Cold-Load-Pickup-Effekt und das Verhalten der Erzeugungsanlagen nach VDE-AR-N 4105 berücksichtigt. Die für die Netzführung notwendigen Daten wurden mittels Zustandsschätzung ermittelt.

Die Simulationen haben bestätigt, dass die erwartete Funktionalität des Systems erzielt wird. Die Ergebnisse der Simulationen lassen erwarten, dass die aktiven Verteilnetze die Qualität des Netzwiederaufbaus aufgrund der Nutzung dezentraler Anlagen erhöhen können.

- **Multi-Agent Based Strategies for Power System Island Operation and System Restoration Support from Distribution Grids**

M.Sc. Manswet Banka

The thesis addresses the support of the system operation after grid faults and during grid restoration by active distribution grids. The traditional strategies of grid restoration do not use the growing potential of the generation installed at the distribution level. This will be however a necessity taking into account the ongoing decentralization of the generation of electric power.

Within the conducted work a system was created, which combines a virtual domain in a form of a multi-agent system, and a domain of electric energy system in form of 20 kV distribution grid area. The multi-agent system is responsible for high automated coordination of the operation of the grid area during faults in the overlaid grid levels. The system has three main features. Firstly, it should build a stable grid island in case of threatening black-out. If this was not successful, the multi-agent system should energize and perform the start-up of the grid area. After the fault in the overlaid grid was cleared, the islanded grid area should be resynchronized with the bulk system. The proposed concepts, which implement these functionalities, were tested by the means of simulations using a co-simulation environment, which was developed specially for this purpose.

The most important aspects were taken into account during modelling of the electric domain. Among other things the forecasts from the German Network Development Plan 2035 were used to define the load/generation scenarios for the simulations. The behavior of the generation units was modelled to fulfill the requirements of the German standard VDE-AR-N 4105, whereas the loads exhibited Cold Load Pickup effect. Moreover, the communication delays during the time critical building of island grid were taken into account. The most important data required for the operation of the analyzed grid area are determined using state estimation techniques.

The performed simulations have confirmed that the expected features can be achieved. They anticipate that the active distribution grids will help enhancing the quality of the grid restoration service thanks to the usage of the distribution energy resources.

■ **Aktiver Verteilnetzbetrieb zur systemdienlichen Nutzung von betrieblichen Flexibilitäten**

M.Sc. Heiner Früh

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr. sc. Andreas Ulbig

RWTH Aachen

Tag der mündlichen Prüfung:

11.12.2023

Die aktuell stattfindende Transformation des elektrischen Energieversorgungssystems im Rahmen der deutschen Energiewende stellt die Netzbetreiber vor große Herausforderungen sowohl im Betrieb, als auch der Planung. Insbesondere die veränderten Rahmenbedingungen in den Verteilnetzen sind hierbei hervorzuheben. Die Verteilnetzbetreiber werden zukünftig eine aktivere Rolle als bislang einnehmen müssen, da sich die Erzeugungsleistung immer weiter in Richtung der Verteilnetze verschiebt. Darüber hinaus wird durch die Informations- und Kommunikationstechnologie die Erschließung des enormen Flexibilitätpotentials der dezentral angeschlossenen Verbraucher und Erzeuger ermöglicht. Hierfür sind neben massiven Investitionen in die Netzinfrastruktur auch geeignete Konzepte zur automatisierten, systemübergreifenden Koordination der Flexibilitätsnutzung notwendig, welche den operativen Anforderungen genügen.

In dieser Arbeit wird ein praxistaugliches Konzept für einen aktiven Verteilnetzbetrieb vorgestellt sowie dessen Implementierung in einem realen deutschen Niederspannungsnetz beschrieben. Gegenstand der Untersuchungen ist dabei die komplette Prozesskette eines automatisierten Niederspannungsnetzbetriebs, angefangen bei der Kommunikationsanbindung, über die Bestimmung des aktuellen Netzzustands in Echtzeit, als Basis für einen sicheren Betrieb, bis hin zur letztlichen Flexibilitätsnutzung. Bei der Auswahl und Umsetzung der benötigten Methoden stehen dabei die Anforderungen des realen Netzbetriebs im Vordergrund. Durch eine abschließende Demonstration der entwickelten Konzepte und Methoden im Rahmen von Feldversuchen während des regulären Niederspannungsnetzbetriebs, werden diese unter Realbedingungen validiert. Hierbei werden wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Praxistauglichkeit der getesteten Methoden erlangt. Es kann gezeigt werden, dass eine großflächige Umsetzung des beschriebenen Konzepts praktikabel ist, wodurch perspektivisch eine Spannungsebenen übergreifende Bereitstellung von Flexibilität aus den Verteilnetzen ermöglicht werden kann, wenngleich der Investitionsbedarf dem gegenübersteht.

- **Active Distribution System Operation For The Coordinated Provision Of Operational Flexibilities**

M.Sc. Heiner Früh

The currently unfolding transformation of the electric power system as part of the German "Energy Transition" is presenting system operators with major challenges in both operation and planning of their grids. In particular, the altered framework conditions in the distribution systems are to be emphasized here. In the future, the distribution system operators will have to take on a more active role than in the past, since the installed generation capacity is shifting more and more towards the distribution systems. In addition, information and communications technology will enable the usage of the enormous flexibility potential of decentrally connected loads and generators. This requires not only massive investments in the grid infrastructure, but also suitable concepts for an automated, system-wide coordination of flexibility usage that meet the operational requirements.

In this work, a practical concept for an active distribution system operation is presented and its implementation in a real German low-voltage grid is described. The subject of the investigations is the complete process chain of an automated low-voltage system operation, starting with the communication connection, the determination of the current system state in real time, as a basis for a safe operation, leading to the final flexibility utilization. In the selection and implementation of the required methods, the focus of this work lies on the requirements of real system operation. Through a demonstration of the developed concepts and methods in the context of field tests during regular system operation in a low-voltage grid, the presented methods are validated under real conditions. Valuable insights into the practical suitability of the tested methods are provided this way. It can be shown that a large-scale implementation of the described concept is practicable, whereby a vertical provision of flexibility from distribution systems can be achieved in the near future, even though the required investments are opposed to this.

■ **Autarkes Zustandsmonitoring von Kabelmuffen auf Basis integrierter Teilentladungs- und Temperatursensorik**

M.Sc. Daniel Passow

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichterin:

Prof. Dr. Myriam Koch

TU Darmstadt

Tag der mündlichen Prüfung:

15.12.2023

Die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Kabelnetze in der Hoch- und Höchstspannung hängt direkt von den Zustandsparametern der verbauten Komponenten ab. Aufgrund der bei der Landverlegung eines Erdkabels aus Gewichtsgründen beschränkten Transportkapazität setzen sich Kabeltrassen meist aus einer Vielzahl von Kabelabschnitten und deren Verbindungselementen, den sogenannten Kabelmuffen zusammen. Als grober Richtwert kann dabei in der Regel mit ungefähr einer Kabelmuffe pro Kilometer Kabel gerechnet werden. Im Fall von Kabeltrassen mit einer Länge von mehreren Kilometern führt dies zu einer hohen Quantität der Komponente und somit zu einer starken Gewichtung für die einwandfreie Funktionalität des Kabelnetzes. Vor diesem Hintergrund untersucht die hier vorliegenden Arbeit die Möglichkeit, konventionelle Aufschiebekabelmuffen mit einem direkt integrierten und selbst entwickelten Zustands-Monitoringsystem auszustatten. Besonderer Fokus wird auf die Auslegung des Systems zur Erfassung der Zustandsparameter im Online- und Livebetrieb gelegt.

Ein wichtiger Baustein im Konzept des Monitoringsystems ist dabei die Beurteilung des Isolationszustands von Kabel und Muffe auf Basis der Erfassung von Teilentladungen (TE) mit direkt in der Kabelmuffe integrierter Sensorik. Gerade in Kabelnetzen ist die Detektion von TE durch die besonders lange Ausdehnung des Betriebsmittels und den dadurch bei der TE-Impulsausbreitung wirkenden Tiefpass- und Dämpfungseffekten erschwert. Infolgedessen stellt die direkte Integration von Sensorik in der Kabelmuffe eine Möglichkeit dar, die Auswirkungen der Dämpfungs- und Tiefpassproblematik bei der TE-Detektion im Kabel zu limitieren. Um die Vor- und Nachteile der integrierbaren kapazitiven und induktiven Sensortypen abzuwägen, werden sowohl deren Frequenzgang als auch deren Verhalten im Zeitbereich näher betrachtet und charakterisiert. Außerdem wird die Sensitivität der untersuchten Sensorik im Labor überprüft und deren Effektivität nachgewiesen.

Um darüber hinaus in Zukunft eine akkurate Sensorauslegung ohne den Aufwand zusätzlicher Qualifizierungsmessungen zu ermöglichen, werden Modelle für die kapazitiven und induktiven Sensorvarianten entwickelt. Da hierbei unterschiedliche Simulationstools zum Einsatz kommen, werden die aus den Simulationen resultierenden Ergebnisse miteinander verglichen und das Für und Wider der einzelnen Simulationsmethoden gegeneinander abgewogen. Anhand der zuvor im

Labor ermittelten Ergebnisse wird dabei die Genauigkeit der Modellierungsansätze validiert und der zukünftige Einsatz der Simulationen als effektive Auslegetools legitimiert.

Neben der Sensormodellierung und -charakterisierung wird zusätzlich mit Hilfe eines selbst entwickelten Prototyps aufgezeigt, wie ein TE-Monitoringsystem unter Ausnutzung mehrerer Frequenzbänder nicht nur TE detektieren, sondern gleichzeitig eine grobe Ortsinformation generieren kann. Diese Ortsinformation kann dann zur begrenzten Lokalisierung der Fehlerquelle genutzt werden. Neben der Validierung des Lokalisierungsprinzips wird außerdem die Sensitivität des gesamten Monitoringsystems anhand einer Kabelmuffe mit definierten TE-Fehlstellen in einem Versuchsaufbau nachgewiesen.

Abgesehen von der Messung und Analyse der TE stellt die Erfassung der Muffentemperatur einen weiteren wichtigen Baustein im Konzept des Monitoringsystems dar. Die Erfassung der Temperatur ermöglicht es, thermische Fehler zu detektieren und eine Aussage über den Auslastungszustand der Kabelmuffe zu treffen. Da die Leitertemperatur in der Muffe unter Hochspannung messtechnisch nicht direkt erfasst werden kann, wird zur Beurteilung des Auslastungszustands und zur Angabe der Temperatur in der Muffe ein thermisches Modell benötigt. In Ermangelung solcher Modelle wird deswegen zunächst das thermische Verhalten einer Kabelmuffe im Labor messtechnisch evaluiert. Daran angeschlossen werden in einem zweiten Schritt thermische Modelle der Kabelmuffe abgeleitet.

Für den Einsatz im Monitoringbetrieb wird dabei ein auf einem linearen Netzwerk basierendes thermisches Modell entwickelt und dessen Genauigkeit anhand der Labormessungen validiert. In Kombination mit einer dezidierten thermischen Sensorik sowie einer integrierten Laststrommessung ermöglicht das lineare Netzwerkmodell die Beurteilung der Muffentemperatur im Rahmen des thermischen Monitorings von Kabelmuffen.

Zusätzlich dazu wird ein auf der Finiten Elemente Methode (FEM) basierendes Modell für komplexere und weiterführende Analysen entwickelt und ebenfalls durch die experimentell ermittelten Messdaten validiert. Mit Hilfe des validierten FEM-Modells wird in einem weiteren Schritt sowohl der Einfluss der Kabelmuffen als auch der Einfluss des Muffenbuchtdesigns auf die Stromtragfähigkeit einer Kabeltrasse unter variierenden Umgebungsbedingungen bei Erdverlegung analysiert. Anhand der daraus gewonnen Erkenntnisse wird außerdem aufgezeigt, wie unter Einbezug der thermischen Zeitkonstante des Erdbodens bei Beachtung des (n-1)-Prinzips, eine verbesserte Nutzung der Übertragungskapazität und Überlastung des Kabels möglich sind.

Abschließend wird auf Basis eines im Rahmen der Arbeit entwickelten Prototyps auf praxisrelevante Fragen in der realen Applikation eingegangen. Zusätzlich werden bisher nicht betrachtete Komponenten des Monitoringsystems, wie die Kommunikation oder die autarke Energieversorgung, näher beleuchtet.

- **Autonomous Condition Monitoring of Cable Joints Based on Integrated Partial Discharge and Temperature Sensors**

M.Sc. Daniel Passow

The reliability and performance of high-voltage and extra-high-voltage cable networks depend directly on the condition parameters of the individual installed components. Due to the limited transport capacity of underground cables in on-shore applications, cable routes consist of several cable segments. These segments are usually connected by so called cable joints. As a rough guideline, about one cable joint per kilometer can be expected. In the case of cable routes with a length of several kilometers, this leads to a high quantity of components and a strong weighting for fault free cable networks. With that in mind, this thesis investigates the possibility of integrating a self developed self sufficient condition monitoring system into the design of a conventional slip-on joint. Particular focus is placed on the system design concerning the online operability of the condition monitoring.

An important component in the concept of the system is the assessment of the insulation condition of joints and cables based on the detection and analysis of partial discharges (PD) with directly integrated sensors. Particularly in cable networks, the detection of PD is complicated due to the extended length of the equipment and the resulting side effects. The extended length of the equipment leads to low-pass behavior and attenuation. In this context, the direct integration of PD sensors in the joint presents a possibility of limiting the effects of the attenuation and low-pass characteristics. To evaluate the advantages and disadvantages of capacitive and inductive sensor designs, their behavior is characterized in terms of frequency response and time domain behavior. In addition, the sensor sensitivity is evaluated and effectively demonstrated in the laboratory.

Furthermore, to permit accurate sensor design in the future without the expense of additional qualification measurements, simulation models for the different sensors are developed and validated. For this purpose, different simulation tools and concepts are used, and from the results pros and cons for each concept are derived and compared. In addition, the accuracy of the modeling approaches is validated based on the previously acquired measurement results, legitimizing the future use of the simulations as effective design tools.

Besides modeling and characterization of the sensors, a self-developed prototype is used to demonstrate how PD monitoring in cables can not only detect PD using multiple frequency bands but can also generate coarse location information at the same time, which can be used to determine the fault location within certain limits. In addition to validating the localization principle, the sensitivity of the monitoring system is demonstrated using a cable joint with defined artificial PD faults.

Aside from the measurement and detection of PD, the evaluation of the joint temperature is another important component in the concept of the monitoring system. Whether it might be a defective conductive connection or any other kind of degradation that can lead to increased power loss within the equipment, evaluation of the temperature makes it possible to analyze the operating and load condition. Since the conductor temperature cannot be measured directly during operation under high voltage, a thermal model is inevitably required to evaluate the actual load condition and to evaluate the temperature in the joint. In the absence of thermal models, the thermal behavior of a cable joint is evaluated by measurement in the laboratory, and thermal models are derived.

For the usage in the monitoring system a thermal model built on a linear network is developed and its accuracy is validated based on laboratory measurements. Combined with dedicated integrated thermal sensors and an integrated load current measurement, this model enables the thermal monitoring of the cable joint during online operation.

In addition, a model based on the finite element method (FEM) is developed for more complex and advanced analyses. This model is also validated by the experimentally determined measurement data. In a further step with the help of the validated FEM model, the influence of cable joints on the ampacity of a cable route under varying boundary conditions in a buried application is analyzed. Including the resulting findings, it is also shown how the thermal time constant of underground cables can be used to increase the load and ampacity while still relying on the (n 1) principle, thus contributing to an increase in the efficiency of existing cable networks.

Finally, based on a developed prototype practical questions for real applications are addressed. Furthermore, components that have not been addressed so far, like the communication or the self-sufficient energy supply, will be analyzed in more detail.

- **Technoökonomische Neugestaltung vertikaler Netzbetreiberinteraktionen auf Grundlage einer partikelschwarmbasierten Aggregation dezentraler Wirk- und Blindleistungsflexibilitäten der Verteilnetzebene**

M.Sc. Marcel Sarstedt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion

Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 13.10.2023

- **Modellierung und Plausibilisierung synthetischer Netzstrukturen elektrischer Verteilnetze**

M.Sc. Marc Roland Trageser

Hauptberichter: Prof. Dr. sc. Andreas Ulbig

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion

RTWH Aachen

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2023

5. FORSCHUNGSARBEITEN

Das Institut befasst sich in seinen Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig mit Themen, die zur Sicherstellung einer zuverlässigen, kosteneffizienten und nachhaltigen Energieversorgung beitragen. Dabei werden hochspannungstechnische Aufgaben auf dem Gebiet der Isolationsfestigkeit und Diagnostik genauso bearbeitet wie Themen, die die Umstrukturierung der elektrischen Energieversorgung u.a. durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien betreffen. Ein besonderer Schwerpunkt der Forschungstätigkeit ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei energietechnischen und elektronischen Systemen.

Hochspannungstechnik

Am Institut werden moderne *Messmethoden* zur Erfassung hoher Stoßspannungen und schnellveränderlicher elektromagnetischer Felder untersucht und weiterentwickelt. Ein wichtiger Schwerpunkt ist hier Teilentladungs-(TE)-Messtechnik. Wir beschäftigen uns hier vor allem mit fortschrittlichen Verfahren der Störgrößenunterdrückung und Mustererkennung, der akustischen TE-Messtechnik und der UHF-Methode zur Erfassung und Ortung von TE.

Der *Betrieb* der Übertragungsnetze über Bemessungsgrenzen und projektierte Lebensdauer der Betriebsmittel hinaus bedingt eine genauere Überwachung des Betriebszustandes, um die Versorgungssicherheit weiter zu gewährleisten (Life Cycle Management). So werden zum einen die für die einzelnen Betriebsmittel notwendigen Diagnoseverfahren (z.B. Teilentladungsmessung, Frequency Response Analysis, Feuchtigkeitsbestimmung, Gas-in-Öl-Analyse, Vibrationsmessung, Online Monitoring) entwickelt und verbessert, um etwa die Überlastbarkeit und Restnutzungsdauer vorhersagen zu können. Hier stellen die Messverfahren zur Anwendung in der Schaltanlage einen besonderen Schwerpunkt dar. Zum anderen werden anlagenübergreifende Instandhaltungsstrategien entwickelt (Asset Management).

Hinsichtlich des *Designs* hochspannungstechnischer Betriebsmittel werden neue Isolierstoffe (z. B. natürliche und synthetische Ester) auf ihre physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften hin geprüft. Durch den Einsatz moderner Softwarewerkzeuge, z.B. Finite Elemente Methode (FEM) und Computational Fluid Dynamics (CFD), wird der Ölstrom und das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren untersucht. Das Forschungsgebiet Gasförmige Isolationssysteme ist geprägt durch Themenstellungen wie die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von SF₆ und Mischgasen und die Untersuchung der Ausbreitung und Dämpfung von Very Fast Transients in GIS.

RESEARCH ACTIVITIES

Our institute's main research topics are related to the reliability, cost-efficiency and sustainability of electric power supply. Thus, we deal on the one hand with tasks from the field of high-voltage insulation performance and condition assessment and on the other hand with the requirements for planning and operation of future electric power grids which arise from the increasing use of renewable energies. A special emphasis of our research work is in the field of electromagnetic compatibility (EMC) of both power electric and electronic systems.

High Voltage Engineering

At our institute we develop and improve *measurement techniques* for the measurement of high amplitude impulse voltages and transient electromagnetic fields. One main topic in this field has become the detection and measurement of partial discharges. Here we basically deal with modern methods of noise reduction, with acoustic PD measurement techniques and with unconventional UHF partial discharge measurement and localisation techniques.

The *operation* of electric power networks above their initial dimensioning levels and longer than their estimated lifespan requires a detailed monitoring of the operating conditions to ensure a safe supply with electric power also in the future (life cycle management). For this task the diagnostic tools, which are necessary for different apparatus, are developed or improved (e. g. partial discharge measurement, frequency response analysis, moisture determination, dissolved gas analysis, vibration measurement, on-line monitoring). These tools can be used to predict the overload capacity and residual life time of a H.V. apparatus. On the other side service and maintenance strategies for H.V. equipment are developed (asset management).

Regarding the *design* of high voltage equipment new materials (e. g. natural and synthetic esters) are investigated concerning their physical, chemical and electric properties. By means of modern software tools, e. g. finite element analysis (FEM) and computational fluid dynamics (CFD), the oil-flow distribution and the thermal behavior of power transformers can be investigated and optimized. The research area Gaseous Dielectrics is characterized by topics like investigation of dielectric properties of pure SF₆ and SF₆-gas mixtures, the influence of atmospheric conditions on the dielectric strength of technical insulation designs and the investigation of generation and damping of very fast transients in gas-insulated switchgear.

Elektrische Energieversorgung / Smart Grids

In diesem Forschungsgebiet werden Methoden zur optimalen Planung und Betriebsführung des zukünftigen intelligenten Stromversorgungssystems mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien entwickelt, implementiert und untersucht. Wesentliche Forschungsthemen sind dabei:

- Netzplanungsmethoden unter Verwendung probabilistischer Ansätze und unter Einbeziehung von Flexibilisierungsoptionen
- Methoden zur Schaffung bzw. Verbesserung der Beobachtbarkeit der elektrischen Netze basierend auf Zustandsschätzungsalgorithmen sowie auf zeitsynchronisierten Messungen mittels Phasor Measurement Units (PMU)
- Ansätze zur Komplexitätsreduktion von Simulations- und Optimierungsverfahren bei interdisziplinärer, sparten- und spannungsebenenübergreifender Betrachtung
- Konzepte für flexible, dezentrale Netzarchitekturen (Mikronetze, virtuelle Kraftwerke, etc.) und Verfahren für deren optimierte Auslegung und Betriebsführung
- Optimale Betriebsführungsstrategien für Systeme mit hoher Penetration an volatilen Erzeugern
- Regelungsverfahren und Betriebsführungsmethoden für optimale Integration von HGÜ-Systeme in das Verbundsystem.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Die Forschungsschwerpunkte der Elektromagnetischen Verträglichkeit am IEH liegen im Automobilbereich und bei Mittelspannungsschaltanlagen.

- EMV von KFZ-Wechselrichtern
- Aktive und passive Filter
- Induktive Ladesysteme
- EMV von Mittelspannungsanlagen
- Teilentladungsbetrachtung in der Elektromobilität
- CISPR 25 Komponententests mit komplexen Kabelbäumen

Electrical Power Supply / Smart Grids

In this research area the methods for optimal planning and operation of the future intelligent electrical power supply systems with large penetration of renewable energies are developed, implemented and analyzed.

Most relevant topics on this field are:

- Methods for grid planning tasks using probabilistic approaches taking into consideration the possible flexibility options
- Methods for provision or improvement of power grid observability level based on state estimation approaches as well as time synchronized measurements with Phasor Measurement Units (PMU)
- Methods for reduction of complexity in simulation and optimization approaches with regard to interdisciplinary analysis across voltage levels and energy sectors
- Concepts of flexible decentralized power system architectures (micro grids, virtual power plants, etc.) as well as approaches for their optimized design and operation
- Optimal control strategies for systems with high penetration of stochastic generation
- Control strategies and operation methods for optimal integration of HVDC-systems into the interconnected power system

Electromagnetic Compatibility

The main research of Electromagnetic Compatibility at the IEH focuses on the automotive sector and medium voltage switchgears.

- EMC of automotive inverters
- Active and passive filters
- Inductive charging systems
- EMC of medium voltage installations
- Partial discharge analysis in electromobility
- CISPR 25 component level test with complex wiring harnesses

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

- **Forschungsprojekt „ZÜbReNe“:
Steigerung der Zuverlässigkeit und Überlastbarkeit
von Betriebsmitteln zur Reduktion von Netzausbau
Laufzeit: November 2019 – April 2023**

Die Belastbarkeit von elektrischen Betriebsmitteln wird durch schädigende Auswirkungen von überhöhten Temperaturen auf die Isolationsmaterialien begrenzt. Wenn diese Temperaturen gezielt gemessen, ausgewertet und die Ergebnisse an die Netzleitstelle übertragen werden, können Energienetze höher ausgelastet werden, wodurch die Kosten für Netzausbau und Einspeisemanagement gesenkt werden können.

In ZÜbReNe wird ein Monitoring für Transformatoren und Kabelmuffen vorgeschlagen und entwickelt. Wichtige Projektaufgaben sind die Entwicklung eines thermischen Modells und die Implementierung von Sensoren in die Muffe. Es wird eine „intelligente“ Muffe angestrebt, mit der auch Teilentladungen, ein wichtiger Indikator für eine Zustandsverschlechterung, überwacht werden können. Auch Transformatoren altern bei thermischer Überlastung schneller und verursachen bei vorzeitigem Ausfall hohe Kosten. Sie können durchaus überlastet werden, sofern man bei Kenntnis der aktuellen Umgebungsbedingungen die Öl- und Heißpunkttemperaturen vorab möglichst genau berechnen kann. Im Projekt werden thermische Modelle zur Berechnung der Überlastbarkeit von Transformatoren entwickelt. Damit die Modelle breit einsetzbar sind, wird ein Algorithmus zu deren Selbstparametrierung entworfen. Mit der Entwicklung und prototypischen Umsetzung von Monitoringsystemen für Transformatoren und Kabelmuffen wird die Zustandserfassung der Betriebsmittel ermöglicht, um die aktuelle Überlastbarkeit in der Leitwarte im Netzbetrieb berücksichtigen zu können. Die in diesem Projekt fokussierten Aspekte des Kabel- sowie Transformatormonitorings in Kombination mit dem Freileitungsmonitoring stellen eine neue Perspektive für die Planung des Netzausbaus dar.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „ZÜbReNe“:
Increasing the Reliability and Overload Capacity
of HV Equipment to Reduce Grid Expansion**

Period: November 2019 – April 2023

The load capacity of electrical equipment is limited by damaging effects of excessive temperatures on the insulation materials. If the temperatures are measured, evaluated and the results are transmitted to the network control center, the electric power network can be utilized to a greater extent, thus reducing the costs for grid expansion and feed-in management.

