

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	17
4.	PROMOTIONEN	34
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	48
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK.....	52
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS.....	78
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	110
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,

um die Tür Richtung Klimaneutralität zu öffnen, hat Wirtschaftsminister Habeck mit seinem „Osterpaket“ die längst überfälligen Zielvorgaben zum Ausbau der Erneuerbaren Energien formuliert. Dazu soll in den nächsten Jahren der jährliche Zubau von Windenergie- und PV-Anlagen um das etwa Fünffache gegenüber heute gesteigert werden. Hier stellt sich natürlich die Frage, wie die Umsetzung des Pakets vor dem Hintergrund des sich verschärfenden Personal- und Materialmangels gelingen kann. Die Anzahl der Studierenden im Bereich der Energietechnik stagniert nicht nur an unserer Universität sondern flächendeckend in ganz Deutschland, die Unternehmen schaffen es teilweise nicht einmal die in den nächsten Jahren verstärkt in den Ruhestand gehenden Mitarbeiter zu ersetzen. Den wahren Ernst der Lage haben Politik und Industrie noch nicht erkannt. Es fehlen groß angelegte Werbekampagnen und Stipendienprogramme. Wir haben diverse Maßnahmen, wie Schulbesuche, Vorträge von ehemaligen Absolventen und Informationsveranstaltungen in die Wege geleitet, um für unsere Studiengänge zu werben. Allerdings stellt sich trotz der sehr guten Berufsaussichten und der Medienpräsenz des Themas Klimaschutz ein leider nur mäßiger Erfolg ein.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir aber auf ein gelungenes Jahr zurückblicken. Es wurden 31 wissenschaftliche Publikationen in Konferenzbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht, die unsere Forschungsaktivitäten eindrucksvoll dokumentieren. Auch in diesem Jahr können wir fünf Kollegen zur erfolgreichen Dissertation gratulieren. Ouafa Laribi, Tim Streubel, Stefanie Hägele, Christoph Kattmann und Denis Müller brachten ihre Promotionen zum erfolgreichen Abschluss. Dr. Denis Müller erhielt den Preis für herausragende Dissertationen von der Dr. Wilhelmy-Stiftung für seine Dissertation. Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) hat Prof. Tenbohlen zum IEEE Fellow ernannt, mit der dazugehörigen Ehrung: "for contributions to leadership in power transformer reliability". Der IEEE Fellow ist eine der prestigeträchtigsten Auszeichnungen des IEEE und wird einer sehr begrenzten Anzahl von Senior-Mitgliedern verliehen, die einen wichtigen Beitrag zum Fortschritt oder zur Anwendung von Technik, Wissenschaft und Technologie geleistet haben.

Wir haben einige unserer Projekte erfolgreich zu Ende führen können. Dabei wurden zwei Projekte, ILA-BW und Retrans, die durch das Umweltministerium Baden-Württemberg gefördert wurden, abgeschlossen. Wir können eine sehr positive Bilanz nach Abschluss dieser Projekte ziehen und bedanken uns bei dem Fördergeber sowie Projektpartnern für eine hervorragende Unterstützung. Gleichzeitig haben wir drei neue Projekte gestartet: Park4Flex, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; TruckConnect, gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr sowie REALIST, gefördert durch die Stadt Stuttgart im Rahmen des Klima-Innovationsfonds. Darüber hinaus ist uns gelungen, mit einem

Multidisziplinären Partnerverbund die Förderung der Carl-Zeiss-Stiftung für das Projekt DiTeNS im Rahmen des Förderprogramms „CZS-Durchbrüche“ zu gewinnen.

Das Jahr 2022 brachte auch viele personelle Veränderungen am Institut. Unsere erfahrenen Mitarbeiter Adrian Eisenmann, Philipp Wenger, Heiner Früh, Tim Streubel, Matthias Buchner, Manuel Haug und Jonas Bertelmann haben das Institut verlassen. Neu in unserem Team der wissenschaftlichen MitarbeiterInnen begrüßen wir Felipe Probst, Nelly-Lee Fischer, Charlotte Wagner und Kevin Kratz. Leider zeigt auch bei uns der Rückgang der Absolventenzahlen Wirkung. So können wir momentan leider einige wissenschaftliche Stellen nicht besetzen. Nach nun 36 Jahren erfolgreichen und nachhaltigen Wirkens am Institut verabschiedeten wir schweren Herzens Dr. Ulrich Schärli in den wohlverdienten Vorruhestand. Dies ist sicherlich eine große Zäsur in der Leitung des Instituts. Mit seiner Organisationsgabe hat er den administrativen Bereich vorbildlich geführt und war dadurch uns immer eine außerordentliche Unterstützung. Für die gemeinsame Zeit und das Erreichte möchten wir uns bei ihm herzlich bedanken. Erfreulicherweise konnten wir diese Lücke mit Herrn M. Sc. Markus Miller schließen. Wir wünschen allen ehemaligen IEHlerInnen alles Gute und viel Erfolg bei ihren neuen Beschäftigungen und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit unseren neuen und alten MitarbeiterInnen.

Leider mussten wir dieses Jahr den Tod von zwei sehr verdienten Ehemaligen beklagen. Prof. Dr. Heinz A. Maier verstarb am 9.4.2022. Er hat am Institut im Bereich der elektrischen Energienetze geforscht und gelehrt. Prof. Dr. Peter Heidinger verstarb am 3.5.2022. Er war lange Jahre in unserem Institut als Honorarprofessor aktiv. Die Nachricht von ihrem Ableben traf uns alle schmerzlich.

Allen FreundInnen und KooperationspartnerInnen 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 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 FreundInnen 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.

Für das Jahr 2023 wünschen wir Ihnen Glück, alles Gute und vor allem Gesundheit.

Stuttgart, im Februar 2023

PREFACE

Dear friends!

In order to expedite and consistently drive forward the expansion of renewable energy sources, the Federal Minister for Economic Affairs and Climate Protection Robert Habeck has adopted the so-called Easter Package. It was high time for such clear targets. To this end, the annual new-build of wind energy installations and photovoltaic sites need to expand substantially, compared to today by about five times in the next few years. This naturally raises the question of how the package can be successfully implemented in the light of the increasing shortage of staff and materials. The number of students in the field of energy technology is stagnating, not only at our university but throughout Germany, and some companies are not even managing to replace the employees who will increasingly retire in the next few years. Politics and industry have not yet recognized the seriousness of the situation. There is a lack of large-scale advertising campaigns and scholarship programs. We have initiated various measures, such as school visits, lectures by former graduates and information events, to promote our degree programs. However, despite the very good career prospects and the media presence of the topic of climate protection, the success is unfortunately only moderate.

In scientific terms, however, we can look back on a successful year. 31 scientific publications were published in conference proceedings and journals, which impressively document our research activities. Also this year, we can congratulate five colleagues on achieving the doctorate degree. Ouafa Laribi, Tim Streubel, Stefanie Hägele, Christoph Kattmann and Denis Müller have successfully completed their doctorates. Dr. Denis Müller received the Outstanding Dissertation Award from the Dr. Wilhelmy Foundation for his dissertation. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), the world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity, has named Prof. Tenbohlen an IEEE Fellow, with the accompanying honor: "for contributions to leadership in power transformer reliability." IEEE Fellow is one of the IEEE's most prestigious awards and is reserved to a very limited number of senior members who have made significant contributions to the advancement or application of engineering, science and technology.

We were able to successfully complete some of our projects as for example two projects, which were funded by the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg, ILA-BW and Retrans. 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 three new projects: Park4Flex, funded by the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action; TruckConnect, funded by the Federal Ministry for Digital and Transport; and REALIST, funded by the City of Stuttgart as part of the Stuttgart's Climate Innovation Fund. With an interdisciplinary research team we also succeeded in receiving a funding for the "Discursive Transformation of Energy Systems" (DiTeNS) project funded by the Carl Zeiss Foundation (CZS) as part of the "CZS Breakthroughs – Energy Systems of the

Future" program. During the year 2022, there were several personnel changes. Our experienced staff members Adrian Eisenmann, Philipp Wenger, Heiner Früh, Tim Streubel, Matthias Buchner, Manuel Haug und Jonas Bertelmann have left the Institute. In return, we welcome Felipe Probst, Nelly-Lee Fischer, Charlotte Wagner und Kevin Kratz to our scientific team. Unfortunately, the decline in the number of graduates is also having an effect on us, so that we are currently unable to fill all open scientific positions. After 36 years of successful work and exceptional dedication to our Institute, Dr. Ulrich Schärli entered in his well-deserved early retirement. With a heavy heart we said goodbye to him as this is certainly a big break in the management of our Institute. With his talent for organization, he led the administrative area in an exemplary manner and was always an extraordinary support to us. We would like to thank him sincerely for the great work relationship we have enjoyed over the past years and for what we have achieved together. The gap that Dr. Schärli will leave behind could fortunately been filled. M. Sc. Markus Miller has taken over his duties. We wish the former colleagues all the best in their future employment and look forward to working with our new and current team members.

Unfortunately, this year we had to mourn the death of two very deserving alumni. Prof. Dr. Heinz A. Maier died on April 9, 2022. He researched and taught at the institute in the field of electrical energy networks. Prof. Dr. Peter Heidinger passed away on May 3, 2022. For many years he was active in our institute as an honorary professor. The news of their passing saddened us all.

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 of Economic Affairs and Energy, the Ministry of Environment, Climate, Industry and Energy of 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 annual report.

Our best wishes accompany you in 2023. May the New Year bring you good health, happiness and success.

Stuttgart, February 2023

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:

Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI (bis 28.02.2022)

M. Sc. Markus MILLER (ab 01.03.2022) -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. Jonas BERTELMANN (bis 30.11.2022)

M. Sc. Chandra Prakash BEURA -685-69152

M. Sc. Matthias BUCHNER (bis 10.06.2022)

M. Sc. Paul BURKHARDT -685-61735

M. Sc. Deepak DEEPAK -685-67889

M. Sc. Adrian EISENMANN (bis 31.01.2022)

M. Sc. Markus FISCHER -685-61525

M. Sc. Nelly-Lee FISCHER (ab 11.01.2022) -685-69138

M. Sc. Heiner FRÜH (bis 31.03.2022)

M. Sc. Malte GERBER -685-69168

	M. Sc. Jonas GRAF	-685-67844
	M. Sc. Michaela GRUBER	-685-67868
	M. Sc. Manuel HAUG (bis 31.10.2022)	
	M. Sc. Chuxuan HE	-685-67857
	M. Sc. Kevin KRATZ (ab 01.12.2022)	-685-60832
	M. Sc. Sharon MÜLLER	-685-67875
	M. Sc. Daniel PASSOW (bis 31.12.2022)	
	M. Sc. Felipe PROBST (ab 01.02.2022)	-685-67885
	M. Sc. Jan SCHABEL	-685-67874
	M. Sc. Tim STREUBEL (bis 14.06.2022)	
	M. Sc. Inti Runa SUPA STÖLBEN (ab 11.01.2022)	-685-69139
	M. Sc. Charlotte WAGNER (ab 01.06.2022)	-685-67838
	M. Sc. Kathrin WALZ	-685-69196
	M. Sc. Philipp WENGER (bis 28.02.2022)	
	M. Sc. Zeenat HANIF	-685-67844
Sekretariat / Secretary:	<i>Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:</i>	
	Janja SCHULZ	-685-67870
	Annette GUGEL	-685-67880
	<i>Hochspannungslabor Ostfildern:</i>	
	Konstanze LINS	-685-69175
Buchhaltung / Accounting:	Elisabeth WEILANDT (ab 01.01.2022)	-685-67876
Technische Angestellte / Technical Staff:	Can AKGÜL, <i>Mechaniker</i> (bis 31.10.2022)	
	Erwin BECK, <i>Mechanikermeister</i>	-685-67847
	Lothar EHINGER, <i>Elektromeister</i>	-685-61526
	Timon GOLD, <i>Zentralwerkstattleiter</i>	-685-67847
	Daniel HARTICH, <i>Mechaniker</i>	-685-67847
	Michael HERDTLE, <i>Mechaniker</i>	-685-69161
	Edona KUQI, <i>Mechanikermeisterin</i>	-685-67847
	Benedikt LUSINSKY, <i>Industriemechaniker</i> (bis 18.07.2022)	
	Hartmut RÖNISCH, <i>Elektrotechniker</i>	-685-67856
	Christian WÖLZLEIN, <i>IT-Systemkaufmann</i>	-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**DR.-ING. U. SCHÄRLI / 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

6. Februar 2022, ganztägig:

Fahrt zur Omexom GA Süd GmbH in Fellbach mit Fachvorträgen und Vorführungen für Hörerinnen und Hörer der Vorlesung „Hochspannungsfreileitungen“

4.-10. Juni 2022: Besuch mit den Hörerinnen und Hörern der Fachvorlesungen bei:

- | | |
|---------------------------------|---|
| - NKT GmbH und Co. KG, Köln | Niederspannungskabel, Mittelspannungskabel und Hochspannungskabel |
| - GE Grid GmbH, Mönchengladbach | Leistungstransformatoren |
| - RWE Power AG, Essen | Aussichtspunkt Braunkohletagebau Garzweiler |
| - ABB Calor Emag, Ratingen | Mittelspannungsschaltanlagen |



Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Exkursion bei ABB Calor Emag in Ratingen

12. Juli 2022, ganztägig:

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

14. Juli 2022, ganztägig:

Exkursion zum SuedLink Info-Center der TransnetBW in Leingarten mit Fachvorträgen und Diskussionen sowie anschließender Besichtigung der 380-kV Schaltanlage und der Konverter-Baufläche für Hörerinnen und Hörer der Vorlesung „Elektrische Verbundsysteme“.



Exkursion zum SuedLink Info-Center der TransnetBW in Leingarten

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 01.11.2021 bis 31.10.2022:

Akhlaghi, Hamed

Investigation of Sensor Designs for UHF Partial Discharge Monitoring in Power Transformers

The reliability of electrical grids depends on the quality and availability of their electrical equipment, e.g., power transformers. Local failures inside their insulation can lead to breakdowns resulting in high outage and penalty costs. Therefore, power transformers are tested for partial discharge (PD) activity in a routine test to avoid such destructive events. PD activity can be considered a diagnostic measurement online or offline to be constantly monitored during service using the ultra-high frequency (UHF) method. UHF measurement contained measuring the electromagnetic signals emitted by the PD source, involving the frequency band from 300 MHz to 3 GHz, by using UHF sensors. In this thesis, the design and simulation of novel type sensors which are suitable for PD detection in power transformers will be considered. The Accuracy of UHF measurement is addressed by the sensitivity of the UHF sensor, which is measured by the antenna factor (AF) UHF sensors by using in a special reproducible step, i.e., a GTEM cell. The GTEM cell is presented, which is oil-filled to address the environmental conditions inside a transformer where the sensor will be used. With such a cell, investigate the AF of UHF sensors and illustrate that sensor sensitivities are measured in an oil-filled GTEM cell. Finally, this thesis shows future research topics, which can be considered to improve the proposed UHF sensors for power transformers.

Boll, Tobias

Entwicklung eines prognosebasierten Energiemanagementsystems (EMS) zur Kopplung von dezentralen Erzeugungseinheiten mit einem Ladeinfrastruktursystem

Development of a forecast-based energy management system (EMS) for coupling decentralized generating units with a charging infrastructure system

Christl, Dominik

Einfluss des Kontaktwerkstoffs und externer Magnetfelder auf das Abrissverhalten des Schaltlichtbogens in Vakuumschaltern

Influence of the contact material and external magnetic fields on the chopping behavior of switching arcs in vacuum interrupters

Dangelmeyr, Maximilian Niklas

Implementierung einer Netzimpedanzvermessung mittels einer Phase-locked-loop Methodik und eines Linearverstärkers

In der vorliegenden Arbeit wird ein Impedanz-basiertes Messverfahren zur Analyse des Wechselstromwiderstandverhaltens eines Stromnetzes aufgezeigt. Eine bereits umgesetzte Methodik beruht auf einer Messung, welche mittels einer seriellen

Verknüpfung von Signalgenerator und Linearverstärker durchgeführt wird. Für diese Impedanzmessung ist das Erfassen der Netzfrequenz sehr wichtig und wird für jeden Messvorgang immer aktuell benötigt. Diese Netzfrequenzerfassung wird extern über ein zusätzlich entwickeltes Gerät realisiert. Durch diese Masterarbeit soll die bestehende Methodik durch eine Fusion beider Einheiten in einem Gerät verbessert und der Messaufwand reduziert werden. Das neue Messkonzept ist in acht Kapiteln gegliedert, grundlegend ausgearbeitet, umgesetzt und anschließend ausgewertet sowie mit den bisher bestehenden Messdaten validiert.

Implementation of a network impedance measurement using phase-locked-loop methodology and a linear amplifier

In this contribution, an impedance-based measurement method for analyzing the AC resistance behavior of a power system is demonstrated. An already implemented methodology is based on a measurement which is performed by means of a serial connection of signal generator and linear amplifier. For this impedance measurement, the acquisition of the mains frequency is very important and is always required for each measurement process. This mains frequency acquisition is realized externally by an additionally developed device. This master thesis aims to improve the existing methodology by merging both units in one device and to reduce the measurement effort. The new measurement concept is divided into eight chapters, fundamentally elaborated, implemented and subsequently evaluated and validated with the existing measurement data.

Eppler, Simon

Vergleich zwischen linearer und heuristischer Optimierung im Kontext einer koordinierten, spannungsebenenübergreifenden Nutzung betrieblicher Flexibilität in Verteilnetzen

Flexibilitäten in Niederspannungsnetzen bieten ein großes Potenzial, um Dienstleistungen für höhere Spannungsebenen bereitzustellen. Die wachsende Anzahl an Flexibilitäten und deren räumliche Verteilung in Netzen verlangt nach einer automatisierten Koordination. In dieser Arbeit wird eine Regelung durch einen multikriteriellen Optimierungsalgorithmus (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) implementiert, um einen angeforderten Arbeitspunktwechsel am Ortsnetztransformator auf die Flexibilitäten aufzuteilen. Die Einstellung der Flexibilitäten erfolgt gemäß definierter Zielfunktionen, die betriebliche als auch netzstützende Zwecke verfolgen. Netzrestriktionen werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Der Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II wird mittels einer zeitreihenbasierten Simulation verglichen mit einem linearisierten Optimal Power Flow für den operativen Einsatz in einem Niederspannungsnetz. Die Ergebnisse zeigen, dass der implementierte Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II durch die langen Berechnungszeiten, die für die Evolution der Population benötigt werden, Schwierigkeiten hat, auf die schnellen Änderungen in Niederspannungsnetzen mit hoher Durchdringung mit Photovoltaik zu reagieren. Nur durch spezielles Seeding der Startpopulation konnten vergleichbare Lösungen zu dem Optimal Power Flow erreicht werden.

Comparison between linear and heuristic optimization in the context of coordinated, vertical utilization of operational flexibilities in distribution grids

Flexibilities in low-voltage grids offer great potential for providing services for higher voltage levels. The growing number of flexibilities and their spatial distribution in grids requires automated coordination. In this work, a control is implemented by a multicriteria optimization algorithm (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) to distribute a requested operating point change at the local grid transformer among the flexibilities. The flexibilities are set according to defined objective functions, which have operational as well as grid supporting purposes. Grid constraints are also taken into account. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II is compared using a time series based simulation with a linearized optimal power flow for operational use in a low voltage grid. The results show that the implemented Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II has difficulties to respond to the fast changes in low voltage grids with high penetration of photovoltaic due to the long computation times needed for the evolution of the population. Only with special seeding of the starting population comparable solutions to the optimal power flow could be achieved.

Erb, Jonathan

Weiterentwicklung einer Spannungsebenen übergreifenden Aggregationsmethodik für Flexibilitäten in Verteilnetzen

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Algorithmus entworfen, der es ermöglicht flexible Leistungen aus Verteilnetzen über verschiedene Netzebenen hinweg zu koordinieren und so dem überlagerten Netz einen Flexibilitätsbereich zur Verfügung zu stellen. Dabei wird die Berechnung der vorhandenen Flexibilität der einzelnen Netze weitestgehend unabhängig voneinander durchgeführt. Die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Netzebenen und die daraus resultierenden Änderungen der Knotenspannungen wurden in die Berechnung integriert, sodass trotz unabhängiger Berechnung der einzelnen Netzgebiete eine Verletzung aller Netzrestriktionen ausgeschlossen werden kann.

Development of a Flexibility Aggregation Method in multi-level Distribution grids

Within the scope of this master thesis, an algorithm was designed that enables the management of flexible power from distribution grids across different voltage levels and thus provides an aggregated flexibility to the superimposed grid. The calculation of the available flexibility of the individual grids is carried out independently of each other as far as possible. The mutual influence of the different grid levels and the resulting changes in the node voltages were integrated into the calculation, so that a violation of all grid restrictions can be excluded despite the independent calculation of the individual grid areas.