In ZÜbReNe a monitoring system for transformers and cable joints is proposed and developed. Important project tasks are the development of a thermal model and the implementation of sensors in the cable joint. The aim is to develop an "intelligent" joint, which can also monitor partial discharges as an important indicator of deterioration. Also when power transformers are thermally overloaded they age faster and cause high costs if they fail prematurely. Overload is possible if the current ambient conditions are known and if one is able to calculate the oil and hotspot temperatures as precisely as possible in advance. Therefore in this project thermal models for calculating the overload capacity of transformers are developed. Also an algorithm for their self-parameterization is designed for a wide usage of the models. The development and prototypical implementation of monitoring systems for power transformers and cable joints allows taking into account their current overload capacity for the operation of electric networks. The aspects of cable and transformer monitoring in the project combined with the overhead line monitoring represent a new perspective for the planning of the grid expansion.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

- **Forschungsprojekt:
Entwicklung eines ganzheitlichen Lebensdauer-
modells für Wicklungsisolierungen von elektrischen
Maschinen auf Basis der wirkenden Schadensmecha-
nismen und ihrer unterschiedlichen Ausprägungen**
Laufzeit: März 2021 – Dezember 2023

Die Langlebigkeit und ein möglichst geringer Wartungsaufwand elektrischer Maschinen stellen in allen Anwendungsbereichen, aber vor allem für die Elektromobilität wesentliche Faktoren für eine erfolgreiche Mobilitätswende dar. Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Antriebsmaschine müssen für eine effiziente Systemauslegung in einem getreuen Lebensdauermodell modelliert werden können. Insbesondere steigende elektrischen Anforderungen, wie höhere Betriebsspannungen und effizientere, steilere Schaltflanken der Leistungselektronik stellen neue, bisher unbekannte Treiber für potentielle Isolationsfehler dar und müssen daher in solche Modelle einfließen.

Im Rahmen dieses Projekts wird ein Lebensdauermodell für die Wicklungsisolation unter Stress durch rechteckförmige Spannungen erstellt, wie sie an Leistungswechselrichter auftreten. Damit können die Auswirkungen elektrischer Alterungsmechanismen auf die Wicklung charakterisiert werden, was eine Schätzung der Lebensdauer der Wicklung ermöglicht. Das Modell basiert auf einer empirischen Messkampagne, welche sowohl thermische Alterungseffekte als auch elektrische Schädigungsmechanismen berücksichtigt, wie beispielsweise Teilentladungen.

Das Lebensdauermodell basiert auf einem Accelerated Degradation Test -Ansatz und wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinenelemente (IMA) entwickelt, um eine zuverlässige Abschätzung des Alterungsverhaltens der Maschinenisolation bereitzustellen. Um die Anwendung in industriellen Applikationen zu vereinfachen, wird im Rahmen des Projekts auch ein benutzerfreundliches Softwaretool für die Lebensdauervorhersage der Isolierung entwickelt. So können Projektergebnisse einfach in aktuelle Konstruktionsprozesse integriert werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsnetzwerk
Mittelstand



- **Research Project:
Development of a service lifetime model for winding insulations of electrical machines on the basis of the acting damage mechanisms and their different characteristics**

Period: March 2021 – December 2023

Reliable assessment methods of the electrical machine are an important topic due to the development of electrical vehicles. The insulation failure of the winding is one of the main risk for both the motor, as well as for the reliability of the entire electrical vehicle. Therefore, the lifetime model of the winding is an important part for the reliability assessment for the electrical motor.

In this project, a lifetime model for the winding under PWM voltage is built based on the data measured at different specifications. The project tasks are to study the aging mechanism of the winding and to propose a method to estimate the lifetime of the winding. The aim is to build a relationship between the lifetime of the winding and the data measured by the partial discharge (PD) measurement.

The lifetime model is based on an accelerated degradation test approach and is developed in cooperation with the Institute of Machine Elements (IMA) and is intended to provide a reliable estimate of the ageing behavior of the machine insulation. To simplify its use in industrial applications, the project will also develop a user-friendly software tool for insulation life prediction. In this way, project results can be easily integrated into current design processes.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsnetzwerk
Mittelstand



- **Forschungsprojekt „E-DropSep“:
Entwicklung eines energieeffizienten,
dielektrophoretischen Tropfenabscheiders durch
hohe E-Feldinhomogenität zur hocheffizienten
Abscheidung von Tropfen aus Gasströmen**
Laufzeit: April 2021 – April 2023

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines neuartigen dielektrophoretischen Tropfenabscheiders. Unter Erzeugung inhomogener elektrischer Felder in einem Zylinderkondensator und Ausnutzung oder Induzierung von Dipolmomenten werden Tropfenabscheider mit deutlich erhöhten Abscheidegraden bei mind. 75% energieeffizienterer Betriebsweise gegenüber Drall-Tropfenabscheidern ermöglicht. Dazu werden die Tropfenabscheider ausgelegt, berechnet und die notwendigen Störungsbedingungen simuliert. Ventilatoren, Strömungsberuhigungsstrecken und monodisperse Tropfengeneratoren sind notwendig, um über ein optisches particle tracking die Phänomene im Zylinderkondensator zu erforschen. Zudem müssen die Feldinhomogenität und geeignete Elektrodenformen erforscht werden. Ziel ist es, im Technikumsmaßstab bei Hochspannungen bis zu 100 kV Abscheidegrade über 99% bei Partikelgrößen um 10 μm zu ermöglichen. Neben der Isolationstechnik und dynamischer Spannungsversorgung müssen die Komponenten des Tropfenabscheiders so ausgelegt werden, dass Volumenströme über 500 m^3/h möglich werden. Über eine adaptiv zuschaltbare Befeuchtungseinheit wird die Abscheidung von Partikeln aus sehr trockenen Gasströmen möglich.

Das Projektkonsortium setzt sich aus zwei mittelständischen Betrieben und zwei Forschungseinrichtungen zusammen. Dies sind die Firmen Siebel Elektrotechnik GmbH und mf microfilter GmbH sowie das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) und das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „ E-DropSep“:
Development of an energy-efficient dielectrophoretic
Droplet Separator by high E-Field Inhomogeneity for
highly efficient Separation of Droplets from Gas
Streams**

Period: April 2021 – April 2023

The aim of the project is to develop a new type of dielectrophoretic droplet separator. By generating inhomogeneous electric fields in a cylindrical capacitor and utilizing or inducing dipole moments, droplet separators with significantly increased separation efficiencies and at least 75% more energy-efficient operation than swirl droplet separators are made possible. For this purpose, the droplet separators are designed, calculated and the necessary disturbance conditions are simulated. Ventilators, flow calming sections and monodisperse droplet generators are necessary to explore the phenomena in the cylindrical capacitor via optical particle tracking. In addition, field inhomogeneity and suitable electrode shapes must be explored. The aim is to enable deposition efficiencies above 99% at particle sizes around 10 μm on a pilot plant scale at high voltages up to 100 kV. In addition to the insulation technology and dynamic voltage supply, the components of the droplet separator must be designed in such a way that volume flows of over 500 m^3/h are possible. The separation of particles from very dry gas streams is possible via an adaptively switchable humidification unit.

The project consortium consists of two medium-sized enterprises and two research institution. These are the enterprises Siebel Elektrotechnik GmbH and mf microfilter GmbH as well as the Institute for Energy Transmission and High Voltage Technology (IEH) and the Institute for Building Energetics, Thermotechnology and Energy Storage of the University of Stuttgart.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



on the basis of a decision
by the German Bundestag

- **Forschungsprojekt:
Teilentladung in passiven Komponenten**

Laufzeit: April 2022 – September 2024

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Lebensdauermodells für Folienkondensatoren und Leiterplatten in leistungselektronischen Anwendungen. Im Fokus steht dabei der Ausfallmechanismus durch Teilentladung. Die Langlebigkeit und somit ein möglichst geringer Wartungsaufwand stellen im Bereich leistungselektronischer Komponenten wesentliche Faktoren zur Wirtschaftlichkeit dar. Ein systematischer Mangel kann je nach Stückzahlen im Feld zu hohen, nicht kalkulierbaren Folgekosten führen. Die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der verwendeten Komponenten und Systeme ist daher in allen Anwendungsfällen statistisch abzusichern, um die geforderte Langlebigkeit für die ausgelieferte Gesamtmenge gewährleisten zu können.

Speziell aktuelle SiC und GaN-Technologien der Halbleitertechnik mit effizienten, schnellen Schaltzeiten und entsprechend steilen Taktflanken bei hohen Betriebsspannungen führen zu einer bisher unbekannten Belastung elektrischer Bauteile wie Folienkondensatoren und Leiterkarten. Insbesondere deren dielektrische Festigkeit muss den neuen Einflüssen durch SiC und GaN genügen. Diese Auslegung bei extrem steilen Spannungsgradienten und höheren E-Feldstärken ist aktuell in der Praxis schwer bis unmöglich, da umfassende Kenntnisse über die Degradationseffekte und eine potentiell beschleunigte Alterung von elektrischen Bauteilen und Leiterkarten fehlen. Um dieses Defizit zu beseitigen ist eine statistische Versuchsplanung und – Durchführung notwendig, welche sowohl relevante Einflussfaktoren und dementsprechende Ausfallmechanismen widerspiegeln als auch eine optimale Stichprobenanzahl und Prüfzeit beschreiben, die zusammen mit dem Institut mit Maschinenelementen (IMA) entwickelt werden. Gleichzeitig sind detaillierte Kenntnisse über den inneren Aufbau und Materialeigenschaften der untersuchten Komponenten wichtig, weswegen eng mit Komponentenherstellern (Würth Elektronik und Electronicon) zusammengearbeitet wird.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können von durch Leitflächen und insbesondere durch ein im Projekt entwickeltes Lebensdauerprognosetool für die Optimierung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Leistungselektronik verwendet werden. Einerseits, um die erforderliche Lebensdauer sicherstellen zu können, und andererseits, um Überdimensionierungen zu erkennen und im Sinne der Effizienzsteigerung zu beseitigen.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsnetzwerk
Mittelstand



- **Research Project:
Partial Discharges and Ageing in passive
Components of Power Electronics**

Period: April 2022 – September 2024

The aim of the project is to develop a lifetime model for film capacitors and printed circuit boards (PCB) in power electronics applications. The focus is on the failure mechanism due to partial discharges. Longevity and thus low maintenance efforts are essential factors for economic efficiency in the field of power electronic components. Depending on the number of units in the field, a systematic defect can lead to high, incalculable follow-up costs. The service life and reliability of components and systems must therefore be statistically assured in all applications in order to be able to guarantee the required longevity for the total quantity delivered.

Especially current SiC- and GaN-technologies in semiconductor technology with efficient, fast switching and correspondingly steep slew rates at high operating voltages lead to a currently unknown load on electrical components such as film capacitors and printed circuit boards. Designing their electrical insulation at extremely steep voltage gradients and high E-field strengths is currently difficult or even impossible in practice, since comprehensive knowledge about the degradation effects and potentially accelerated ageing of these components is lacking. To eliminate this deficit, statistical test planning is necessary, which reflects both, relevant influencing factors (including corresponding failure mechanisms) and describe an optimal number of samples and test time. Both are being developed in cooperation with the Institute with Machine Elements (IMA). At the same time, profound knowledge of the internal structure and material properties of the components under investigation are important, which is why component manufacturers (Würth Elektronik and Electronicon) represent essential partners within this project.

The gained knowledge can be used to optimize the service life and reliability of power electronics by means of guidelines and a lifetime prediction tool developed in this project. Hence, engineers will be able to do both, to ensure the required service life, to recognise overdimensioning and eliminate it in the sense of increasing system efficiency and costs.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

Forschungsnetzwerk
Mittelstand



- **Precision Contamination Control: Enhancing Transformer Diagnostics Through Targeted Oil Sample Analysis**

M. Sc. Fatemeh Ahmadipour

Analyzing contaminant levels, encompassing hydrogen, moisture, acids, and particles, in mineral transformer oil is crucial for understanding potential faults in power transformers. Hydrogen serves as a key indicator of incipient thermal faults, linked to overheating, partial discharges, and cellulose insulation degradation. Excessive moisture accelerates insulation aging and diminishes dielectric strength, while acidity in transformer oil signals potential insulation degradation and corrosive byproduct formation. Particles, such as metal fragments or sludge, provide insights into mechanical wear, insulation erosion, or impending catastrophic failures. Scrutinizing these contamination parameters enables analysts to correlate variations with specific transformer faults, supporting a proactive and targeted maintenance approach. This comprehensive understanding aids in identifying incipient issues, preventing transformer failures, and ensuring the reliability and longevity of power distribution systems.

To improve our ability to diagnose and maintain power transformers effectively, it's crucial to use oil samples deliberately contaminated with specific amounts of hydrogen, moisture, acids, and particles. By carefully introducing these contaminants into transformer oil in controlled amounts, we can systematically study how they affect the oil's properties. Creating a variety of samples that mimic different operating conditions and potential faults helps us establish connections between contaminant levels and specific transformer issues. This method aids in developing and fine-tuning diagnostic tools, ensuring accurate detection and measurement of contaminant concentrations in real transformer environments. The availability of oil samples with controlled contaminant levels is a key factor in refining diagnostic methods, significantly contributing to the improvement of predictive maintenance practices for power transformers.

Our project aims to carefully set up experiments using a specific plan to make transformer oil samples. We want to add precise amounts of contaminants like hydrogen, moisture, acids, and particles, with a focus on hydrogen and moisture. While doing this, we'll use advanced tools like the Dissolved Gas Analysis (DGA) system, Karl Fischer titrator, and moisture measurement sensors to measure contaminant levels at the same time. This helps us confirm our method scientifically. By combining these tools, we not only learn how to control contaminant levels in the oil but also connect these levels with signals from high-tech instruments in real-time. This method helps refine tools for checking power transformers, making predictive maintenance in power systems much better.

■ Oberflächenladungen auf Stützern in DC-GIS

M. Sc. Lars Baronat

Die verstärkte Nutzung der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) hat auch zu einem Interesse an der Verwendung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) für Gleichspannung geführt. Im Vergleich zu traditionellen AC-GIS kommen jedoch unter Gleichspannungsbelastung bisher vernachlässigbare Effekte zum Tragen wie die Ansammlung und Migration von Ladungsträgern auf Isolatoroberflächen. Um diese Ladungen zu untersuchen, wird ein System entwickelt, welches Oberflächenladungen auf Stützern in einer realen GIS unter vollen Betriebsbedingungen messen kann.

Dieses System besteht aus einem GIS-Ring, in welchem die Ladungen auf zwei Stützern simultan und über lange Zeiträume gemessen werden können. Die Betriebsspannung kann in beiden Polaritäten bis zu 350 kV_{DC} betragen. Der Innenleiter wird mittels eines eingepprägten AC-Stromes geheizt, um realistische Betriebstemperaturen zu erreichen.

Zur Messung der Ladungen befindet sich im Inneren der GIS ein 5-Achs Roboter, welcher Feldsonden an beliebigen Stellen der Stützer positionieren kann. Eine solche Sonde ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Messung selbst erfolgt durch einen Nullabgleich. Roboter und Feldsonden werden durch eine einstellbare DC-Quelle auf Hochspannungspotential gehoben, bis kein elektrisches Feld mehr messbar ist. Aus dem so ermittelten Oberflächenpotential können später die Ladungen berechnet werden.



Fig. 1: Feldsonde vor einem Stützer
Field probe in front of a spacer

Aufgrund der unerwartet langen Lieferzeit der Hochspannungsquellen konnte erst jetzt begonnen werden die Anlage aufzubauen. Abbildung 2 zeigt den aktuellen Stand des Aufbaus. Auf der linken Seite stehen die beiden 350 kV DC-Quellen. Rechts befindet sich ein eigens konstruierter Trenntransformator zur Versorgung des Roboters. Vor diesem Transformator wird sich später ein weiterer Ausgang der vorderen DC-Quelle befinden. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Hochspannungskomponenten werden über ein externes Widerstandsnetzwerk hergestellt, welches an einer Seilkonstruktion über dem Aufbau hängt.

■ Surface Charges on spacers in DC-GIS

M. Sc. Lars Baronat

The growing use of high voltage DC (HVDC) systems has also led to an increased interest in the use of gas insulated switchgear (GIS) for use with HVDC. Due to the use of direct current, there are effects like the accumulation and migration of charges on insulator surfaces that can be ignored in traditional AC GIS. To investigate these charges, a setup is built to measure surface charges inside a real GIS under full operating conditions.

This system consists of a GIS ring in which charges on two spacers can be measured simultaneously and over long timespans. The operating voltage can be up to 350 kV_{DC} in both polarities, while the inner conductor is heated to operating temperature by an induced AC current.

Inside the GIS there is a 5-axis robot that is able to place field probes on every point of the spacers. One of these probes is shown in figure 1. The measurement itself operates as a zero-field compensation. The robot, along with the field probes, is lifted up onto high voltage potential using a variable HVDC source until no electric field can be measured. This way, the surface potentials of the spacers can be measured and the surface charges can be calculated from the measured potentials.



Fig. 2: Hochspannungsversorgung im Aufbau
High-Voltage supply under construction

Because of the unexpectedly long delivery time of the HVDC-sources the construction of the setup has only just begun. Figure 1 shows the current state of construction. On the left are the two 350 kV DC-sources. On the right is a custom isolation transformer that is used to supply power to the robot. In front of this transformer will be a second output of one of the high voltage sources. All connections between the high-voltage components will be made via an external resistor network that is hanging from ropes above the setup.

■ **Ultra-High Frequency Partial Discharge Measurements in Power Transformers**

M. Sc. Chandra Prakash Beura

Power transformers are crucial to the operation of an electrical grid, which necessitates ensuring their proper functioning. Continuous Partial Discharge (PD) activities inside a transformer slowly deteriorate the insulation system and finally lead to its complete breakdown and thus, a failure of the equipment. Therefore, PD monitoring is performed to identify and localize PD sources before the insulation system is compromised. The most widely used methods for PD monitoring are Dissolved Gas Analysis, conventional electrical PD measurement, according to IEC 60270, acoustic, and Ultra-High Frequency (UHF) PD measurement. UHF PD measurement involves measuring the electromagnetic signals emitted by the PD, in the frequency band from 300 MHz to 3 GHz, using UHF sensors and can be used for both PD source detection and localization.

UHF PD measurement has certain advantages over the conventional method. Firstly, the method is less prone to external disturbances. For example, in transformers, the tank which acts as a Faraday cage and the low-pass filter characteristics of the graded bushings provide a shielding effect to external disturbances. Additionally, it allows for three-dimensional localization of PD sources based on Time Difference of Arrival (TDOA) between multiple sensors. Therefore, UHF PD measurement in power systems components, such as Gas Insulated Switchgear and power transformers has attracted attention in recent years.

However, one key aspect of UHF PD measurement in transformers is the placement of sensors. The CIGRÉ Technical Brochure 662 recommends the installation of dielectric windows in newly manufactured transformers for mounting UHF sensors; however, it does not mention where to position them. Additionally, attenuation of the UHF signals is not only dependent on the distance between the source and receiver, but also the propagation path.

Therefore, a practical approach to sensor positioning can be established by evaluating the effect of the propagation path and distance on signal attenuation. A UHF PD experiment is performed on a decommissioned 300 MVA, 420 kV power transformer before scrapping to evaluate most propagation paths with varying distances. Based on the obtained measurement data, general conclusions are drawn about the performance of sensors.

As shown in Figure 1, a total of 17 holes were drilled to allow for the insertion of the monopoles. Sensors were installed at the top and bottom of each vertical tank wall along the length of the transformer and were also distributed horizontally over their respective tank walls. Additionally, a sensor was also placed on the wall that was along the width of the transformer and farther from the OLTC (denoted as side-wall).

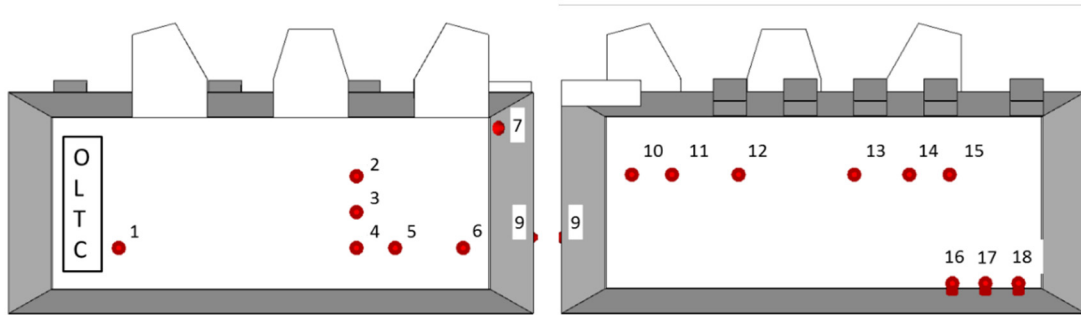


Fig. 1: Sensor distribution over tank surface for HV side (left) and MV/LV side (right)

The accumulated signal power provides information about a specified bandwidth. For each sending/receiving sensor combination, the distance, as well as the accumulated signal power within 400 MHz-900 MHz, was calculated. An accumulated power vs distance plot was obtained, as shown in Figure 2 (left), where each blue circle represents the accumulated power of one sending or receiving combination against the distance between the sensors. It can be observed that there is an expected general decline in signal power with increasing distance. High volatility is observed in the measured data. Therefore, fitting curves are introduced to study the general tendencies of signal attenuation statistically, as shown in Figure 2 (right).

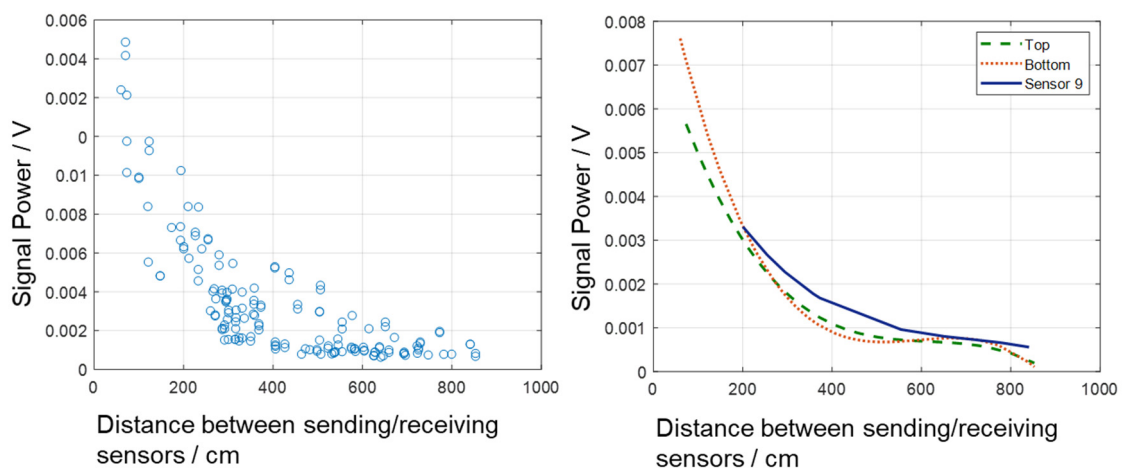


Fig. 2: Signal power of sending-receiving antenna pairs vs distance (left) and fitted curves for different groups of antennas (right)

Analysis of the fitted curves shows that the signal attenuation is mainly dependent on the type of propagation path and the distance between sending/receiving sensors. Attenuation is found to be higher for indirect propagation; however, over very long distances, directly propagating signals can attenuate to the level of indirectly propagating signals. The difference between sensors placed at the top or the bottom of the tank wall is minor.

■ Teilentladung und Alterungsverhalten passiver Komponenten unter pulsformiger Spannung

M. Sc. Jonas Bux

Der Trend zu schnelleren Schaltzeiten und steileren Spannungsflanken stellt eine bisher unbekannte Belastung für die Bauteile des Antriebsstrangs dar. Umfassende Erkenntnisse zur Alterung unter pulsweitenmodulierter, rechteckförmiger Spannung sind von immenser Bedeutung für die Auslegung der Komponenten.

Dafür gilt es, die relevanten Belastungsparameter zu bestimmen und deren Einfluss auf verschiedene charakteristische Eigenschaften der Prüflinge wie z.B. Kapazität, komplexe Impedanz, Verlustfaktor und Isolationswiderstand zu untersuchen.

Erste Langzeitversuche im Rahmen der Vorprüfungen zeigen deutliche Degradationseffekte, die es im weiteren Verlauf zu deuten gilt.

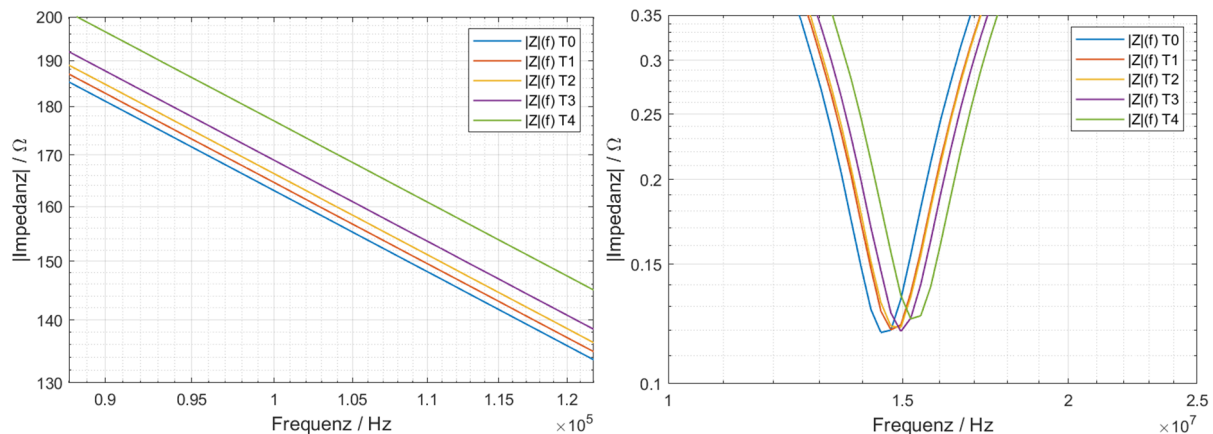


Fig. 1: Verschiebung der Impedanz eines Folienkondensators in ersten Versuchen.
Impedance shift of a film capacitor in preliminary long-term tests.

Neben der Alterung unter Normalbedingungen soll der zusätzliche, überlagerte Degradationseffekt durch Teilentladungen (TE) während des Betriebs qualitativ und quantitativ analysiert werden. Für die TE-Messung stehen am Institut verschiedene konventionelle und unkonventionelle Messmethoden zur Verfügung.

Die Erkenntnisse sollen abschließend für eine fundierte Lebensdauerprognose, einer frühzeitigen Erkennung des Lebensdauerendes des Bauteils und zur Optimierung der TE-Messmethoden an passiven Elementen genutzt werden.

- **Partial discharge and aging behavior of passive components under impulse voltage stress**

M. Sc. Jonas Bux

The trend towards faster switching times and steeper voltage edges results in unprecedented stress for drivetrain components. Comprehensive information on ageing under pulse-width modulated, square-wave voltage is of immense importance for the design of components.

For this purpose, the relevant load parameters must be determined and their influence on various characteristic properties of the test specimens, such as capacitance, complex impedance, dissipation factor and insulation resistance, must be investigated.

Initial long-term tests as part of the preliminary tests show clear degradation effects that need to be interpreted in the further course of the project.

In addition to ageing under normal conditions, the additional, superimposed degradation effect caused by partial discharges (PD) during operation is to be analyzed qualitatively and quantitatively. Various conventional and unconventional measurement methods are available at the institute for PD measurements.

Finally, the findings are to be used for a well-founded lifespan prediction, early detection of the end of the component's lifetime and for optimizing the PD measurement methods on passive elements.