Fischer, Nelly-Lee

Entwicklung und Vergleich verschiedener Abrufkonzepte zur netzdienlichen Nutzung von Flexibilitäten aus dem Verteilnetz

Im Rahmen dieser Arbeit wurden der koordinierte Abruf von Flexibilität auf Basis eines vorab aggregierten Flexibilitätsbereichs simuliert. Dadurch kann eine gezielte

Modifikation des Leistungsflusses über den Transformator auf die einzelnen flexiblen Erzeuger und Verbraucher innerhalb des Netzgebiets aufgeteilt werden. Durch die Realisierung als lineares Optimierungsproblem besteht die Möglichkeit, verschiedene Abrufkonzepte zu realisieren, beispielsweise den Einspeisevorrang erneuerbarer Energien oder die Diskriminierungsfreiheit aller Netzteilnehmer. Zur Validierung und zum Vergleich der entwickelten Abrufkonzepte wurden diese anhand von realen und künstlichen Nieder- und Mittelspannungsnetzen getestet. Das Ergebnis der Arbeit besteht demnach aus einer funktionsfähigen Auswahl an Abrufkonzepten, deren Unterschiede klar aufgezeigt wurden.

Development and Comparison of Several Retrieval Concepts for the Grid-Serving Use of Flexibilities from Distribution Grids

Within this work, the coordinated access of flexibility on the basis of a previously aggregated flexibility area was simulated. This allows a targeted modification of the power flow over the transformer to be split to the individual flexible generators and consumers within the network area. Due to the realization as a linear optimization problem, it is possible to realize different disaggregation concepts, for example regarding the feed-in priority of renewable energies or the non-discrimination of all grid participants. For validation, the developed concepts were tested on low and medium voltage grids. Accordingly, the result of the work consists of different disaggregation strategies.

Friedrichs, Nils

Erprobung und Festlegung von Strom-Anforderungen zur Verringerung des EMVU Testumfangs von Fahrzeugkomponenten

In der vorliegenden Masterarbeit, die in Kooperation mit Mercedes-Benz Group AG verfasst wird, werden die Anforderung die durch das Themengebiet „Elektromagnetische Verträglichkeit Umwelt“ an Komponententests entstehen, betrachtet. Ziel ist es, die Korrelation zwischen den Testanforderungen des Stroms und der magnetischen Flussdichte im Frequenzbereich von 10 Hz bis 400 kHz nach Mercedes-Benz-Werksnorm zu untersuchen. Die Analyse zur Nahfeldcharakteristik der resultierenden magnetischen Flussdichte aus dem Strom wird zunächst durch eine 3D-Feldsimulation realisiert. Mit Validierungsmessungen werden die resultierenden Ergebnisse überprüft. Anschließend erfolgt die Übertragung der erarbeiteten Erkenntnisse unter realen Bedingungen auf Komponenten- und Fahrzeugebene. Dabei werden die zu untersuchenden Messgrößen erneut bestimmt. Basierend auf den Resultaten werden die Testanforderung nach Mercedes-Benz-Werksnorm analysiert. Zusätzlich erfolgt die Bildung von Transferfunktionen, die die Nahfeldcharakteristik der magnetischen Flussdichte am EMVU-Komponententestaufbau beschreiben.

Analysis and Definition of Current Requirements to Reduce the Test Scope of Vehicle Components with regard to EMC-Environment

In the following master thesis, which is written in cooperation with Mercedes-Benz Group AG, the requirements of the topic "Electromagnetic Compatibility Environment" for component tests are considered. The aim is to investigate the correlation between

the test requirements of the current and the magnetic flux density in the frequency range from 10 Hz to 400 kHz according to Mercedes-Benz standard. The analysis on the radiation characteristics of the resulting magnetic flux density from the applied current is first realized by a 3D field simulation. Validation measurements are used to verify the results. Subsequently, the findings are transferred to the component and vehicle level under real conditions. The measured variables to be investigated are determined again. Based on the results, the test requirements according to the Mercedes-Benz standard are analyzed. In addition, transfer functions are created that describe the radiation behavior of the magnetic flux density on the EMCE component test setup.

Göhring, Fabian

Untersuchung und Prognose des Blindleistungskompensationsbedarfs im Hochspannungsnetz

Analysis and projection of reactive power compensation demand in the high voltage grid

Klauser, Nikolaj

3D-FEM-Simulation zur Bestimmung der HF-Impedanz von elektrischen Maschinen

Die Entwicklung von Wechselrichtern wird stets von Anforderungen an die Elektromagnetische Verträglichkeit begleitet. Dementsprechend ist eine Emissionsmessung mit einer realen Maschine oder einer passiven Maschinennachbildung obligatorisch. Diese Messungen sind zeitaufwändig und weisen wenige Freiheitsgrade auf. Nötige Maßnahmen am Wechselrichter nach der Messung sind kostenintensiv. Eine Simulation zu Beginn der Entwicklungsphase kann diese Nachteile kompensieren. In dieser Arbeit soll ein Simulationsverfahren für die Hochfrequenzimpedanz elektrischer Maschinen entwickelt werden. Es werden zwei Ansätze für die Simulation von Spulen umgesetzt. Die Simulationsergebnisse werden anhand von Impedanzmessungen bewertet. Aus den Ergebnissen der Spulensimulationen werden Maßnahmen für das Simulationsverfahren von Statoren abgeleitet.

3D FEM Simulation for determining the RF Impedance of electrical Machines

The development of inverters is always accompanied by requirements for electromagnetic compatibility. Accordingly, an emission measurement with a real machine or a passive machine replica is mandatory. These measurements are time-consuming and have few degrees of freedom. Necessary measures on the inverter after the measurement are cost-intensive. A simulation at the beginning of the development phase can compensate for these disadvantages. In this work, a simulation method for the high-frequency impedance of electrical machines is to be developed. Two approaches for the simulation of coils are implemented. The simulation values are evaluated using impedance measurements. From the results of the coil simulations, measures for the simulation of stators are derived.

Kovacs, Christian

Auslegung und Aufbau eines induktiven KFZ-Ladesystems bis 3,6 kW mit Doppelhelix-Spulen

Ein induktives Ladesystem (WPT-System) kann die Akzeptanz der Elektromobilität steigern und den Komfort für Anwender erhöhen. Jedoch ergeben sich neue Herausforderungen für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), da neue Kopplungswege für elektromagnetische Störungen entstehen. In dieser Masterarbeit wird ein WPT3-System mit Doppelhelix-Spulen auf der Grundlage der SAE (Society of Automotive Engineers) Norm J2954 aus 2019 aufgebaut. Damit ist es möglich, Übertragungsleistungen von bis zu 3,6 kW bei bis zu 92,9% Wirkungsgrad zu erreichen. Mit dem realisierten System wird die Leistungsübertragung unter dem Einfluss verschiedener Betriebsparameter, wie veränderlicher Spulenausrichtung und variabler Betriebsfrequenzen, untersucht. Des Weiteren wird das EMV-Verhalten im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz analysiert. Damit kann eine Bewertung der aktuell diskutierten Grenzwertvorschläge für die gestrahlten Magnetfeldemissionen erfolgen.

Design and construction of an inductive car charging system up to 3.6 kW with double helix coils

An inductive charging system (WPT-system) can increase the acceptance of electromobility and enhance the convenience for users. However, new challenges arise for electromagnetic compatibility (EMC) as new coupling paths for electromagnetic interferences are created. In this master thesis a WPT3 system with double helix coils is built based on the 2019 SAE (Society of Automotive Engineers) standard J2954. The coils enable the achievement of transmission powers of up to 3,6 kW with up to 92.9% efficiency. With the created system, the transmission power is analyzed under the influence of different operating parameters, such as variable coil alignment and variable operating frequencies. Furthermore, the EMC behavior in the frequency range from 9 kHz to 30 MHz is examined. This allows an evaluation of the currently discussed limit value proposals for radiated magnetic field emissions.

Mejía Chaparro, David Andrés

Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Leitungsauslastungen und der Netzverluste

Durch den stetigen Ausbau erneuerbarer Energien und die Zunahme der Elektromobilität werden die Verteilnetze zunehmend belastet, wodurch die Übertragungsverluste steigen. Um diese zu minimieren, wird im Rahmen dieser Arbeit eine lineare optimale Lastflussberechnung entwickelt. Die Optimierung bestimmt Betriebspunkte der dezentralen Erzeugungsanlagen, welche die Blindleistungsflüsse über die Netzzweige reduzieren. Es werden verschiedene Zielfunktionen zur Modellierung der Übertragungsverluste untersucht. Eine quadratische Approximation der Übertragungsverluste, die über eine stückweise Linearisierung in die Optimierung einfließt, führt zu den besten Ergebnissen. Anhand einer Jahressimulation wird das Potenzial dezentraler Erzeugungsanlagen zur Reduktion der Übertragungsverluste ermittelt. Dabei wird ein reales süddeutsches 110 kV-Netzgebiet betrachtet.

Development of a Method for Optimizing Line Loading and Grid Losses

Due to the ongoing expansion of renewable energies, distribution grids are increasingly loaded, resulting in a rise of active power losses. In order to minimize losses, a linear optimal power flow is developed in this thesis. The optimization determines operating points of renewable energy sources (RES), which leads to reduced reactive power flows across the branches of the grid. Various objective functions for modeling losses are investigated. A quadratic approximation of the active power losses, which is included in the optimization via piecewise linearization, proves to be the most suitable. An annual simulation is used to determine the potential of RES to reduce transmission losses. Therefore, a real 110 kV grid area in southern Germany is examined

Qin, Fangtao

Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Reduktion der Netzverluste

In der vorliegenden Arbeit wird ein Optimierungsalgorithmus vorgestellt, der die Netzverluste im Hochspannungsnetz durch die Änderung der Stufenschalterposition von Transformatoren sowie gezielte Schaltung von Kompensationsanlagen minimiert. Dabei dient als Eingangsgröße der Optimierung eine linearisierte Lastflussrechnung. Die vorgenommene Linearisierung wird anhand eines 8-Knoten-Testnetzes auf deren Genauigkeit geprüft. Für die implementierte lineare optimale Lastflussrechnung werden zwei unterschiedliche Näherungen zur Berechnung der Netzverluste verwendet, die als Zielfunktion untersucht werden. Mit dem entwickelten Verfahren lassen sich die Netzverluste besonders beim Einsatz von Querregeltransformatoren echtzeitnah deutlich reduzieren.

Enhancement of a method for reduction of network losses

In this thesis, an optimization algorithm is presented which minimizes active power losses in high-voltage grids by changing the tap-changer position of the transformers as well as by selective switching of compensation units. A linearized load flow calculation is used as input for the optimization. The linearization is tested for accuracy using an 8-node test grid. For use as objective function within the implemented linear optimal power flow, two different approximations for the calculation of active power losses are investigated. With the developed method, active losses can be significantly reduced in close to real time, especially when phase shifting transformers are installed. losses. Therefore, a real 110 kV grid area in southern Germany is examined.

Reiser, Benedikt

Entwicklung eines Lademanagements für bidirektional ladefähige Elektrofahrzeuge

Aufgrund der angestrebten Klimaziele ist zu erwarten, dass sich die Elektromobilität am Markt weiter durchsetzen wird. Durch das gesteuerte bidirektionale Laden von Elektrofahrzeugen kann die Flexibilität der Fahrzeugbatterien auf vielfältige Weise genutzt werden. In dieser Arbeit wird ein Lademanagement für die Koordinierung der Ladevorgänge von bidirektional ladefähigen Elektrofahrzeugen entwickelt. Ziel ist die Potentialbestimmung beim bidirektionalen Laden im Kontext der

Eigenverbrauchsoptimierung eines Haushalts mit Photovoltaikanlage. Dabei wird der Einfluss des Nutzungsverhaltens, der täglichen Fahrstrecke und der Batteriekapazität auf das Optimierungspotential simulativ untersucht. Darüber hinaus erfolgt eine Analyse des Potentials von bidirektionalem Laden bei der Koordinierung von mehreren Ladepunkten bei begrenzter Hausanschlussleistung.

Development of a Charging Management System for Bidirectionally Chargeable Electric Vehicles

Bidirectional charging of electric vehicles, enables the use of the flexibility of the vehicle batteries. In this work, a charging management system for coordinating the charging processes of bidirectionally chargeable electric vehicles is developed. The goal is to determine the potential in bidirectional charging in the context of self-consumption optimization of a household with a photovoltaic system. Thereby, the influence of the usage behavior, the daily driving distance and the battery capacity on the optimization potential is simulatively investigated. In addition, an analysis of the potential of bidirectional charging in the coordination of multiple charging points with limited house connection power is carried out.

Rettenberger, Tobias

Reduktion von Transiten mittels OPF

In dieser Arbeit wird ein Optimierungsalgorithmus vorgestellt, der Transitflüsse im Hochspannungsnetz durch Anpassung der Stufenschalterposition von Transformatoren minimiert. Dabei dient als Eingangsgröße der Optimierung wahlweise eine lineare oder quadratische Näherung der Leistungsflüsse. Die vorgenommene Näherung wird anhand eines 8-Knoten-Testnetzes sowie des Modells eines realen süddeutschen 110 kV Netzes auf ihre Genauigkeit geprüft. Vor allem bei den Blindleistungsflüssen können Vorteile bei der Genauigkeit der quadratischen Näherung festgestellt werden. Die Unterschiede zwischen der linearen und quadratischen Näherung als Eingangsgröße der Optimierung sowie die Auswirkungen der Anzahl und Position von Querregeltransformatoren werden untersucht. Zudem werden die Auswirkungen der Optimierung auf die Verlustleistung analysiert.

Reduction of Transit Power Flows by Using OPF

In this thesis, an optimization algorithm is presented that minimizes transit power flows in high voltage grids by changing the tap position of power transformers. Both a linear and quadratic approximation of power flow is used as input variable for the optimization. The accuracy of the approximation is tested using a model of a real 110 kV grid in southern Germany. Especially in the case of reactive power flows, advantages in the accuracy of the quadratic approximation were found. The differences between the linear and quadratic approximation as input variables of the optimization as well as the effects of varying the number and position of phase shifting transformers are investigated. Furthermore, the effects of the optimization algorithm on active power losses are analyzed.

Ripholz, Felix

Experimental and Simulation Analysis of Electromagnetic Wave Propagation in a Distribution Transformer

Partial discharge (PD) signals in the ultra high frequency (UHF) range propagate differently depending on the medium they are in. This makes it difficult to locate the PD. To investigate this, sensors are placed inside a transformer to generate artificial PD. For the investigation of attenuation and propagation patterns of partial discharges in transformers, a real transformer and its 1-to-1 model reproduced in 3D are investigated in the following. The recorded results are compared with each other to verify the virtual replica and thus to apply the behaviour of the PD to other transformer models and to enable an exact localisation of the PD.

Salmani, Samira

Analyse der Nulldurchgangssoszillationen der Supraharmonischen Emission von Elektrofahrzeugen

Zero-crossing oscillation analysis of Supraharmonic emissions from electric vehicles

Scheer, Paul

Untersuchungen zur Lastflussregelung durch wirkleistungsflusssteuernde Betriebsmittel im Hochspannungsnetz

In dieser Arbeit werden die wirkleistungsflusssteuernden Betriebsmittel Phasenschiebertransformator und Thyristor Controlled Series Capacitor betrachtet. Dazu werden beide simulativ in einem Testnetz und in einem realen Hochspannungsnetz untersucht. Für die Untersuchung wird ein diskreter Regler entwickelt. Dieser muss in der Lage sein, die Auslastung mehrerer Leitungen unter einem definierten Wert zu halten. Dies muss für den (n-0)- und den (n-1)-Fall gelten. Mithilfe des Reglers kann gezeigt werden, dass der Phasenschiebertransformator besser geeignet ist, um große Wirkleistungsflussströme zu bewältigen. Weiterhin werden die verschiedenen Auswirkungen auf das Netz durch die wirkleistungsflusssteuernden Betriebsmittel untersucht. Weiterhin werden EE-Anlagen abgeschaltet, um Auslastungen im Netz zu verhindern.

Investigations of load flow control by active power flow controlling equipment in the high-voltage grid

In this thesis, the active power flow controlling devices phase-shifting transformer and thyristor controlled series capacitor are examined. For this purpose, both are simulated in a test network and in a real 110kV- network. A discrete controller is developed for the simulation. This controller must be able to keep the load of several lines below a defined value. The controller must be able to do this for both the (n-0) and (n-1) cases. With the help of the controller, it can be shown that the phase-shifting transformer is better suited to handle large active power flow currents. Furthermore, the different effects on the grid by the active power flow controlling resources are investigated. Furthermore, renewable energy plants are switched off in order to prevent overloads in the grid.

Schubert, Carolin

Evaluierung und Weiterentwicklung eines Quotenkonzepts für Verteilnetze anhand realer Netzdaten

Evaluation and Further Development of a Quota Concept for Distribution Grids Based on Real Grid Data

Soubar, Abed Alhameed

Untersuchung des Energiebedarfs einer Autobahnraststätte mit ladenden E-Lkw anhand von Parkplatzbelegungsdaten

In dieser Arbeit wurde der zukünftig mögliche Ladebedarf an Autobahnraststätten mit ladenden E-Lkw in Form der Lastprofile zweier exemplarischen Autobahnraststätten simuliert. Zu diesem Zweck wurde eine Simulation entwickelt, die auf Basis von Live-Parkplatzbelegungsdaten und Spezifikationen einiger E-Lkw ein Lastprofil für die Raststätten simulieren kann. In der Simulation wird ein neues Ladeprofil für jeden einfahrenden E-Lkw erstellt, sodass ein realistisches Lastprofil der Raststätten simuliert werden kann. Anhand des Lastprofils wurde der Strombedarf der Raststätten in Abhängigkeit von der Ladeleistung untersucht. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass die Spitzenlast mit steigender Ladeleistung zunimmt, obwohl die Anzahl der gleichzeitig ladenden E-Lkw abnimmt.

Investigation of the energy demand of a freeway service area with charging e-trucks based on parking space occupancy data

In this work, the potential charging demand at freeway service areas with charging e-trucks was modeled by simulating the load profile of two exemplary freeway service areas. For this purpose, a simulation was developed that simulates a load profile for a service area based on live parking space occupancy data. In the simulation, a new charging profile is created for each incoming e-truck so that a realistic load profile of the service areas can be simulated. The simulation results showed that the peak power demand increases with increasing charging power, although the number of e-trucks charging at the same time decreases.

Supa Stölben, Inti Runa

Untersuchung der EMV beim Laden von Elektrofahrzeugen

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden standardisierte Ladeverfahren für Elektrofahrzeuge (EVs) vorgestellt und entsprechende Normen zur Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) beim induktiven Ladevorgang zusammengefasst. Es werden anschließend Laboraufbauten zur leitungsgebundenen EMV-Prüfung beim Wechselstrom (AC)-Ladevorgang von EVs entworfen. Dabei wird eine zweite Referenzmasseplatte zur Nachbildung der Kapazität der Karosserie gegenüber dem Erdpotential der Messhalle eingesetzt. Zudem wird eine Hallenfilternachbildung entworfen, womit die Störpegel einflüsse bei Lasten, die außerhalb der Messhalle aufgestellt werden, berücksichtigt werden können. Ergänzend werden mit einem Impedanz-Analysator Messungen der Aufbauimpedanz zwischen den Referenzmasseplatten durchgeführt. Die hier entworfenen Aufbauten werden sowohl schematisch als auch durch elektrische Ersatzschaltbilder dargestellt.

Investigation of EMC during charging of electric vehicles

As part of this master's thesis, standardized charging processes for electric vehicles (EVs) are presented and the corresponding standards for testing electromagnetic compatibility (EMC) during the conductive charging process are summarized. Laboratory setups have been designed for testing the conducted EMC during the alternating current (AC) charging process of EVs. A second reference ground plate has been applied to replicate the capacitance between the car body and the ground potential of the anechoic chamber. Additionally, an artificial line filter was modeled, to consider the interference level influences for loads installed outside the chamber. Measurements of the structural impedance between the ground plates have been carried out with an impedance analyzer. The structures designed here are shown both schematically and with electrical equivalent circuit diagrams.

Tittjung, Tobias

Simulative und experimentelle Untersuchung und Optimierung des TE-Verhaltens einer wicklungsdirektgekühlten hochperformanten E-Maschine

Simulative and experimental investigation and optimization of the PD behavior of a direct winding-cooled, high-performance electric machine

Tozan, Emre

Development of Neural Networks for Partial Discharge Interpretation

Partial discharge detection in high voltage (HV) equipment plays an important role in terms of its maintenance and ensuring reliability. In terms of Ultra-High Frequency (UHF) sensors, not only the type of partial discharge (PD) can be determined, but also PD can be localized. This is of particular interest since PD can damage the insulation of the equipment and cause a failure. The first part of this work uses two different convolutional neural networks (CNN) to classify PD, detected by UHF sensors, and to identify the type of PD based on the measured time signal. Both variants achieve very high accuracies. The second part deals with the UHF sensor data from experiments on two grid coupling power transformers, as well as the UHF sensor data from the electromagnetic simulations of these transformers. These data were analyzed for their propagation within the power transformer. Neural Networks (NN) use the information obtained from the time signals to predict the source of the PD. Two approaches have been implemented for this purpose, both based on trilateration. It has been shown that the NN make more accurate predictions of the coordinates than the use of trilateration.

Tran, David

Auswahl und Entwicklung einer Hardware-Topologie für eine elektrische Maschinenemulation

Mittlerweile gewähren Maschinenemulatoren einen flexiblen Einsatz in Prüfstandsaufbauten. Für Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) müssen beim Emulatoreinsatz zusätzliche Anforderungen erfüllt werden, um keine zusätzlichen Emissionen zu verursachen. In dieser Arbeit erfolgt eine ausführliche

Literaturrecherche über vorhandene Hardware-Emulatortopologien und eine Abwägung dieser Topologien, für den potenziellen Einsatz in Emulationen für EMV-Messungen. Dazu werden Anforderungen formuliert anhand deren eine Bewertung erfolgt. Darauf aufbauend wird eine Topologie ausgewählt, die ein versetzt taktendes Signal mit 80 kHz Taktfrequenz zur Ansteuerung verwendet und zunächst simuliert wird. Die Validierung der Simulation erfolgt durch eine Hardwareumsetzung des Umrichters inklusive Vermessungen, bei dem ein FPGA zur Ansteuerung verwendet wird.

Selection and Development of a Hardware Topology for an Electrical Machine Emulation

Nowdays, emulators substitute electric machines in testbenches. For electromagnetic compatibility (EMC) measurements, additional requirements have to be met when using an emulator in order not to cause additional emissions. In this thesis, a detailed literature research on existing hardware emulator topologies and a consideration of these topologies, for the potential use in emulations for EMC measurements, is carried out. For this purpose, requirements are formulated, which are considered in a topology evaluation. Based on this evaluation, a topology that uses an 80 kHz interleaved generated signal for actuation is selected and built up in simulations. The validation of the simulation is done by a hardware implementation of the inverter including measurements, where an FPGA is used for the control.

Wagner, Charlotte

Analyse des Potentials der Integration von Vehicle-to-Home in ein Energiemanagementsystem privater Haushalte basierend auf realen Messdaten

Analysis of the potential of integrating vehicle-to-home into a household energy management system based on real measurement data

Wolff, Felix

Analyse des Ladebedarfs elektrischer LKW an Logistikzentren und dessen Auswirkungen auf das Verteilnetz

Der Einfluss von E-LKW-Ladevorgängen an unterschiedlichen Typen von Logistikzentren auf ein Mittelspannungsnetz wird in dieser Arbeit untersucht. Vier unterschiedliche Typen von Logistikansiedlungen werden differenziert betrachtet und verglichen. Das Lager und das Distributionslager lassen sich in der untersuchten Konfiguration in ein bestehendes Netzgebiet integrieren. Die Spitzenleistungen des Depots und des Systemverkehrsstützpunktes sind jedoch zu hoch, um einen sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten. Die Installation einer Photovoltaikanlage kann zwar die Gesamtbelastung senken, trägt jedoch aufgrund ihrer Fluktuation nicht nennenswert zur Reduktion der Lastspitzen bei. In Abhängigkeit der gewählten Leistungsgrenze fallen die Auswirkungen eines Lademanagements auf den logistischen Betrieb mehr oder weniger stark aus.

Electric Truck Charging Analysis at Logistics Centers and its Distribution System Impact

The influence of e-truck charging at different types of logistics centers on a medium-voltage grid is investigated here. Four different types of logistics centers are compared. They can be integrated into an existing grid in the investigated configuration. The peak powers of the depot and the forwarding base of a system transport network are too high to guarantee reliable grid operations. Although the installation of photovoltaic panels can reduce the overall load, it does not contribute significantly to the reduction of peak loads. Depending on the selected power, the impact of a management system on the logistical processes differs.

Wu, Shu

Modellierung eines Ersatznetzes für ein Netz mit Windkraftanlagen unter Berücksichtigung der Charakteristik des Kurzschlussstroms**Modelling of equivalent network for grid with wind turbines considering short-circuit current characteristics**

In this work, the short-circuit behavior of synchronous machines (SMs) and wind turbines (WTs) is investigated to find the equivalent model of the network. By selecting a part of the network to be replaced, SMs in selected areas are replaced by the wind turbines and short-circuit is performed to obtain the equivalent impedance model. To obtain the equivalent model with WTs, this work studies the impedance variation during the short-circuit and performs segmentation analysis and uses the concept of transfer function, and uses the polyfit algorithm in Matlab to derive the impedance expressions and compares with short-circuit response.

Zaremanesh, Poria

Evaluation of Small-Scale Power2X plants as a flexibility in distribution grids

The objective of this proposal is to integrate one or more small P2X plants into an already existing distribution grid. First, the circumstances for a variable utilization of P2X units must be investigated. Additionally, the ability of using P2X plants to avoid undesirable grid situations was checked. In order to test the adaptability and effectiveness of the methodology, in this project a P2X is implemented within a synthetic micro grid. Thus, six different cases regarding the interplay with renewable energy feed-in as well as the usage of battery energy storage systems can be studied to define the optimal use of P2X.

Zegnani, Karim

Einfluss der Umgebungstemperatur und des Alterungsverhaltens von Vakuumschaltern mit verschiedenen Kontaktwerkstoffen auf den Lichtbogenabriss mit überlagertem Magnetfeld

Influence of ambient temperature and aging behavior of vacuum interrupters with different contact material compositions on arc chopping with superimposed magnetic field

Zollmarsch, Catharina

Entwicklung eines Verfahrens zur Reduktion von Leistungstransiten durch Topologieänderung unter Berücksichtigung des (n-1)-Kriteriums

In der vorliegenden Masterarbeit wird ein Verfahren zur Reduktion von Transitflüssen im 110 kV Hochspannungsnetz vorgestellt. Die Reduktion erfolgt durch die gezielte Abschaltung von Betriebsmitteln und unter Berücksichtigung des (n-1)-Kriteriums. Die Auswahl eines hierfür geeigneten Betriebsmittels erfolgt mittels eines heuristischen Ansatzes. Dabei wird die Zulässigkeit der Abschaltung bezogen auf die Versorgungssicherheit des Netzes überprüft. Anschließend wird das Betriebsmittel für eine Abschaltung vorgeschlagen, welches den besten Systemzustand, bezogen auf Netzauslastung, Netzverluste und Transitflüsse, bewirkt. Das entwickelte Verfahren wird anhand eines Testsystems erläutert und anschließend auf das Model eines realen Hochspannungsnetzes angewendet.

Development of a Method for the Reduction of Transit Power Flows by Topology Change Considering the (n-1) Criterion

In this master thesis, a method for the reduction of transit power flows in the 110 kV high-voltage grid is presented. This is accomplished by the deactivation of grid equipment and under consideration of the (n-1)-criterion. The equipment is selected using a heuristic approach. The permissibility of the deactivation is checked with respect to the supply security of the grid. Subsequently, the equipment which results in the best system state in terms of grid loading, losses and transit power flows is proposed for a deactivation. The developed method is explained based on a test case and then applied to the model of a real high-voltage grid.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 01.11.2021 bis 31.10.2022:

NAME	THEMA
Affar Ayoub (*)	3D-FEM Simulation zur Bestimmung der HF-Impedanz einer elektrischen Maschine 3D FEM Simulation for determining the RF Impedance of electric Machine
Almoghhrbe Omar	Optimale Systemidentifikation durch heuristische Optimierungsverfahren Optimal system identification by heuristic optimization methods
Alrais, Muammar	Entwicklung einer Online-Leistungsprognose für eine Photovoltaikanlage Development of an online power forecast for a photovoltaic plant
Beck, Johannes (*)	Untersuchung der Auswirkungen des öffentlichen Schnellladens von Elektrofahrzeugen auf das Übertragungsnetz. Analyzing the impact of public fast charging of electric vehicles on the transmission grid.

Begic, Amir (*)	Adaption und Implementierung eines thermischen neuronalen Netzwerkes mit pauschalen Parametern im Zustandsraum für das Transformator-Monitoring Adaption and Implementation of a thermal neural Network with lumped Parameters in the State Space for Transformer Monitoring
Blank, Joshua (*)	Überprüfung der Auslegung des Systemschutzplans für Überfrequenz Review of the design of the system protection plan for overfrequency
Bux, Jonas Wolfgang (*)	Optimierung von TE-Messmethoden unter pulsweitenmodulierter Spannung Improvement of PD measurement method under impulse voltage
Ernst, Patrick	Untersuchung der Auswirkung von Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr auf ein industrielles Mittelspannungsnetz Analysis of the Effects of an Electrified Commercial Transport on an Industrial Mean Voltage Grid
Ferreira Rodrigues, Emanuel	Analyse zur Systemdienstleistungserbringung durch aggregierte Flexibilität in den Verteilnetzen Analysis on ancillary service provision of distribution grids using aggregated flexibilities
Gause, Frederik	Entwicklung eines Prüfaufbaus zur EMV-Messung von Elektrofahrzeugen beim AC-Laden Development of a test setup for EMC measurement of electric vehicles during AC charging
Groß, Jan (*)	Untersuchung und Verbesserung der Messung hohe Isolationswiderstände in automatisierten Testsystemen Investigation and improvement of the measurement of high insulation resistances in automated test systems
Gu, Yuqiang (*)	EMV-technische Untersuchung von Rogowski-Sensoren für den Netzschutz EMC investigation of Rogowski sensors for grid protection
Haas, Simon	Bestimmung der Einflussparameter auf Emissionsmessungen nach CISPR 25 Determination of Influence Parameters on Emission Measurements according to CISPR 25
Hautz, Niklas	Resynchronisation eines Haushaltes mit dem Verbundnetz im Hardware in the Loop Betrieb Resynchronization of a household with the interconnected grid in hardware-in-the-loop operation
Heilig, Pascal (*)	Entwicklung einer serverbasierten Echtzeitvisualisierung von Messdaten Development of a server-based Realtime Visualization of Measurement Data
Köbel, Stefan (*)	Integration einer Kostenstruktur in einen Aggregationsalgorithmus für Flexibilität Integration of a cost structure into an aggregation algorithm for flexibilities

Kratz, Kevin (*)	Weiterentwicklung der Quotenberechnung unter Berücksichtigung von Blindleistungseinflüssen Improvement of the quota concept in consideration of the influence of reactive power
Kreidel, Katrin(*)	Szenarienerstellung zur Minimierung von CO2-Emissionen und Lastspitzenreduktion in Modellquartieren mittels linearer mathematischer Optimierung Scenario generation for minimizing CO2 emissions and peak load reduction in model districts using linear mathematical optimization
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
Mathea, Maximilian	Integration von Elektromobilität in ein städtisches Verteilnetz Integration of electromobility into an urban distribution network
Mavridis, Petros (*)	Application of deep learning Methods in thermal Modeling of local Network Transformers
Obenland, Fabian	Untersuchung des Lichtbogenabrisses in Vakuumschaltern mit verschiedenen Materialzusammensetzungen der Schaltkontakte. Investigation of arc chopping in vacuum interrupters with different material compositions of the switching contacts.
Regenscheit, Tilan	Die Modellierung von Transformatoren durch Messungen des Frequenzgangs Frequency Response Measurement Applied to Transformer Modeling
Reiser, Benedikt (*)	Charakterisierung einer vollumrichterbasierten Windturbine mit netzbildendem Wechselrichter Characterization of a Full Converter Based Wind Turbine with Grid Forming Converter
Säuberlich, Tobias	Kurzschlussstromberechnung im Umrichter basierten IEEE-9 Bus System Short-circuit current calculations in Converter-based IEEE-9 Bus System
Sauter, Marcel	Untersuchung des Einflusses der Solarstrahlung in der thermischen Modellierung von Windpark-Leistungstransformatoren Investigation of the Influence of Solar Radiation in the thermal Modelling of Power Transformers
Scheer, Paul (*)	Entwicklung einer Methode zur Betrachtung von (n-2)-Ausfällen und wetterabhängiger Strombelastbarkeiten in der 110kV Netzplanung Development of a method for considering (n-2)-outages and weather-dependent current ratings in the 110kV grid planning

Schnee, Lucia (*)	Quantifizierung und Analyse des Flexibilitätspotentials elektrischer Lkw in Baden-Württemberg Flexibility Potential Quantification and Analysis of Electric Trucks
Schubert, Carolin (*)	Charakterisierung des Kurzschlussverhaltens einer Windturbine mit Vollumrichter Characterization of the Short-Circuit Response of a Full Converter based Wind Turbine
Sow, Bassirou (*)	Untersuchung der EMV und Schaltungssimulation beim Laden von Elektrofahrzeugen Investigation of EMC and circuit simulation during charging of electric vehicles
Spyropoulos, Nicolas (*)	Untersuchung der Kurzschlusseigenschaften der Windturbine Typ 4B Investigation of short-circuit characteristics of Wind Turbine Type 4B
Sulejmani Emir (*)	Entwicklung und Aufbau eines Frequenz-Tracking-Systems für die optimale Arbeitspunkteinstellung bei induktiven KFZ-Ladesystemen Development and setup of a frequency tracking system for optimal operating point adjustment in inductive automotive charging systems
Tedia, Besrat (*)	Vergleich des Kurzschlussverhaltens von Umrichtern in Matlab und Power-Factory Comparison of short-circuit response of power converters in Matlab and Power-Factory
Wolff, Felix (*)	Analyse des Einflusses von Verbraucher-Bestandsdaten auf die Ergebnisse von Lastflussberechnungen in Niederspannungsnetzen Analysis of the influence of consumer stock data on the results of load flow calculations in low voltage systems
Zhu, Yuxin (*)	Improvement of PWM generator and PD measurement platform

4. PROMOTIONEN

- **Optimierte Netzplanung von Verteilnetzen unter Berücksichtigung von konventionellem Netzausbau, Batteriespeichern und dynamischer Spitzenkappung**
M.Sc. Ouafa Laribi

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried

KIT Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:

20.04.2022

Die zunehmende Integration von erneuerbaren Energien in Deutschland treibt die Transformation des Stromnetzes voran. Erneuerbare Energieanlagen, die dezentral im Verteilnetz verbreitet sind, ersetzen zunehmend fossile Kraftwerke, die überwiegend auf der Übertragungsebene eingesetzt sind. Dieser Übergang zu mehr erneuerbaren Energien erfordert den Ausbau von höheren Transportkapazitäten im Verteilnetz. In manchen Regionen in Deutschland kommt der konventionelle Netzausbau allerdings aufgrund von schleppenden Neubaugenehmigungen nur langsam voran. Deshalb ist heutzutage neben dem unerlässlichen klassischen Netzausbau eine bessere Ausnutzung des Bestandnetzes erforderlich, um die geplanten Ziele der Energiewende zu erreichen. Dies erfordert einen Netzplanungsansatz, welcher unterschiedliche Lösungen und Maßnahmen berücksichtigt. Diese Arbeit präsentiert eine neue Planungsmethode für Verteilnetze, die neben dem klassischen Netzausbau mit Freileitungen und Kabeln innovative Planungsinstrumente wie Batteriespeichersysteme oder die dynamische Spitzenkappung zur Netzoptimierung und -verstärkung nutzt. Die vorgeschlagene Planungsmethode wurde als automatisierter Planungsalgorithmus in einer zeitreihenbasierten Umgebung implementiert. Ausgehend von den gewählten Planungsinstrumenten ermittelt der Planungsalgorithmus die bedarfsorientierten und kostengünstigsten Maßnahmen zur Optimierung und Verstärkung des betrachteten Netzes, um prognostizierte Engpässe zu verhindern.

Die resultierenden Maßnahmen aus dem Planungsalgorithmus hängen von dem betrachteten Netz, dem Ausbauszenario für erneuerbare Energien und von der Netzspannungsebene ab. Der Einsatz der vorgeschlagenen Planungsmethode an einem realen Hochspannungsnetz in Deutschland hat ergeben, dass die Nutzung der zeitreihenbasierten dynamischen Spitzenkappung neben dem konventionellen Netzausbau zu einer Verringerung der benötigten Freileitungsmaßnahmen auf ca. 63 % im Falle des Netzausbaus mit Freileitungen, und auf 51 % im Falle des Netzausbaus mit Kabeln führen kann.

Dabei können die Gesamtkosten der Netzausbaumaßnahmen durch den Einsatz der dynamischen Spitzenkappung um ca. 30 % im Vergleich zum Netzausbau mit Freileitungen und ca. 43 % im Vergleich zum Netzausbau mit Kabeln reduziert werden.

Darüber hinaus haben die Ergebnisse des Planungsalgorithmus erwiesen, dass der Einsatz von Batteriespeichern in Kombination mit der dynamischen Spitzenkappung und dem konventionellen Netzausbau mit Kabeln zu einer Reduktion der benötigten Kabelmaßnahmen auf ca. 40.5 % führen kann. Gleichzeitig können die Gesamtnetzausbaukosten um ca. 46 % im Vergleich zum Netzausbau mit Kabeln reduziert werden.

Der kombinierte Einsatz von Freileitungen und dynamischer Spitzenkappung hat sich für das betrachtete Hochspannungsnetz als kostengünstigste Planungsvariante erwiesen. Im Falle von stockenden Neubaugenehmigungen könnte ein kombinierter Einsatz von Kabeln, Batteriespeichern und dynamischer Spitzenkappung eine mögliche Alternative sein, auch wenn dies mit mehrfachen Kosten im Vergleich zum Netzausbau mit Freileitungen verbunden ist.

Die vorgeschlagene Planungsmethode stellt eine zuverlässige Abhilfe für eine wirtschaftliche und bedarfsorientierte Netzplanung dar. Sie ermöglicht auch unterschiedliche Netzausbauvarianten durch den Einsatz von Flexibilitäten wie Batteriespeichern und dynamischer Spitzenkappung, um eine höhere Nutzung des Bestandnetzes zu erreichen und den konventionellen Netzausbau zu reduzieren.

- **Optimized Planning of Distribution Power Grids considering Conventional Grid Expansion, Battery Systems and Dynamic Power Curtailment**

M.Sc. Ouafa Laribi

The increasing integration of renewable energies is driving the transformation of the power grid in Germany. Renewable energy sources, which are mostly allocated in distribution grids, are replacing fossil power plants, that are mostly applied in the transport grid. This shift to more renewable energies entails the expansion of the power transport capacities in the distribution grid. The conventional expansion of the power grid in Germany is, however, proceeding slowly, due to the delay in the authorization procedures. Therefore, new solutions that enable a higher utilization of the existing grid must be adopted besides the classical grid expansion in order to achieve the planned energy transition goals.

This research work presents a new grid planning method which applies innovative technologies, in addition to the conventional planning instruments with overhead and cables, to optimize and expand the existing grid. The innovative planning instruments

considered are battery storage systems and dynamic power curtailment. The proposed approach has been implemented in a time series-based framework as an automated planning algorithm. Based on the selected planning instruments, the planning algorithm determines for a given distribution grid the tailored and most cost-efficient measures to prevent prognosticated grid congestion.

The results of the planning algorithm depend on the considered grid, the renewable expansion scenario and the grid voltage level. The application of the proposed planning method on a real high-voltage grid has revealed that the use of dynamic power curtailment in the grid planning in addition to the conventional grid expansion reduces the required overhead lines to 63 % in case of grid expansion with overhead lines. In case of grid expansion with underground cables, the required cables could be reduced to 51 % through the application of the dynamic power curtailment. The total expansion costs could be, thereby, decreased by about 30 % as compared to the grid expansion with mere overhead lines, and by about 43 % as compared to the grid expansion with mere underground cables.

Furthermore, the results of the planning algorithm have proven that the application of battery storage systems in the grid planning in combination with the dynamic power curtailment and the conventional grid expansion with cables could lead to a reduction of the required cables to about 40.5 %. At the same time, the total costs of the grid expansion can be reduced by about 46 % as compared to the grid expansion costs based on cables.

The combined application of overhead lines and dynamic power curtailment has proven to be the most economical planning variant for the considered high-voltage grid. Nonetheless, in case of slow authorization processes for the conventional grid expansion with overhead lines, a combined application of underground cables, Battery storage systems and dynamic power curtailment can be conceivable although several times more expensive than the first variant.

The proposed planning methodology provides a reliable remedy for an economical and need-based planning of the grid. In case of faltering conventional grid expansion, the planning method enables different expansion variants using flexibilities, such as battery storage systems and dynamic power curtailment to reach a higher utilization of the existing grid and reduce the application of conventional measures such as overhead lines and cables.