■ **Auswirkung der Alterung in Vakuumschaltern auf den Abrissstrom**

M. Sc. Markus Fischer

Vakuumschalter für den Einsatz im Mittelspannungsbereich besitzen gegenüber anderen Technologien Vorteile wie die Wartungsfreiheit und eine kompakte Bauform. Zusätzlich ergibt sich bei geringem Kontaktabstand und geöffnetem Schalterzustand eine hohe dielektrische Festigkeit. Der bei Unterbrechungsvorgängen im Moment der mechanischen Kontakttrennung entstehende Schaltlichtbogen besteht im Vakuum aus dem verdampfenden Kontaktwerkstoff. Speziell bei kleinen Strömen wird dieser Lichtbogen nahe des natürlichen Stromnulldurchgangs instabil und kann abrupt mit hoher Stromänderung abreißen. Transiente Überspannungen an angeschlossenen induktiven Verbrauchern sind die Folge. Um einen schonenden Stromabriss zu erreichen, kann dieser mittels verschiedener Maßnahmen näher an den Nulldurchgang verschoben werden. Der grundlegende Ansatz besteht aus der geeigneten Wahl des Schaltkontaktwerkstoffs. Für betriebsmäßige Lastschalthandlungen werden Kontakte aus dem Werkstoff Wolframcarbid-Silber (WCAg) verwendet, die durch einen niedrigen Stromabrisswert im Bereich 0,7 bis 2,5 A gekennzeichnet sind. Bei Leistungsschaltern liegt der Fokus auf einer hohen Unterbrechungsfähigkeit und damit Abbrandfestigkeit der Kontakte. Der hierbei verwendete Kupfer-Chrom (CuCr)-Werkstoff ist daher durch höhere Abrisswerte zwischen 4 und 6 A charakterisierbar. Im Rahmen dieser Forschung werden optimierte Werkstoffe für den Einsatz in Lastschaltern bzw. Schützen untersucht. Neben der Erzielung eines möglichst niedrigen Abrissstroms ist die Langzeitstabilität des Werkstoffs über die Lebensdauer eines Vakuumschalters eine wichtige Eigenschaft. Dazu werden mit den Vakuumschaltern mindestens 10.000 Unterbrechungsvorgänge durchgeführt. Für einen auf Kupfer basierenden Werkstoff, dem ein kleiner Anteil eines anderen Materials zugesetzt ist, ergibt sich kein eindeutiger Trend des Stromabrisses über die Anzahl an Unterbrechungsvorgängen (NIO). Nur eine Streuung ist in Fig. 1 sichtbar, was kein Anzeichen für eine Alterung darstellt. Verglichen mit dem Standardwerkstoff WCAg, welcher ebenfalls keine Alterung zeigt, liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich. Mit Schaltkontakten basierend auf dem Grundwerkstoff CuCr, dem ebenfalls ein kleiner Anteil eines anderen Materials hinzugefügt ist, folgt bis ca. NIO = 7.000 eine Senkung des Abrissstroms um 600 mA (siehe Fig. 2). Im weiteren Verlauf erreicht er wieder den Anfangswert der Untersuchungen, was auf keine Alterung hindeutet. Auch hier sind die Abrisswerte vergleichbar mit dem Grundwerkstoff CuCr ohne Zusätze.

■ Effect of Aging in Vacuum Interrupters on the Chopping Current

M. Sc. Markus Fischer

Vacuum interrupters for medium voltage applications have several advantages compared to other technologies, such as freedom from maintenance and a compact design. Additionally, there is a high dielectric strength with a small contact gap and an open switch state. The switching arc, that occurs during interruption operations at the moment of mechanical contact separation, consists of vaporized contact material in vacuum. Especially at low currents, this arc becomes unstable near the natural current zero crossing and can abruptly chop with a high current gradient, resulting in transient overvoltages at connected inductive loads. To achieve a smoother current chopping, this can be shifted closer to the zero crossing through various measures. The basic approach involves selecting the appropriate switching contact material. For operational load break switching operations, contacts made of tungsten carbide silver (WCAg) are used, characterized by a low chopping current value in the range of 0.7 to 2.5 A. In the case of circuit breakers, the focus is on a high interruption capability and burn-off resistance of the contacts. The copper chromium (CuCr) material used is characterized by higher chopping values between 4 and 6 A. Within the scope of this research, optimized materials for load break switches and contactors are examined. In addition to achieving a low chopping current, the long-term stability of the material over the life cycle of a vacuum interrupter is an important property. To assess this, at least 10,000 interruption operations are performed with the vacuum interrupters. For copper-based material with a small percentage of another material added, there is no clear trend in the chopping current over the number of interruption operations (NIO). Only a scatter is visible in Fig. 1, which does not indicate aging. When compared with the standard material WCAg, which also shows no aging, the values are in a similar range. Switching contacts, based on CuCr, with a small percentage of another material added, show a reduction in the chopping current of about 600 mA up to approximately NIO = 7,000 (see Fig. 2). In the further course, it returns to the initial value of the investigations, indicating no aging. Here, the chopping values are comparable to the base material CuCr without additives.

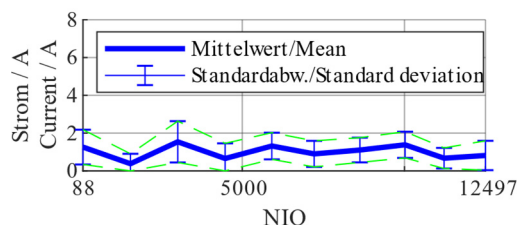


Fig. 1: Cu-basiertes Material
Cu-based material

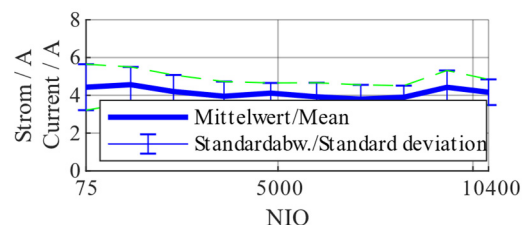


Fig. 2: CuCr-basiertes Material
CuCr-based material

■ **Parametrierung und Validierung thermischer Modelle zur Überlastbarkeit von Transformatoren**

M. Sc. Malte Gerber

Aufgrund der fortschreitenden Entwicklung der laufenden Energiewende, verändert sich die Energieversorgungsstruktur von einer zentralen zu einer dezentralen Energieerzeugung. Hierbei müssen immer häufiger Betriebsmittel ausgebaut werden, um eine Überlastung dieser Betriebsmittel zu verhindern. Damit eine Überlastung von Transformatoren ermöglicht und somit ein kostspieliger Ausbau verhindert werden kann, muss vorerst die thermische Belastung und folglich die vorzeitige Alterung des Transformators abgeschätzt werden. Steigt die Heißpunkttemperatur im Transformator über den vorgeschriebenen Grenzwert von 98°C nach IEC 60076-7, können negative Alterungseffekte am Transformator auftreten. Durch eine dauerhafte Überwachung des thermischen Verhaltens mittels eines Monitoringsystems, kann die mögliche Überlastung bei aktuellen Umgebungsparametern mit Hilfe des thermischen Modells des Transformators abgeschätzt werden.

Das dazu verwendete thermische Modell basiert sowohl auf der europäischen IEC 60076-7 und IEEE C57.91, Absatz 7 als auch weiteren Modellen aus der Literatur. Hierfür werden sowohl die natürliche Konvektion von Öl und Luft als auch die sich ändernde Umgebungstemperatur berücksichtigt, siehe Abb. 1 und Abb. 2. Die Parametrisierung des thermischen Modells erfolgt durch die Aufzeichnung des Betriebszustandes über einen längeren Zeitraum. Durch die Berechnung der oberen Öltemperatur ist auch eine Berechnung der Heißpunkttemperatur und somit eine Abschätzung der Überlastbarkeit des Transformators bei gegebenen Umgebungsparametern möglich. Die in der Norm vorgeschlagenen thermische Modelle sind nicht in der Lage, den dynamischen Wechsel der Kühlungsart zu berücksichtigen, wodurch der Datensatz der Parametrierung ein gleiches Kühlverhalten wie der betrachtete Überlastfall aufweisen muss.

Die weitere Validierung der thermischen Modellierung sowohl bei Kupplungs- und Verteilnetztransformatoren als auch die Implementierung der Modelle in ein Monitoringsystem stellen unter anderem Ziele des Forschungsprojektes „ZÜbReNe“ dar. Dieses Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und ist dieses Jahr beendet worden.

■ **Parameterization and Validation of thermal Models for Transformer Overload Capability**

M. Sc. Malte Gerber

Due to the progressive development of the ongoing energy transition, the energy supply structure is changing from centralized to decentralized energy generation. This means that more and more assets must be removed to prevent it from being overloaded. To enable transformers to be overloaded and thus prevent costly removal, the thermal load and consequently the premature ageing of the transformer must first be estimated. If the hot-spot temperature in the transformer rises above the prescribed limit value of 98°C in accordance with IEC 60076-7, negative ageing effects can occur on the transformer. By permanently monitoring the thermal behavior using a monitoring system, the possible overload at current ambient parameters can be estimated using the thermal model of the transformer.

The thermal model used for this is based on the European IEC 60076-7 and IEEE C57.91 Clause 7 as well as other models from the literature. For this purpose, both the natural convection of oil and air and the changing ambient temperature are considered, see Fig. 1 and Fig. 2. The thermal model is parameterized by recording the operating state over a longer period of time. By calculating the upper oil temperature, it is also possible to calculate the hot-spot temperature and thus estimate the overload capacity of the transformer for given ambient parameters. The thermal models proposed in the standard are not able to consider the dynamic change in the type of cooling, which means that the parameterization data set must have the same cooling behavior as the overload case under consideration.

The further validation of thermal modeling for both coupling and distribution network transformers as well as the implementation of the models in a monitoring system are among the objectives of the "ZÜbReNe" research project. This project was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and was completed this year.

As part of the research project, the various thermal models were analyzed for their accuracy in predicting the upper oil temperature as well as the hot spot temperature. In addition to investigating the accuracy and the relevant environmental parameters, the self-parameterization capability of the models and the resulting possible change in the accuracy of the predictions were also examined. This year, the focus was placed on the consideration of solar radiation on the warming and thus on the thermal modeling. In addition, the use of the thermal models to recognize a fan defect and the effect of a prediction error on the theoretical overload capacity were investigated.

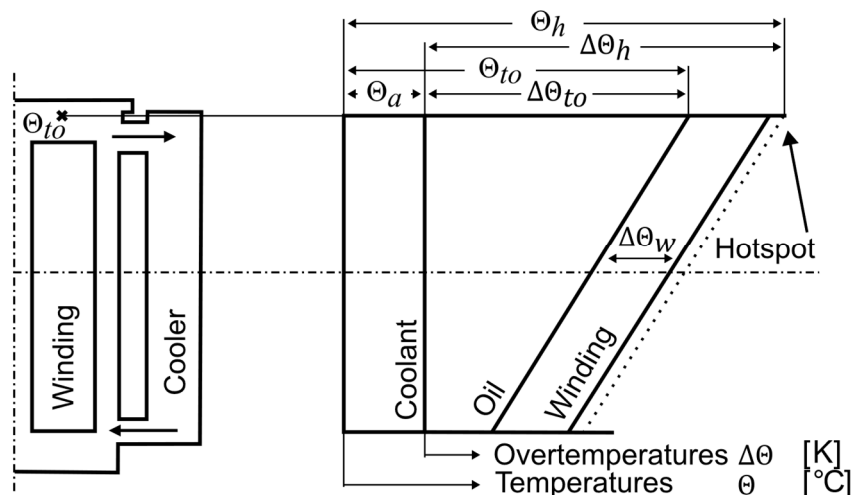
Furthermore, as part of a project with Fichtner, the overload capacity of power transformers was evaluated based on parameterization using the results from the heat run and the influence on ageing and the loss of service life under increased load was investigated.

A similar project with a transmission system operator is currently being carried out.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind die verschiedenen thermischen Modelle auf ihre Genauigkeit in der Vorhersage der oberen Öltemperatur aber auch der Heißpunkttemperatur untersucht worden. Über die Untersuchung der Genauigkeit und der relevanten Umgebungsparameter hinaus wurde die Selbstparametrierbarkeit der Modelle und die dadurch mögliche Veränderung der Vorhersagegenauigkeit untersucht. Hierbei wurde abschließend dieses Jahr ein Hauptaugenmerk auf die Berücksichtigung der solaren Einstrahlung auf die Erwärmung und somit auf die thermische Modellierung gelegt. Außerdem wurde die Verwendung der thermischen Modelle zur Erkennung eines Lüfterdefekts als auch die Auswirkung eines Vorhersagefehlers auf die theoretische Überlastbarkeit untersucht.

Darüber hinaus wurde im Rahmen eines Projektes mit Fichtner die Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren anhand einer Parametrierung mithilfe der Ergebnisse aus dem Wärmelauf evaluiert und der Einfluss auf die Alterung bzw. den Lebensdauerverlust bei erhöhter Belastung untersucht.

Ein ähnliches Projekt mit einem Übertragungsnetzbetreiber befindet sich aktuell in der Durchführung.



Θ_a :	Coolant temperature	$\Delta\Theta_{to}$:	Top-oil overtemperature
Θ_{to} :	Top-oil temperature	$\Delta\Theta_h$:	Hotspot overtemperature
Θ_h :	Hotspot temperature	$\Delta\Theta_w$:	Copper Jump (Winding-Oil)

Fig. 1: Temperaturverteilung im Transformator
Temperature distribution in the transformer

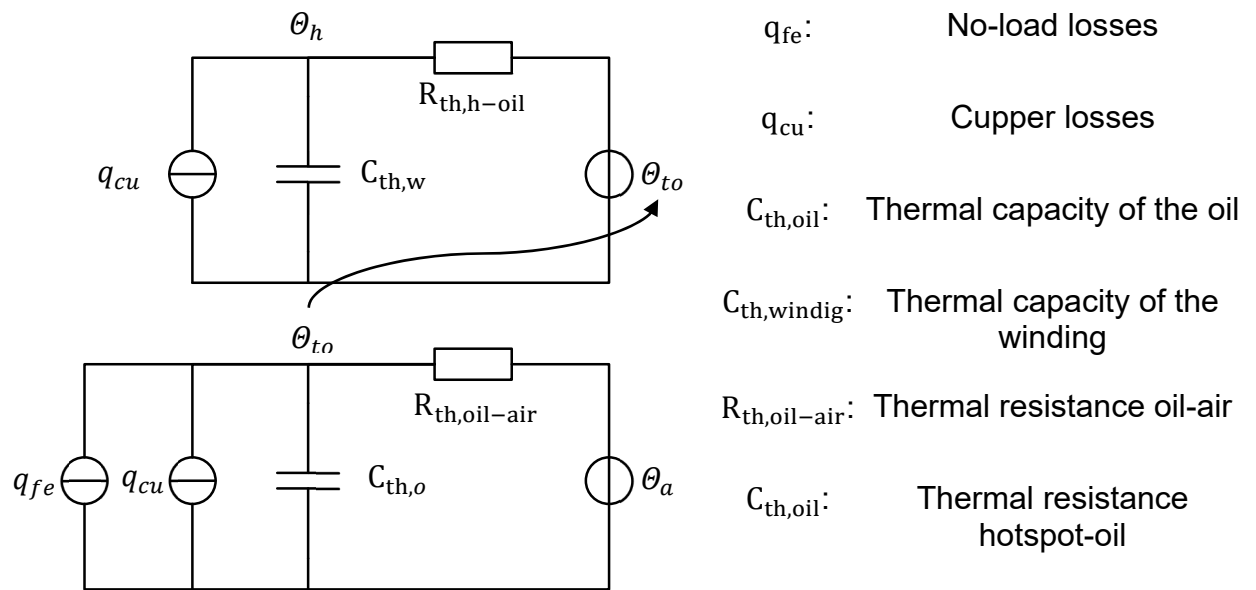


Fig. 2: Thermisches Ersatzschaltbild des thermischen Verhaltens im Transformator
Thermal equivalent circuit of the thermal behavior in the transformer

PD measurement of hairpin motors for electric vehicle

M. Sc. Chuxuan He

With the wider use of the electrical motor with hairpin wound stator, its reliability becomes a focus aspect to ensure the requirements regarding lifetime, which heavily depends upon the electric insulation health and conductivity of the winding. Insulation stresses can originate from the electrical stress, such as increasing battery voltages and fast transients from the inverter drive system, as well as from the high environmental stress: the insulation state of the hairpin motor at different working conditions is important for the reliability of the electrical car. Partial discharge (PD) can be used as an index of the health of an insulation system, so is to the reliable operation of the system. In particular, for the motor used in the vehicle, it is necessary to consider the harmonic of the inverter. Therefore, it is worth to analyze the PD characteristic under impulse condition. Fig. 1 shows the platform used for the PD measurement under impulse measurement, which can regulate the rise time, fall time, frequency, and the amplitude of the output, and the chamber is used to simulate different work conditions.

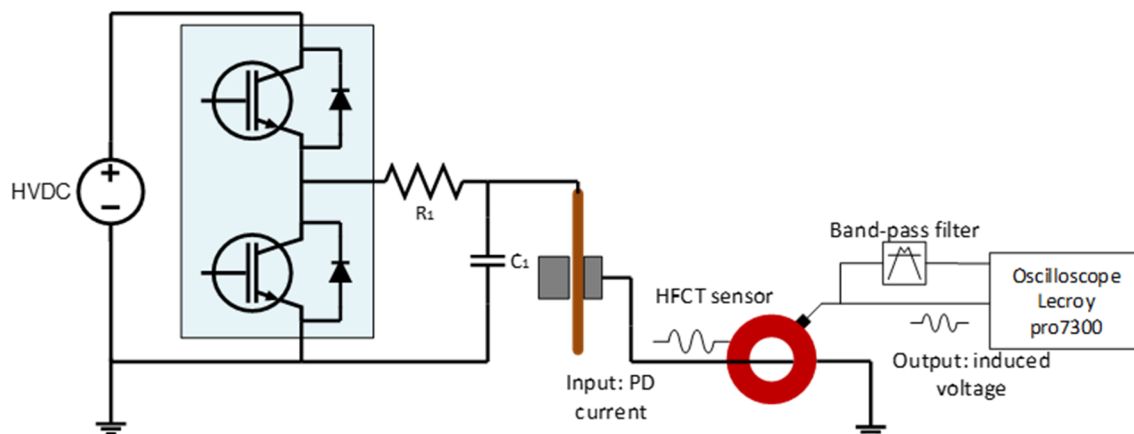


Fig. 1: Test platform for the PD measurement under impulse condition.

However, under impulse conditions, the PD signal overlaps with the impulse signal, as shown in Fig. 2. The widely-used PD measurement method with the coupling capacitor is not applicable to the impulse condition due to the frequency range it can measure. The high-frequency measurement method should be a new attempt since the background noise is under 300 MHz. Hence, the broadband methods shown in IEC 60270, such as ultra-high frequency (UHF) sensors and high-frequency current transformer (HFCT), allow the measurement of PD signal under impulse conditions.

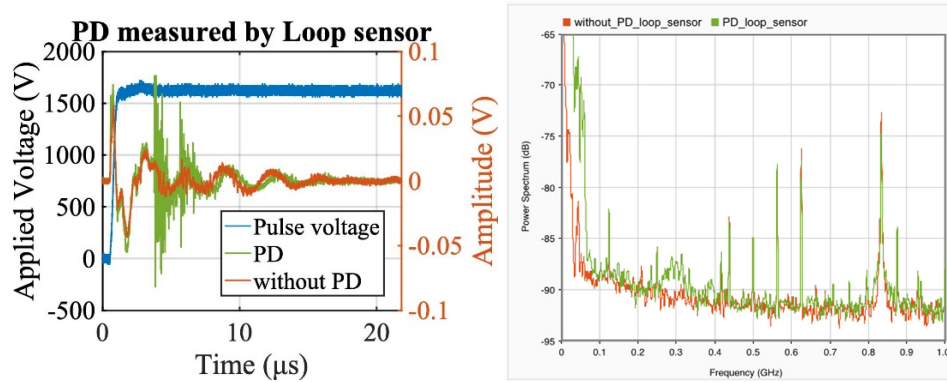


Fig. 2: Time-domain signal and FFT analysis of background noise and PD signal

With the platform and the proposed PD measurement method, the insulation state of the hairpin winding can be investigated based on the PD measurement data. The relationship between the PD measurement data and the lifetime of the hairpin winding is still undergoing.

■ Lokalisierung von Teilentladungen in elektrischen Antriebsmaschinen

M. Sc. Yang Hu

Zur Sicherstellung der Lebensdauer von elektrischen Antrieben ist die Altersbeständigkeit der elektrischen Isolation innerhalb des Motors ein essenzieller Parameter. Vorschädigungen, wie Produktionsfehler oder Materialdefekte, müssen daher zuverlässig erkannt und identifiziert werden können - beispielsweise im Rahmen einer End-of-Line Prüfung. Zur Erfassung solcher Fehlstellen im Motorinneren eignet sich die aus anderen Bereichen bereits etablierte Teilentladungsmessung (TE-Messung). Lokale Defekte können damit detektiert und idealerweise auch genauer lokalisiert werden. Verschiedene physikalische Messverfahren stehen hierzu zur Verfügung (siehe Fig. 1).

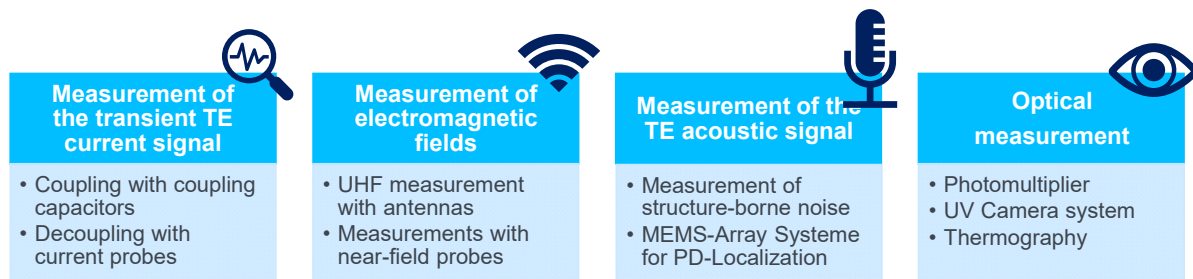


Fig. 1: Betrachtete Messverfahren für TE-Ortung
Measurement methods considered for PD location

Im Rahmen dieser Studie soll ermittelt werden, welche dieser Methoden sich möglichst gut zur Motoranalyse eignet. Wesentliche Bewertungskriterien sind hierbei die Sensitivität der Methoden für verschiedene Fehler- und Defektypen sowie die damit erreichbare Ortungsgenauigkeit der Fehlstellen. Zusätzliche Kriterien sind die Anwendbarkeit der Methoden bei gepulstem Betrieb des Motors an einem Inverter und damit die Störempfindlichkeit – auch gegenüber externen Störquellen in Industrieumgebungen.

Ergänzend zu diesen grundlegenden Betrachtungen wird eine praktische Bewertung bereits verfügbarer kommerzieller Isolationsprüfgeräte mit integrierter TE-Messung durchgeführt. Hierzu wird ein Referenzprüfling an verschiedenen Geräten vermessen, so dass im Rahmen eines anonymisierten Round-Robin-Tests eine direkte Vergleichbarkeit hergestellt werden kann. Damit wird zum einen eine Marktanalyse ermöglicht. Andererseits ist auch eine Bewertung der Reproduzierbarkeit von TE-Messungen möglich, welche insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Standardisierung der TE-Messtechnik für Motoranalysen relevant ist.

■ **Localization of partial discharges in electric machines**

M. Sc. Yang Hu

The service lifetime of electric drives is a critical factor in terms of quality assurance. Ensuring the stability of the electrical insulation within the electric motor is an essential parameter. Therefore, a reliable detection and classification of preliminary damages at an early stage is crucial - for example as part of an end-of-line test. Damages can be caused by production errors or material defects. Partial discharge (PD) measurement, already established in other domains like the energy sector, is suitable for detecting such defects inside the motor. They can be detected and, ideally, localized precisely. Various physical measurement methods are available for this purpose.

The aim of this study is to determine which of these methods is most suitable for motor analysis. The main evaluation criteria are the sensitivity of the methods for different types of faults and defects and the achievable localization accuracy of these faults. Additional criteria are the applicability of the methods during pulsed operation of the motor on an inverter and thus their susceptibility to interference - also to external sources of interference in industrial environments.

In addition to these basic considerations, a practical evaluation of already available commercial insulation testers with integrated PD measurement is carried out. For this purpose, a reference test sample is measured on different devices so that direct comparability can be established within the scope of an anonymized round-robin test. On the one hand, this enables a market analysis. On the other hand, an evaluation of the reproducibility of PD measurements is also possible, which is particularly relevant regarding a possible standardization of the PD measurement technique for motor analyses.

■ Investigation of Harmonics and Resonant Overvoltages in Wind Turbine Transformers

M. Sc. Felipe Luis Probst

The demand for sustainable energy has increased significantly in recent years. The goal of the German Federal Government is to achieve a share of at least 80% of electricity consumption from renewable energies by 2030. Especially for offshore wind energy, the target is at least 30 GW by 2030, 40 GW by 2035, and 70 GW by 2045. For onshore wind energy, the target is about 115 GW by 2030. Therefore, 1500 to 2000 wind turbines should be built annually to meet this target.

Each wind turbine has, among other devices, a step-up transformer, which can be located in the nacelle, in the basement, or outside the wind turbine. Like other transformers, the wind turbine transformer (WTT) must withstand electromagnetic transients, such as those caused by lightning or switching. In addition, the WTT is usually exposed to harmonics and other special conditions due to the prevalence of variable speed generators connected to power electronic converters in modern wind turbines. Fig. 1 presents a schematic diagram of a Type-4 wind turbine, showing the direct connection between the transformer and the frequency converter.

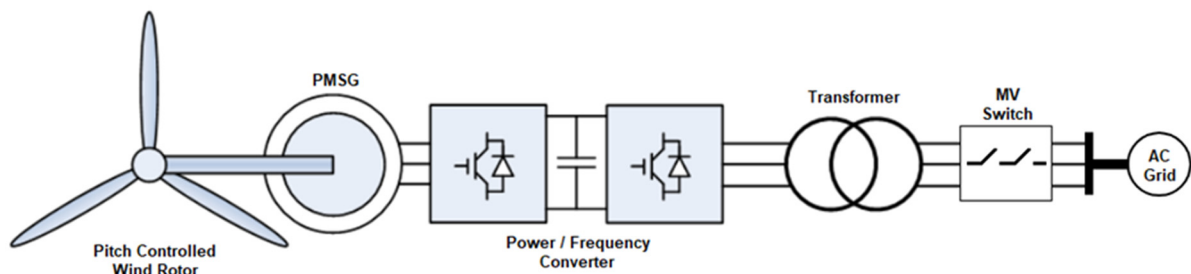


Fig. 1: Schematic diagram of a Type-4 wind turbine. (adapted from [https://www.researchgate.net/publication/255246367 Integrating Renewable Energy into the Transmission and Distribution System of the U S Virgin Islands](https://www.researchgate.net/publication/255246367_Integrating_Renewable_Energy_into_the_Transmission_and_Distribution_System_of_the_U_S_Virgin_Islands))

Many studies have evaluated the harmonic emission of individual wind turbines. Some have concluded that it is relatively low, whereas others point to relatively high emission at higher harmonic orders. Even if the harmonic levels are not high, they can coincide with the internal resonance frequencies of the WTT and consequently lead to failure. Moreover, a significant increase in WTT failures has been reported recently.