■ **Fingerprint Approach for the Characterization and Mitigation of Supraharmonic Distortion from Electric Vehicles**

M.Sc. Tim Streubel

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hofmann

IFES Hannover

Tag der mündlichen Prüfung:

13.05.2022

Im Rahmen der Arbeit wurden Unterbrechungen des Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen festgestellt, während die Spannungsqualität innerhalb der normativen Grenzen lag. Dies deutet darauf hin, dass eine niedrige Spannungsqualität ein erhebliches Risiko für die erfolgreiche Integration von Elektrofahrzeugen in die Verteilungsnetze darstellen könnte. Insbesondere die von modernen leistungselektronischen Anwendungen erzeugten höherfrequenten Oberschwingungen, im Bereich von 2 bis 150 kHz (Supraharmonische) geben in der Wissenschaft und bei der Normung Anlass zur Sorge. Es gibt nur begrenzte Kenntnisse und Erfahrungen über das Langzeitverhalten von Supraharmonischen in der Praxis. Die Hauptgründe dafür sind das Fehlen geeigneter Messgeräte und Analysemethoden, die in der Lage sind, die großen Mengen an erzeugten Daten effizient zu verarbeiten.

In dieser Arbeit wird ein neuer Überwachungsansatz für die kontinuierliche Langzeitmessung und Charakterisierung von Supraharmonischen im Feld präsentiert. Das Hauptkonzept des Ansatzes besteht darin, die Daten lokal auf den Messgeräten zu verarbeiten und nur ausgewählte und komprimierte Ergebnisse an den Überwachungsserver zu senden. Algorithmen zur Erkennung von Ereignissen ermöglichten es den Messgeräten, Messabschnitte zu extrahieren, die unerwartete Änderungen im supraharmonischen Spektrum enthielten. Dies lieferte wichtige Merkmale von Verzerrungsquellen im Zeit- und Frequenzbereich. Darüber hinaus wurde auf den Messgeräten ein Fingerabdruck-Datenbankansatz implementiert, mit dem wiederkehrende supraharmonische Muster identifiziert, wiedererkannt und gespeichert werden können. Dieser Ansatz ermöglichte es, Messungen an bestehende Fingerabdrücke anzuhängen und eine detailliertere statistische Darstellung der Verzerrungseigenschaften der Quellen zu erstellen. Das Überwachungssystem wurde an drei verschiedenen Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge eingesetzt und validiert. Die Spannungsqualität lag an allen überwachten Standorten innerhalb der normativen Grenzen. Es wurden jedoch hohe Neutralströme aufgrund der ungleichen Belastung von Elektrofahrzeugen und eine große Anzahl von Transienten beobachtet. Die hochfrequente Verzerrung variierte erheblich zwischen den Standorten und wurde hauptsächlich durch die Hintergrundverzerrung und die Anzahl der angeschlossenen Fahrzeuge beeinflusst.

Mit dem implementierten Fingerprint-Charakterisierungsansatz wurden unbeabsichtigte Ladeunterbrechungen erkannt und die betroffenen und verantwortlichen Fahrzeuge identifiziert. Schließlich wurde ein aktiver Minderungsansatz implementiert und an einem Ladestandort validiert. Der Ansatz ist in der Lage, harmonische Verzerrungen zu reduzieren und Störungen im Ladeprozess zu verhindern.

- **Fingerprint Approach for the Characterization and Mitigation of Supraharmonic Distortion from Electric Vehicles**

M.Sc. Tim Streubel

In the frame of this thesis, unintended interruptions of electric vehicle charging processes were detected while the power quality was within normative limits. This indicates that poor power quality could impose a significant risk for the successful integration of electric vehicles into the distribution grids. Particularly higher frequency harmonics in the range from 2 to 150 kHz (Supraharmonics), generated by modern power electronic applications, raise concerns among the scientific and standard setting communities. There is limited knowledge and experience about the long-term behavior of Supraharmonics in the field. The main reasons are the lack of suitable measurement equipment and data analysis methods, able to overcome the challenge of processing the large amounts of generated data in an efficient manner.

This thesis proposes a new monitoring approach for the continuous long-term measurement and characterization of Supraharmonics, which are rarely measured in the field. The main concept of the approach is to process the data locally on the meters and to only send selected and compressed results to the monitoring server. Event detection algorithms enabled the meters to extract measurement segments, containing unexpected changes within the Supraharmonic spectrum. This provided important characteristics of distortion sources in time and frequency domain. Moreover, a fingerprint database approach was implemented on the measurement devices with the ability to identifying, re-identifying and memorizing reoccurring Supraharmonic patterns. This approach allowed appending measurements to existing fingerprints and enabled a more detailed statistical representation of the source's distortion characteristics. With the fingerprint database, a detailed analysis and decomposition of Supraharmonic patterns into their corresponding sources was possible.

The monitoring system was deployed and validated at three different electric vehicle charging infrastructures. The power quality was within acceptable limits at all monitored sites. However, high neutral currents due to the unbalanced charging of EVs and large numbers of switching transients were observed. The Supraharmonic

distortion varied significantly between the sites and was mainly influenced by the background distortion and number of connected vehicles. With the implemented fingerprint characterization approach unintended charging interruptions were detected and the affected and responsible vehicles identified. Finally, an active mitigation approach was implemented and validated at an EV charging site. The approach is able to reduce harmonic distortion levels and prevent charge process disturbances.

- **Dielektrische Festigkeit von alternativen Isolierflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl in Abhängigkeit der Feldhomogenität**

M. Sc. Stephanie Hägele

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Herr Prof. Dr.-Ing. Ronald Plath

TU Berlin

Tag der mündlichen Prüfung:

03.06.2022

Die vorliegende Arbeit untersucht die Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit von Mineralöl und natürlichen Estern bei verschiedenen Spannungsbeanspruchungen und Feldhomogenitätsgraden. Sie arbeitet die chemischen und physikalischen Grundlagen, auf welchen diese Unterschiede beruhen, theoretisch heraus und stellt verschiedene Modelle zur Erklärung vor. Im Anschluss daran wird durch experimentelle Untersuchungen eine Datengrundlage zur Beurteilung geschaffen, ab welcher Feldinhomogenität Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit der verschiedenen Isolierflüssigkeiten auftreten. Dies erfolgt über Elektroden mit verschiedenen Spitzenradien und der Verwendung verschiedener Elektrodenabstände. Hiermit kann eine große Anzahl von Feldhomogenitätsgraden im zu untersuchenden Bereich abgebildet und durch einen Feldhomogenitätsgrad quantifiziert werden. Die Untersuchungen erfolgen sowohl unter Wechselspannung, wie unter Blitzstoßbeanspruchung.

Unter Wechselspannungen können für die gesamte untersuchte Breite an Feldhomogenitätsgraden für trockene Isolierflüssigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit festgestellt werden.

Die unter Blitzstoßbelastung experimentell ermittelten Ergebnisse zeigen eine deutlich reduzierte dielektrische Festigkeit natürlicher Ester. Diese wirkt sich bei zunehmender Inhomogenität und steigendem Elektrodenabstand stärker aus und beginnt bei Radien, die kleiner sind als jene, die im Design von Leistungstransformatoren verwendet werden. Die festgelegten Feldinhomogenitäten werden dazu verwendet einen Bereich an Feldhomogenitätsgraden zu bestimmen, bei welchem die Unterschiede in der

dielektrischen Festigkeit zwischen den Flüssigkeiten beginnen. Diese liegen zwischen den Bereichen, welche klassischerweise für Entladungsuntersuchungen (sehr inhomogen) im Labor und im Transformator design (möglichst homogen) verwendet werden. Um die zu Beginn theoretisch beschriebenen Mechanismen, welche bei stark inhomogenen Feldern zu einer Verringerung der dielektrischen Festigkeit von natürlichen Esterflüssigkeiten führen, messbar zu machen, werden die im relevanten Inhomogenitätsgradsbereich liegenden Konfigurationen näher untersucht.

Hierzu werden Messsysteme entworfen, welche Lichtemissionen und Vorentladungsströme der Vorentladungen erfassen können. Vorentladungseinsatzspannung und Beschleunigungsspannung sind zwei Beispiele für Größen, welche ermittelt werden, um Entladungsentstehung und –ausbreitung in Mineralöl und natürlichem Ester näher zu untersuchen. Bei stark inhomogenen Feldern zeigt sich, dass insbesondere die Entladungsausbreitung und weniger der Entladungseinsatz für die verringerte dielektrische Festigkeit natürlicher Ester verantwortlich ist. Die Beschleunigungsspannung von Mineralöl liegt oberhalb jener von natürlichem Ester. Je inhomogener die Anordnung, desto weiter oberhalb der mittleren Durchschlagsspannung liegt die Beschleunigungsspannung von Mineralöl. Bei natürlichem Ester zeigt sich dieser Zusammenhang in abgeschwächter Form. Nur bei den inhomogensten der untersuchten Anordnungen ist dort eine Beschleunigungsspannung oberhalb der mittleren Durchschlagsspannung messbar.

Ein elektrohydrodynamisches Simulationsmodell für die untersuchten Feldinhomogenitätsgrade und Isolierflüssigkeiten dient zur simulativen Beschreibung. Simulierte Entladungseinsatzspannungen werden mit gemessenen Ergebnissen verglichen sowie Veränderungen der physikalischen Größen, welche für die Unterschiede der dielektrischen Eigenschaften in beiden Isolierflüssigkeiten verantwortlich sind, untersucht und dokumentiert. Die Auswirkungen von Molekülen mit niedrigen Ionisationspotenzialen und hohen Anzahldichten in Form erleichterter Entladungsausbreitung bei natürlichem Ester werden dokumentiert. Das entworfene numerische Simulationsmodell bestätigt die messtechnisch erfassten Zusammenhänge.

- **Dielectric strength of alternative insulating liquids in comparison to mineral oil depending on field homogeneity**

M. Sc. Stephanie Hägele

This work investigates differences in dielectric strength between mineral oil and natural ester liquid at different types of voltage stress and field homogeneity degrees. It points out the chemical and physical basics on which differences in dielectric strength between the insulating liquids are based on and provides models for explications. Experiments provide a database for assessment of the degree of inhomogeneity at which differences between the two liquids start appearing. Therefore, electrodes with different radii and gap distances are used to cover a large range of inhomogeneity and to quantify by degrees of inhomogeneity. Experiments are conducted under AC and lightning impulse stress.

AC results show comparable dielectric strength for both liquids in dry condition for all investigated degrees of inhomogeneity.

Results determined under lightning impulse stress show a considerable reduced dielectric strength of natural ester liquid. Reduced dielectric strength is reinforced by increasing degrees of inhomogeneity and increasing electrode gap distances and starts at radii smaller than the ones used in design of power transformers. Lightning impulse studies are used to define the degree of inhomogeneity where dielectric strength of natural ester liquids starts to decline compared to mineral oil. The further used sector of inhomogeneities lies between the sectors used for laboratory discharge studies (highly inhomogeneous) and in power transformer design (homogeneous as possible). Measurement setups for light emission and pre-breakdown phenomena are built up to determine discharge inception voltages. Discharge inception voltage and acceleration voltage are two examples of values that are determined to investigate initiation and propagation of discharge in mineral oil and natural ester liquid. Especially discharge propagation and less discharge initiation is responsible for reduced dielectric strength of natural ester liquid in highly inhomogeneous field arrangements.

Acceleration voltage of mineral oil is higher than the one of natural ester liquid at same electrode and gap arrangement. The more inhomogeneous the arrangement, the higher acceleration voltage of mineral oil increases over mean breakdown voltage. This correlation is observed in a far weaker way for natural ester liquid. Only at highest inhomogeneous field arrangements acceleration voltage higher than mean breakdown voltage can be observed.

An electrohydrodynamic simulation model using same electrodes and gap distances as for measurements is developed. Inception voltages of the model are compared to the measured inception voltages. Variation of values that influence differences of dielectric strength of both insulating liquids are investigated and recorded. Effects of

molecules with low ionization potential and high number density on eased discharge propagation in natural ester liquid are documented. The electrohydrodynamic model affirms the measured correlations between parameters.

■ **Optimization of Power Flow Computation Methods**

Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter: Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr. Robert Schürhuber

TU Graz

Tag der mündlichen Prüfung:

19.07.2022

Lastflussberechnungen sind der zentrale Baustein vieler Simulationen, die das elektrische Netz betreffen. Entwicklungen im Rahmen der Energiewende wie dezentrale Erzeugungsanlagen, elektrische Mobilität und elektrische Wärmepumpen erfordern einen gezielten Netzbetrieb und -ausbau, um die Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit der Energieversorgung sicherzustellen. Gleichzeitig ändern diese Entwicklungen die Anforderungen an Netzsimulationen und machen teilweise umfangreiche Simulationen mit Millionen von einzelnen Berechnungsfällen notwendig.

Die vorliegende Arbeit untersucht gängige Lastflussmethoden mit einem besonderen Fokus auf die Berechnungsgeschwindigkeit bei umfangreichen Simulationen, wie sie in der modernen Verteilnetzplanung vorkommen. Dazu werden eine Anzahl von Lastflussmethoden vorgestellt.

Um eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen, werden weiterhin eine Reihe von komplexeren Netzelementen und -umständen wie mehrere Slack-Knoten, Transformatoren und asymmetrische Bedingungen untersucht und ihr Einfluss auf die Komplexität der Modelle und die Berechnungsgeschwindigkeit analysiert.

Die Schlüsselerkenntnis der Arbeit ist die Effektivität der Z_{BUS} -Jacobi-Methode, einer oft vernachlässigten Lastflussmethode, die aber um Größenordnungen schneller als andere Methoden sein kann, insbesondere der Y_{BUS} -Newton-Raphson-Methode. Ein wichtiger Einfluss auf die praktische Performance ist die Implementierung gemäß den Anforderungen moderner Prozessoren unter Berücksichtigung von Caches, Instruction Pipelining und Branch Prediction.

Zusätzlich zu den Lastflussmethoden präsentiert diese Arbeit mehrere Beschleunigungsmethoden wie statische Beschleunigungsfaktoren, Netzreduktion und Parallelisierung, die die Lösung praktischer Probleme weiter beschleunigen können.

Abschließend untersucht die Arbeit drei reale Netzsimulations-Probleme im Hinblick auf die performanteste Lösungsmethoden und den Effekt der vorgestellten Beschleunigungsstrategien.

■ **Optimization of Power Flow Computation Methods**

Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Power flow computations are a cornerstone of many simulations regarding the electric grid. With the recent developments in distributed generation and the continuing electrification of mobility and residential heating, a targeted grid operation and expansion is more important than ever to ensure reliability and sustainability. At the same time, these developments change the preconditions of electric grid simulations and often necessitate large-scale simulations with millions of individual scenarios.

This thesis evaluates the landscape of power flow computation methods with a focus on practical computational performance in large-scale simulations, as they occur in modern distribution grid planning. For this purpose, a number of power flow methods are investigated. In order to enable a wider range of applications, a selection of complicating grid elements and factors like multiple slack nodes, transformers, and asymmetric conditions are investigated for their effect on complexity and performance.

The main finding of this thesis is that the Z_{BUS} Jacobi method, an often-neglected power flow algorithm, can be magnitudes faster than the other methods, especially the established Y_{BUS} Newton-Raphson method. An important factor in the computational performance of all power flow methods is an implementation guided by the requirements of modern CPUs, which requires a mathematical formulation that leverages CPU features like caching, instruction pipelining and branch prediction.

In addition to the solution methods, the thesis presents a series of acceleration methods like static acceleration factors, grid reduction and parallelization, which can be applied to power flow problems for a further performance boost.

Finally, the thesis presents three real-world example problems and investigates the most performant solution method as well as the effect of the various acceleration strategies.

- **Prädiktive Pulskompensation zur aktiven Gleichtaktentstörung von leistungselektronischen Wandlern im CISPR 25 Komponententest**

M. Sc. Denis Müller

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow

Universität Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung:

7.12.2022

Die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs, und damit der Einzug großer, leistungselektronischer Konverter, stellt die elektromagnetische Verträglichkeit in Fahrzeugen vor neue Herausforderungen. Aktive EMV-Filter sollen die Miniaturisierung der Entstörelemente in der Leistungselektronik voranbringen. Die Realisierung aktiver EMV-Filter im Hochvoltbordnetz birgt wiederum eine ganze Reihe eigener Schwierigkeiten, die für einen flächendeckenden Einsatz adressiert werden müssen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Methode zur aktiven Störunterdrückung, die genau auf die Entstörung von leistungselektronischen Komponenten im Hochvoltbordnetz zugeschnitten ist. Anhand der aktiven EMV-Entstörung eines Pulswechselrichters wird der Stand der Forschung im Bereich aktiver EMV-Filter demonstriert. Basierend auf dem vorgestellten Prototyp werden die Schwächen der konventionellen Realisierung in analoger Schaltungstechnik identifiziert. Der aufgebaute Prototyp wird als Maßstab für die alternativ entwickelte Entstörmethode herangezogen.

Basierend auf der getakteten Funktionsweise von leistungselektronischen Wandlern wird eine neuartige Entstörmethode abgeleitet. Bei dieser Methode wird ein gepulstes Rechtecksignal den Störsignalen der Leistungselektronik destruktiv überlagert. Das Kompensationssignal wird über eine Hilfsspannungsquelle erzeugt und mittels zweier Kondensatoren auf die zu entstörenden Leitungen eingeprägt. Um eine möglichst hohe Dämpfungswirkung zu erzielen, muss das Kompensationssignal zeitlich exakt auf die Störanregung in Form der Schaltsignale der Leistungsmodule synchronisiert und deren Amplituden aufeinander abgestimmt werden. Die sogenannte Pulskompensation kommt mit einer Zwei-Punkt Topologie als aktivem Element aus. Durch das Zusammenspiel von Störanregung und Koppelpfad in leistungselektronischen Komponenten kann damit eine für die Anwendung passend zugeschnittene Entstörmethode entwickelt werden. Hierzu wird ein Modell entwickelt, mit dem die notwendige Pulsform, Pulsamplitude und Synchronisationsgenauigkeit bestimmt werden können. Ebenso lässt sich die erreichbare Filterdämpfung aus dem Modell ableiten.

Der theoretisch entwickelte Ansatz wird anhand eines Tiefsetzstellers für stationär getaktete, leistungselektronische Komponenten in den praktischen Einsatz überführt. Dabei wird sowohl die Effektivität der Pulskompensation zur Störunterdrückung demonstriert, als auch das vorgestellte, analytische Modell validiert. Anhand stationärer, aber auch dynamischer Veränderungen im Betriebspunkt des Tiefsetzsteller kann eine Methode zur automatischen Nachführung veränderter Betriebspunkte abgeleitet werden.

Die Nachführung erlaubt neben dem stationären Betrieb auch die Anwendung auf dynamisch getaktete Komponenten. Anhand eines Pulswechselrichters wird die Transformation der Methode von DC/DC Wandlern hin zu DC/AC Wandlern abgeleitet. Dabei liegt der Fokus auf den notwendigen Anpassungen in Hardware und Software der Pulskompensation.

Abschließend erfolgt ein Vergleich der vorgestellten Methode mit einer konventionellen aktiven Filtermethode. Der eingangs aufgebaute, aktive Filter in Analogtechnik wird hierfür als Maßstab zur Bewertung herangezogen. Dabei zeigt sich, dass die neue Methode höhere Dämpfungswerte und eine größere Bandbreite erzielt. Auch Bauraum und Kosten können mit der Pulskompensation gegenüber konventionellen aktiven Filtern nochmals deutlich reduziert werden.

- **Predictive Pulsed Compensation for Active Common Mode Suppression of Power Electronic Converters in a CISPR 25 Test Setup**

M. Sc. Denis Müller

The increasing electrification of the powertrain and, thus, the use of large power electronic converters causes new challenges for electromagnetic compatibility in vehicles. Active EMI filters are intended to improve the miniaturization of interference control elements in power electronics. The realization of active EMI filters in the high voltage cable harness of vehicles, in turn, involves a lot of issues of its own, which must be addressed for a widespread use.

This work investigates the development of a new method for active interference suppression that is precisely tailored to the disturbance patterns of power electronic components in the high voltage cable harness. Using the active EMI control of an inverter as an example, the state of research with respect to active EMI filters is introduced. Based on a presented prototype, the drawbacks of the conventional realization in analog circuit technology are identified. The built prototype is used as a benchmark for the alternatively developed EMI control method.