Therefore, the main objective of this research is to investigate the influence of the harmonics generated by the wind turbine on the WTT. For this purpose, a power-hardware-in-the-loop setup will be used, where a wind turbine model will be developed in a real-time simulator, and its output voltage will be applied to a real WTT to evaluate the interaction between both devices. Furthermore, a WTT model will be developed in an electromagnetic transient program to further investigate harmonics and internal resonances.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

- **Forschungsprojekt „flexQgrid“:
Praxisorientierte Umsetzung des quotenbasierten
Netzampelkonzeptes zur Flexibilitätsnutzung
im und aus dem Verteilnetz**

Laufzeit: November 2019 – März 2023

Im Forschungsprojekt „flexQgrid“ wird in einem interdisziplinären Konsortium, bestehend aus erfahrenen Partnern von Netzbetrieb, Industrie und Forschung sowie eines Start-Ups an einem wesentlichen Beitrag sowohl zur Realisierung der Flexibilitätsnutzung im Verteilnetz als auch zur Flexibilitätsbereitstellung für vorgelagerte Spannungsebenen geforscht. Die Förderung erfolgt im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, „Innovationen für die Energiewende“. Neben der Weiterentwicklung des quotenbasierten Netzampelkonzeptes aus dem Vorgängerprojekt „grid-control“ steht auch dessen operative Einbindung in die Netzführung und Leitsystemumgebung sowie eine Erprobung im Rahmen eines Feldtests im Fokus.



In den geplanten Arbeitspaketen des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik steht die Wirk- und Blindleistungsbereitstellung an überlagerte Spannungsebenen im Mittelpunkt. Zunächst wird eine Methodik zur stationären Aggregation von Wirk- und Blindleistungsflexibilitäten einzelner Anlagen eines Netzes, unter Berücksichtigung der Netzrestriktionen, entwickelt. Diese Methodik kann in einem Bottom-Up Ansatz genutzt werden, um das Flexibilitätspotential für ein Netz unter Berücksichtigung der unterlagerten Netze zusammenzufassen. In einem weiteren Schritt wird ein Abrufkonzept für Flexibilitäten in einem Top-Down-Ansatz entwickelt. Hierbei wird der Flexibilitätsabruf innerhalb der zulässigen Flexibilitätskennfelder der einzelnen Anlagen und unter Einhaltung der Netzrestriktionen realisiert. Abschließend werden die Aggregationsmethode und das Abrufkonzept von Flexibilitäten in einem Feldtest umgesetzt und verifiziert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektpartner bei der Auftaktveranstaltung

- Research Project „flexQgrid“:
Practical Implementation of a Quota-based Network
Traffic Light Concept for Flexible Use to and from
Distribution Grids**

Period: November 2019 – March 2023

The research project “flexQgrid” is an interdisciplinary consortium comprised of experienced grid operators, industrial partners and research facilities, including a start-up. The goal is to research an essential contribution, both to the realization of flexibility utilization at the distribution grid level, as well as the upstream provision of flexibility for underlying voltage levels. The project is funded within the framework of the 7th Energy Research Program of the Federal Government, "Innovations for the Energy Transition". In addition to the enhancement of the quota-based traffic light concept from the previous project “grid-control”, the focus lies also on its operational integration into the grid management and control system environment.



In the planned work packages of the Institute for Energy Transmission and High Voltage Technology, the focus is to provide active and reactive power to overlaying voltage levels. First, a methodology for the stationary aggregation of active and reactive power flexibilities of individual grid devices will be developed considering network restrictions. This methodology can be used in a bottom-up approach to summarize the flexibility potential for a grid, taking into account the underlying grids. In a further step, a request concept for flexibilities in a top-down approach will be developed. The flexibility request is implemented within permissible flexibility ranges of individual plants and in compliance with network restrictions. Finally, the aggregation method and the flexibility request concept are implemented and verified in a field test.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag



Storage system at field test location

- **Leuchtturmprojekt „MobiLab“:
Mobility Living Lab**

Laufzeit: Juli 2020 – November 2024

Mit dem Leuchtturmprojekt „MobiLab“ strebt die Universität Stuttgart bis 2035 eine klimaneutrale Mobilität auf dem Campus an und will Vorreiter für eine emissionsarme Mobilität in Praxis und Forschung sein. Der Campus Vaihingen soll autofrei werden. Die Anfahrt könnte künftig über ein zentrales Parkhaus am Rande des Campus erfolgen. Dieses wird zusammen mit der zentralen S-Bahn-Station über selbstfahrende Shuttles an den Campus angebunden. Ein Verleihsystem mit autonomen E-Scootern und RegioRad-Stationen unterstützen die Shuttles und verbessern die Mobilität. Durch die Maßnahmen im Rahmen von „MobiLab“ wird der Campus Vaihingen zu einem umfassenden Reallabor mit den Forschungsfeldern Forschungsfahrzeug, Forschungsstraße und Forschungsparkhaus.

Dabei ist das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik an dem Teilprojekt „Forschungsstraße: Dynamisches Laden und sichere Energieversorgung“ beteiligt.

Durch induktives Laden während der Fahrt kann es am Netzanschlusspunkt der Ladestraße zu kurzfristigen Leistungsspitzen kommen. Es treten Netzurückwirkungen auf, die begrenzt werden müssen. Dazu sind ein elektrischer Pufferspeicher sowie ein aktives Netzfilter vorgesehen. Die auftretenden dynamischen Vorgänge werden mit einem Power-Quality Monitoringsystem in einem erweiterten Frequenzbereich untersucht. Anschließend soll die korrekte Funktion des Netzfilters im Feldtest verifiziert werden.



Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

Das Vorhaben wird aus Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

- **Lighthouse Project „MobiLab“:
Mobility Living Lab**

Period: July 2020 – November 2024

With the lighthouse project “MobiLab” the University of Stuttgart strives for climate neutral mobility at the Campus Vaihingen by 2035 and wants to be a pioneer in low-emissions mobility in practice and in research. The university is planning to make Campus Vaihingen car free. Access to the campus would be provided via a central parking lot at the edge of the campus. Autonomous shuttles would connect this and the suburban railway station to the campus. A rental system for autonomous scooters and RegioRad stations supports the shuttle service and improve mobility. These Mobilab measures will transform Campus Vaihingen into a comprehensive living lab, the perfect place to investigate research vehicles, research roads and research parking lots.

Within the project, the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology is involved in the subproject “Research Road: Dynamic charging and secure power supply”.

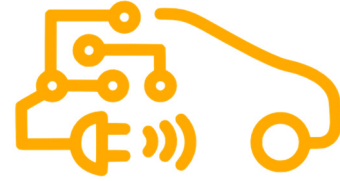
By inductive charging while the vehicle is moving, short-term peak powers can occur at the grid connection point of the research road. System perturbations appear and need to be limited. For this purpose, an electric buffer storage as well as an active mains filter are provided. The occurring dynamic operations will be examined by a power quality monitoring system in an expanded frequency range. Subsequently the correct function of the mains filter will be verified in a field test.



Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

Support with funds of the State of Baden-Württemberg is gratefully acknowledged.

- **Forschungsprojekt „BANULA“**
Laufzeit: Oktober 2021 – September 2025



Die Elektromobilität spielt beim Erreichen der Klimaschutzziele eine wichtige Rolle. Um die dafür angestrebten hohen Zulassungszahlen erreichen zu können, muss Ladeinfrastruktur in Umfang und Verfügbarkeit ausreichend vorhanden sein. Aktuell existiert in Deutschland eine Vielzahl unterschiedlicher Anbieter und Tarifmodelle. Dadurch ist es für die Nutzer der Ladesäulen oft nicht ersichtlich, inwiefern eine Roaming-Verbindung besteht oder zu welchem Tarif aktuell abgerechnet wird. Außerdem können sie an der Ladesäule ihren Stromlieferanten nicht frei wählen. Im Forschungsprojekt „BANULA - Barrierefreie und nutzerfreundliche Lademöglichkeiten schaffen“ soll daher untersucht werden, inwiefern durch die Blockchain-Technologie ein einfaches, transparentes, kundenfreundliches und barrierefreies Laden bei gleichzeitiger Gewährleistung der System- und Versorgungssicherheit ermöglicht werden kann. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Im Rahmen von BANULA kooperiert das IEH mit dem Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) der Universität Stuttgart, dem Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), der Badenova AG & Co. KG, der Becker Büttner Held PartGmbH, Fujitsu, der Parkraumgesellschaft Baden-Württemberg mbH (PBW), der Schwarz Immobilien Service GmbH & Co. KG, der smartlab Innovationsgesellschaft mbH sowie der TransnetBW GmbH. Im Projekt ist eine Ausgliederung der Ladesäulen in ein sogenanntes „virtuelles Netzgebiet“ vorgesehen. Dadurch kann die Abrechnung und Bilanzierung von Strommengen und Netzentgelten zielgruppengerecht der jeweiligen Marktrolle zugeordnet werden. Dies ermöglicht eine Kopplung der kaufmännischen Abwicklung und Bilanzierung mit der Netzphysik. Das IEH ist im Projekt für die Untersuchung der Auswirkungen der Ladevorgänge auf das Übertragungsnetz sowie die Identifikation und Analyse der entstehenden Flexibilitätspotentiale verantwortlich.

Das Vorhaben wird im Rahmen der Förderinitiative des BMWK zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität (Elektro-Mobil) beim DLR Projektträger gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „BANULA“**
Period: October 2021 – September 2025



Electric mobility plays an important role in achieving climate protection targets in the transport sector. In order to be able to achieve the required high registration numbers of electric vehicles, sufficient charging infrastructure in terms of scope and availability has to be provided. There are currently a large number of different charging providers and tariff models in Germany. As a result, it is often not clear to users of charging stations to what extent a roaming connection exists or at which tariff they are currently being charged. In addition, users are not free to choose their electricity supplier at the charging station. The research project "BANULA - Creating barrier-free and user-friendly charging options" will therefore investigate the extent to which blockchain technology can enable simple, transparent, customer-friendly and barrier-free charging while ensuring system and supply security. The project is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK).

As part of BANULA, IEH is cooperating with the Institute of Human Factors and Technology Management (IAT) at the University of Stuttgart, the Fraunhofer Institute for Industrial Engineering (IAO), Badenova AG & Co. KG, Becker Büttner Held PartGmbH, Fujitsu, Parkraumgesellschaft Baden-Württemberg mbH (PBW), Schwarz Immobilien Service GmbH & Co. KG, smartlab Innovationsgesellschaft mbH and TransnetBW GmbH. In the project, the charging stations are assigned to so-called "virtual grid areas". In this way, the billing and balancing of electricity quantities and grid fees can be assigned to the respective market role. This enables the coupling of commercial processing and balancing with the grid physics. In the project, IEH is responsible for investigating the effects of the charging processes on the transmission grid as well as for identifying and analyzing the resulting flexibility potentials.

The project is funded within the framework of the BMWK funding initiative for the promotion of research and development in the field of electric mobility (Elektro-Mobil) at the DLR project management organization.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



on the basis of a decision
by the German Bundestag

- **Forschungsprojekt „REALIST“:
Reallabor zur beschleunigten Elektrifizierung des
urbanen Logistikverkehrs in Stuttgart**

Laufzeit: Juli 2022 – August 2025

Die Elektrifizierung des urbanen Lieferverkehrs ist kombiniert mit der Nutzung Erneuerbarer Energien für die Senkung von CO₂-Emissionen und das Erreichen der Klimaschutzziele unabdingbar. Darauf müssen Stromnetz, Stadtlogistik und Kommunen durch Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen frühzeitig vorbereitet werden. Dies fördert das interdisziplinäre Projekt REALIST (Reallabor zur beschleunigten Elektrifizierung des urbanen Logistikverkehrs in Stuttgart).

Im Zentrum steht ein Reallabor, in dem der Praxiseinsatz von E-Lkw erprobt wird. Die teilnehmenden Speditionen testen dabei im Rahmen des Feldversuches eine Umstellung ihrer Prozesse mit dem Einsatz des E-Lkw. Eine Machbarkeitsanalyse begleitet den Praxiseinsatz mit dem Ziel, ein klima-innovatives Stromversorgungs- und Logistikkonzept für eine elektrische Stadtbelieferung zu schaffen. Durch die Analyse und virtuelle Elektrifizierung bestehender Stückgutverkehrs-Touren in Stuttgart können Auswirkungen auf logistische Prozesse und das regionale Stromnetz abgeleitet werden. Dies kann als Entscheidungsgrundlage für diverse Akteure, wie die Landeshauptstadt (LHS) Stuttgart, dienen. Eine „Go-to-Market“-Strategie stellt sicher, dass die Ergebnisse nachhaltig zur Elektrifizierung des Lieferverkehrs beitragen.

Das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) und das Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart übernehmen die Leitung des Projektes und begleiten das Projekt wissenschaftlich. Zu dem breiten Projektkonsortium gehören außerdem Speditionen, Fahrzeughersteller, Netzbetreiber, Verbände und die LHS Stuttgart. Vollpartner im Projekt sind die Emons Spedition GmbH, Herbinger Transporte und LSU Schäberle Logistik & Speditions-Union GmbH u. Co. KG. Als assoziierte Partner beteiligen sich darüber hinaus die BPW Bergische Achsen KG, die Daimler Truck AG, das Intralogistik-Netzwerk in Baden-Württemberg e.V., die Landeshauptstadt Stuttgart, die Netze BW GmbH, die Schwarz Logistik GmbH, die Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., die Stuttgart Netze GmbH und der Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg e.V.

Das Vorhaben wird im Rahmen des Stuttgarter Klima-Innovationsfonds gefördert. Mit dem Klima-Innovationsfonds fördert die Stadt Stuttgart seit 2021 innovative Ideen für Klimaschutz und Klimafolgenanpassung.



- **Research Project „REALIST“:
Real Lab for Accelerated Electrification of Urban
Logistics Transport in Stuttgart**

Period: July 2022 – August 2025

The electrification of urban delivery traffic, combined with the use of renewable energies, is crucial to reduce CO₂ emissions and achieve climate protection targets. This requires early preparation of the power grid, urban logistics and municipalities by creating suitable framework conditions. The interdisciplinary project REALIST (Real Lab for Accelerated Electrification of Urban Logistics Transport in Stuttgart) promotes this.

The focus is on a real lab in which the practical use of e-trucks is tested. The participating freight forwarders are testing a conversion of their processes with the use of e-trucks as part of the field test. A feasibility analysis accompanies the practical application with the aim of creating a climate-innovative power supply and logistics concept for electric city delivery. This can serve as a basis for decision-making for various stakeholders, such as the state capital Stuttgart. A "go-to-market" strategy ensures that the results contribute lastingly to the electrification of delivery traffic.

The Institute for Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) and the Institute for Mechanical Handling and Logistics (IFT) of the University of Stuttgart are leading the project and providing scientific support. The wide project consortium also includes freight forwarders, vehicle manufacturers, network operators, associations and the state capital Stuttgart. Active partners in the project are Emons Spedition GmbH, Herbinger Transporte and LSU Schäberle Logistik & Speditionen-Union GmbH u. Co. KG, BPW Bergische Achsen KG, Daimler Truck AG, Intralogistik-Netzwerk in Baden-Württemberg e.V., the state capital Stuttgart, Netze BW GmbH, Schwarz Logistik GmbH, Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., Stuttgart Netze GmbH and Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg e.V. are also participating as associated partners.

The project is being funded as part of the Stuttgart Climate Innovation Fund. With the Climate Innovation Fund, the city of Stuttgart has been promoting innovative ideas for climate protection and climate impact adaptation since 2021.



- **Forschungsprojekt „TruckConnect“:
Erstellung eines Anforderungskatalogs zur
Implementierung einer Europäischen Datenplattform
für den batterieelektrischen Schwerlastverkehr**

Laufzeit: September 2022 – August 2023

Die fortschreitende Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs stellt die beteiligten Akteure vor komplexe Herausforderungen. Damit Logistiker, Energieversorger, Ladesäulenbetreiber und weitere Beteiligte im Verkehrssystem den Wandel reibungslos bewerkstelligen können, beteiligt sich das IEH im Projekt „TruckConnect“. Darin werden die vielfältigen Anforderungen für eine zentrale Datenplattform ermittelt. Gefördert wird das Projekt im Rahmen der Innovationsinitiative mFUND durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr.

Wie gelingt es, elektrifizierte Fahrzeuge möglichst reibungslos in die bereits bestehenden Logistiksysteme und -prozesse zu integrieren? Diese Frage steht im Mittelpunkt von „TruckConnect“, an dem neben dem IEH das Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) sowie das Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart beteiligt sind. Ziel des Projekts ist die Erstellung eines Anforderungskatalogs zur Implementierung einer Europäischen Datenplattform für den batterieelektrischen Schwerlastverkehr. Denn die erfolgreiche Transformation kann nur datenbasiert erfolgen. Die intelligente Plattform soll den Austausch von Daten zwischen Transport- und Energiesystemen ermöglichen und die Energie- und Transportbedarfe so synchronisieren, dass batterieelektrische Lkw zukünftig genauso zuverlässig eingesetzt werden können wie Diesel-Lkw bei gleichbleibender Versorgungssicherheit.

Das IEH bringt in „TruckConnect“ seine Expertise im Bereich der elektrischen Energieversorgung mit ein. Dabei geht es vor allem darum, wie die Netzintegration von Ladeinfrastruktur für E-Lkw im Fernverkehr in Zukunft erfolgreich gelingen kann, wie die Fahrzeuge optimal aus Erneuerbaren Quellen versorgt werden und ob die Nutzung der Lkw-Batterien zukünftig Flexibilität für den Netzbetrieb liefern kann. Um dabei die Herausforderungen und Ansichten aller beteiligten Akteure zu berücksichtigen, sind im Projekt umfangreiche Interviews mit Experten aus Logistik- und Energiebranche geplant. „TruckConnect“ läuft von September 2022 bis August 2023 und schafft eine wichtige Grundlage für den bevorstehenden Transformationsprozess hin zu einem klimafreundlichen Fernverkehr.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „TruckConnect“:
Development of a catalog of requirements for the
implementation of a European data platform for
battery-electric heavy-duty traffic**

Period: September 2022 – August 2023

The ongoing electrification of truck traffic poses complex challenges for the players involved. IEH is participating in the TruckConnect project to ensure that logistics companies, energy suppliers, charging station operators and other participants in the transport system can manage the change smoothly. The project is identifying the diverse requirements for a central data platform. TruckConnect is funded by the German Federal Ministry of Digital Affairs and Transport as part of the mFUND innovation initiative.

How can electrified vehicles be integrated as smoothly as possible into existing logistics systems and processes? This question is the focus of "TruckConnect", in which the Institute of Human Factors and Technology Management (IAT) and the Institute of Mechanical Handling and Logistics (IFT) at the University of Stuttgart are involved alongside IEH. The aim of the project is to create a catalog of requirements for the implementation of a European data platform for battery-electric heavy-duty transport. Because one thing is certain: the successful transformation can only be data-based. The intelligent platform should enable the exchange of data between transport and energy systems and synchronize energy and transport requirements in such a way that battery-electric trucks can be used just as reliably as diesel trucks in the future - while maintaining the same level of supply security.

IEH is contributing its expertise in the field of electrical energy supply to "TruckConnect". The main focus is on how the grid integration of charging infrastructure for e-trucks in long-distance transport can succeed in the future, how the vehicles can be optimally supplied from renewable sources, and whether the use of truck batteries can provide flexibilities for grid operation in the future. In order to take into account the challenges and views of all stakeholders involved, the project plans to conduct extensive interviews with experts from the logistics and energy sectors. "TruckConnect" runs from September 2022 to August 2023 and lays an important foundation for the upcoming transformation process to climate-friendly long-distance transport.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Forschungsprojekt „Park4Flex“:
Untersuchung der Flexibilitätspotenziale aus
Parkhäusern für deren Einbindung in
Netzstabilisierungsprozesse und eine gesteigerte
Integration erneuerbarer Energien**
Laufzeit: November 2022 – Oktober 2025

Für die Erreichung der Klimaziele sehen die aktualisierten Pläne der Bundesregierung einen zukünftig wesentlich stärkeren Ausbau von erneuerbaren Energieanlagen vor. Hierdurch verstärkt sich die Volatilität des Gesamtsystems und durch wachsende intersektorale Abhängigkeiten entstehen Herausforderungen bezüglich eines stabilen Netzbetriebes und einer sicheren Versorgung. Um diesen zu begegnen, bedarf es eines gezielten Netzausbaus und einer deutlichen Flexibilisierung des Versorgungssystems.

Park4Flex umfasst die Definition, Implementierung und ausführliche Analyse eines neuen Konzeptes für die Bereitstellung von Flexibilität aus konzentrierten Parkräumen unter Berücksichtigung des bidirektionalen Ladens. Dabei werden die Auswirkungen auf die Stabilisierung des Versorgungssystems durch die vorgeschlagene Lösung analysiert und das zusätzliche Ausbaupotential von erneuerbaren Energien durch die Bereitstellung von Flexibilitäten ermittelt. Zur Demonstration der Machbarkeit des Park4Flex-Konzeptes wird die Ladeinfrastruktur in einem Versuchsparkraum mit umfassenden neuen Funktionalitäten und modernen Kommunikationsstandards ausgerüstet. Durch die entwickelten Vorhersagemodelle für Parkplatzverfügbarkeiten und Ladeverhalten werden die Unsicherheiten in den aggregierten Flexibilitäten reduziert, was deren Eignung zur Bereitstellung netzdienlicher Systemdienstleistungen erhöht. Die entwickelten Geschäftsmodelle zielen auf den wirtschaftlicheren Betrieb von Parkräumen ab und helfen die Unternehmen zu diversifizieren, indem eine Sektorenkopplung des Energie- und Verkehrssektors geschaffen wird. Die Klärung der regulatorischen und datenschutzrechtlichen Rahmenbedingungen unterstützen weitere Entwicklungen im Bereich der Flexibilitätsvermarktung von Elektromobilität.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „Park4Flex“:
Investigation of flexibility potentials from parking
garages for their integration into grid stabilization
processes and increased integration of renewable
energies**

Period: November 2022 – Oktober 2025

In order to achieve the climate targets, the updated plans of the German government will require a significantly greater expansion of renewable energy plants in the future. This will increase the volatility of the overall system, and growing intersectoral dependencies will create challenges with regard to stable grid operation and secure supply. To meet these challenges, a targeted grid expansion and a significant flexibilization of the power system are required.

Park4Flex encompasses the definition, implementation and detailed analysis of a new concept for the provision of flexibility from concentrated parking spaces, taking into account bidirectional charging. The impact on the stabilization of the power system by the proposed solution will be analyzed and the additional expansion potential of renewable energy by providing flexibilities will be determined. To demonstrate the feasibility of the Park4Flex concept, the charging infrastructure will be equipped with comprehensive new functionalities and modern communication standards in a test parking area. The developed predictive models for parking availability and charging behavior reduce the uncertainties in the aggregated flexibilities, which increases their suitability for providing ancillary services. The business models developed aim to operate parking facilities more economically and help diversify businesses by creating sector coupling of the energy and transportation sectors. The clarification of the regulatory and data protection framework supports further developments in the field of flexibility marketing of electromobility.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

- **Forschungsprojekt „Bid-E-V“:
Untersuchung der Netzurückwirkungen von
bidirektionalen elektrischen Nutzfahrzeugflotten,
sowie der netzdienlichen Nutzung ihres
Flexibilitätspotentials**

Laufzeit: Februar 2023 – Januar 2026

Die Elektrifizierung des Nutzfahrzeugsektors ist ein entscheidender Baustein für eine nachhaltige Treibhausgasneutralität. Nachhaltiger Transport erfordert jedoch nicht nur die Elektrifizierung an sich, sondern auch die Nutzung von erneuerbarer Energie für das Laden der Fahrzeuge. Die intelligente Integration von Elektrofahrzeugen ins Stromnetz, insbesondere durch bidirektionales Laden und Einspeicherung elektrischer Energie in die Fahrzeugbatterien, wird als wesentlich Anteil für die Maximierung von Lastmanagementpotenzialen angesehen. Neben einem Innovationsbedarf für Automobilhersteller ergeben sich jedoch auch für Netzbetreiber neue Herausforderungen durch die Anbindung von gewerblichen Ladeparks und die damit einhergehenden hohen Ladelasten in das Stromnetz.

Durch einen Feldversuch mit uni- und bidirektionalen elektrischen Vans an einem Logistikstandort soll im Projekt „Bid-E-V“ die Machbarkeit von uni- sowie bidirektionalem Laden im gewerblichen Kontext demonstriert werden. In einem fachlich breit aufgestellten Konsortium sollen die für den Feldtest notwendigen Komponenten (Fahrzeuge, Ladesysteme, Lademanagementsystem) entwickelt und eine netz- und marktseitige Integration der Fahrzeuge ermöglicht werden.

Das IEH untersucht in diesem Projekt die Auswirkungen bidirektionaler Ladevorgänge auf die Netzstabilität und die Nutzung von Flexibilitätspotenzialen zur Netzstützung. Ziel ist die Entwicklung einer Methode zur passiven Bestimmung der Netzimpedanz an Ladepunkten und die Erweiterung eines Konzepts für die optimierte Flexibilitätskoordination im Verteilnetz. Realitätsnahe Tests am Feldstandort sollen die Skalierbarkeit von bidirektionalen Ladepunkten und die Stabilität des Netzes und der Ladevorgänge zeigen.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „Bid-E-V“:
Investigation of the influence of bidirectional electric
commercial vehicle fleets on power quality and the
grid-supporting use of their flexibility potential**

Period: February 2023 – January 2026

Electrification of the commercial vehicle sector is a crucial element in achieving sustainable greenhouse gas neutrality. However, sustainable transportation requires not only electrification, but also the use of renewable energy for charging vehicles. The intelligent integration of electric vehicles into the power grid, in particular through bidirectional charging and storage of electrical energy in the vehicle batteries, is seen as a key factor in maximizing load management potential. However, in addition to the need for innovation for car manufacturers, new challenges are also arising for grid operators due to the connection of commercial charging parks and the associated high charging loads in the electricity grid.

The "Bid-E-V" project aims to demonstrate the feasibility of unidirectional and bidirectional charging in a commercial context through a field test with unidirectional and bidirectional electric vans at a logistics location. The components required for the field test (vehicles, charging systems, charging management system) are to be developed in a broad-based consortium and the integration of the vehicles into the grid and market is to be made possible.

In this project, IEH is investigating the effects of bidirectional charging processes on grid stability and the use of flexibility potential to support the grid. The aim is to develop a method for passively determining the grid impedance at charging points and to expand a concept for optimized flexibility coordination in the distribution grid. Realistic tests at the field site are intended to demonstrate the scalability of bidirectional charging points and the stability of the grid and charging processes.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

- **Forschungsprojekt „DiTEnS“:
Discursive Transformation of Energy Systems**

Laufzeit: April 2023 – März 2029

Während die Energiewende im Stromsektor bereits vorangeschritten ist, erweist sich die Transformation des Wärmesektors hin zu einem klimaneutralen System als ein schwieriger Prozess. Um einen erfolgreichen Transformationsprozess zu ermöglichen, muss eine Vielzahl von Stakeholdern zu einer gemeinsam tragfähigen Lösung finden.

Im Projekt DiTEnS wird die Wärmewende in ausgewählten Quartieren im Rahmen von diskursiven Stakeholderdialogen begleitet und vorangetrieben. Hierbei gilt es den Blickwinkel zu weiten und das lokale Energiesystem ganzheitlich im Sinne der Sektorenkopplung zu betrachten. Zur Unterstützung des Dialogprozesses werden Tools auf Basis von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) entwickelt, durch welche der Transformationsprozess für die Stakeholder erlebbar gemacht wird. Hierzu werden digitale Zwillinge der zu untersuchenden Quartiere erstellt, welche eine digitale Begehung der Quartiere und eine Visualisierung relevanter Komponenten des Energiesystems ermöglichen. Um eine faktenbasierte Diskussion zu ermöglichen, wird das Energiesystem des betrachteten digitalen Zwillings techno-ökonomisch simuliert. Hierdurch soll anhand der Wünsche und Bedenken der Stakeholder eine für das Quartier optimale zukunftsfähige Energieversorgung gefunden werden. Dabei gilt es sowohl technische und ökonomische als auch ökologische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Anhand des Universitätscampus Vaihingen wird ein erster Mock-Up entwickelt, aus welchem wichtige Erkenntnisse für spätere in Kooperation mit Praxispartnern auszuwählende Fallstudien gewonnen werden sollen. Das Projekt vereint die sozialwissenschaftliche mit der techno-ökonomischen Perspektive auf Aspekte der Energiewende und sticht durch Interdisziplinarität sowie innovative Konzepte hervor.

- **Research Project „DiTeNS“:
Discursive Transformation of Energy Systems**

Period: April 2023 – March 2029

While the energy transition in the electricity sector has already made progress, the transformation of the heating sector towards a climate-neutral system is proving to be a difficult process. In order to enable a successful transformation process, a large number of stakeholders must find a jointly viable solution.

In the DiTeNS project, the heating transition in selected districts is accompanied and driven forward as part of discursive stakeholder dialogs. The aim is to broaden the perspective and take a holistic view of the local energy system in terms of sector coupling. To support the dialog process, tools based on virtual reality (VR) and augmented reality (AR) are being developed to bring the transformation process to life for stakeholders. For this purpose, digital twins of the neighbourhoods to be examined are created, which enable a digital tour of the neighbourhoods and a visualization of relevant components of the energy system. In order to enable a fact-based discussion, the energy system of the digital twin under consideration is simulated techno-economically. The aim is to find an optimal sustainable energy supply for the neighborhood based on the wishes and concerns of the stakeholders. Both technical and economic as well as ecological aspects need to be taken into account. Using the Vaihingen university campus as an example, an initial mock-up will be developed from which important findings will be gained for subsequent case studies to be selected in cooperation with practice partners. The project combines the social science and techno-economic perspectives on aspects of the energy transition and stands out due to its interdisciplinarity and innovative concepts.

- **Entwicklung digitaler Zwillinge von Quartieren zur Veranschaulichung der lokalen Auswirkung der Wärmewende auf Verteilnetze**

M. Sc. Johannes Beck

Als integraler Bestandteil der Energiewende stellt die Elektrifizierung des Wärmesektors eine Möglichkeit dar, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Durch die zunehmende Elektrifizierung des Wärmesektors werden die Stromnetze in Zukunft stärker belastet. In Kombination mit dem gleichzeitigen Hochlauf der Elektromobilität und dem Ausbau der Erneuerbaren Energien werden Netzbetreiber vor neue Herausforderungen gestellt. Im Forschungsprojekt DiTEoS werden die Auswirkungen der Energiewende in Quartieren auf die lokalen Ortsnetze untersucht. Hierbei gilt es, eine Reihe verschiedener Aspekte zu untersuchen. Zunächst muss eine geeignete Datengrundlage gefunden werden, welche sowohl die Struktur der elektrischen, thermischen und materiellen Versorgungsnetze als auch zeitreihenbasierte Informationen aller Komponenten des Energiesystems umfasst. Da nicht alle zur Energiesystemmodellierung notwendigen Informationen für unterschiedlichste Quartiere zur Verfügung stehen, müssen Methoden entwickelt werden, diese aus alternativen verfügbaren Daten zu synthetisieren. Für die Energiesimulation wird auf die Expertise einer Vielzahl unterschiedlicher Expert*innen aus dem Bereich der thermischen, ökonomischen sowie elektrischen Energiesystemmodellierung zurückgegriffen. Ziel ist es, ganzheitliche energetische Modelle von Quartieren zu erzeugen, welche in digitale Zwillinge der Quartiere eingebunden werden können. Durch interaktive Simulationen soll die Wärmewende und das technische, ökonomische sowie ökologische Potential verschiedener Versorgungstechnologien fallspezifisch visualisiert werden. Dabei gilt es Methodiken der Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) zu nutzen, um die verschiedenen Stakeholder des betrachteten Quartiers im Rahmen von diskursiven Beteiligungsprozessen in die Planung eines zukunftsfähigen lokalen Energiesystems einzubinden. Mögliche Teilnehmer an den geplanten Stakeholderdialogen sind unter anderem die im Quartier Wohnenden, Eigentümer von Wohneinheiten, Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreiber, lokale Interessensverbände, Politik, Verwaltung und viele mehr. Als erste Case-Study wird der Universitätscampus Vaihingen betrachtet, von welchem ein erster digitaler Zwilling im Sinne eines Mock-Ups erzeugt wird. Hierbei sollen erste methodische Ansätze entwickelt werden, welche auf nachfolgende Case-Studies übertragen werden können. Die Auswahl weiterer Case-Studies erfolgt in Abstimmung mit außeruniversitären Projektpartnern, welche dem Projekt auch durch eine generelle Beiratsfunktion einen großen Mehrwert liefern.

- **Development of digital twins of neighborhoods to illustrate the local impact of the heating transition on distribution grids**

M. Sc. Johannes Beck

As an integral part of the energy transition, the electrification of the heating sector represents an opportunity to reduce greenhouse gas emissions. The increasing electrification of the heating sector will place a greater burden on electricity grids in the future. In combination with the simultaneous ramp-up of electromobility and the expansion of renewable energies, grid operators will face new challenges. The DiTEnS research project is investigating the effects of the energy transition in districts on local grids. A number of different aspects need to be examined. First of all, a suitable data basis must be found that includes the structure of the electrical, thermal and material supply networks as well as time-series-based information on all components of the energy system. Since not all the information required for energy system modelling is available for a wide range of districts, methods must be developed to synthesize this information from alternative available data. The energy simulation draws on the expertise of a large number of different experts from the fields of thermal, economic and electrical energy system modeling. The aim is to generate holistic energy models of districts that can be integrated into digital twins of these districts. Interactive simulations will be used to visualize the heating transition and the technical, economic and ecological potential of various supply technologies on a case-specific basis. The aim is to use virtual reality (VR) and augmented reality (AR) methods to involve the various stakeholders of the district under consideration in the planning of a sustainable local energy system as part of discursive participation processes. Possible participants in the planned stakeholder dialogs include those living in the neighbourhood, owners of residential units, energy suppliers, grid operators, local interest groups, politicians, administrators and many more. The first case study is the Vaihingen university campus, of which an initial digital twin is being created in the form of a mock-up. The aim is to develop initial methodological approaches that can then be transferred to subsequent case studies. Further case studies will be selected in consultation with non-university project partners, who will also provide great added value to the project through a general advisory board function.

■ Optimierung des Betriebs von Hochspannungsverteilnetzen

M. Sc. Paul Burkhardt

Der fortschreitende Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) und der Zubau neuer Verbraucher wie E-Mobilität und Wärmepumpen führen zu einer zunehmenden Belastung der Verteilnetze. Durch die zukünftig weiter steigende Auslastung der Betriebsmittel können z. B. die Netzverluste in der 110-kV-Ebene zunehmen. Derzeit fallen im Hochspannungsverteilnetz in Deutschland ca. 5 TWh/a an Verlustenergie an. Durch eine Reduzierung der Netzverluste können zum einen Kosten vermieden werden. Zum anderen können die durch die Bereitstellung der Verlustenergie verursachten CO₂-Emissionen reduziert werden.

Am IEH wird ein zweistufiger simulationsbasierter Ansatz zur Reduktion von Verlusten entwickelt. Zunächst erfolgt eine simulative Optimierung der Netztopologie. Anschließend wird auf Basis einer linearen Optimierung das Potenzial zur Reduktion durch Anpassung weiterer Stellgrößen untersucht. Hierfür werden Kompensationsanlagen, das Blindleistungspotential von unmittelbar an das 110 kV-Netz angeschlossenen EE-Anlagen sowie die Stufung von Längsregeltransformatoren berücksichtigt. Darüber hinaus können durch den entwickelten Algorithmus auch Querregeltransformatoren abgebildet werden. Allerdings sind diese aktuell in Hochspannungsverteilnetzen in Deutschland nur selten installiert.

Durch den Einsatz von Querregeltransformatoren können insbesondere Netzgebiete entlastet werden, welche stark durch Leistungstransite belastet sind. Dies trifft auf das untersuchte und in Fig. 1 dargestellte Netzgebiet zu. Mittels den Querregeltransformatoren kann den vorherrschenden Wirkleistungstransitflüssen entgegengewirkt werden und somit die Betriebsmittelauslastungen (siehe Fig. 2), als auch die in Fig. 3 abgebildeten stromabhängigen Netzverluste deutlich reduziert werden. Allerdings können sich durch den potentiellen Einsatz der Transformatoren die Auslastungen auf einzelnen Netzzweigen gegenüber dem IST-Zustand erhöhen.

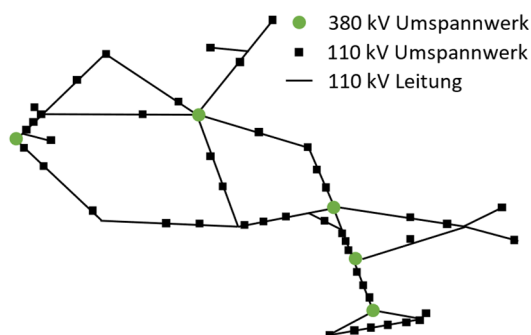


Fig. 1: Topologie des 110 kV-Netzes.
Topology of the HV grid.

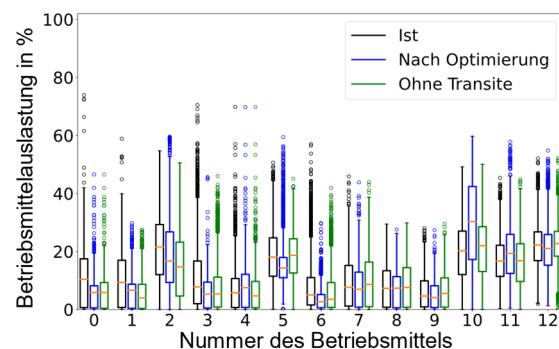


Fig. 2: Auslastung mit und ohne Transite.
Loading with and without transits.

■ Optimized Operation of High-Voltage Distribution Grids

M. Sc. Paul Burkhardt

The ongoing expansion of renewable energy sources and the increase in new consumers such as e-mobility and heat pumps are challenging for the distribution grid operators. For example, grid losses at the 110 kV level could rise in the future as a result of further increases in line and transformer loading. At present, the high-voltage distribution grids in Germany cause losses of about 5 TWh/a. Reducing grid losses can both save costs and reduce the CO₂ emissions caused by the provision of energy losses.

At the IEH, a two-step simulation-based approach is developed to reduce losses. First, a virtual optimization of the grid topology is performed. Then, on the basis of a linear optimization, the potential for reduction by adjusting further control variables is investigated. For this purpose, compensation units, the reactive power feed-in of renewable energy resources connected to the high-voltage distribution grid and the step-changer position of power transformers are considered. In addition, phase shifting transformers can also be included in the algorithm. However, these transformers are still rare in high-voltage distribution grids in Germany.

In particular, the use of phase-shifting transformers can relieve grid areas that are heavily loaded by transit power flows, such as the HV distribution grid shown in Fig. 1. By using phase-shifting transformers, the predominant active power transits can be counteracted and the branch load can be significantly reduced (see Fig. 2). In addition, the current-dependent losses shown in Fig. 3 can be minimized. The achievable reduction depends on the amount of substations equipped with a phase-shifting transformer.

Especially when considering phase-shifting transformers, significant changes in the power flows can be caused by the optimization algorithm. Therefore, in the future, the (n-1) state will be integrated into the linear optimization. This is to ensure that the optimized control variables do not violate any limits in the event of an outage.

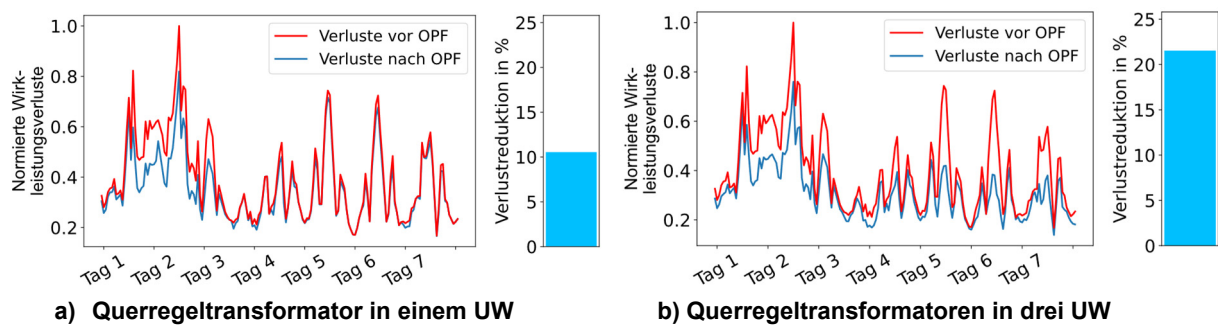


Fig. 3: Verluste im IST-Zustand und nach der Optimierung.
Active power losses before and after optimization.

■ Calculation of Initial Short-Circuit Currents for Converter-based Power System

M. Sc. Deepak

Initial short-circuit current is a very important operational and planning parameter for classical power systems. Using the initial short-circuit currents, various aspects of system operation and planning are derived. For example, equipment rating and design of protection systems. With synchronous generators being replaced with renewable sources of energy, it is to be investigated if the existing calculation method as per VDE-0102 can be further used for the calculation of short-circuit currents with more proportion of converter-interfaced generators. This suitability of static calculation method is to be investigated due to the difference in the operational response of the converter-interfaced generators. The majority of these units are equivalent current sources, which means they cannot inject a high initial short-circuit current at the instant of the fault and therefore continue to inject pre-fault currents. This results in angle difference in the initial fault currents injected from synchronous generators and the converter-interfaced generators. Consequently, the initial fault currents as per the VDE method, which does not consider the complex contribution from converters, are overestimated. Therefore, in order to improve the calculation of initial short-circuit currents using the static calculation method, a static method based on the VDE method is developed, considering the complex contribution of currents from synchronous generators and converter-interfaced generators. The test system used is the IEEE-39 bus system. In this model, the synchronous machines are replaced with WT Type 4B and the initial fault currents are calculated as per the developed static method and then compared with the RMS simulations.

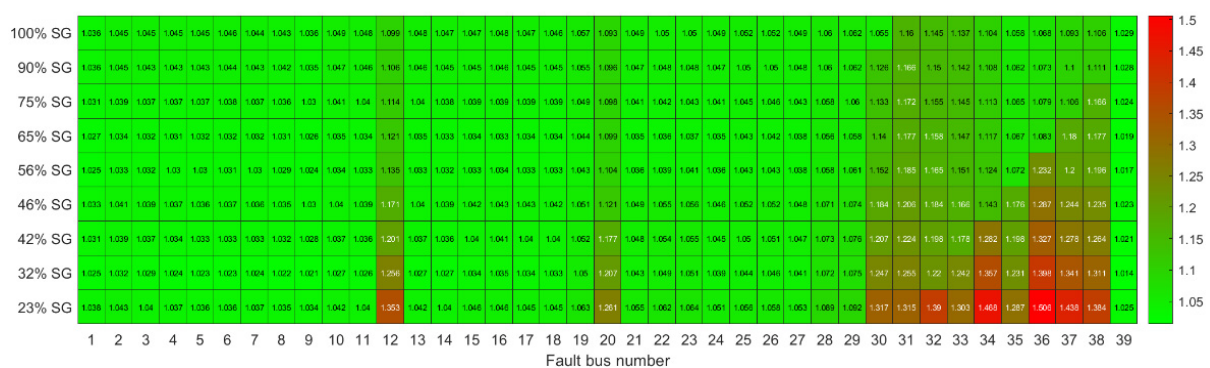


Fig. 1: shows the comparison of initial short-circuit currents calculation between the developed static method and RMS simulations

The result showing the comparison is presented using the heatmap and can be seen in Fig. 1. The Y-axis shows the percentage of synchronous machines in the system and on the X-axis are the fault bus numbers. Each cell in this heatmap presents the ratio of initial fault currents from static and RMS simulation when the short-circuit occurs at the fault bus number. It can be observed that the static method estimates initial short-circuit currents with good accuracy for 345kV buses, even for the lesser proportion of synchronous generators in the system. However, it overestimated the currents for non-345kV buses. This includes the bus-12, 20 along with the generator buses (bus-30 to 38). This is further being investigated and also the static calculation method is further improved for more accurate calculation of initial short-circuit current for converter-based power systems.

■ **Netzintegration von Elektromobilität in Übertragungsnetze**

M. Sc. Nelly-Lee Fischer

Gemäß der Zielsetzung der Bundesregierung sollen bis 2030 bis zu 10 Millionen E-Autos auf deutschen Straßen unterwegs sein. Deren Netzintegration kann zu neuen Herausforderungen im Übertragungsnetz führen. Daher sind neue Ansätze nötig, um die hinzukommende Last zu quantifizieren und zu verorten, sodass mögliche Netzengpässe frühzeitig identifiziert und ein sicherer Netzbetrieb gewährleistet werden kann.

Dafür wurde am IEH zunächst ein zeitreihenbasiertes Netzmodell des aktuellen baden-württembergischen Übertragungsnetzes aufgebaut, anhand dessen die Elektromobilitätslasten untersucht werden.

Zur Nachbildung der Elektromobilitätslasten wurde das IEH-interne Tool zur Berechnung synthetischer Lastprofile basierend auf der Trip-Chain Generation je E-Auto weiterentwickelt. Neben diesem Ansatz wurde eine weitere Methode entwickelt, die nicht das Lastprofil jedes einzelnen E-Autos nachbildet, sondern das jedes Ladepunkts abhängig vom jeweiligen Typ des Ladepunkts.

Die Regionalisierung der Elektromobilitätslasten wird sowohl auf Gemeinde- als auch auf 100 m x 100 m Planquadratsbene (siehe Fig. 1) untersucht. Anhand dessen wird analysiert, ob durch eine hochauflösende Regionalisierung größere Unterschiede bei der Verortung der Elektromobilitätslasten auftreten und wie sich dies auf die Auslastung der einzelnen Netzknoten des Höchstspannungsnetzes auswirkt.



Fig. 1: Regionalisierung über 100 m x 100 m Planquadrats.
Regionalization via 100 m x 100 m grid squares.

Darüber hinaus wurden erste Ansätze zur Quantifizierung des unidirektionalen Flexibilitätspotentials aus E-Autos entwickelt. Einer der Ansätze dient zur Berechnung der maximalen Verschiebbarkeit von Ladevorgängen. Ein weiterer Ansatz bestimmt das Flexibilitätspotential innerhalb definierter Zeiträume mit voller Steuerbarkeit durch den Netzbetreiber sowie mit Berücksichtigung des individuellen Ladeverhaltens zur realitätsnäheren Bestimmung.

Es wurde begonnen die einzelnen Module in ein Simulations-, Analyse- und Visualisierungstool zu integrieren.

■ **Integration of electromobility in transmission grids**

M. Sc. Nelly-Lee Fischer

The German government's target is to have up to 10 million electric vehicles on German roads by 2030. Their grid integration can lead to new challenges in the transmission grid. Therefore, new approaches are needed to quantify and locate the additional load caused by the massive integration of electric vehicles, so that potential grid congestions can be identified at an early stage and secure grid operation can be ensured.

For this purpose, a time-series-based grid model of the current transmission grid in Baden-Württemberg was built at the IEH, which will be used to investigate the electromobility loads.

To simulate the electromobility loads, the IEH-internal tool for calculating synthetic load profiles based on trip-chain generation per electric vehicle was improved upon. In addition to this approach, another method was developed that does not simulate the load profile of each individual electric vehicle, but instead of each charging point depending on the type of charging point.

The regionalization of the electromobility loads is considered on the municipality level as well as on the 100 m x 100 m grid square level (shown in Fig.1). Based on this, it is analyzed if a regionalization with higher resolution leads to larger differences in the location of the electromobility loads and how this affects the capacity of each individual grid node of the transmission grid.

In addition, initial approaches have been developed to quantify the unidirectional flexibility potential from electric vehicles. One of the approaches is used to calculate the maximum shiftability of charging operations. Another approach determines the flexibility potential within defined time windows with full controllability by the grid operator as well as with consideration of the individual charging behavior for a more realistic determination.

The integration of the individual modules into a simulation, analysis and visualization tool has begun.

■ **Flexibilitätpotential bidirektional ladender Elektrofahrzeuge für den Stromnetzbetrieb**

M. Sc. Stefan Köbel

Um die Pariser Klimaziele zu erreichen, befinden sich die elektrische Energieversorgung und die Individualmobilität in einem Transformationsprozess hin zu klimaneutralen Technologien. Der im Zuge dessen vorangetriebene Ausbau an erneuerbaren Energien und das Wegfallen konventioneller Großkraftwerke erfordern für eine zuverlässige Energieversorgung in der Zukunft u.a. neue Speicherkapazitäten und die Flexibilisierung von Lasten und Erzeugern. Die künftig zahlreich verfügbaren Batterien in den Elektrofahrzeugen könnten durch intelligente Ladekonzepte und bidirektionale Ladefunktionen als Speicher und Flexibilität fungieren.

Im Forschungsprojekt Park4Flex wird untersucht, wie Flexibilität in konzentrierten Parkräumen (bspw. Parkhäuser) marktbasiert durch (bidirektional) ladende Elektrofahrzeuge zur Unterstützung des Netzbetriebs bereitgestellt werden kann und welches Potential deutschlandweit dafür besteht.

In einer Systemstudie sollen zunächst Park- und Mobilitätsdaten gesammelt werden, um Nutzer- und Parkhaustypen zu klassifizieren. Anschließend sollen typenspezifische, probabilistische Parkzeitreihen mit einem Parkmodell generiert werden. Des Weiteren sollen reale, gemessene Ladevorgänge geclustert und daraus synthetische Ladevorgangszeitreihen erstellt werden.

Im Kontext eines Ladevorgangs soll Flexibilität definiert und ein Aggregationsalgorithmus weiterentwickelt werden. Auf dieser Grundlage soll das aggregierte Flexibilitätpotenzial für verschiedene Ladestrategien und Parkhaustypen untersucht und für verschiedene Anwendungsfälle bewertet werden.

Das deutschlandweite Potenzial soll im Übertragungsnetz untersucht werden, wobei die aktuellen Ausbaupläne für erneuerbare Energien, aber auch für Wärmepumpen und Elektromobilität in den Eingangszeitreihen berücksichtigt werden. Auf Basis von Strukturdaten werden den Netzknoten Parkhaustypen zugeordnet. Abschließend sollen die Auswirkungen auf das Netz mittels Lastflussberechnungen analysiert, Sensitivitätsanalysen durchgeführt und das P4F-Konzept bewertet werden.

- **Flexibility potential of bidirectional charging electric vehicles for electricity grid operation**

M. Sc. Stefan Köbel

In order to achieve the Paris climate targets, the electrical energy supply and individual mobility are undergoing a transformation process towards climate-neutral technologies. The expansion of renewable energies, which is being driven forward as part of this process, and the elimination of conventional large-scale power plants will require new storage capacities and the flexibilization of loads and producers, amongst other things, to ensure a reliable energy supply in the future. The numerous batteries in electric vehicles that will be available in the future could act as storage and flexibility through intelligent charging concepts and bidirectional charging functions.

The Park4Flex research project is investigating how flexibility in concentrated parking spaces (e.g. parking garages) can be provided on a market basis by (bidirectionally) charging electric vehicles to support grid operation and what potential there is for this throughout Germany.

In a system study, first parking and mobility data will be collected in order to classify user and car park types. Subsequently, type-specific, probabilistic parking time series are to be generated using a parking model. In addition, real, measured charging processes are to be clustered and synthetic charging process time series created from them.

Flexibility is to be defined in the context of a charging process and an aggregation algorithm is to be further developed. On this basis, the aggregated flexibility potential for different charging strategies and car park types will be investigated and evaluated for different use cases.

The Germany-wide potential will be analyzed in the transmission grid, taking into account the current expansion plans for renewable energies, but also for heat pumps and electromobility in the input time series. Car Park types are assigned to the grid nodes on the basis of structural data. Finally, the effects on the grid will be analyzed using load flow calculations, sensitivity analyses will be carried out and the P4F concept will be evaluated.

■ **Untersuchung von Flexibilitätspotentialen und netzdienlichem Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen in Smart Grids**

M. Sc. Kevin Kratz

Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen und neuartiger Verbraucher, wie Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge, verändern sich die Lastflüsse im Stromnetz. Gleichzeitig ist deren Verhalten und damit die Gesamtsituation im Stromnetz zunehmend schwieriger vorherzusagen. Weiterhin verkompliziert der Rückgang großer Kraftwerksblöcke die Betriebsführung in den Übertragungs- und Verteilnetzen, sodass es immer schwerer wird Erzeugung und Verbrauch aufeinander abzustimmen.