Based on the pulsed operation of power electronic converters, a novel EMI suppression method is derived. In this method, a pulsed square-wave signal is destructively superimposed on the disturbance signal of the power converter. The compensation signal is generated by an auxiliary voltage source and injected on the power lines by two capacitors. In order to achieve the highest possible attenuation, the compensation signal must be synchronized exactly in time to the disturbance source and their amplitudes must be matched. The so-called pulsed compensation can be built up with a two-level topology as the active circuit. The interaction of disturbance source and coupling path in power electronics can thus be used to develop a suppression method, tailored for this application. For this purpose, a model is developed which can be used to determine the necessary pulse shape, amplitude and synchronization accuracy. The achievable filter attenuation can also be calculated using the introduced model.

The theoretically developed approach is transferred to practical application using a buck converter as an example for a stationary clocked power converter. The effectiveness of pulsed compensation for disturbance suppression is demonstrated and the presented analytic model is validated. Based on stationary, but also dynamic changes in the operation point of the buck converter, an automatic synchronization method for tracking changed load situations is derived.

In addition to steady-state operation, the automatic synchronization also allows the application to dynamically clocked power converters. Using an inverter, the adaption of the method from DC/DC to DC/AC converters is introduced. Necessary adaptations in hardware and software of the pulsed compensation are scope of this section.

Finally, the pulsed compensation is compared to conventional active EMI filter methods. The analog active filter prototype, developed at the beginning of this work, is used as a benchmark for the evaluation of the new method. The results show that the pulsed compensation achieves a higher attenuation and a larger bandwidth. Compared to conventional active EMI filters, the pulsed compensation method can also significantly reduce installation space and costs of the EMI filter.

- **Netzplanung in unsymmetrisch belasteten Niederspannungsnetzen und der Betrieb von Batteriespeichern als netzentlastendes Betriebsmittel**
M. Sc. Lukas Held

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried
KIT Karlsruhe

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Tag der mündlichen Prüfung:

14.02.2022

- **Teilentladungsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung**

Dipl.-Ing. Thomas Götz

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann
TU Dresden
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2022

- **Increasing Network Utilisation Using Active Measures within Transmission Planning Studies**

M. Sc. Behzad Keyvani

Hauptberichter: Dr. D. Flynn
UCD Dublin
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung: 17.11.2022

- **Ein Beitrag zur Netzautomatisierung auf Niederspannungsebene unter Berücksichtigung spärlicher Datenlage und -übertragungsrate**

M. Sc. Marco Weisenstein

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. W. H. Wellßow
TU Kaiserslautern
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung: 07.12.2022

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 alternativen Gasen und deren Verhalten bei Gleichspannungsbeanspruchung.

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 SF₆ and alternative gases under AC and DC stress, 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:



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 – August 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 – August 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 Leitfähen 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



- **Development of electrode configuration for droplet separator based on DEP principles**

M. Sc. Fatemeh Ahmadipour

Dielectrophoresis (DEP) applications play an important role in current technology and meet lots of needs in various areas such as medical diagnosis, biosensors, and particle filtering. Considering the aforementioned description and given the fact that the conventional processes of droplet separation from gas flow are very energy consuming, the efforts for developing a new type of droplet separator leads to employ DEP in this application. This study focuses on the development of the electrode configuration on a laboratory scale to achieve an optimized design for a new type of droplet separator.

This research deals with designing and optimizing a geometry of a capacitor, based on the DEP principles which can promise higher separation efficiencies and energy saving. The moist air flows in the capacitor, in which an inhomogeneous electric field has been generated with specifically designed electrodes. Since the water molecules have a permanent dipole, they experience an acceleration towards the direction of increasing electric field strength by inducing dipole moments in the capacitor, and thus, the droplets separate from airflow. In this research, the COMSOL Multiphysics® simulation program and MATLAB are utilized to search for suitable optimized configurations. All the analytical calculations and finite element simulations are carried out for finding an optimized model in which the trajectory of water particles can be tracked by a camera.

Given the aforementioned description, an inhomogeneous electric field is needed to have dielectrophoretic force. Thus, a proper electrode geometry should be designed which can generate a desirable nonuniform electric field. Electric field distribution in cylindrical capacitors, which consist of two concentric cylinder electrodes is inhomogeneous and, in this design, the electric field strength increases towards the inner electrode. Although the cylindrical configuration can provide a non-uniform electric field, this geometry is not suitable for this study because the round shape of the outer electrode makes it difficult to have optical access in order to follow the trajectory of water droplets. Therefore, different substitute geometry has been developed which should not only provide an inhomogeneous electric field but also have suitable camera access. The proposed optimized geometry for the outer electrode has been shown in Figure 1.

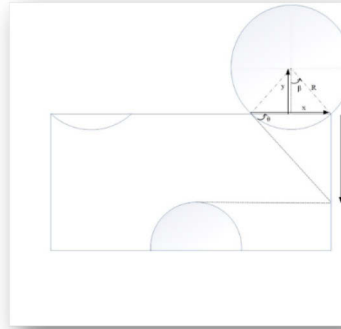


Figure 1 Optimized design for electrode configuration with consideration of providing camera access

The distance h is constant and equal to the distance between two electrodes in a cylindrical design (100 mm). In order to create a most desirable design, only the x -value need to be chosen, then R and y -values can be calculated. To be able to determine the optimal x -value, the first five different x -values (80 mm, 100 mm, 120 mm, 140 mm, 150 mm) have been investigated. Figure 2 shows the gradient curves. The light blue curve belongs to the cylindrical capacitor. From Figure 2 it can be seen that the optimum width lies between the values $x=120$ mm and $x=140$ mm, since the curve in this range has similar behavior to the cylindrical capacitor. For this reason, the x value of 130 mm is used in the following calculations.

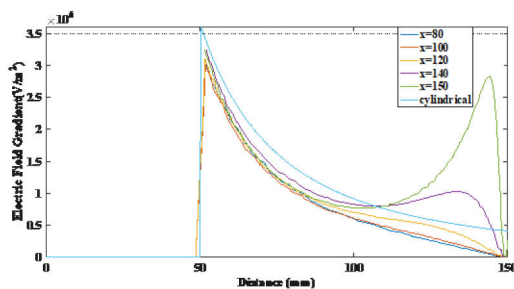


Figure 2 Gradient curves regarding the optimized design (for different x values)

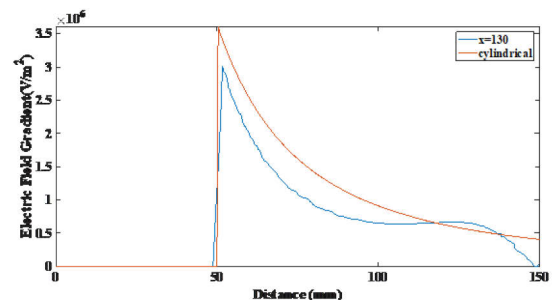


Figure 1 Comparison of gradient curves of the ultimate chosen design with cylindrical design

Figure 3 shows the gradient curves of the cylindrical capacitor and the new design with an arc width (x) of 130 mm. A voltage of 10 kV is applied to high voltage electrode of both designs. The gradient of electric field in optimized design is zero only in a small area. This allows the movement of more water particles, and thus more efficient separation of water droplets from the air. The substitute geometry has almost the same electrostatic properties as the cylindrical design in the electric field recording area and also allows the observation of the trajectory of the particles. Thus, with this electrode configuration water droplets can be influenced and split off under certain circumstances.

■ **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. Speziell im Bereich von Offshore-Windparks zählt sich diese Technik durch ihre Kompaktheit aus. Im Vergleich zu traditionellen AC-GIS kommen jedoch unter Gleichspannungsbelastung bisher vernachlässigbare Effekte zum Tragen, wie die Ansammlung und Migration von Ladungsträgern auf Isolator-Oberflächen. Um diese Ladungen zu untersuchen, wird ein System entwickelt, das 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.

Da es sich bei der Ladungsträermigration um einen sehr langsamen Prozess handelt, ist das Messsystem auf einen Dauerbetrieb von mehreren Monaten ausgelegt. Daher benötigt der Roboter eine permanente Stromversorgung sowie eine Kommunikationsverbindung für Steuerbefehle und Messdaten. Die Stromversorgung wird über einen eigens konstruierten Trenntransformator realisiert. Die Kommunikation mit dem Roboter erfolgt mittels CAN-Bus. Dieser wird mit einem Powerline-Communication-Modul auf die Stromversorgung aufmoduliert. Die Messdaten der Feldsonden liegen als Analogwert vor. Dieser wird in ein frequenzmoduliertes Rechtecksignal gewandelt und optisch durch den Gasraum übertragen.

■ 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 using gas insulated switchgear (GIS) with HVDC. This technology is especially beneficial in off-shore wind parks because of their compactness. 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 of 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 of the GIS there is a 5-axis robot which 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. In this way the surface potentials of the spacers can be measured and the surface charges can be calculated from the measured potentials.

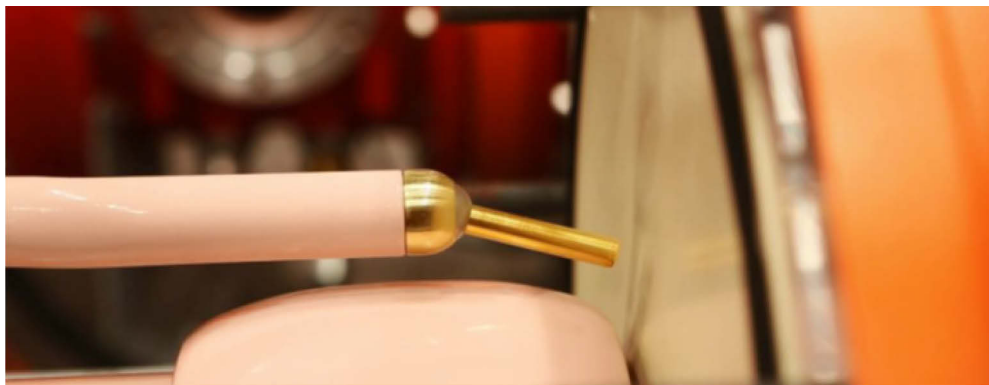


Fig 2: Feldsonde vor einem Stützer
Field probe in front of a spacer

Due to the slow speed of the charge migration, the setup is designed for long-term measurements of several months. This necessitates a permanent power supply for the robot along with a communication connection for the control of the robot as well as the measured values from the field probes. The power supply is provided by an isolation transformer, which has been built especially for this setup. The control of the robot uses CAN-Bus. This CAN-Bus is transmitted to the robot using a powerline communication module. The values from the field probes are provided as an analog signal that is transformed into a frequency modulated square wave and sent through the gas compartment using an optical link.

■ **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. In transformers, for example, 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).

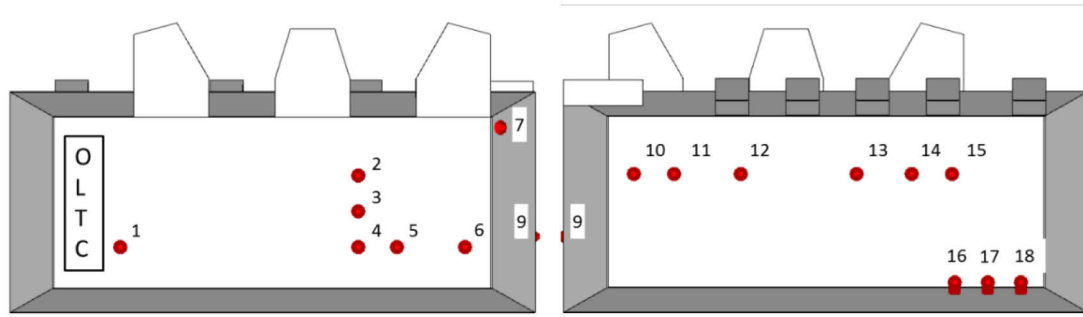


Figure 1. Sensor distribution over tank surface for HV side (left) and MV/LV side (right)

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).

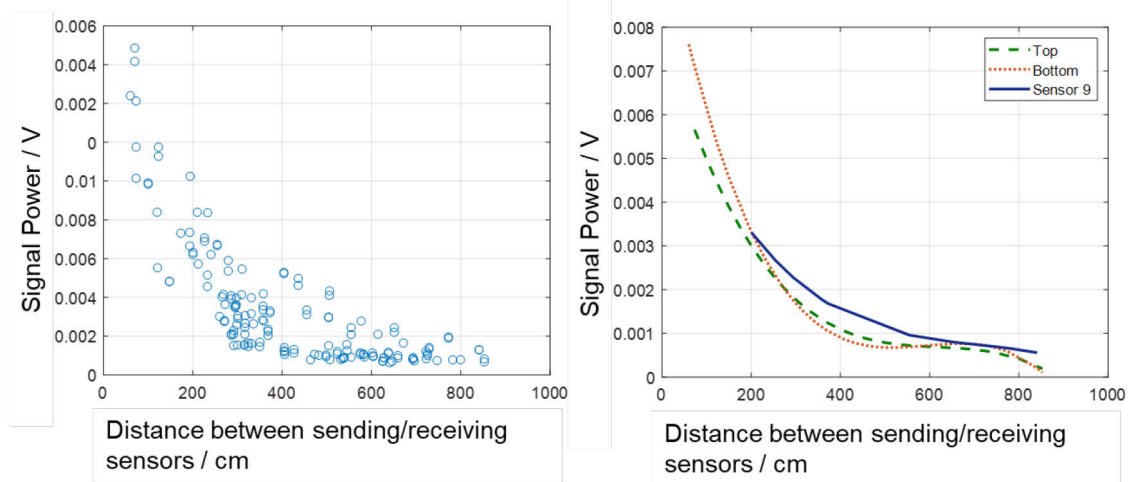


Figure 2. Signal power of sending-receiving antenna pairs vs distance (left) and fitted curves for different groups of antennas (right)

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.

- **Einfluss neuartiger Schaltkontaktmaterialien und Geometrien auf das Abrissverhalten von Vakuumschaltlichtbögen mit Überlagerung axialer Magnetfelder**

M. Sc. Markus Fischer

Für Schaltaufgaben im Mittelspannungsbereich werden vorwiegend Vakuumleistungsschalter eingesetzt. Prinzipiell entsteht bei Schaltvorgängen im Augenblicksmoment der mechanischen Kontaktstücktrennung ein Lichtbogen, welcher im natürlichen Nulldurchgang des auszuschaltenden AC-Stroms von selbst verlischt. Im Vakuum brennt dieser, gespeist aus verdampftem Kontaktwerkstoff, gebildete Lichtbogen bei kleinen Strömen instabil und kann bereits vor dem Nulldurchgang abreißen. Bei diesem transienten Vorgang treten hohe Stromgradienten auf. An angeschlossenen induktiven Verbrauchern können durch Resonanzeffekte hohe transiente Überspannungen auftreten und im schlimmsten Fall das Betriebsmittel irreversibel schädigen.

Das Abrissverhalten eines Schaltlichtbogens kann mithilfe verschiedener Maßnahmen beeinflusst werden. Eine Möglichkeit besteht darin, durch geeignete Wahl des Schaltelektroden-Werkstoffs den Abrissstromwert I_{ch} in Richtung des Nulldurchgangs zu reduzieren. Für den Kontaktwerkstoff Wolframcarbid-Silber (WCAg), der in Schaltern für Schützschaltheilungen verwendet wird, liegt der Stromabrisswert I_{ch} in einem Bereich von 0,7 bis 2,5 A. Bei Leistungsschaltern, die mit dem Werkstoff Kupfer-Chrom (CuCr) ausgerüstet sind, liegen diese Werte zwischen 4 und 6 A. Hier zeigt sich das grundlegende Einsatzgebiet dieser Schalter. In Schützschaltern ist ein niedriger Abrisswert zu priorisieren. Bei Leistungsschaltern müssen zudem hohe Kurzschlussströme sicher ausgeschaltet werden, ohne die Kontaktstücke durch verdampfenden Werkstoff stark zu erodieren. So ist das Stromabrissverhalten als zweitrangig einzustufen.

Durch die Überlagerung eines externen axialen Magnetfelds bei einer Schaltheilung ergibt sich ein zusätzlicher Einflussfaktor. Für einen mit WCAg vergleichbaren Werkstoff zeigt sich eine Senkung der Abrisswerte bereits ohne Magnetfeldeinfluss. Schaltkontaktstücke aus einem weiteren Material verhalten sich ähnlich zu CuCr-Werkstoffen: Insgesamt treten höhere Abrisswerte mit einem Minimum bei etwa $B \approx 50$ mT auf. Zusätzlich kann über hybride Kontaktgeometrien (siehe Fig. 1), bei denen die Schaltkontaktstücke aus zwei verschiedenen Werkstoffzusammensetzungen bestehen, das Abrissverhalten beeinflusst werden. Gegenüber der Platte/Platten-Anordnung ergeben sich für die ein- und zweiseitige Ring-Pin-Anordnung um 200 mA niedrigere Abrisswerte.

■ **Influence of new Switching Contact Materials and Geometries on the Chopping Behavior of Vacuum Switching Arcs with Superimposed Axial Magnetic Fields**

M. Sc. Markus Fischer

Vacuum interrupters are mainly used for switching tasks in the medium voltage range. During switching operations, an arc is generated at the moment of mechanical contact separation, which ideally chops in the natural current zero crossing. In vacuum this arc is created from vaporized contact material: It is unstable at low currents and can chop before zero crossing. During this transient process high current gradients occur. At inductive loads high transient overvoltages can occur due to resonance effects which can damage in worst cases the equipment. The chopping behavior of the interruption arc can be influenced by various methods. One is to reduce chopping by a proper choice of the contact materials and thus to shift it closer to the zero crossing. For the contact material tungsten carbide silver (WAg), which is used in contactor, the chopping current I_{ch} is in the range of 0.7 ... 2.5 A. In circuit breakers, equipped with copper chromium (CuCr) contacts, the values are between 4 and 6 A. This illustrates the basic application of these interruption devices. In contactor application a low chopping value and an easy evaporation of the contact material is prioritized. Circuit breakers must interrupt safely high short circuit currents with reduced erosion of the contact by vaporization. Hence the chopping behavior is from secondary importance.

The superposition of an external axial magnetic field during the interruption operation leads to a further influencing factor. For an electrode material comparable to WAg a reduction of the chopping values is already shown without the influence of a magnetic field. Interruption contacts, made of another investigated material, show a similar behavior to CuCr materials: Higher chopping values with a minimum axial magnetic field at $B \approx 50$ mT. Additionally, hybrid contact geometries (see Fig. 1), where the interruption contacts consist of two different material compositions, can be used to influence the chopping behavior. Compared with the plate/plate arrangement, the one-sided and two-sided ring-pin arrangements result in 200 mA lower chopping currents.

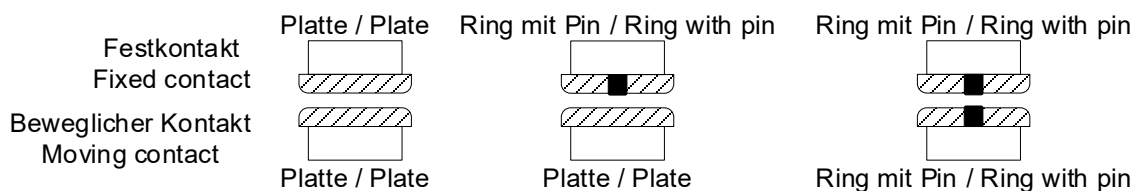


Fig. 1: Kontaktstückanordnungen.
Contact arrangements.

■ **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 [2], 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 auf der europäischen Norm IEC 60076-7 [2] und der amerikanischen Norm IEEE C57.91 [3]. 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 thermischen 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 stellt unter anderem Ziele des Forschungsprojektes „ZÜbReNe“ dar. Dieses Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind die verschiedenen Thermischen Modelle auf ihre Genauigkeit in der Vorhersage der oberen Öltemperatur untersucht worden. Über die Untersuchung der Genauigkeit und der relevanten Umgebungsparameter hinaus wird die Selbstparametrierbarkeit der Modelle untersucht und die dadurch mögliche Veränderung der Vorhersagegenauigkeit. Hierbei wurde in diesem Jahr ein Hauptaugenmerk auf die thermische Modellierung von Windparktransformatoren sowie die Berechnung und Validierung der Heißpunkttemperatur gelegt. Außerdem wurde die Anzahl der erforderlichen Messdaten und die benötigte Qualität der Messdaten untersucht.