In diesem Zusammenhang können dezentrale Erzeugungsanlagen und steuerbare Lasten flexibel genutzt werden, damit ein intelligenter Stromnetzbetrieb umgesetzt werden kann. Da diese Betriebselemente großteils in der Verteilnetzebene angeschlossen sind, ist eine funktionsfähige Koordination zwischen Verteilnetzbetreibern und Übertragungsnetzbetreibern notwendig. Denn gerade Letzteren stehen immer weniger eigene Maßnahmen zur Verfügung, um den Netzbetrieb zu steuern und Engpässe zu vermeiden. Daher sind diese auf die Steuerung flexibler Anlagen im Verteilnetz angewiesen. Um die Koordination zwischen den Netzbetreibern zu vereinfachen und die Bereitstellung der Flexibilität möglichst anonym zu halten, wurde am IEH eine Methodik zur Aggregation aller flexiblen Anlagen innerhalb eines Netzbereichs entwickelt. Diese berücksichtigt zudem auch die Restriktionen innerhalb des betrachteten Netzabschnittes hinsichtlich der Übertragungskapazitäten aller Leitungen und Transformatoren sowie der Spannungsbandgrenzen. Hinsichtlich des Flexibilitätspotentials von Elektrofahrzeugen ergeben sich jedoch einige Herausforderungen, die es zu berücksichtigen gilt. Dies umfasst vor allem die verschiedenen Anwendungsfälle und darin auch immer die Unsicherheit bezüglich der Standzeit und der verfügbaren Kapazität des betrachteten Ladestandorts. Jedoch liegt ein hohes Potential in der flexiblen Gestaltung der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen, insbesondere wenn diese auch ins Netz einspeisen können.

Diese Herausforderungen sind auch Themeninhalte des geförderten Forschungsprojekts „Bid-E-V“, in welchem das bidirektionale Ladeverhalten von elektrifizierten Logistik-Vans untersucht wird. Ein Hauptaugenmerk liegt hier auf der netzdienlichen Flexibilität einer solchen Flotte und deren zukünftige Vermarktung.

- **Investigation of flexibility potentials and grid-supportive charging behavior of electric vehicles in smart grids**

M. Sc. Kevin Kratz

The increasing amount of renewable energy generation plants and new types of consumers, such as heat pumps and electric vehicles, are changing the load flows in the electricity grid. At the same time, their behavior and thus the overall situation in the electricity grid is becoming increasingly difficult to predict. Furthermore, the decline in large power plant units is complicating operational processes in the transmission and distribution grids, making it increasingly difficult to balance generation and consumption.

In this context, decentralized power generation plants and controllable loads can be used flexibly so that smart grid operation can be implemented. As these operating units are mainly connected at distribution grid levels, effective coordination between distribution grid operators and transmission grid operators is necessary. Especially the latter have fewer and fewer options of their own to control grid operation and avoid congestions. They are therefore dependent on the control of flexible units in the distribution grid. In order to simplify coordination between the grid operators and to keep the provision of flexibility as anonymous as possible, IEH has developed a methodology for aggregating all flexible systems within a grid area. This also takes into account the restrictions within the grid section under consideration with regard to the transmission capacities of all lines and transformers as well as the voltage band limits. With regard to the flexibility potential of electric vehicles, however, there are a number of challenges that need to be taken into account. Above all, this includes the various use cases and the uncertainty regarding the service life and available capacity of the charging location under consideration. However, there is great potential in the flexible organization of the charging processes of electric vehicles, especially if they can also feed electrical energy into the grid.

These challenges are also the subject of the funded research project "Bid-E-V", in which the bidirectional charging behavior of electrified logistics vans is being investigated. The main focus here is on the grid-supporting flexibility of such a fleet and its future marketing.

■ **Nutzung betrieblicher Flexibilitäten im aktiven Verteilnetzbetrieb**

M. Sc. Sharon Müller

Die voranschreitende Energiewende führt zu einem Wandel des Energieversorgungssystems und bringt grundlegend neue Rollen für die beteiligten Akteure, insbesondere für Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber sowie Endkunden und Aggregatoren von flexibler und dezentraler Leistungsbereitstellung. Im Projekt *flexQgrid* wurde daher ein Netzgebiet untersucht, dass bereits jetzt typische Charakteristika eines aktiven Verteilnetzes aufweist und somit als gute Basis für Untersuchungen bezüglich des zukünftigen Netzbetriebs unter Einbindung aller relevanten Partner dienen kann.

Neben einer sehr hohen Durchdringung an dezentralen Photovoltaik- und zwei Windenergieanlagen zeichnet sich das untersuchte Netzgebiet durch eine Vielzahl an steuerbaren Lasten wie Elektromobilität, Wärmepumpen oder elektrischen Speichersystemen aus. Mit Hilfe intelligenter Gebäude-Energiemanagementsysteme konnte der Einsatz der einzelnen flexiblen Anlagen sowohl kosteneffizient für den Endkunden als auch netz- und systemdienlich optimiert werden. Eine großflächig installierte Smart Meter Infrastruktur in drei Niederspannungsnetzen sowie dem überlagerten Mittelspannungsnetz ermöglichte sowohl eine nahezu echtzeitfähige Steuerung der Flexibilitäten als auch eine hochaufgelöste Überwachung und Auswertung der realen Netzzustände.

Im Laufe des Projekts wurde ein präventives Engpassmanagement in Mittel- und Niederspannungsnetzen implementiert und getestet. Dafür wurden die Netzzustände im Voraus prognostiziert, sodass drohende Engpässe schon vor Auftritt detektiert und behoben werden konnten. Dafür wurde die Leistungserzeugung oder der Leistungsbezug der flexiblen Anlagen soweit beschränkt, dass ein sicherer Netzbetrieb gewährleistet war. Es hat sich gezeigt, dass die Funktionalität eines präventiven Engpassmanagements sehr stark von der Prognosegüte abhängt. Durch stochastisches Lastverhalten in Niederspannungsnetzen sowie einer hohen Volatilität in der erneuerbaren Erzeugung ist eine ausreichende Genauigkeit jedoch nicht oder nur unter sehr hohem Aufwand möglich. Wird dennoch eine verpflichtende Beschränkung der flexiblen Leistung vorgenommen, kommt es entweder zu unnötig hohen Einschränkungen für die Endkunden, oder ein bestehender Engpass kann nicht behoben werden, sodass ein zusätzliches Eingreifen des Netzbetreibers während des Netzbetriebs nötig ist. Alternativ ist eine informative Kommunikation von hohen Netzauslastungen an die Energiemanagementsysteme denkbar. So können Endkunden ihren Lastgang bei drohender Abregelung optimieren und ein auftretender Engpass effizient im Rahmen eines kurativen Engpassmanagements in nahezu Echtzeit behoben werden.

- **Usage of operational flexibilities in active distribution network operation**

M. Sc. Sharon Müller

The ongoing energy transition is leading to a change in the energy supply system and brings with it fundamentally new roles for all players involved, in particular distribution and transmission system operators as well as prosumer and aggregators of flexible and decentralized power supply. The *flexQgrid* project therefore investigated a grid area that already exhibits typical characteristics of an active distribution grid and can therefore serve as a good basis for investigations into future grid operation involving all relevant partners.

In addition to a very high penetration of decentralized photovoltaic systems and two wind turbines, the investigated grid area is characterized by a large number of controllable loads such as electric vehicle charging, heat pumps or battery electric storage systems. With the help of intelligent energy management systems, it was possible to optimize the use of the individual flexible systems both cost-efficiently for the end customer and in a grid- and system- serving way. A highly developed smart meter infrastructure installed in three low-voltage grids and the overlying medium-voltage grid enabled both close-to-real-time control of the flexibility and a high-resolution monitoring and evaluation of real grid states.

Within the project, a preventive congestion management was implemented and tested in a medium and three low-voltage grids. Hereby, the grid states were forecasted in advance so that impending bottlenecks could be detected and eliminated before their occurrence. Therefore, the power generation or consumption of the flexible assets was limited in order to guarantee a safe grid operation. It has been shown that the functionality of a preventive congestion management is highly dependent on the quality of the forecast. Due to the stochastic load behaviour of low-voltage grids, coupled with the high volatility of renewable generation, it is not possible or very difficult to achieve sufficient accuracy. If, however, a mandatory restriction of flexible capacity is nevertheless imposed, this either results in unnecessarily high restrictions for the prosumer, or an existing bottleneck cannot be eliminated. Hence, additional intervention by the grid operator is necessary during online grid operation. Alternatively, informative communication of high grid loading, e.g. a high probability of impending bottlenecks, to the energy management systems is conceivable. Then, the end customers can optimize their load profile considering the possibility of curtailment, for example shifting charging of electric vehicles. Furthermore, any congestion that occurs can be resolved efficiently using a close-to-real time congestion management integrated into the grid operation.

■ **Netzintegration von Wirtschaftsverkehr im urbanen Raum**

M. Sc. Charlotte Wagner

Die Elektrifizierung des urbanen Lieferverkehrs kombiniert mit der Nutzung Erneuerbarer Energien ist für die Senkung von CO₂-Emissionen unabdingbar. Darauf müssen Stromnetz, Stadtlogistik und Kommunen durch Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen frühzeitig vorbereitet sein. Im interdisziplinären Forschungsvorhaben REALIST werden klima-innovative Stromversorgungs- und Logistikkonzepte für eine elektrische Stadtbelieferung entwickelt und im Rahmen eines Reallabors erprobt.

In Kooperation mit einer Partnerspedition konnten reale Ladekurven von bereits heute eingesetzten E-Lkw des Herstellers MAN und Mercedes-Benz aufgezeichnet werden. Die Fahrzeuge werden für einen Pendelverkehr eingesetzt und fahren drei- bis viermal täglich eine Strecke von je 40 km. Geladen wird an einer 40-kW-Ladestation an der Rampe des Betriebshofes.

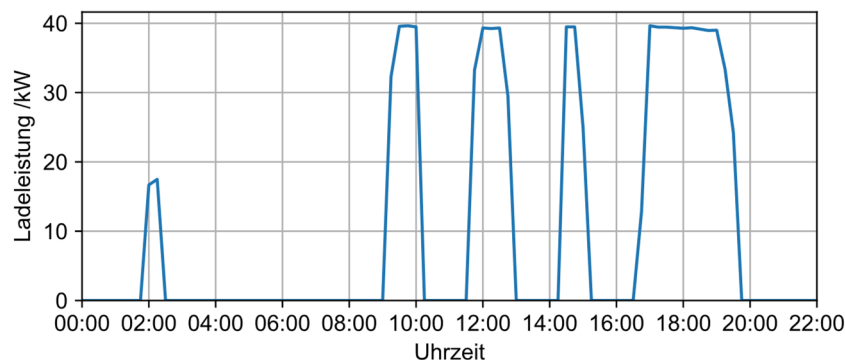


Fig. 1: Laden eines E-Lkw an der Speditionsrampe über einen Tag
Charging an e-truck at the freight ramp over one day

In der Fig. 1 ist der Ladevorgang des E-Lkw, der für den Pendelverkehr eingesetzt wird, über ein Tag dargestellt. Die Energie für die wiederholend kurzen Distanzen kann innerhalb der Warenbeladung an der Rampe und nachts nachgeladen werden. Dies stellt eine erfolgreiche Einsatzmöglichkeit des E-Lkw dar. Für eine weitere Elektrifizierung der Flotte reicht die Netzanschlusskapazität vor Ort allerdings nicht aus. Damit wird deutlich, wie wichtig die frühzeitige Identifikation und Lokalisierung zukünftiger Ladebedarfe von E-Lkw für die Stromnetzplanung ist. Die Akteure aus der Logistikbranche sind bei der Umstellung auf E-Lkw auf ein resilientes Ladeinfrastrukturnetz angewiesen. Für Stromnetzbetreiber müssen bei der Stromnetzplanung neue Planungsgrundsätze berücksichtigt werden, welche das Laden von E-Lkw berücksichtigen. Hierzu bedarf es einer engen Zusammenarbeit zweier Branchen, die zuvor wenige Berührungspunkte aufwiesen.

- **Grid Integration of commercial transport in urban areas**

M. Sc. Charlotte Wagner

The electrification of urban transportation combined with the use of renewable energies is essential for reducing CO₂ emissions. The power grid, urban logistics and municipalities should be prepared for this at an early stage by creating suitable framework conditions. In the interdisciplinary research project REALIST, climate-innovative power supply and logistics concepts for electric urban delivery are being developed and tested in a pilot lab.

In cooperation with a partner freight company, realistic loading curves of existing e-trucks from MAN and Mercedes-Benz were recorded. The vehicles are used for a shuttle transport that covers a distance of 40 km three to four times a day. Charging is done at a 40-kW charging station at the ramp of the depot.

Fig. 1 shows the charging process of the e-truck used for shuttle transport over the course of a day. The energy needed for the repeating short distances can be recharged during the loading of the goods at the ramp and at night. This represents a successful application of the e-truck. However, the grid connection capacity is not sufficient on site for further electrification of the fleet. This clearly shows how important the early identification and localization of future charging needs of e-trucks is for electricity grid planning. The players in the logistics sector are dependent on a resilient charging infrastructure network when switching to e-trucks. For electricity grid operators, new planning principles that take into account the charging of e-trucks must be considered in electricity grid planning. This requires close cooperation between two sectors that previously had few points of contact.

■ Netzintegration von elektrischen Lkw

M. Sc. Kathrin Walz

Die Verkehrswende weitet sich zunehmend auf den Straßengüterverkehr aus, der aufgrund hoher Fahrleistungen einen signifikanten Teil zu den Verkehrsemissionen beiträgt. Ein Hochlauf von E-Lkw kann zu neuen Herausforderungen im Stromnetz führen, auf welche dieses bisher kaum vorbereitet wurde. Daher sind neue Ansätze nötig, um deren Ladevorgänge in Netzplanung und Netzbetrieb zu berücksichtigen. Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte zur Netzintegration von E-Lkw wurden zwei Ansätze entwickelt, mithilfe derer das Laden von E-Lkw in die Netz- und Energiesystemplanung integriert werden kann: der ladeortbezogene Ansatz und der fahrzeugbezogener Ansatz. Fig.1 zeigt eine Gegenüberstellung der Ansätze.

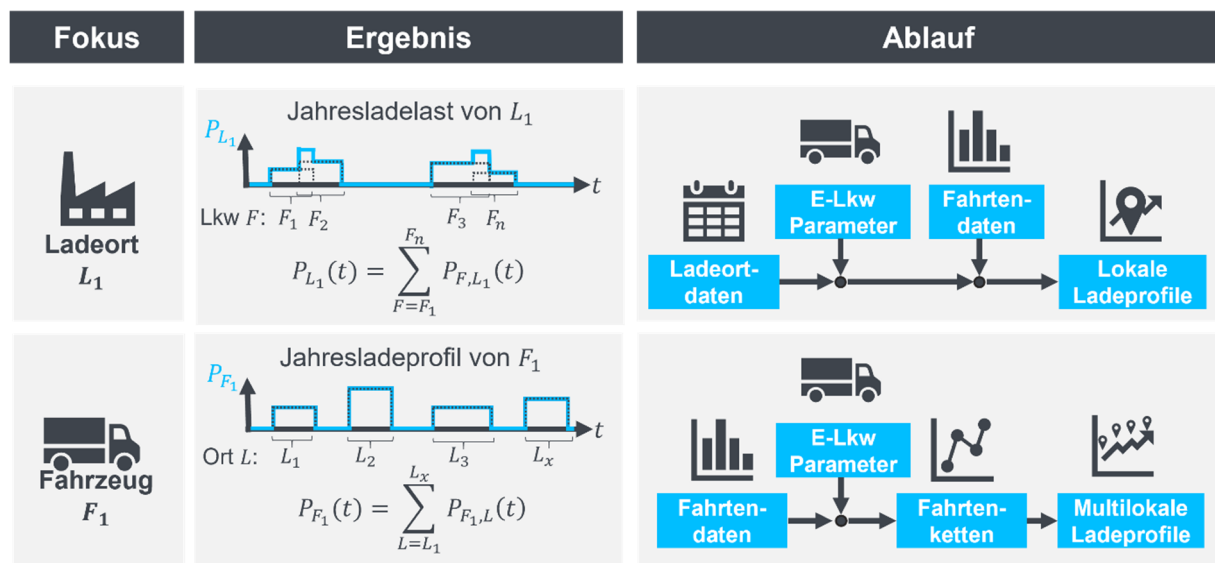


Fig. 1: Gegenüberstellung der Ansätze zur Modellierung des E-Lkw-Ladebedarfs.
Comparison of the two e-truck charging demand modeling approaches.

Während mit dem ladeortbezogenen Ansatz der E-Lkw-Ladebedarf an charakteristischen Ladeorten wie Depots oder Autobahnraststätten ermittelt werden kann, ermöglicht der fahrzeugbezogene Ansatz die Bestimmung des zeit- und ortsabhängigen Ladebedarfs eines einzelnen Fahrzeugs. Die Anwendungsfälle für die beiden Ansätze in der Netz- und Energiesystemplanung sind dementsprechend unterschiedlich. Der ladeortbezogene Ansatz kann genutzt werden, um den lokalen Ladebedarf jedes einzelnen Ladestandorts und damit jedes Netzkunden in einem festen Netzgebiet zu modellieren. Dies ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen von E-Lkw-Laden im lokalen Verteilnetz. Der fahrzeugbezogene Ansatz dient der überregionalen Modellierung des Ladebedarfs von Flotten und kann daher für die Bestimmung des regionalen Energiebedarfs im Übertragungsnetz und die Ableitung von Flexibilitätsoptionen verwendet werden. Fig. 2 zeigt die Integration der beiden Ansätze in die beschriebenen Anwendungsfälle.

Grid Integration of Electric Trucks

M. Sc. Kathrin Walz

The transport transition is increasingly extending to road freight transport, which contributes a significant share to transport emissions due to high mileage. A ramp-up of e-trucks can lead to new challenges in the power grid, for which the grid has hardly been prepared so far. Therefore, new approaches are needed to consider their charging processes in grid planning and grid operation. Within the framework of several research projects on the grid integration of e-trucks, two approaches have been developed that can be used to integrate e-truck charging into grid and power system planning: the charging location-based approach and the vehicle-based approach. Fig.1 shows a comparison of the approaches.

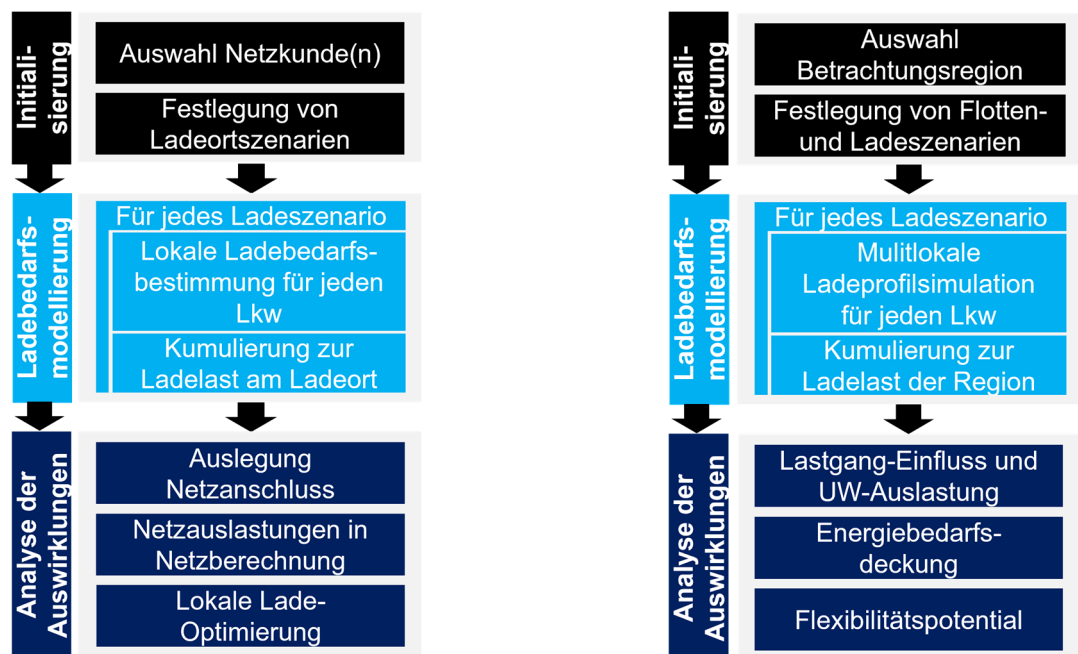


Fig. 2: Integration von E-Lkw in Netz- (links) und Energiesystemplanung (rechts).
Integration of e-trucks in grid (left) and power system (right) planning.

While the charging location-based approach can be used to determine the e-truck charging demand at characteristic charging locations such as depots or highway rest areas, the vehicle-based approach enables the determination of the time- and location-dependent charging demand of an individual vehicle. Accordingly, the use cases for the two approaches in grid and power system planning are different. The charging location-based approach can be used to model the local charging demand of each grid customer in a fixed grid area. This enables the study of the impact of e-truck charging in the local distribution grid. The vehicle-based approach is used to model the charging demand of fleets across regions and can be used to determine regional energy demand on the transmission grid and derive flexibility options. Fig. 2 shows the integration of the two approaches into the described use cases.

- **Parkraumbeteiligung an der marktbasierten Flexibilitätsbereitstellung zur Netzstabilisierung bei steigender Integration von erneuerbaren Energien**

M. Sc. Henrik Wissel

Durch die Dezentralisierung der Energieerzeuger steigt die Energiekapazität im Niederspannungsnetz. Gleichzeitig steigen auch die Lasten durch die Zunahme von Elektrofahrzeugen. Bis 2030 hat die Bundesregierung das Ziel, 15 Millionen Elektrofahrzeuge im Straßenverkehr zu haben sowie eine Million öffentliche Ladepunkte zu installieren. Besonders stark ist davon das Niederspannungsnetz betroffen. Die Ortsnetzstationen sind dadurch höheren Belastungen ausgesetzt, aber auch die Anschlussleistung von Gebäuden an das Netz ist begrenzt. Durch die steigende IT-Fähigkeit von intelligenten Verbrauchern, wie Wärmepumpen oder Ladestationen, ergeben sich neue Möglichkeiten in der Bereitstellung von Daten sowie bei dem intelligenten Eingriff in den Lastgang durch den Netzbetreiber oder Energievermarkter. Dadurch können perspektivisch intelligente Netze aufgebaut werden, die zur Entlastung des Niederspannungsnetzes sowie zur Einhaltung vorgegebener Anschlussleistungen beitragen. Des Weiteren kann ein Energievermarkter durch Nutzung der Infrastruktur den Lastgang der Verbraucher zeitlich so verschieben, dass bei einem günstigen Strompreis viel Energie verbraucht und bei einem teuren Strompreis viel Energie eingespeist wird. Dadurch können Stromkosten für den Endverbraucher reduziert werden.

Durch die andauernde Transformation des Versorgungssystems werden Flexibilitäten von intelligenten Verbrauchern zunehmend dezentralisiert. Dadurch steigt der Koordinationsaufwand und die Anforderungen an zuverlässige Informations- und Kommunikationstechnik.

Im Rahmen des Projektes Park4Flex wird ein umfassendes Konzept entwickelt, welches sich von der Erweiterung der Ladeinfrastruktur über die Entwicklung von Methoden zur Aggregation der sektorübergreifenden Flexibilitäten bis hin zur Vermarktung der Flexibilitäten und Klärung der regulatorischen Rahmenbedingungen erstreckt. Zur Validierung des entwickelten Konzeptes wird dieses während eines Feldtests in einem Parkhaus mit ca. 20 Ladepunkten umgesetzt. Parallel dazu wird ein zweiter Feldtest an der Universität Stuttgart durchgeführt, um den Einfluss bidirektionaler Ladevorgänge auf die Flexibilität zu erproben. In beiden Feldtests wird die gesamte Wirkungskette demonstriert, beginnend mit der Aggregation des Flexibilitätspotenzials, gefolgt von der Vermarktung und Abrufung von Flexibilitätsoptionen durch Dritte bis hin zur Bereitstellung der Flexibilitäten durch die Fahrzeugflotte. Auf Basis der erzielten Erkenntnisse werden die Güte und Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Lösung bewertet sowie Handlungsempfehlungen erarbeitet.

- **Parking participation in market-base flexibility provision for grid stabilization with increasing integration of renewables**

M. Sc. Henrik Wissel

The decentralization of energy producers is increasing the energy capacity in the low-voltage grid. At the same time, loads are also rising due to the increase in electric vehicles. By 2030, the German government aims to have 15 million electric vehicles on the roads and one million public charging points installed. The low-voltage grid is particularly affected by this. The local grid stations are exposed to higher loads as a result, but the connection capacity of buildings to the grid is also limited. The increasing IT capability of intelligent consumers, such as heat pumps or charging stations, opens up new possibilities in the provision of data and intelligent intervention in the load profile by the grid operator or energy marketer. In this way, smart grids can be set up in the future that help to reduce the load on the low-voltage grid and comply with specified connected loads. Furthermore, by using the infrastructure, an energy marketer can shift the load profile of consumers over time so that a lot of energy is consumed when the electricity price is low and a lot of energy is fed in when the electricity price is high. This can reduce electricity costs for the end consumer.

Due to the ongoing transformation of the supply system, the flexibility of smart consumers is becoming increasingly decentralized. This increases the coordination effort and the requirements for reliable information and communication technology.

As part of the Park4Flex project, a comprehensive concept is being developed, ranging from the expansion of the charging infrastructure and the development of methods for aggregating cross-sector flexibilities to the marketing of flexibilities and clarification of the regulatory framework. To validate the developed concept, it will be implemented during a field test in a parking garage with approx. 20 charging points. At the same time, a second field test will be carried out at the University of Stuttgart to test the influence of bidirectional charging processes on flexibility. In both field tests, the entire chain of effects will be demonstrated, starting with the aggregation of flexibility potential, followed by the marketing and retrieval of flexibility options by third parties, through to the provision of flexibility by the vehicle fleet. Based on the findings, the quality and cost-effectiveness of the proposed solution will be evaluated and recommendations for action developed.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

- **Forschungsprojekt „MachineEmulate“:**
Entwicklung einer parametrisierten und rechen-
effizienten FEM-Modellierung eines BLDC-Motors und
einer Methode zur Extraktion der EMV-relevanten
Daten und Entwicklung der Hardware des Emulators
Laufzeit: Juli 2021 – September 2024

Ziel des Projekts MachineEmulate ist die Entwicklung und der prototypische Aufbau eines EMV-konformen Maschinenemulators zur Nachbildung elektrischer Maschinen in verschiedenen Lastszenarien bei EMV-Prüfungen. Dabei soll der Emulator als aktive Ersatzlast bei der entwicklungsbegleitenden Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von Wechselrichtern beispielsweise für die Automobilbranche dienen.