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

M. Sc. Malte Gerber

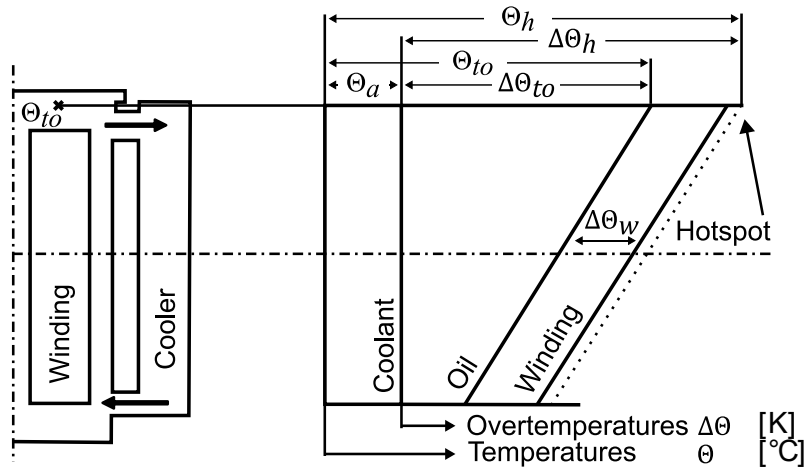
Due to the progressive development of the ongoing energy turnaround, the energy supply structure is changing from centralized to decentralized energy generation. In this context, equipment must be replaced more and more frequently to prevent an overload of this equipment. To enable overloading of transformers and thus prevent costly removal, the thermal load and consequently the premature aging of the transformer must first be estimated. If the hot spot temperature in the transformer rises above the prescribed limit of 98°C according to IEC 60076-7 [2], negative aging effects can occur on the transformer. By permanently monitoring the thermal behavior by means of a monitoring system, the possible overload at current ambient parameters can be estimated with the help of the thermal model of the transformer.

The thermal model used for this purpose is based on the European Standard IEC 60076-7 [3] and the American Standard IEEE C57.91 Clause 7 [3]. For this purpose, both the natural convection of oil and air and the changing ambient temperature have been considered, see Fig. 1 and Fig. 2. The thermal model has been parameterized by recording the operating condition over a longer period. 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 at given ambient parameters. The thermal models proposed in the standard are not able to take into consideration the dynamic change of the cooling mode, which means that the parameterization data set must have the same cooling behavior as the considered overload case.

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

Within the scope of the research project, the various thermal models have been investigated for their accuracy in predicting the upper oil temperature. Beyond the investigation of the accuracy and the relevant environmental parameters, the self-parameterization of the models is investigated and how this may change the prediction accuracy. Here, a major focus this year has been on the thermal modeling of wind farm transformers and the calculation and validation of the hotspot temperature. In addition, the required number of measurement data and the necessary quality of measurement data were investigated.

Darüber hinaus wurden in diesem Jahr unterschiedliche Methoden zur thermischen Modellierung von Ortsnetztransformatoren mit Hilfe von neuronalen Netzen untersucht. Hierbei steht besonders die Skalierbarkeit der Modelle auf dem Prüfstand, da viele dieser neuronalen Netzmodelle auf einer eher statistischen Modellbetrachtung beruhen. Daher ist aktuell ein hybrider Modellansatz (Abb. 3) der Hauptfokus der Modellierung mittels neuronaler Netze.



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)

Abb. 1: Temperaturverteilung im Transformator

Fig. 1: Temperature distribution in the transformer

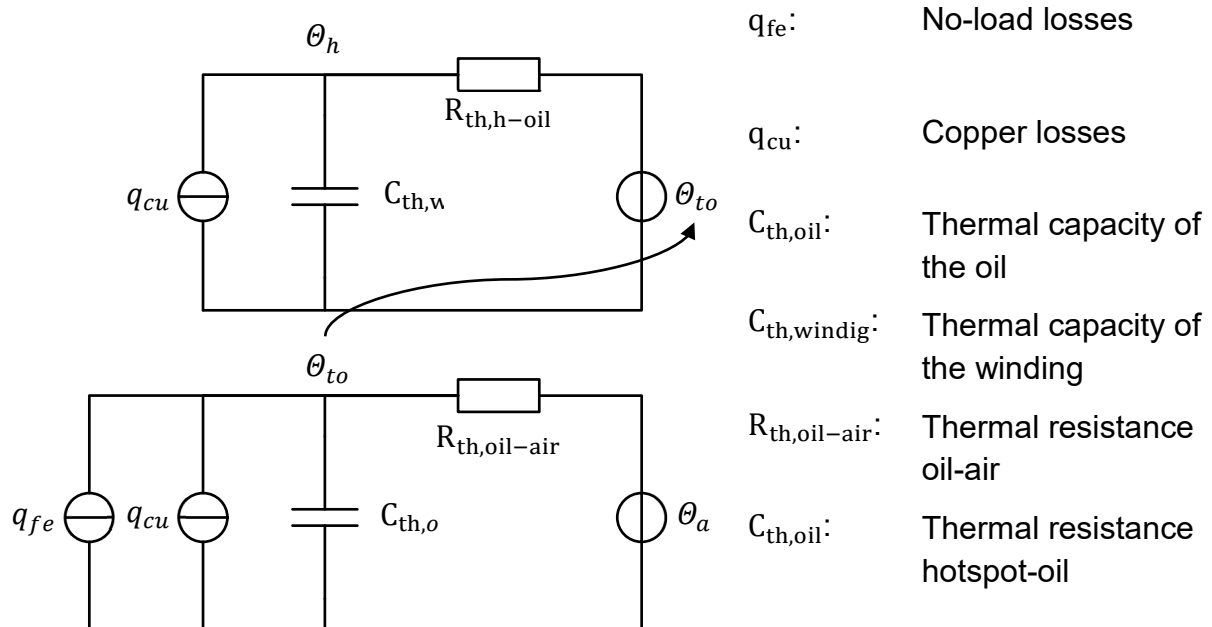


Abb. 2: Thermisches Ersatzschaltbild des thermischen Verhaltens im Transformator

Fig. 2: Thermal equivalent circuit of the thermal behavior in the transformer

In addition, different methods for thermal modeling of local grid transformers using neural networks were investigated this year. Here, especially the scalability of the models is put to the test, since many of these neural network models are based on a rather statistical model approach. Therefore, a hybrid model approach (Fig. 3) is currently the main focus of modeling by using neural networks.

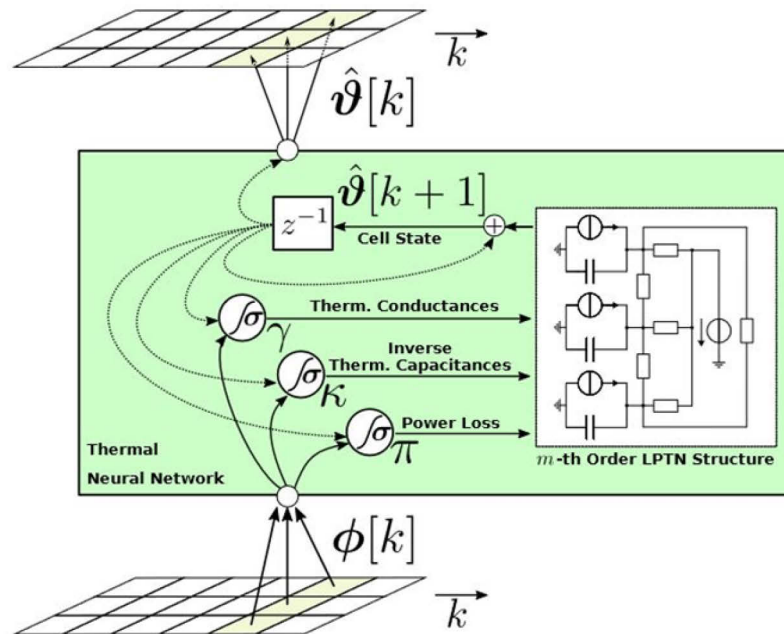


Abb. 3: Konzept des thermischen neuronalen Netzes [1]

Fig. 3: Thermal neural network concept [1]

[1]: W. Kirchgässner, O. Wallscheid und B. Joachim, „Thermal Neural Networks: Lumped-Parameter Modelling With State-Space Machine Learning,“ IEEE, Paderborn, 2021

[2]: IEC 60076-7: Leistungstransformatoren - Part 7: Leitfaden für die Belastung von mineralölgefüllten Leistungstransformatoren, *International Electrotechnical Commission*, 2016

[3]: IEEE C57.91: IEEE Guide for Loading Mineral-Oil- Immersed Transformers, *American National Standard*, 2011

■ 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 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.

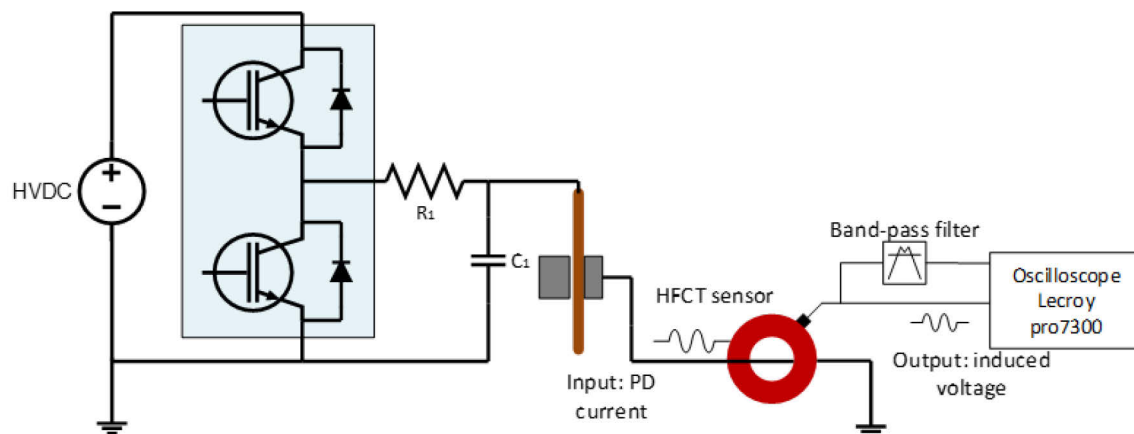


Fig. 1 Test platform for the PD measurement under impulse condition.

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. However, the optimization of the measure technique is still under going.

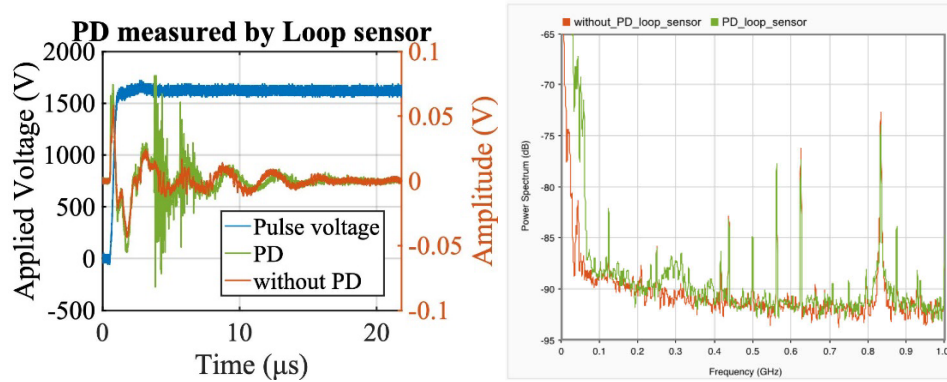


Fig. 2 Time-domain signal and FFT analysis of background noise and PD signal

The influence factors, including electrical stress and environmental stress, on the lifetime of the winding, are also under investigation. The study of the lifetime model of the winding is also one of recent studies.

■ Teilentladungsmonitoring für Kabelmuffen

M. Sc. Daniel Passow

Mit dem Trend der zunehmenden Verkabelung der Hoch- und Höchstspannungsnetze nimmt die Bedeutung der einzelnen Betriebsmittel innerhalb von Kabelnetzen zu. Dies gilt insbesondere für Kabelgarnituren, die als verbindende Elemente ein integraler Bestandteil dieser Netze sind. Im Rahmen von Maßnahmen wie „Predictive Maintenance“ spielt die Erfassung der Zustandsparameter von Betriebsmitteln eine entscheidende Rolle für die Sicherung der Energieversorgung. Kabelgarnituren in Form von Kabelmuffen oder Endverschlüssen bieten die Möglichkeit, autarke Monitoringsysteme für die Zustandsüberwachung punktuell im Kabelsystem zu integrieren. Dabei dient die Erfassung der TE-Aktivität ausschließlich als Kriterium zur Bewertung des Isolationszustands. Um das im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts ZÜbReNe entwickelte, prototypische TE-Monitoringsystem für Kabelmuffen messtechnisch zu validieren, wird der Aufbau aus Fig. 1 verwendet. Der Aufbau besteht aus einem konventionellen kapazitiv auskoppelnden TE-Diagnosesystem, dem prototypischen TE-Monitoringsystem und dem eigens entwickelten induktiven Sensor sowie einer Kabelmuffe mit einem definierten Montagedefekt. Anhand des definierten Aufbaus kann nach der Kalibrierung beider Systeme die Sensitivität und die Phasenlage der beiden Messeinheiten verglichen werden. Fig 2. zeigt den Vergleich der resultierenden TE-Muster für beide Systeme bei derselben Fehlstelle. Es ist festzustellen, dass beide Systeme dieselbe Phasenlage und dasselbe Muster zeigen. Ebenso ergibt sich ein vergleichbarer TE-Pegel. Der größte Unterschied ergibt sich im Rauschpegel des Monitoringsystems. Dies ist zum einen der ungekapselten induktiven Messung im Schirm und zum anderen der für das Monitoringsystem vorgegebenen Restriktionen für die Auslegung des induktiven Sensors geschuldet. Neben der Validierung der TE-Funktionalität wurde das Monitoringsystem im Rahmen des ZÜbReNe Projekts während eines Typentests ebenso für die grundsätzliche Einsatzfähigkeit in realen Pilotprojekten qualifiziert.

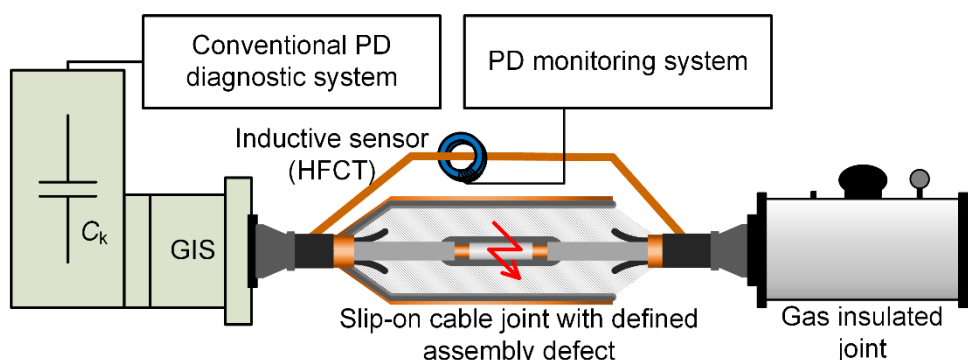


Fig. 1 Messaufbau für die Validierung des prototypischen TE-Monitoringsystems
Measurement setup for the validation of the prototypical PD-monitoring system

■ Partial Discharge Monitoring for Joints

M. Sc. Daniel Passow

With the trend towards putting an increased number of HV and EHV cables in operation, the importance of functional cable accessories is growing. Since cable accessories are used as connecting elements, they are an integral part of modern cable grids. As a part of predictive maintenance strategies, the monitoring of condition parameters is an important tool to evaluate the status of a cable route and secure the energy supply. Cable joints and terminations offer the possibility of integrating self-sufficient monitoring systems at exposed points along a cable. In this context the detection of PD activity serves as criterion for evaluating the insulation condition of an accessory or cable. In order to validate the functionality of a prototypical PD monitoring system, which was developed within the scope of the publicly funded project ZÜbReNe, the setup shown in Fig. 1 is used. The setup consists of a conventional, capacitively connected PD-diagnostic system, the prototypical PD-monitoring system and the specifically developed High Frequency Current Transformer (HFCT). Furthermore, a slip-on joint with a defined assembly defect as PD source is used. Based on these boundary conditions, the sensitivity and the positioning of the phase resolved partial discharge (PRPD) pattern of both measuring devices can be compared after calibration of both systems. Fig. 2 shows the comparison of the resulting PRPDs for both systems at the same defect. Both systems show a similar PRPD pattern. Furthermore, the PD level is comparable. The biggest difference is given in the increased noise level of the monitoring system. This is caused by the non-encapsulated PD measurement with the HFCT in the screen and the restrictions for the design of the HFCT. In addition to the validation of the PD functionality, the monitoring system was also qualified for operational capability in pilot projects by applying the system during a type test within the framework of the ZÜbReNe project.

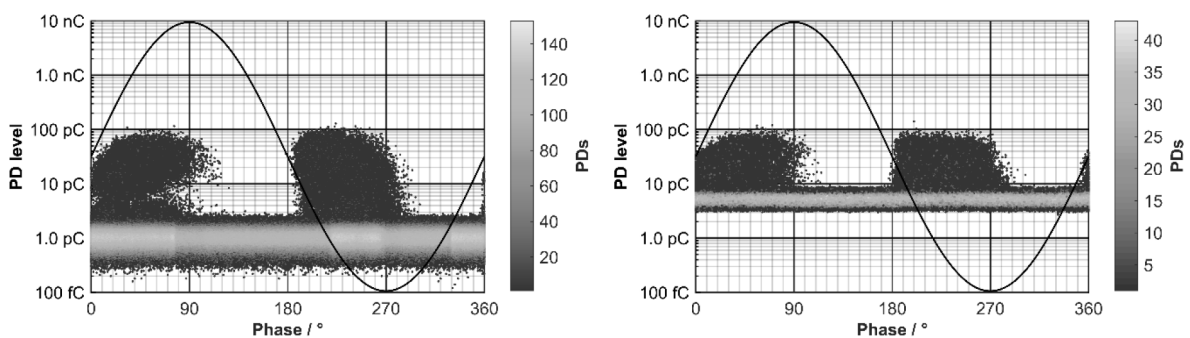


Fig. 2 Resultierende TE-Muster für dieselbe Fehlstelle, links: konventionelles TE-Diagnosesystem, rechts: prototypisches TE-Monitoringsystem
Resulting PRPD pattern for the same defect, left side: conventional PD diagnostic, right side: prototypical PD-monitoring system

■ **Modeling of HVDC Converter Transformers for Electromagnetic Transient Studies**

M. Sc. Felipe Luis Probst

The HVDC (High Voltage Direct Current) systems are recognized for presenting technical and economic advantages for long distances transmission, asynchronous interconnections, and long submarine cable crossing. The number of projects has been increasing in recent years, reflecting the global interest in this technology.

The converter transformer is one of the most important elements in an HVDC system. As other transformers, they must withstand electromagnetic transients, such as lightning or switching of circuit breakers and disconnect switches. Moreover, the operation of the converter causes some effects on the HVDC converter transformer due to harmonics and DC offset, such as additional losses, vibration, and noise level increase. These factors highly affect the equipment design, since they imply a larger size to meet necessary insulation levels, which also increases the production costs. Furthermore, some recent failures of HVDC converter transformers due to resonances show how much the reliability of energy transmission is dependent on the understanding of the system's behavior.

Due to the relevance of converter transformers and for a correct assessment of their operating condition and interaction with the power system where they are installed, it is important to develop a reliable model to perform electromagnetic transient studies. Furthermore, it is interesting that such a model covers a wide band of frequency, since typical transient events occur over a wide frequency range, from a few Hz to hundreds of MHz. The nonlinear characteristics of the core considerably impact the equipment's response at low frequencies, while the influence of stray capacitances impacts at high frequencies.

There are some works in the literature that use black-box modeling for transformers. However, it is assumed a linear behavior for the equipment, which can be considered valid only for high frequencies. Thereby, these models cannot be used for studies of transients like temporary overvoltage, inrush current, and ferroresonance. For HVDC converter transformers, which are strongly influenced by harmonics and DC offset caused by the converters, it is even more important to consider the nonlinearities at low frequencies.

Therefore, the main objective of this research is to develop a reliable computational model of HVDC converter transformers that allows the performance of different studies in transient and steady-state regimes covering a wide frequency band.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

- **Forschungsprojekt „ReTrans“:
Reduzierung von Transiten im Hochspannungs-
verteilnetz für eine optimale Integration von
erneuerbaren Energien**

Laufzeit: Oktober 2019 – Dezember 2022

Die fortschreitende Integration regenerativer Energietechnologien in das elektrische Versorgungsnetz stellt deren Betreiber zunehmend vor neue Herausforderungen. So führt die vermaschte Struktur der 110 kV-Netze zu ungewollten Leistungstransiten in den 110 kV-Netzen, da diese an mehreren Punkten an die Übertragungsnetze der Höchstspannungsebenen angeschlossen sind. Diese ungewollten Transite führen bereits heute neben der durch die erneuerbaren Energien verursachten Erhöhung der Netzauslastung zu einer zusätzlichen Belastung. Die zusätzlichen Belastungen der Betriebsmittel reduzieren die verfügbare Übertragungskapazität der 110 kV-Netze und führen gleichzeitig zu einer Erhöhung der Übertragungsverluste. Zudem müssen aufgrund dieser Leistungstransite stellenweise Erzeugungsanlagen abgeregelt und topologische Maßnahmen wie Netztrennungen und Trafoabschaltungen durchgeführt werden, um die (n-1)-Sicherheit im Netz aufrechterhalten zu können.