Der parametrierbare Emulator soll das elektrische Klemmenverhalten verschiedener elektrischer Maschinen unter verschiedenen Lastszenarien nachbilden (= Power Hardware in the Loop, HIL). Solche Emulatoren sind bereits für funktionale Tests erhältlich. Die Besonderheit des zu entwickelnden Prototyps besteht darin, dass er emissionsarm ist und auch das hochfrequente Klemmenverhalten bis ca. 230 MHz nachbilden kann. Dadurch können EMV-Prüfungen unter realistischen Lastbedingungen mit geringerem Aufwand durchgeführt werden. Hauptziel des Projekts ist die Emulation von bürstenlosen Motoren. Das Emulatorsystem soll für EMV-Prüflabore und Hardware-Entwickler angeboten werden.

Das Projektkonsortium setzt sich aus zwei mittelständischen Betrieben und einer Forschungseinrichtung zusammen. Dies sind die Firmen J. Helmke & Co. und MeßTechnikNord GmbH sowie das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Stuttgart.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „MachineEmulate“:
Development of a configurable and computing-
efficient FEM model of a BLDC motor and a method
for extracting the EMC-relevant data and development
of the emulator's hardware**

Period: July 2021 – September 2024

The aim of the MachineEmulate project is to develop and prototype an EMC-compliant machine emulator to simulate electrical machines in various load scenarios during EMC tests. The emulator is intended to serve as an active substitute load for pre-compliance testing of the electromagnetic compatibility (EMC) of inverters, for example for the automotive industry.

The configurable emulator is intended to simulate the electrical terminal behaviour of various electrical machines under different load scenarios (= Power Hardware in the Loop, HIL). Such emulators are already available for functional tests. The special features of the prototype to be developed are its low emissions and its ability to simulate high-frequency terminal behaviour up to approx. 230 MHz. This means that EMC tests can be carried out under realistic load conditions with less effort. The main goal of the project is the emulation of brushless motors. The emulator system will be offered to EMC test laboratories and hardware developers.

The project consortium consists of two medium-sized enterprises and one research institution. These are the enterprises J. Helmke & Co. and MeßTechnikNord GmbH as well as the Institute for Energy Transmission and High Voltage Technology (IEH) of the University of Stuttgart.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



on the basis of a decision
by the German Bundestag

- **Forschungsprojekt „EACplus“:
Schirmdämpfung von hochintegrativen, recyclebaren
Gehäusestrukturen mit geringem CO2 Footprint**

Laufzeit: Dezember 2021 – November 2024

Der Übergang vom konventionellen zum elektrifizierten Antriebsstrang eröffnet bei der Gestaltung von Elektrofahrzeugen und derer Komponenten völlig neue Möglichkeiten. So wandeln sich zum einen die verbauten Komponenten, zum anderen aber auch deren Anforderungsprofile. Die mechanischen, medialen und thermischen Belastungen sind bei Elektrofahrzeugen deutlich reduziert. Gleichzeitig steigen aber die Herausforderungen in Bezug auf elektromagnetische Verträglichkeit, Leichtbau und Akustik. Zudem nimmt der öffentliche Druck auf die Hersteller und Systemzulieferer zu, den CO₂-Fußabdruck von Fahrzeugen zu senken und langfristig möglichst CO₂-neutral zu gestalten. Als Konsequenz müssen die Fahrzeug- und Komponentenhersteller Kosten reduzieren, den Gedanken der Kreislaufwirtschaft stärker in ihren Produkten verankern und gleichzeitig das hohe Niveau der Zuverlässigkeit beibehalten.

Ziel im EAC+ Projekt ist es, kreislauffähige, ökonomisch und technisch konkurrenzfähige Gehäusestrukturen zu entwickeln, die ein hohes Potential haben, in verschiedensten Branchen Anwendung zu finden und gleichzeitig den hohen elektromagnetischen Anforderungen der Elektromobilität gerecht zu werden. Demonstriert werden soll dies an einer der technologisch anspruchsvollsten Komponenten elektrischer Fahrzeuge, dem Gehäuse des Traktionsinverters.

Im Projektkonsortium arbeiten insgesamt 7 Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammen: Mercedes-Benz AG (Projektkoordination), ZF Friedrichshafen AG, Fahrzeugelektrik Pirna GmbH & Co. KG, TU Bergakademie Freiberg - Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART), Universität Stuttgart - Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Technische Universität Dresden - Institut für Fertigungstechnik (IF) und Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK). Das Vorhaben kooperiert mit dem Forschungsnetzwerk Plattform FOREL und ist dadurch mit mehr als 130 Partnerinstitutionen aus Industrie und Forschung verbunden.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project „EACplus“:
Shielding Attenuation of Highly Integrative,
Recyclable Housing Structures with a Low CO2
Footprint**

Period: December 2021 – November 2024

The transition from conventional to electrified powertrains offers completely new possibilities for the design of electric vehicles and their components. The installed components are changing, as well as their requirement profiles. The mechanical, medial and thermal loads are significantly reduced in electric vehicles. At the same time, however, the challenges in terms of electromagnetic compatibility, lightweight construction and acoustics are increasing. In addition, public pressure is increasing on manufacturers and system suppliers to reduce the CO2 footprint of vehicles and to make them as CO2-neutral as possible in the long term. As a consequence, vehicle and component manufacturers must reduce costs, anchor the idea of the circular economy more firmly in their products and at the same time maintain the high level of reliability.

The aim of the EAC+ project is to develop recyclable, economically and technically competitive housing structures that have a high potential to be used in a wide range of industries and while meeting the high electromagnetic requirements of electromobility. This will be demonstrated with one of the technologically most demanding components of electric vehicles, the housing of the traction inverter.

7 partners from science and industry are working together in the project consortium: Mercedes-Benz AG (project coordination), ZF Friedrichshafen AG, Fahrzeugelektrik Pirna GmbH & Co. KG, TU Bergakademie Freiberg - Institute for Processing Machines and Recycling Systems Technology (IART), University of Stuttgart - Institute for Energy Transmission and High Voltage Technology (IEH), Dresden University of Technology - Institute for Manufacturing Technology (IF) and Institute for Lightweight Construction and Plastics Technology (ILK). The project cooperates with the research network Platform FOREL and is thus connected with more than 130 partner institutions from industry and research.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

■ EMV-konforme elektrische Maschinenemulation

M. Sc. Michaela Gruber

Das Forschungsprojekt „MachineEmulate“ konzentriert sich auf einen neuen Ansatz, um EMV-Emissionsmessungen von Kfz-Wechselrichtern unter realistischen Lastbedingungen möglichst einfach und kostengünstig durchführen zu können. Hierbei soll die reale elektrische Maschine inklusive externer Last (hydraulisch oder durch eine zusätzliche Lastmaschine) vollständig durch eine elektrische Last, eine sog. elektrische Maschinenemulation ersetzt werden. Fig. 1 zeigt die an den Wechselrichter (DUT, engl. device under test) angeschlossene elektrische Maschinenemulation.

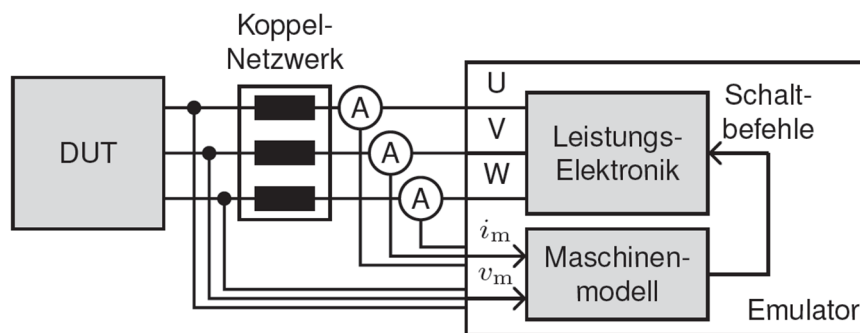


Fig. 1: Blockschaubild der elektrischen Maschinenemulation.

Block diagram of the electrical machine emulation.

Für eine reale Belastung des Wechselrichters muss der Emulator die Impedanz der Maschine nachbilden. Emulatoren, die die Impedanz bis ca. 100 kHz nachbilden, sind bereits kommerziell erhältlich und werden für Wechselrichter-Funktionstests als Power Hardware in the Loop (PHIL) eingesetzt. Für den Einsatz als Ersatzlast bei EMV-Prüfungen ergeben sich zwei weitere Anforderungen: Zum einen muss die HF-Impedanz der Maschine ebenfalls nachgebildet werden, damit sich die vom Wechselrichter emittierten Störströme über die Last schließen können. Zum anderen darf der Emulator nur vernachlässigbar geringe Eigenemissionen erzeugen, um das Messergebnis nicht zu verfälschen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird daher ein eigener Emulator für einen Leistungsbereich bis 1 kW aufgebaut. Der funktionale Emulator basiert auf dem Stand der Forschung (versetzt taktender Wechselrichter, Grundwellenmodell) und wird durch geeignete Maßnahmen hinsichtlich seiner Eigenemissionen optimiert (Layout, Ansteuerung, Filtermaßnahmen). Der Schwerpunkt der Neuentwicklung liegt auf der Nachbildung und Ermittlung der HF-Impedanz von Synchronmaschinen. Neben der simulativen Bestimmung anhand von FEM-Simulationen werden verschiedene Messkonzepte untersucht und weiterentwickelt. Fig. 2 zeigt beispielhaft eine Messmethodik zur Bestimmung der Gleichtaktimpedanz im aktiven Betrieb. Hierbei wird die Impedanz mithilfe von zwei Stromzangen und einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) aus dem gemessenen Übertragungsverhalten bestimmt.

■ EMC compliant Electrical Machine Emulation

M. Sc. Michaela Gruber

The research project “MachineEmulate” is focusing on a new approach for measuring EMC emissions from vehicle inverters under realistic load conditions in a simple and cost-effective way. The inverter load, specifically the electrical machine and its external load (hydraulic or an additional load machine) are completely replaced by an electrical load, by a so-called electrical machine emulation. Fig. 1 shows the electrical machine emulation connected to the inverter (DUT, device under test).

For a realistic load on the inverter, the emulator must simulate the impedance of the machine. Emulators that simulate the impedance up to approx. 100 kHz are already commercially available and are used for functional tests on inverters as power hardware in the loop (PHiL). There are two additional requirements for use as a substitute load in EMC tests: Firstly, the radio frequency (RF) impedance of the machine must also be emulated so that the interference currents emitted by the inverter can close via the load. Secondly, the emulator must only generate negligible emissions so as not to distort the measurement result.

Therefore, an in-house developed emulator for a power range up to 1 kW is being built as part of the research project. The functional emulator is based on the current state of research (interleaved switched inverter, fundamental wave model) and is optimized by suitable measures with regard to its emissions (layout, control, filter measures). The focus of the new development is on emulating and determining the RF impedance of synchronous machines. In addition to simulative determination using FEM simulations, various measurement concepts are being investigated and enhanced. Fig. 2 shows an example of a measurement method for determining the common mode impedance in active operation. Using two current clamps and a vector network analyzer (VNA), the RF impedance is determined from the measured transmission behavior.

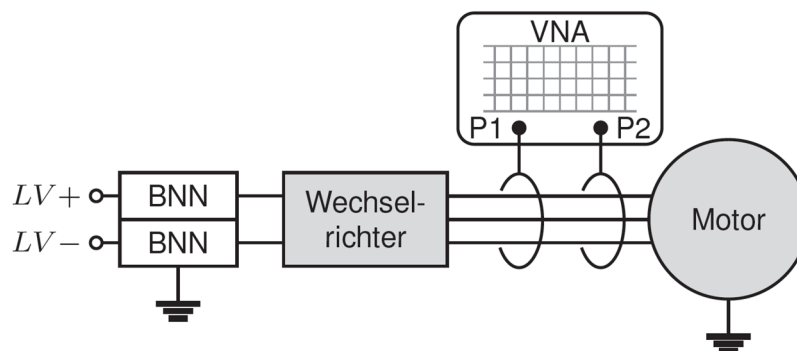


Fig. 2: Messmethodik zur Bestimmung der Gleichtaktimpedanz im aktiven Betrieb.
Block diagram of the common mode impedance measurement in active operation.

■ CISPR 25 Komponententests mit komplexen Kabelbäumen

M. Sc. Jan Schabel

Die Komplexität elektronischer Steuergeräte im Fahrzeug wird in den kommenden Jahren signifikant zunehmen. Insbesondere durch die hohen Sicherheitsanforderungen an das autonome Fahren. Bedingt durch die Elektromobilität steigen sowohl die Anzahl benötigter Sensoren als auch eingebauter Aktoren in Kraftfahrzeugen, wodurch auch die Anforderungen an Steuergeräte steigen. Um eine EMV-gerechte Messung durchführen zu können, muss den geänderten Bedingungen auch im Rahmen von Komponententests nach CISPR 25 Rechnung getragen werden.

Beim EMV-Komponententest wird der Prüfling über ein Stück des originalen Kabelbaums mit einer Lastnachbildung verbunden. Der Messaufbau nach CISPR 25, wie er in Abbildung 1 zu sehen ist, lässt viele Spielräume offen, weshalb eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Messaufbauten notwendig ist, um eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Prüfungen sicherzustellen.



Fig. 1: Messaufbau mit 15 Busleitungen
Measurement setup with 15 bus lines

Abbildung 1 zeigt einen solchen Messaufbau mit 15 Busleitungen. Auf der linken Seite sind die Lastnachbildungen zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Aufspaltung des Kabelbaums nur schwer eine definierte Leitungsverlegung zulässt, wodurch eine reproduzierbare Messung nur schwer zu erreichen ist.

In Abbildung 2 ist eine Messung der Feldstärke dargestellt, bei der ein Messaufbau mit einer Leitung einem Aufbau mit 15 Leitungen gegenübergestellt ist. Es ist zu sehen, dass ein großer Kabelbaum zu einer Vielzahl an kleinen Resonanzen führt, die sich fast wie ein Rauschen auf die Messung legen.

■ CISPR 25 component level test with complex wiring harnesses

M. Sc. Jan Schabel

The general complexity of electronic control units (ECUs) in vehicles will increase significantly within the next years: Due to the high safety requirements in both, autonomous cars and electromobility, the number of sensors and actuators built into the vehicle will increase, leading to higher requirements for electronic control units, too. In order to ensure both, reliable and reproducible component level tests, the soaring complexity of the measurement setup needs to be incorporated into CISPR 25.

For an EMC component test, the device under test is connected with a load simulation via a piece of the original wiring harness. The measuring setup according to CISPR 25, as seen in Figure 1, leaves much room for variations. This is, why it is necessary to investigate the influence of different measurement setups in order to ensure reproducibility.

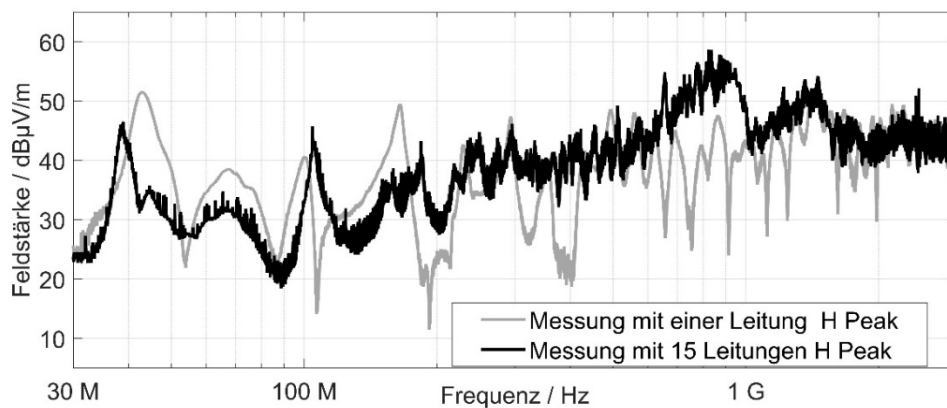


Fig. 2: Gestrahlte Emissionen des Messaufbaus mit einer Leitung im Vergleich zu 15 Leitungen
Radiated emissions of the measurement setup with one line compared to 15 lines

Fig. 1 shows such a measurement setup with 15 bus lines. The load simulators are shown on the left side. It can be seen, that the splicing of the cable harness makes it difficult to define the routing of the cables, which makes it difficult to achieve reproducible measurements.

Fig. 2 shows a measurement of the field strength in which a measurement setup with one cable is compared with a setup with 15 cables. It can be seen that a large cable harness leads to a large number of small resonances, which are almost like noise on the measurement.

■ EMV von induktiven Kfz-Ladesystemen

M. Sc. Emir Sulejmani

Die zentralen Herausforderungen beim kontaktlosen Laden von Elektrofahrzeugen liegen in der Überwindung des fahrzeugabhängigen Luftspaltes und der parkbedingten Positionstoleranz. Die daraus resultierende geringe und positionsabhängige magnetische Kopplung zwischen den Spulen führt dazu, dass deutlich mehr Blindleistung in das System eingespeist werden muss. Darüber hinaus entstehen beim induktiven Laden hohe magnetische Feldstärken, die zu Problemen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) führen.

Neben dem Magnetfeld im vorgesehenen Betriebsbereich zwischen 79 – 90 kHz treten weitere Störaussendungen durch Streufelder auf. Diese Felder tragen nicht zur Energieübertragung bei. Stattdessen kann das Streufeld unerwünschte elektrische und magnetische Felder sowie elektromagnetische Störungen verursachen. Der Wechselrichter erzeugt aufgrund der hohen Schaltfrequenz signifikante Störströme. Dazu gehören sowohl der Gegentakt- (DM) als auch der Gleichtaktstrom (CM), die beide erhebliche zeitlich veränderliche Magnetfelder in der Umgebung erzeugen können. Die Untersuchung dieser Störströme ist daher ein wichtiger Aspekt bei der EMV-Charakterisierung von induktiven Kfz-Ladesystemen.

Erste Untersuchungen dieser leitungs- und feldgebundenen Störaussendungen wurden am Beispiel eines am Institut zur Verfügung stehenden WPT-Systems (Wireless Power Transfer) durchgeführt. Dieses kann eine maximale Übertragungsleistung von 3,6 kW bereitstellen und wurde nach dem Normvorschlag der SAE J2954 aufgebaut. Fig. 1 zeigt das abgestrahlte Magnetfeld in einem Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 30 MHz in x- und in y-Richtung. Die aktuellen Grenzwerte stehen derzeit noch in Diskussion. Fig. 2 zeigt den standardisierten Prüfaufbau für leitungs- und feldgebundene Emissionsmessungen.

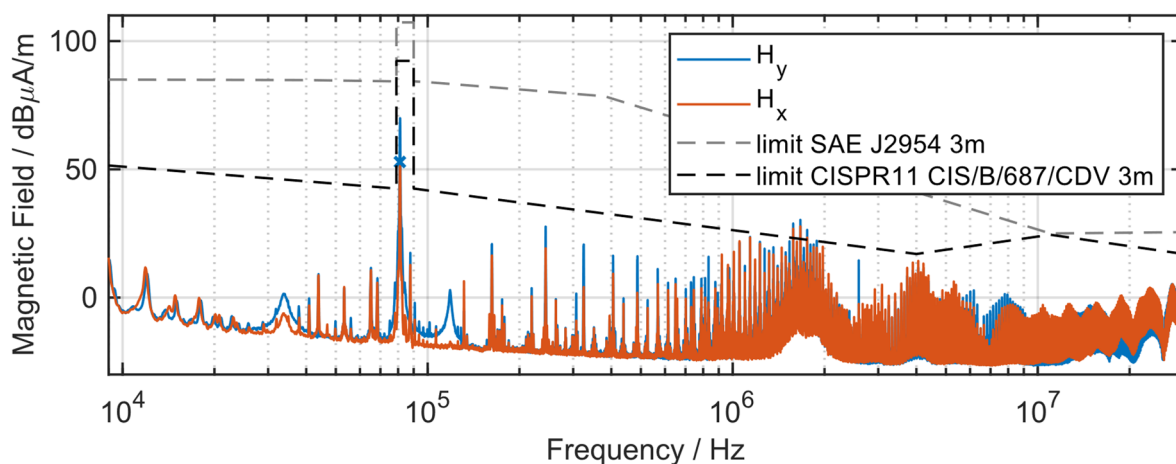


Fig. 1: Magnetfeldmessung in 3 m Abstand zum WPT-System (QP-Detector, 200 Hz).
Magnetic field measurement at a distance of 3 m from the WPT system.

■ EMC of inductive automotive charging systems

M. Sc. Emir Sulejmani

The main challenges in contactless charging of electric vehicles are overcoming the vehicle-dependent air gap and the parking-related position tolerance. The resulting low and position-dependent magnetic coupling between the coils results in significantly more reactive power having to be fed into the system. In addition, inductive charging generates high magnetic field strengths, which lead to problems with regard to electromagnetic compatibility (EMC).

In addition to the magnetic field in the intended operating range between 79 - 90 kHz, further interference emissions occur due to stray fields. These fields do not contribute to energy transmission. Instead, the stray field can cause unwanted electric and magnetic fields as well as electromagnetic interference. The inverter generates significant interference currents due to the high switching frequency. These include both the differential-mode (DM) and the common-mode current (CM), both of which can generate significant time-varying magnetic fields in the environment. The investigation of these interference currents is therefore an important aspect in the EMC characterization of inductive vehicle charging systems.

Initial investigations of these line- and field-bound interference emissions were carried out using the example of a WPT system (Wireless Power Transfer) available at the institute. It can provide a maximum transmission power of 3.6 kW and was constructed in accordance with the SAE J2954 standard. Fig. 1 shows the radiated magnetic field in a frequency range between 9 kHz and 30 MHz in the x and y directions. The current limit values are still under discussion. Fig. 2 shows the standardized test setup for conducted and field-bound emission measurements.

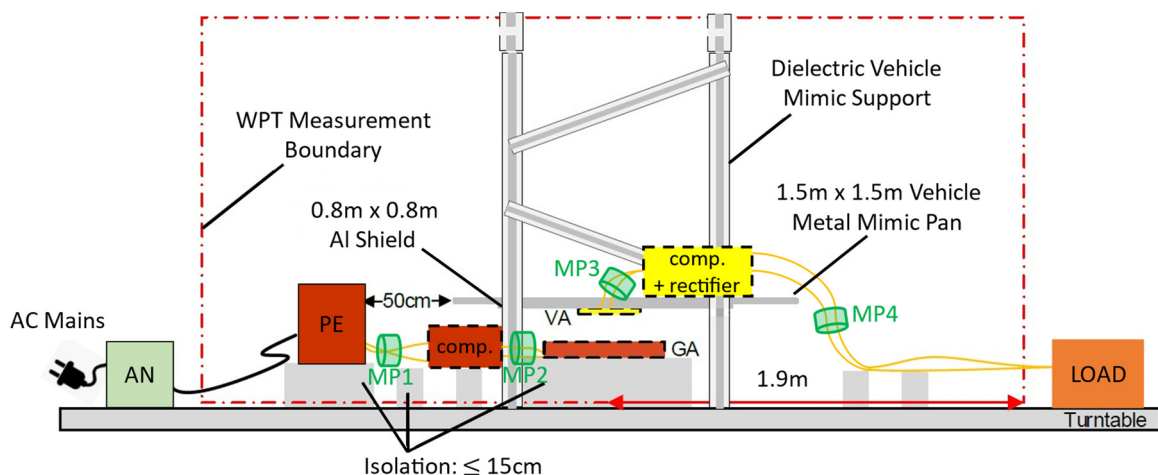


Fig. 2: Empfohlener Prüfaufbau für gestrahlte Emissionen gemäß SAE J2954.
Recommended test setup for radiated emissions according to SAE J2954.

Systembetrachtung der EMV beim konduktiven Ladevorgang von Elektrofahrzeugen

M. Sc. Inti Runa Supa Stölben

Das elektrische Antriebssystem von Elektrofahrzeugen (EVs) besteht unter anderem aus dem Elektromotor, Wechselrichter, On-Board-Ladegerät, Gleichstromwandler und der Traktionsbatterie (siehe Fig. 1). Während des konduktiven Ladevorgangs stellt dieses System aufgrund der schnell schaltenden Leistungselektronik eine hochfrequente Emissionsquelle dar, die negative Auswirkungen auf Komponenten des Elektrofahrzeugs selbst (im Sinne der klassischen Kfz-EMV) haben kann, aber auch kritische Wechselwirkungen mit externen Geräten, die am gleichen Stromnetz angeschlossen sind (im Sinne der Netzqualität, PQ), verursachen kann. Daher sind EMV-Untersuchungen der leitungsgebundenen Störaussendung und der Störfestigkeit während des Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen erforderlich.

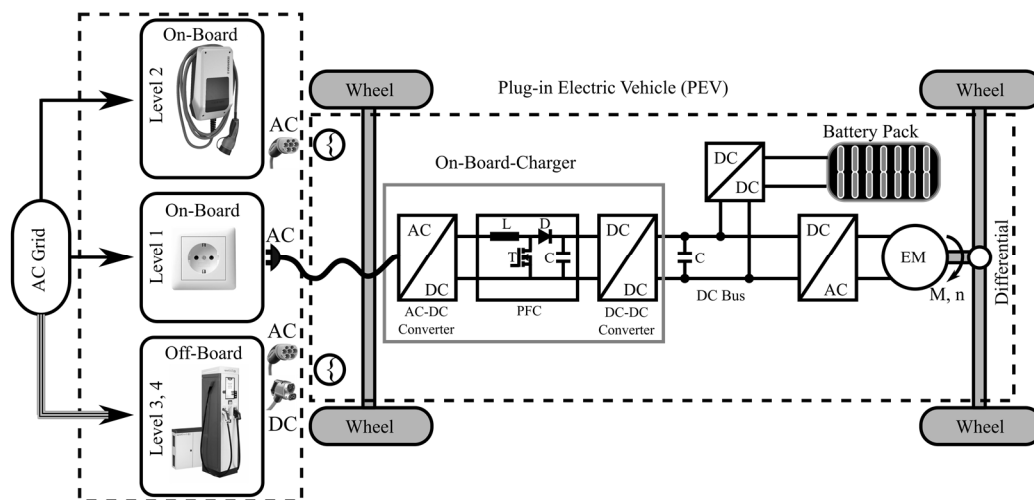


Fig. 1: Konduktive Lade-Infrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge.
Conductive charging infrastructure for battery electric vehicles.

In diesem Forschungsprojekt werden die äußeren Einflüsse wie Länge des Ladekabels, Anbindung der Fahrzeugkarosserie sowie die Ladeleistung auf das EMV-Verhalten von EVs im gekoppelten Ladebetrieb systematisch untersucht. Fig. 2 zeigt das Ersatzschaltbild für das Laden mit Wechselstrom (AC) im Mode 2. Bei diesem Ladebetrieb ist der Laderegler in das Ladekabel integriert und für die Kommunikation mit dem Fahrzeug verantwortlich. Das Fahrzeug fährt über eine leitende Massefläche (GND), wodurch sich eine parasitäre Kapazität C_{GND-EV} von etwa 800 pF bildet. Zur Messung der Störspannungen wird eine AC-Netznachbildung (LISN) verwendet. Zusätzlich werden Störstrommessungen mit einer Stromzange (HF-Stromwandler) und Impedanzmessungen mit einem Impedanzanalysator durchgeführt.