Bei der Durchführbarkeitsstudie ReTrans soll die Reduktion von Leistungstransiten im Verteilnetz mit einem PMU-Monitoring-System für eine optimale und verbesserte Integration von erneuerbaren Energien im Verteilnetz untersucht werden. Hierfür soll ein PMU-Monitoring-System entwickelt und in einem Netzgebiet der Netze BW zur Beobachtung der Leistungstransite umgesetzt werden. Zur Identifizierung und Bewertung der Leistungstransite soll dieses System mit einem Netzmodell sowie der Leitwarte gekoppelt werden, um die aktuellen Schaltzustände sowie die Einspeise- und Lastprognosen zu erhalten. Darauf aufbauend werden mit geeigneten Gegenmaßnahmen die Leistungstransite reduziert und mit einer Optimierung des Blindleistungspotenzials im Netz die Übertragungsverluste verringert. Ausgehend hiervon soll ein Konzept zur Vorhersage der Leistungstransite und deren Reduktion im vorausschauenden Netzbetrieb entwickelt werden. Hierdurch sollen alle Betriebsmittel optimal eingesetzt werden, um eine weitere Integration der erneuerbaren Energien zu ermöglichen. Abschließend werden die notwendigen Modellierungsschritte in einem Leitfaden als Hilfestellung für die Umsetzung des Konzepts zusammengefasst.



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

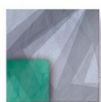
Das Vorhaben wird im Rahmen des BWPLUS-Förderprogramms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ beim Projektträger Karlsruhe Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) am Karlsruher Institut für Technologie mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

- **Research Project „ReTrans”:
Reduction of Transits in the High-Voltage Distribution
Grid for an Optimal Integration of Renewable Energies**

Period: October 2019 – December 2022

The grid operators are facing new challenges due to the increasing integration of renewable energy systems into the electricity distribution grid. The meshed structure of the 110 kV networks leads to unwanted power transits in the 110 kV grids, as these are connected at several points to the transmission grids. These unwanted transits are leading to an additional loading of the 110 kV grid beside the grid loading caused already by renewable energies. The rising loading reduce the available transmission capacity of the 110 kV grid and at the same time lead to higher transmission losses. Due to these power transits, regenerative power plants must be curtailed in some regions of the grid. Moreover, topological measures must be adopted such as transformer shutdowns and grid disconnections in order to maintain the (n-1) criterion in the grid.

In this context, the feasibility study ReTrans investigates the reduction of power transits in the distribution grid with the help of a PMU-monitoring-system for an optimal and improved integration of renewable energies in the distribution grid. For this purpose, a PMU-monitoring-system has to be developed and implemented in the grid of the grid operator Netze BW in order to control the power transits. This system will be coupled with a grid model and connected to the Netze BW control center to identify and evaluate the power transits. Through this coupling, the current switching states as well as the feed-in and load forecasts can be obtained. Based on this, the power transits could be reduced with the help of suitable countermeasures and the transmission losses could be limited by optimizing the reactive power potential in the grid. Following this, a concept for forecast and reduction of power transits among a predictive grid operation will be developed. In this way, all resources could be used optimally to enable further integration of renewable energies. Finally, the necessary modeling steps will be summarized in a guideline in order to standardize the implementation of the concept.



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Support by the BWPLUS-Research Program “Preservation of the Environment” at the Project Management Agency Karlsruhe Baden-Württemberg Program (PTKA-BWP) at the Karlsruhe Institute of Technology with funds of the State of Baden-Württemberg is gratefully acknowledged.

- **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 – Juni 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 – June 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 „ILA-BW“:
Intelligentes netzdienliches Lademanagement in
Baden-Württemberg**

Laufzeit: August 2021 – Dezember 2022

Im Rahmen des Projektes ILA-BW werden mit den Partnern EnBW Energie Baden-Württemberg AG, dem Innovationsprojekt ChargeHere, der Stuttgart Netze GmbH und der Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V. zwei Standorte mit Ladeinfrastruktur ausgestattet. Am Firmensitz von ChargeHere werden 8 Ladepunkte in einem Mehrfamilienhaus mit hybrider Nutzung als Bürofläche und privaten Wohnungen installiert. Am Standort des IEH werden 5 Ladepunkte aufgebaut und in das Smart-Grid-Labor integriert. Ein Projekthighlight ist die Möglichkeit des bidirektionalen Ladens am IEH.

Anhand dieser Standorte wird eine Potentialanalyse bezüglich der Nutzung von intelligenten Lademanagementsystemen im elektrischen Energieversorgungssystem als eine Alternative zum konventionellen Netzausbau und zur Unterstützung der Integration von Ladeinfrastruktur in Parkflächen durchgeführt. Die technische Realisierbarkeit des ermittelten Potentials wird durch Feldversuche und Spannungsqualitätsmessungen an der Ladeinfrastruktur erfolgen.

Für die Entwicklung von Lademanagementfunktionen wird eine ganzheitliche Optimierung auf Basis von synthetischen Ladeprofilen und der Prognose von PV-Erzeugung und Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen durchgeführt. In weiteren Simulationsstudien werden Skalierungseffekte in unterschiedlichen Szenarien nachgebildet und bewertet. Auf Basis der Simulationsstudien wird das Potential an zusätzlichen Elektrofahrzeugen, welche an dem Netzverknüpfungspunkt durch die optimierten Ladevorgänge geladen werden können, ermittelt.

Anhand der gewonnenen Daten durch die Nutzung der Parkflächen an dem betrachteten Mehrfamilienhaus erfolgt eine Validierung der Last- und Erzeugerprognose. Die entwickelten Erweiterungen des Lademanagements können im Smart-Grid-Labor unter definierten Bedingungen evaluiert werden.

Das Vorhaben wird im Rahmen des BWPLUS-Förderprogramms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ beim Projektträger Karlsruhe Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) am Karlsruher Institut für Technologie mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

- **Research Project: “ILA-BW”:
Intelligent Grid-Supporting Charging Management in
Baden-Württemberg**

Period: August 2021 – December 2022

The project ILA-BW aims to equip two locations with charging infrastructure. The project is enabled by the partners EnBW Energie Baden-Württemberg AG, the ChargeHere innovation project, Stuttgart Netze GmbH and the Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V. At ChargeHere's office, 8 charging points will be installed in an apartment building with the hybrid use as office space and private apartments. At the IEH site, 5 charging points will be installed and integrated into the smart grid laboratory. The project highlight is to showcase the possibility of bidirectional charging at the IEH to provide grid support.

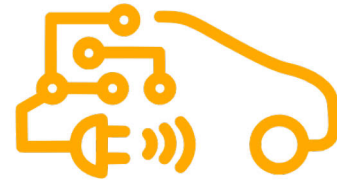
On these locations, prospective analysis will be conducted regarding the use of smart charging management systems in the electric power system as an alternative to conventional grid expansion and to support the integration of charging infrastructure in the parking areas. The technical feasibility of the identified aspects will be performed through various field tests and voltage quality measurements from the charging infrastructure.

Holistic optimization based on synthetic charging profiles, prediction of PV generation and prediction of electric vehicle charging behavior will be performed for the development of charging management functions. In further simulation studies, scaling effects in different scenarios will be replicated and evaluated. Based on the simulation studies, the possibility of charging additional electric vehicles at the grid interconnection point is determined.

Based on the data obtained from the parking areas of the apartment building, the validation of the load and generator forecast will be performed. The developed functions of the charging management can also be evaluated in the smart grid laboratory under defined conditions.

Supported by the BWPLUS-Research Program “Preservation of the Environment” at the Project Management Agency Karlsruhe Baden-Württemberg Program (PTKA-BWP) at the Karlsruhe Institute of Technology 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:



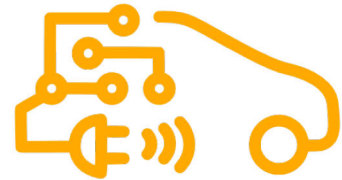
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



DLR Projektträger

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 – Juli 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.

#jetztklimachen

unterstützt vom



KLIMA
INNOVATIONS
FONDS

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

Period: July 2022 – July 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 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.

#jetztklimachen****

unterstützt vom



KLIMA
INNOVATIONS
FONDS

- **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:



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:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

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:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

■ **Reduktion von Übertragungsverlusten in 110 kV-Netzen**

M. Sc. Paul Burkhardt

Aufgrund des steigenden Ausbaus erneuerbarer Energien und der fortschreitenden Sektorenkopplung werden die Verteilnetze zunehmend belastet. Dadurch können sich zukünftig die Verluste beispielsweise in der 110 kV-Ebene erhöhen. Aktuell entfallen in Deutschland auf die 110 kV-Ebene ca. 5 TWh/a an Verlustenergie. Kann diese durch Optimierungsmaßnahmen reduziert werden, können einerseits Kosten vermieden und andererseits durch die Bereitstellung der Verlustenergie hervorgerufene CO₂-Emissionen gemindert werden.

Im 110 kV-Netz vorhandene Möglichkeiten zur Beeinflussung des Blindleistungshaushaltes, wie umrichterbasierte Erzeugungsanlagen oder Betriebsmittel zur Blindleistungskompensation, werden bisher meist nicht gezielt zur Verlustreduktion eingesetzt. Vielmehr ist beispielsweise bei der Q(U)-Regelung oder $\cos\phi(P)$ -Steuerung von dezentralen Erzeugungsanlagen der Zweck, durch lokale Blindleistungseinspeisung das zulässige Spannungsband einzuhalten. Kompensationsanlagen wie Spulen oder Kondensatorbänke hingegen werden unter anderem unterspannungsseitig an den 380/110 kV-Transformatoren eingesetzt, um beispielsweise vertraglich vereinbarte Blindleistungsflüsse an den Übergabeknoten zum Übertragungsnetz sicherstellen zu können.

Am IEH wurde eine Methodik entwickelt, die es auf Basis einer linearen optimalen Lastflussrechnung (OPF) unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen ermöglicht, das Blindleistungspotential von dezentralen Erzeugungsanlagen und Kompensationsanlagen in der 110 kV-Ebene zur Verlustreduktion einzusetzen. Für den netzdienlichen Einsatz von Spulen und Kondensatorbänken ist allerdings erforderlich, dass sich diese gestuft schalten lassen und nicht ausschließlich zu- und abschaltbar sind. Die entwickelte Methode kann dabei in quasi Echtzeit im realen Netzbetrieb eingesetzt werden.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Verlustreduktion bietet die Verringerung von Leistungstransiten durch das 110 kV-Netz. Ursache für die Leistungstransite sind parallel verlaufende Leitungen in einem vermaschten Netzverbund bestehend aus der 380 kV und 110 kV Ebene. Wird innerhalb der 380 kV Ebene Leistung übertragen, fließt aufgrund der Impedanzverhältnisse ein Teil der übertragenen Leistung durch das 110 kV Netz. Die Leistungstransite können dabei sowohl durch Quer- als auch in geringem Maße durch Längsregeltransformatoren beeinflusst werden. Es ist daher geplant, diese als weitere steuerbare Betriebsmittel in den entwickelten echtzeitfähigen OPF zur Verlustreduktion einzubinden.

- **Reduction of active power transmission losses in 110 kV grids**

M. Sc. Paul Burkhardt

Due to the increasing expansion of renewable energy sources (RES) and the ongoing sector coupling, distribution grids are increasingly loaded. As a result, active power losses in the 110 kV level, for example, may increase in the future. Currently, the 110 kV level in Germany causes about 5 TWh/a of losses. If losses can be reduced by optimization measures, costs can be avoided and CO₂ emissions caused by the provision of active power losses can be minimized.

Existing options in the 110 kV grid for controlling the reactive power balance, such as converter-based generation or equipment for reactive power compensation, have so far mostly not been used for loss reduction. Rather, the purpose of Q(U)-control or $\cos\phi(P)$ -control of RES is to stay within the permitted voltage band by injecting reactive power locally. Compensation units, such as coils or capacitor banks, are used, for instance, on the low-voltage side of 380/110 kV transformers in order to ensure contractually agreed reactive power flows at the interconnection nodes to the transmission grid.

At the IEH, a novel method was developed, which enables the reactive power potential of RES and compensation units in the 110 kV level to be used for loss reduction. The algorithm is based on linear optimal power flow (OPF) and the given constraints such as voltage limits are regarded. For this purpose, various objective functions were tested with regard to their accuracy and suitability for a real-time application. For the grid-serving use of coils and capacitor banks, however, it is necessary that they can be switched in steps and not solely switched on and off. The developed method can be used in close to real time in grid operation.

The reduction of transit power flows through the 110 kV grid provides an additional opportunity for active power loss reduction. Transit power flows are caused by parallel lines in a meshed grid consisting of 380 kV and 110 kV levels. If power is transmitted within the 380 kV level, part of the transmitted power flows through the 110 kV grid due to the impedance ratios. The transits can be reduced by phase shifting transformers and, to a minor degree, by series regulating transformers. It is therefore planned to integrate both transformer types into the real-time capable OPF developed as further controllable operating resources. Furthermore, the proposed method will be tested on cyclical snapshots from the control room of a southern German distribution grid operator.

■ Short-Circuit Currents Characterization for Future Converter-based Power Systems

M. Sc. Deepak

Short-circuit power (SCP) is an important parameter in classical power systems with synchronous generators (SGs). SCP is calculated from the initial short-circuit current (SCC). Using SCP, different aspects of planning and operation are derived. For example, short-circuit ratio (SCR) provides information about the grid strength at the node and is part of equipment connection guidelines. Other aspects are equipment and protection system design, small-signal, transient and voltage stability. However, with the integration of renewables with converter-interfaced generators (CIGs), the dynamic behavior of the grid is changing, which is dictated by the controller strategies of CIGs and not physics, like in SGs. This results in different short-circuit behavior of the grid and therefore, need to revisit the definition of SCP and correspondingly, SCC. In the literature so far, unlike small-signal behavior, not much work is presented regarding the short-circuit response with grid feeding (GFL), grid forming (GFM) converter and SGs. There are open questions when it comes to relating the short-circuit response to the planning and design of future CIGs-based power systems.

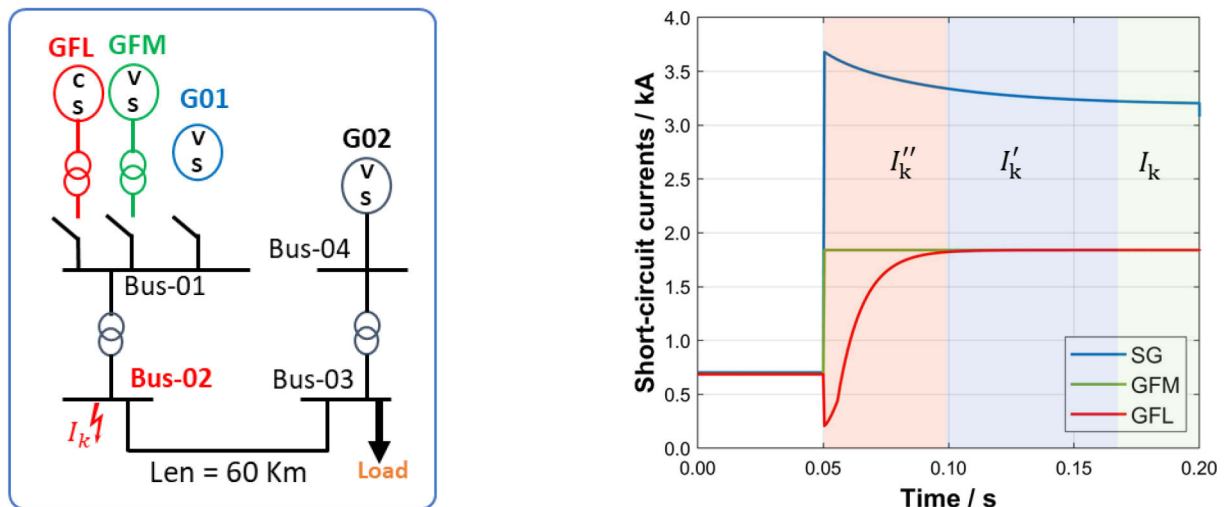


Fig. 1: shows a simplified model to show short-circuit currents in future converter-based power systems

To show the short-circuit characteristics of future CIGs-based power systems, a simplified two-machine model (Fig. 1) is used. The SG at Bus-01 is G01 and then replaced with GFL and GFM with the same nominal power and set-points as G01. WECC WT Type 4B is used as GFL and virtual synchronous machine as GFM. The fault occurs at Bus-02 for 150 ms. SCC for different combinations of units are presented in Fig. 2 with an individual contribution in Fig. 3. With GFL and SG, the

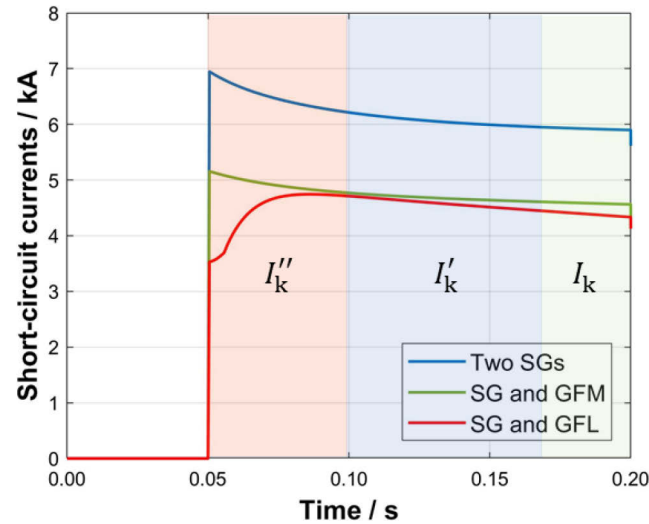


Fig. 2: Short-circuit currents with SGs, GFL, and GFM for short-circuit at Bus-02

maximum is no more at fault inception. This results in revisiting the calculation of SCR which is calculated from the initial SCC. The breaking currents are higher than the initial SCC but lower than with just SGs. With GFM and SG, the maximum is at fault inception but the reduction of SCC is lesser than with only SGs, which means, sustaining a similar magnitude of SCC for a longer duration.

This work is being further developed by taking the IEEE-39 bus system as the test system and proposing short-circuit currents characterization for the future converter-based power system.

■ **Netzintegration von Elektromobilität in Übertragungsnetze**

M. Sc. Nelly-Lee Fischer

Gemäß der Zielsetzung der Bundesregierung bezüglich der Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr sollen bis 2030 sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sein und insgesamt eine Millionen Ladepunkte zur Verfügung stehen. Im Bereich der Netzintegration von Elektromobilität sind noch viele Herausforderungen ungeklärt, vor allem auch im Hinblick auf die Auswirkungen der Ladevorgänge bei einer hohen Durchdringung auf das Übertragungsnetz. Für eine netzdienliche Integration der Ladeinfrastruktur müssen die Netzauswirkungen des Ladens von Elektrofahrzeugen auf das Übertragungsnetz regional und zeitlich aufgelöst quantifiziert werden.

Dafür wird am IEH zunächst ein Netzmodell des baden-württembergischen Übertragungsnetzes aufgebaut, um nachgelagert die regionalisierten und aggregierten Elektromobilitätslasten den einzelnen Netzknoten des Übertragungsnetzes zuordnen zu können. Neben dem Aufbau des statischen Netzmodells ist vor allem die Parametrisierung entscheidend. Es müssen reale Betriebsmittelparameter, Last- und Erzeugungszeitreihen hinterlegt werden, sodass zeitreihenbasierte Untersuchungen und Analysen des Einflusses von Elektromobilität sowie ihres beinhalteten Flexibilitätspotentials ermöglicht werden können.

Für die Quantifizierung der Elektromobilitätslasten wurde am IEH bereits ein Tool entwickelt, mithilfe dessen synthetische Ladeprofile von Elektrofahrzeugen generiert werden können. Dieses Tool gilt es weiterzuentwickeln und anzupassen, sodass die generierten Ladeprofile geeignet für die Untersuchungen auf Übertragungsnetzebene sind. Zu den Erweiterungen gehört unter anderem die Ermöglichung der Aggregation einzelner Ladeprofile auf Gemeindeebene, woraus sich ein kumuliertes Ladeprofil je Gemeinde ermitteln lässt. Diese kumulierten Ladeprofile sollen dann den jeweiligen Höchstspannungsknoten zugeordnet werden, um so knotenscharfe und zeitlich aufgelöste Untersuchungen auf Übertragungsnetzebene vornehmen zu können. Auch die Quantifizierung des darin beinhalteten Flexibilitätspotentials stellt eine Erweiterung bei der synthetischen Generierung der einzelnen Ladeprofile dar. Eine weitere Anpassung besteht in der Berücksichtigung weiterer Ladeorte, welche momentan überwiegend auf das Heimpladen, also das private Laden, beschränkt sind. Neben dem privaten Laden soll vor allem auch das öffentliche und halb-öffentliche Laden mit in die Generation der Ladeprofile einfließen, denn auch diese Elektromobilitätslasten sind aufgrund ihrer großen Leistungsbedarfe zukünftig nicht vernachlässigbar.