System Consideration of EMC in the Conductive Charging Process of Electric Vehicles

M. Sc. Inti Runa Supa Stölben

The electric drive system of an electric vehicle (EV) consists of an electric motor, inverter, on-board charger, DC/DC converter and traction battery (see Figure 1). During conductive charging, this system represents a high-frequency emission source due to the fast-switching power electronics, which can have negative effects on components of the electric vehicle itself (in terms of classical automotive EMC), but can also cause critical interactions with external devices connected to the same power grid (in terms of power quality, PQ). Therefore, EMC studies of conducted emissions and immunity during electric vehicle charging are required.

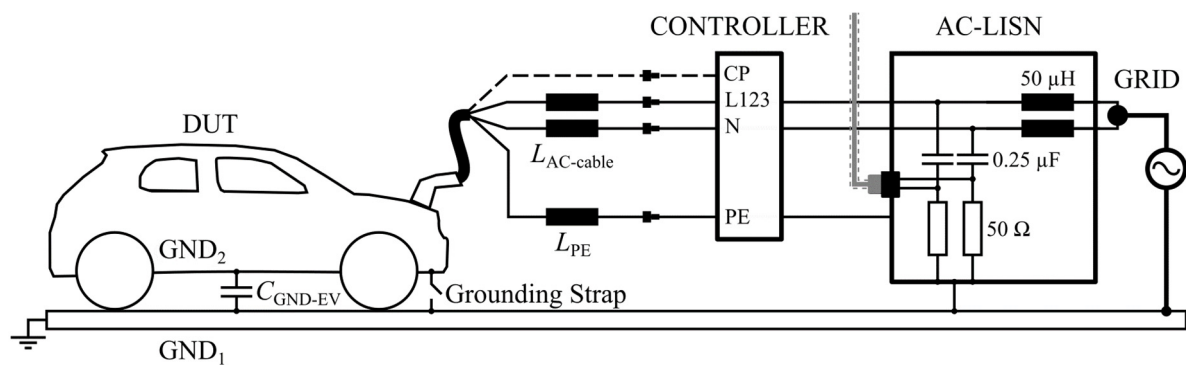


Fig. 2: Schematischer Aufbau für Störspannungsmessungen an realen Fahrzeugen beim AC-laden (Mode 2).

Schematic setup for interference voltage measurements on real vehicles during AC-Charging (mode 2).

In this research project, the external influences such as the length of the charging cable, the connection to the vehicle body and the charging power on the EMC behavior of EVs in coupled charging mode are systematically investigated. Figure 2 shows the equivalent circuit diagram for AC charging in mode 2. In this charging mode, the charge controller is integrated into the charging cable and is responsible for communication with the vehicle. The vehicle travels over a conductive ground plane (GND), creating a parasitic capacitance C_{GND-EV} of approximately 800 pF. An AC Line Impedance Stabilisation Network (LISN) is used to measure the noise voltages. In addition, interference current measurements are made with a current clamp (RF current transformer) and impedance measurements are made with an impedance analyzer.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

Die folgenden Beiträge können unter www.ieh.uni-stuttgart.de abgerufen werden.

S. Tenbohlen, C.P. Beura, W. Sikorski, R. Albarracín Sánchez, B. A. de Castro, M. Beltle, M., P. Fehlmann, M. Judd, F. Werner, M. Siegel
Frequency Range of UHF PD Measurements in Power Transformers.
Energies 2023, 16, 1395, <https://doi.org/10.3390/en16031395>.

M. Tahir, S. Tenbohlen
Transformer Winding Fault Classification and Condition Assessment Based on Random Forest Using FRA.
Energies 2023, 16, 3714, <https://doi.org/10.3390/en16093714>.

Y. Yang, S. Shen, F. Zhang, S. Ji, C. Ekanayake, T. K. Saha, S. Tenbohlen, P. Jarman, Z. Wang
A review of transformer FRA measurement and diagnosis techniques.
Transformer Magazin. Vol. 10, Issue 2, pp. 96-109, 2023.

D. Pfleger, C. Wagner, R. Schulz, K. Rudion
Elektrifizierung des Stückgutverkehrs – Vorgehensweise zur virtuellen Elektrifizierung in einer Großstadt.
Tagungsband zum 15. Wissenschaftsforum Mobilität in Duisburg, "Towards the New Normal in Mobility" (H. Proff). Springer Fachmedien Wiesbaden. May 11, 2023.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-39438-7>.

M. Miller, K. Rudion, H. Nägele, A. Großhans
Optimale Planung von Verteilnetzen bei Anwendung von dynamischen Strombelastbarkeiten von Kabeln und Transformatoren.
ETG Kongress 2023, 25.-26. Mai 2023, Kassel, S. 240-247.

P. Burkhardt, K. Rudion, A. Frank
Blindleistungssteuerung von dezentralen Erzeugungsanlagen zur Verlustreduktion in 110 kV-Netzen mittels linearer Optimierung.
ETG Kongress 2023, 25.-26. Mai 2023, Kassel, S. 267-272.

K. Walz, K. Rudion
Zeitreihenbasierte Modellierung des Ladebedarfs batterie-elektrischer Lkw für die probabilistische Netzplanung.
ETG Kongress 2023, 25.-26. Mai 2023, Kassel, S. 969-976.

D. Deepak, K. Rudion, C. John, H. Abele

Investigation of the Short-Circuit Power Significance in Converterbased Power Systems.

ETG Kongress 2023, 25.-26. May 2023, Kassel, Germany, S. 1-8.

P. Burkhardt, K. Rudion, A. Frank, A. Probst

Evaluation of Transit Power Flows in High Voltage Distribution Grids using Fuzzy Logic.

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, June 12-15, 2023.

Müller, S., Rudion, K., Frankenbach, M.A., Exner, C.: *Evaluation of Quota-Based Predictive Congestion Management in Active Distribution Networks.*

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, June 12-15, 2023.

C. Wagner, K. Walz, K. Rudion, D. Burghof, I. Mauser

Vehicle-to-home or battery energy storage systems - a comparison of the potential usage in smart homes.

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, June 12-15, 2023, pp. 1204-1208, doi: 10.1049/icp.2023.0679.

K. Kratz; S. Müller; K. Rudion; C. Körner

Investigation of grid-serving flexibility provision by electric vehicles in a distribution grid.

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, June 12-15, 2023, p. 1513 – 1517.

D. Deepak, M. Buchner, K. Rudion, C. John, H. Abele

Short-circuit currents characterization for future converter-based power systems.

27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, June 12-15, 2023, Paper No. 10824, S.2175-2179.

R. Berkemeier, R. Bach, S. Tenbohlen

Partial discharge detection and 3d-Localization at 110-kV-cable terminations using UHF-Sensors.

The 11th Leading International Conference and Exhibition on Insulated Power Cables, JiCable, Lyon, France, June 18 – June 22, 2023.

M. Fischer, M. Beltle, S. Tenbohlen, D. Gentsch, W. Ebbinghaus

Influence of Switching Contact Materials with Superimposed Axial Magnetic Field on the Vacuum Arc's Chopping Behavior

30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Okinawa, Japan, June 25th-30th, 2023, pp. 177-180.

L. Baronat, M. Beltle, S. Tenbohlen, U. Riechert

Measurement System for Surface Potentials in Realistic HVDC-GIS Environments.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023, Glasgow, UK, pp. 658-662.

C. P. Beura, P. Wenger, E. Tozan, M. Beltle and S. Tenbohlen

Localization of Partial Discharge Sources in Power Transformers using Neural Networks.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

M. Gerber, M. Sauter, S. Tenbohlen

Investigation of the Influence of Solar Radiation on the Thermal Modeling of Power Transformers.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

F. L. Probst, M. Beltle, M. Gerber, S. Tenbohlen, K. A. Alsdorf

Using capacitive electric field sensors to measure transient overvoltages: a case study.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

Ch. He, M. Beltle, S. Tenbohlen, J. Bux

Improvement of a Loop Antenna for Partial Discharge Measurement of Inverter-fed Hairpin Motors.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

L. Ranzinger, S. Uhrig, S. Tenbohlen, T. Rieder

Detecting Ground Faults in Synchronous Machines using Sweep-Frequency-Response-Analysis (SFRA).

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

L. Ranzinger, S. Uhrig, S. Tenbohlen

Recommendations for the use of the Sweep-Frequency-Response-Analysis method for fault diagnosis on rotating machines.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

R. Berkemeier, R. Bach, S. Tenbohlen

3D-Localization of Partial Discharge in XLPE-Cable-Terminations using UHF-Sensors.

25th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), August 28–September 01, 2023 Glasgow, UK.

M. Gruber, M. Beltle, S. Tenbohlen

Measurement and Simulation of the Shielding Effectiveness of Planar Material with Apertures using a ASTM D4935 TEM Cell.

2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, September 4-8, 2023,

Doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274278.

I. R. Supa Stölben, M. Beltle, S. Tenbohlen, R. Eidher, K. Spanos, V. Rischmüller
Influences of Ground Connection and Cable Length on the EMC behavior of Electric Vehicles during Conductive Charging Operations.

2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, September 4-8, 2023, pp. 1-4.

N. Fischer, K. Rudion

Forecasting the Flexibility Potential of Electric Vehicles Limited by Individual Charging Targets.

2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Grenoble, France, October 23-26, 2023.

E. Sulejmani, M. Beltle, S. Tenbohlen

EMC of Inductive Automotive Charging Systems According to Standard SAE J2954.

Vehicles 2023, Vol. 5, Issue 4, October 2023, pp. 1532-1552.

DOI: 10.3390/vehicles5040083.

F. L. Probst, M. Beltle, M. Gerber, S. Tenbohlen, K. A. Alsdorf

Measurement of switching transient overvoltages with a capacitive electric field sensor.

Electric Power Systems Research, Volume 223, October 2023, 109619, ISSN 0378-7796, DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109619.

F. L. Probst, M. V. F. da Luz, S. Tenbohlen

Modeling of a capacitive voltage transformer for evaluation of transient response in conformity with the IEC 61869-5 Standard.

Electric Power Systems Research, Volume 223, October 2023, 109591, ISSN 0378-7796, DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109591.

S. Tenbohlen, Z. Hanif, D. Martin

Analysis of Major Failures of Power Transformers.

Cigre SC A2 & 6th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", ICTRAM, Split, Croatia, November 2023.

S. Tenbohlen, C. P. Beura, W. Sikorski, R. Albarracín Sánchez, B. Albuquerque de Castro, M. Beltle, P. Fehlmann, M. Judd, F. Werner und M. Siegel

HF Emission Spectra of Partial Discharges in Power Transformers.

Cigre SC A2 & 6th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", ICTRAM, Split, Croatia, November 2023.

M. Siegel, C. Kattmann, C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen

HF Emission Spectra of Partial Discharges in Power Transformers.

Cigre SC A2 & 6th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", ICTRAM, Split, Croatia, November 2023.

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

30.1.23	CIREF Flexibility WG Teilnehmer: Prof. K. Rudion
30.1.23	CIGRE DAK Workshop Teilnehmer: Prof. K. Rudion
09.2.23	SmartGridsBW Teilnehmer: Prof. K. Rudion
27.2.-5.3.23	India Smart Utility Week ISUW 2023, Neu Delhi, Indien Teilnehmer/Beitrag: Prof. S. Tenbohlen
8.-9.3.23	Omexom Technikforum, Darmstadt Teilnehmende/Beitrag: Prof. S. Tenbohlen, M. Miller, M. Gerber, M. Gruber, M. Beltle, K. Walz, S. Müller, K. Kratz, S. Köbel, N. Fischer, P. Burkhardt
14.03.23	Sitzung International Steering Committee des ISH, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
23.3.23	SmartGridsBW Teilnehmer: Prof. K. Rudion
27.3.23	CIGRE DAK SC 6 Teilnehmer: Prof. K. Rudion
27.-28.3.23	Technischer Beirat Omexom, Mannheim Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
30.3.23	Volta-X Messe Teilnehmende: Prof. K. Rudion, N. Fischer, K. Walz, C. Wagner, P. Burkhardt
20.4.23	AKR Jury Sitzung Teilnehmer: Prof. K. Rudion
25.04.23	DAK A2 CIGRE Sitzung, Regensburg Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
26.04.23	CIGRE A2.60 WG Meeting, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
2.-3.5.23	Sitzung des DKE/K 124, Dresden Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
4.-5.5.23	Highvolt Kolloquium, Dresden Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
09.5.23	SmartGridsBW Teilnehmer: Prof. K. Rudion
16.5.23	Energiekongress energie.geladen Teilnehmerin: C. Wagner

- 25.-26.5.23 ETG Kongress „Die Energiewende beschleunigen“, Kassel
Teilnehmende/Beiträge: Prof. K. Rudion, M. Miller, K. Walz,
D. Deepak, P. Burkhardt
- 11.-15.6.23 IPST 2023, International Conference on Power Systems Transients,
Thessaloniki, Greece
Teilnehmer/Beiträge: F. L. Probst
- 12.-15.6.23 CIREN 2023: International Conference & Exhibition on Electricity
Distribution, Rome, Italy
Teilnehmende/Beiträge: Prof. K. Rudion, D. Deepak, P. Burkhardt,
C. Wagner, K. Kratz, S. Müller
- 14.6.23 CIREN Flexibility WG
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, S. Müller
- 22.06.23 ETG Q2 Treffen, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 25.-30.6.23 30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation
in Vacuum (ISDEIV), Okinawa, Japan
Teilnehmer/Beitrag: M. Fischer
- 28.06.23 A2 Study Committee Workshop, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.07.23 CIGRE DAK D1, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.7.23 Umweltabend - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
Baden-Württemberg
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 25.7.23 SmartGridsBW
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 28.8.-1.9.23 ISH 2023, 25th International Symposium on High Voltage
Engineering, Glasgow, Scotland, UK
Teilnehmende/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, L. Baronat, C. Beura,
M. Gerber, C. He, F. L. Probst
- 4.-8.9.23 EMC Europe, 2023 International Symposium on Electromagnetic
Compatibility, Krakow, Poland
Teilnehmerin/Beiträge: M. Gruber
- 07.09.23 VDE Gremium UK 222.1, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 14.9.23 Smart Grids Gespräche
Teilnehmer/Beitrag: Prof. K. Rudion
- 15.9.23 Netzausbaugipfel 2023
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 21.9.23 Energiewende – Flexibilität im Stromnetz, München, 2023
Teilnehmer/Beitrag: M. Gerber

- 09.-10.10.23 Cigre/Cired Informationsveranstaltung, Universität Stuttgart
Teilnehmende: Prof. S. Tenbohlen, Prof. K. Rudion, M. Miller, M. Beltle, J. Bux, P. Burkhardt, S. Müller, J. Beck, N. Fischer, K. Walz, C. Wagner, M. Gruber, H. Wissel, S. Köbel, D. Deepak, I. R. Supa Stölben
- 10.10.23 CIGRE/CIRED Info Veranstaltung
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 23.-26.10.23 ISGT Europe 2023 Konferenz, Grenoble, Frankreich
Teilnehmerin/Beitrag: N. Fischer
- 24.10.23 CIGRE AG D1.01 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 26.10.23 ETG Q2 High Voltage goes Green, Berlin
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 27.10.23 SmartGridsBW
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 13.11.23 CIGRE WG A2.62 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 13.11.23 CIGRE DAK C6
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 14.-15.11.23 Seminar an der TAE „Grundlagen der Hochspannungstechnik“
Technische Akademie Esslingen Ostfildern
Leitung: Prof. S. Tenbohlen
- 15.-17.11.23 IEEE PESS Power and Energy Student Summit 2023
Teilnehmende/Beitrag: N. Fischer, J. Beck
- 20.-21.11.23 Technischer Beirat Omexom Deutschland, Kamp-Lintfort
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 23.11.23 DAK CIGRE SC C4, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 23.11.23 ISGAN, Development of Digital Twin
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 28.11.23 CIGRE A2 Annual Study Committee Meeting, Split, Kroatien
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 06.12.23 11. Smart Grids Kongress, Fellbach
Teilnehmende: Prof. K. Rudion, C. Wagner
- 07.12.23 UTRA Annual Conference, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

8. PRÜFEINRICHTUNGEN

Stoßspannungsanlagen	bis 1,6 MV, 64 kJ bis 1,0 MV, 50 kJ bis 400 kV, 20 kJ
Schwingende Blitzstoßspannung	bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ
Wechselspannungskaskade	2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung
Wechselspannungsanlage	350 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz
Gleichspannungsanlage	bis 600 kV, 10 mA mit Teilentladungsmessplatz
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluft- antenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m ³ (B x L x H)
Spannungsteiler	gedämpft kapazitive Spannungsteiler bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)
E/H-Feldmesssysteme	mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 500 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)
EMV-Prüf- und Messgeräte	diverse ESD-Pistolen, LV- und HV- Bordnetz- nachbildungen (LISN) für nach CISPR 25 / automotive und nach CISPR 16. BCI-Zangen, Koppelzangen nach IEC 61000-4, Multifunktionsgeneratoren für Burst, Surge nach IEC 61000-4, versch. vektorielle Netzwerk- analysatoren, Breitbandmessempfänger 10 Hz-6 GHz. versch. Signalgeneratoren 9 kHz-6 GHz. Diverse Os- zilloskope bis 3 GHz.
EMV-Absorberräume	10 m und 3 m Messabstand, mit Leistungsverstärkern, Monopole, Bikonische, UltraLog- und Hornantennen für 9 kHz bis 5GHz, Videoüberwachung über LWL für Stör- festigkeit, TEM-Messzellen
Klimakammer	3 x 3 x 3 m ³ , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C
Einpolige SF ₆ -Anlage	U _n = 525 kV, max. Länge mit Abzweigen ca. 25 m
Einpolige SF ₆ -Anlage	U _n = 245 kV, max. Länge mit Abzweigen ca. 5 m
Teilentladungsmessgeräte	für elektrische TE-Messungen nach IEC 60270. UHF-Messsysteme (300 MHz-3 GHz), akustische Or- tungssysteme. Die Systeme unterstützen verschiedene Analyseverfahren.
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlag- spannungsmessgerät, Gaschromatographen (Vaku- umentgasung- und Headspace), Ölaufbereitungs- anlagen für Mineralöl und Bioester

Power Quality Analyzer

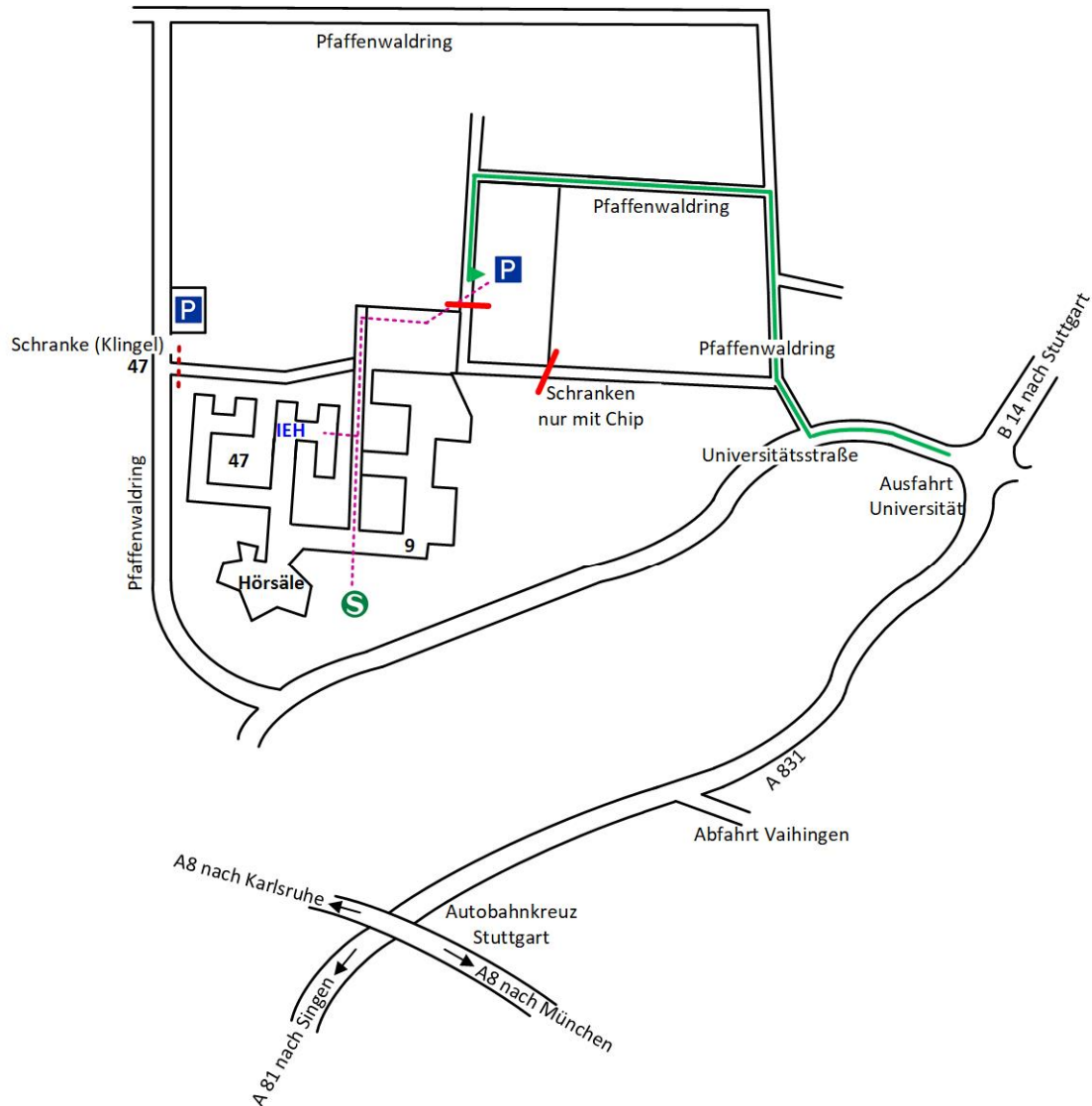
dreiphasige Strom- und Spannungsmessung bis zur 3000. Harmonischen (150 kHz), kontinuierliche Transientenerkennung mit 500 kS/s, Visualisierung auf Webseite

HiL-Simulator:

Hardware-in-the-Loop-Simulationen von elektrischen Energienetzen mit Einbindung von digitaler Kommunikation und Schutztechnik

9. LAGEPLÄNE

Lageplan
des Institutsteils Stuttgart-Vaihingen
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Telefon: +49 (0)711 685-67870

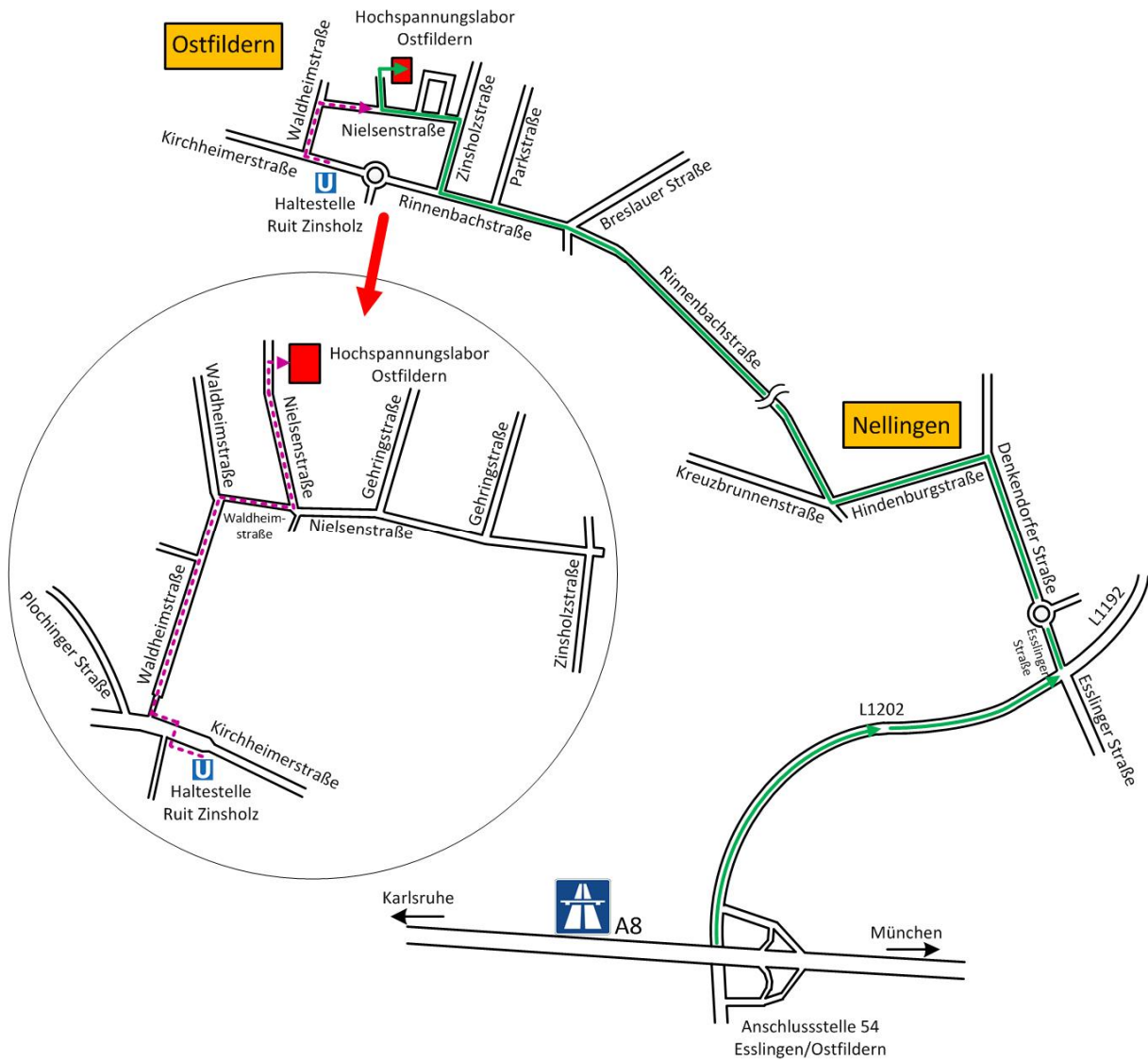


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

S-Bahnen der Linien S1, S2 und S3

Haltestelle „Universität“, Ausgang „Universitätszentrum“

Lageplan
des Institutsteils Ostfildern (Hochspannungslabor), Nielsenstr. 18, 73760 Ostfildern,
Telefon: +49 (0)711 685-69175 ; +49 (0) 711 3412075



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

Stadtbahnlinien U7 und U8
Haltestelle „Ruit Zinsholz“
(ab Stuttgart Hbf 20 Minuten Fahrzeit)