■ **Integration of electromobility in transmission grids**

M. Sc. Nelly-Lee Fischer

According to the German government's target for reducing greenhouse gas emissions in the transport sector, seven to ten million electric vehicles should be registered in Germany by 2030 and a total of one million charging points should be available. In the area of grid integration of electromobility many challenges are still unresolved, especially with regard to the impact of charging operations at high penetration on the transmission grid. For a grid-serving integration of the charging infrastructure, the grid effects of charging electric vehicles on the transmission grid have to be quantified regionally and temporally resolved.

To achieve this, a grid model of the Baden-Württemberg transmission grid is being developed at the IEH in order to be able to assign the regionalized and aggregated electric mobility loads to the individual nodes of the transmission grid. In addition to the construction of the static grid model, the parameterization is crucial. Real asset parameters, load and generation time series must be stored so that time series-based investigations and analyses of the influence of electromobility and its included flexibility potential are possible.

To quantify the loads caused by electromobility, a tool has already been developed at the IEH that can be used to generate synthetic charging profiles of electric vehicles. This tool needs to be further developed and adapted so that the generated charging profiles are suitable for studies at the transmission grid level. The improvements include enabling the aggregation of individual charging profiles at the municipality level, from which a cumulative charging profile per municipality can be determined. These cumulative charging profiles are associated with the respective extra-high voltage nodes in order to be able to carry out node-specific and time-resolved investigations at transmission grid level. The quantification of the flexibility potential contained therein also represents a further development in the synthetic generation of the individual charging profiles. Another improvement is the consideration of more charging locations, which are currently mainly limited to home charging. In addition to private charging public and semi-public charging should also be included in the generation of the charging profiles, as these electromobility loads cannot be neglected in the future due to their large power demand.

■ Lademanagement und Netzurückwirkungen von Elektrofahrzeugen

M. Sc. Jonas Graf

Deutschland hat sich über das Klimaschutzgesetz dazu verpflichtet, bis 2045 treibhausgasneutral zu sein. Bis zum Jahr 2030 ist für den Energiesektor eine Reduktion der Treibhausgase um 77 % gegenüber 1990 und für den Verkehrssektor eine Reduktion um 48 % gegenüber 1990 geplant. Um diese Ziele zu erreichen, ist für den Energiesektor der Umstieg auf erneuerbare Energien verbunden mit einem weiteren Netzausbau vorgesehen. Für den Verkehrssektor wird eine Reduktion durch den Ausbau von Elektromobilität vorangetrieben. Zukünftig werden beide Sektoren stark miteinander gekoppelt sein. [1]

Für den stark steigenden Bedarf an elektrischer Energie durch den Verkehrssektor müssen von der Erzeugung bis zum jeweiligen Ladepunkt ausreichende Kapazitäten verfügbar sein. Dabei müssen hohe lokale Gleichzeitigkeiten besonders beachtet werden. Über ein Lademanagement können einzelne Ladevorgänge beeinflusst werden, um Lastflüsse zu optimieren. Beispielsweise kann die Optimierung für ein Szenario mit einem Einfamilienhaus, einem Elektrofahrzeug und einer Photovoltaik (PV)-Anlage durchgeführt werden. Die Ladevorgänge bei verschiedenen Ladestrategien des Lademanagements sind in Fig. 1 dargestellt. Wird das Elektrofahrzeug ungesteuert geladen, wird unmittelbar nach der Ankunft des

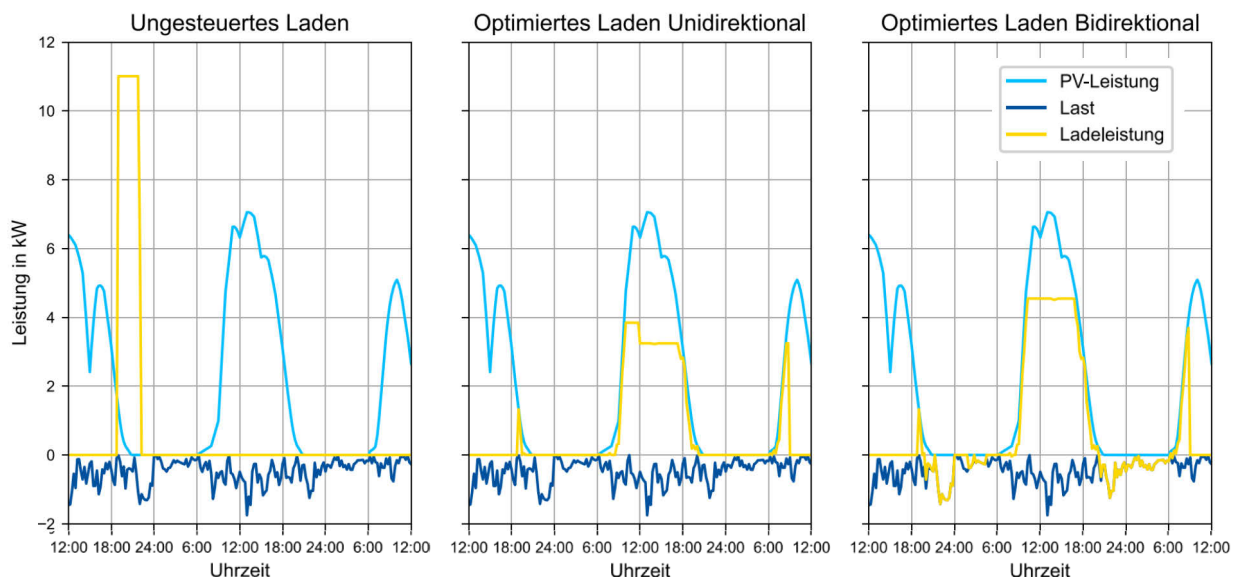


Fig. 1: Leistungsverläufe einer PV-Anlage (PV-Leistung), eines Haushalts (Last) und der Ladeleistung bei verschiedenen Ladestrategien
Power curves of a PV system (PV-Leistung), a household (Last) and the charging power (Ladeleistung) with different charging strategies.

■ **Charging management and power quality of electric vehicles**

M. Sc. Jonas Graf

Germany has committed itself via the *Klimaschutzgesetz* to being greenhouse gas neutral by 2045. By 2030, a 77% reduction in greenhouse gases compared to 1990 is planned for the energy sector and a 48% reduction for the transport sector compared to 1990. In order to achieve these goals, the energy sector is to switch to renewable energies under consideration of further grid expansions. For the transport sector, a reduction is driven by a shift towards electromobility. In the future, both sectors will be strongly coupled with each other. [1]

For the strongly increasing demand for electrical energy by the transport sector, sufficient capacities must be available from generation to the respective charging point. In this context, high local simultaneities must be particularly considered. Individual charging processes can be influenced by a charging management in order to optimize load flows. For example, optimization can be performed for a scenario with a single-family home, an electric vehicle and a photovoltaic (PV) system. The charging processes for different charging strategies of the charging management are shown in Fig. 1. If the electric vehicle is charged in an uncontrolled manner, a maximum charging power of 11 kW is retrieved immediately after the arrival of the vehicle. By simply optimizing the charging process, the generation power of the PV system can be used so that no energy is drawn from the utility grid during times with available PV energy. Further optimization of the charging process, with the assumption of bidirectional power flows at the charging point, allows the household's load demand to be met during the time periods without PV generation. In the scenario shown, the utility grid is used only to feed the excess energy from the PV system.

At IEH, a Smart Charging Environment was added to the Smart Grid Lab for investigations of charging strategies and associated hardware. The additional laboratory enables the investigation of charging processes with different chargers and charging strategies. The plug types Type 2 and CCS are available for investigation, as well as the CHAdeMO plug that is widespread on the Asian market. Investigations are carried out with AC and DC charging processes. Experiments can be conducted with IEH's vehicle, a Honda e with bidirectional charging capability. A section of the smart-charging environment with the vehicle is shown in Fig. 2.

For a successful integration of electric mobility into the power grid, voltage quality is of great importance in addition to the consideration of load flows. The smart charging environment is electrically and informationally connected to the Smart Grid Lab so that

Fahrzeugs eine maximale Ladeleistung von 11 kW abgerufen. Durch eine einfache Optimierung des Ladevorgangs kann die Erzeugungsleistung der PV-Anlage genutzt werden, sodass für den Ladevorgang keine Energie aus dem Versorgungsnetz bezogen wird. Eine weitere Optimierung des Ladevorgangs mit der Annahme von bidirektionalen Leistungsflüssen am Ladepunkt ermöglicht den Lastbedarf des Haushalts während den Zeitbereichen ohne PV-Erzeugung zu decken. In dem gezeigten Szenario wird das Versorgungsnetz nur zur Einspeisung der überschüssigen Energie der PV-Anlage verwendet.

Am IEH wurde für die Untersuchung von Ladestrategien und der dazugehörigen Hardware das Smart-Grid-Labor um ein Smart-Charging-Environment erweitert. Das zusätzliche Labor ermöglicht die Untersuchung von Ladevorgängen mit verschiedenen Ladegeräten und Ladestrategien. Zur Untersuchung stehen die Steckertypen Typ 2 und CCS, aber auch der auf dem asiatischen Markt verbreitete CHAdeMO-Stecker. Untersuchungen werden bei AC- und DC-Ladevorgängen durchgeführt. Experimente können mit dem Fahrzeug des IEH, einem Honda e mit bidirektionaler Ladefunktion, durchgeführt werden. Ein Ausschnitt des Smart-Charging-Environments mit dem Fahrzeug ist in Fig. 2 dargestellt.

Für eine erfolgreiche Integration von Elektromobilität in das Stromnetz ist neben der Betrachtung von Lastflüssen auch die Spannungsqualität von großer Bedeutung. Das Smart-Charging-Environment ist elektrisch und informationstechnisch mit dem Smart-Grid-Labor verbunden, sodass Experimente innerhalb einer Power-Hardware-in-the-Loop-Umgebung durchgeführt werden können. In dieser Konfiguration können sowohl die Störaussendungen eines Elektrofahrzeugs gemessen werden als auch das Verhalten des Fahrzeugs bei verschiedenen Netzzuständen. Eine beispielhafte Untersuchung ist die Abhängigkeit von höherfrequenten Störaussendungen des Stroms (Total Demand Distortion, TDD) von der Versorgungsspannung (Fig. 3).



Fig. 2: Elektrofahrzeug beim Laden am AC-Ladepunkt
Electric Vehicle while charging at the AC charging point.

Experiments can be conducted within a power hardware-in-the-loop environment. In this configuration, the spurious emissions of an electric vehicle can be measured, as well as the behavior of the vehicle under different grid conditions. An exemplary investigation is the dependence of higher-frequency current spurious emissions (total demand distortion, TDD) on the supply voltage (Fig. 3).

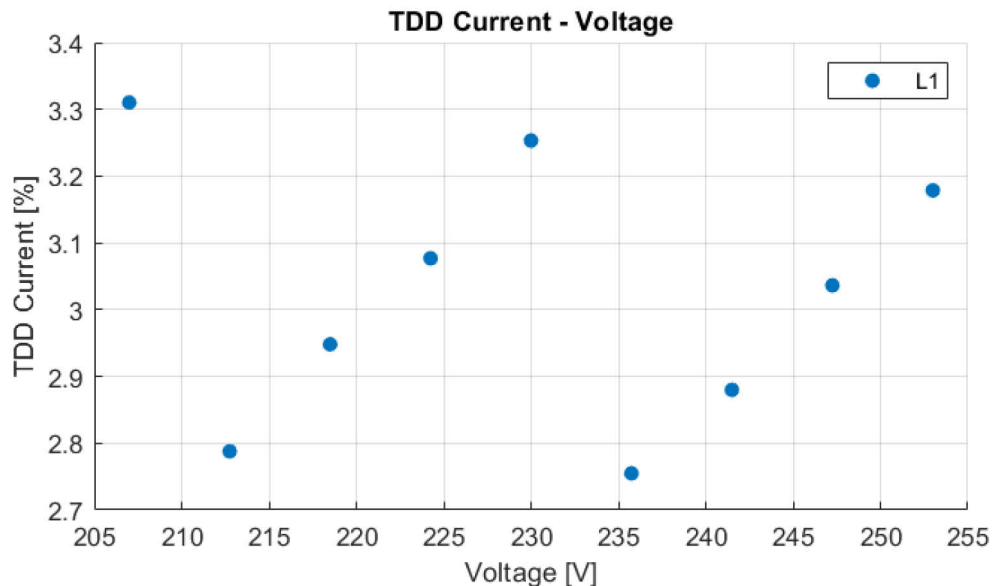


Fig. 3: Abhängigkeit der Total Demanded Distortion (TDD) von der Spannung
Total Demanded Distortion (TDD) over voltage

[1] BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit „Klimaschutz in Zahlen“, 2021. [Online]. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf. [Zugriff am 25.11.2022].

■ **Nutzung betrieblicher Flexibilitäten im aktiven Verteilnetzbetrieb**

M. Sc. Sharon Müller

Die voranschreitende Energiewende führt zu einem Wandel des Energieversorgungssystems und bringt eine grundlegend neue Rolle für die Verteilnetzbetreiber, aber auch für weitere beteiligte Akteure wie Übertragungsnetzbetreiber, Endkunden oder Aggregatoren von flexibler und dezentraler Leistungsbereitstellung. Im Projekt *flexQgrid* wird ein Netzgebiet untersucht, das 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 mit kleinen regenerativen Erzeugungsanlagen, insbesondere Photovoltaik und Windenergieanlagen, zeichnet sich das untersuchte Netzgebiet durch eine Vielzahl an steuerbaren Lasten wie Elektromobilität, Wärmepumpen oder elektrischen Speichersystemen aus. Durch in den Haushalten installierte intelligente Gebäude-Energiemanagementsysteme kann der Einsatz der einzelnen flexiblen Anlagen sowohl kosteneffizient für den Endkunden als auch netzdienlich optimiert werden. Eine großflächig installierte Smart Meter Infrastruktur in drei Niederspannungsnetzen sowie in dem überlagerten Mittelspannungsnetz ermöglicht eine nahezu echtzeitfähige Überwachung des realen Netzzustands sowie eine Steuerung der flexiblen Anlagen anhand externer Signale.

Im Laufe des Projekts werden sowohl präventives als auch kuratives Engpassmanagement in Mittel- und Niederspannungsnetzen getestet. Auf Basis des Netzaampelkonzepts, vorgestellt vom Bundesverband deutscher Energie- und Wasserwirtschaft BDEW e.V., können Schwächen und Stärken theoretischer Konzepte im Feldtest untersucht werden. Somit werden wichtige Erkenntnisse für einen aktiven Verteilnetzbetrieb sowie die flächendeckende Nutzung des bereits jetzt vorhandenen Flexibilitätspotentials gewonnen. Es zeigt sich, dass die Nutzung betrieblicher Flexibilitäten, bereitgestellt vom Endverbraucher, eines stark erhöhten Kommunikationsaufwands bedarf. Für die Nutzung des gesamten Flexibilitätspotentials über mehrere Spannungsebenen hinweg, gegebenenfalls unter Einbeziehung verschiedener Verteilnetzbetreiber, ist eine klare Definition der Schnittstellen sowie des notwendigen Datenaustauschs wichtig. Gerade in Niederspannungsnetzen führt das stochastische Lastverhalten sowie die aufgrund von Wolkenzügen teilweise stark fluktuierende Photovoltaik Einspeisung zu Ungenauigkeiten, sowohl für die Bestimmung des aktuellen Netzzustands als auch für die Prognose des Netzzustands, mit denen im zukünftigen Netzbetrieb umgegangen werden muss.

■ Usage of operational flexibilities in active distribution network operation

M. Sc. Sharon Müller

The ongoing energy transition leads to a change of the energy supply system and brings fundamentally new roles for distribution and transmission system operators, but also for other actors such as prosumers or aggregators of flexible and decentralized power supply. In the *flexQgrid* project, a German power grid is investigated that already shows typical characteristics of an active distribution network and can thus serve as a good basis for investigations regarding future grid operation involving all relevant partners.

In addition to a very high penetration of small renewable generation plants, especially photovoltaics and wind turbines, the investigated distribution grid is characterized by a large number of controllable loads such as electric vehicles, heat pumps or battery electric storage systems. Smart building energy management systems installed in households can optimize the use of individual flexible plants both cost-efficiently for the end customer or grid-serving. A smart meter infrastructure installed over a large area in three low-voltage grids and the overlying medium-voltage grid enables close to real-time monitoring of the actual grid status and control of the flexible systems based on external signals.

The project tests and evaluates both preventive and curative congestion management in medium and low-voltage networks. Based on the network traffic light concept, presented by the German Association of Energy and Water Industries BDEW e.V., weaknesses and strengths of theoretical concepts can be investigated in a field test. Thus, important findings for an active distribution grid operation as well as the area-wide use of the already existing flexibility potential are gained. It is shown that the use of operational flexibilities, provided by the prosumer, strongly increases the necessary communication effort. For the utilization of the entire flexibility potential across several voltage levels, possibly involving different distribution system operators, a clear definition of the interfaces as well as the necessary data exchange is important. Especially in low-voltage grids, the stochastic load behavior as well as the potential highly fluctuating photovoltaic feed-in due to cloud drafts leads to inaccuracies for both, the determination of the current grid state as well as the former performed forecast of the grid state. This leads to new challenges in the grid monitoring and operation, which have to be dealt with in future.

■ **Netzintegration von Wirtschaftsverkehr im urbanen Raum**

M. Sc. Charlotte Wagner

Der Wirtschaftsverkehr trägt in vielen großen Städten zu einem großen Teil des Verkehrsaufkommens bei. Eine Vielzahl ein- und ausfahrender Lkw erhöht die Luft- und Lärmbelastung in den betroffenen Stadtgebieten und verschlechtert zudem die CO₂-Bilanz der Region. Eine weitestgehende Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs birgt die Chance, schädliche Treibhausgasemissionen zu vermeiden und die Lärmbelastung deutlich zu senken.

Insbesondere der Lieferverkehr in städtischen Gewerbegebieten weist tendenziell kurze Wegstrecken und gleichzeitig eine hohe Planbarkeit der Fahrten auf. Für diesen Use-Case stehen bereits heute serienreife E-Lkw zur Verfügung. Für eine zuverlässige Energieversorgung einer zukünftigen E-Lkw-Flotte bleiben jedoch viele Fragen unbeantwortet. Die Auswirkungen einer Elektrifizierung müssen frühzeitig erkannt werden, um die Stromnetze in Ballungsräumen rechtzeitig vorbereiten zu können. Die notwendigen Platzreserven für den Aufbau von passender Ladeinfrastruktur für die E-Lkw sind im städtischen Raum stark begrenzt. Eine Regionalisierung zukünftiger Ladebedarfe von E-Lkw stellt demnach eine entscheidende Frage dar.

In den vergangenen Jahren konnten sich Verteilnetzbetreiber auf den Hochlauf der Energiebedarfe von privaten Elektrofahrzeugen vorbereiten. Das Mobilitätsverhalten und der damit verbundene Energiebedarf elektrischer Nutzfahrzeuge bleibt bis heute größtenteils unbekannt. Um eine möglichst ressourcensparende Netzintegration der E-Lkw zu ermöglichen, sollten Zeitpunkt und benötigte Ladeenergie der Flotte bekannt sein. Hierzu können beispielsweise invasive Verkehrsdetektoren zur Aufnahme des bestehenden Verkehrsaufkommens konventioneller Fahrzeuge genutzt werden. Diese könnten zukünftig durch elektrische E-Lkw ersetzt werden. Mit Hilfe einer virtuellen Elektrifizierung bestehender Lkw-Flotten können zukünftige Netzengpässe in den städtischen Gewerbegebieten frühzeitig erkannt und notwendige Netzausbaumaßnahmen identifiziert werden. Alternativ könnte ein Lademanagement oder weitere kombinierte elektrisch/logistische Optimierungsmaßnahmen Lastspitzen reduzieren und damit einen Netzausbau vermeiden oder verzögern.

Die modellbasierten Untersuchungen können mit Hilfe von laufenden Reallaboren am IEH verifiziert werden. So kommen im Projekt REALIST beispielweise mindestens zwei E-Lkw im Raum Stuttgart zum praktischen Einsatz. Diese sammeln über zwei Jahre wertvolle Messdaten, wodurch wertvolle Erkenntnisse zum Ladeverhalten und Energieverbrauch der E-Lkw abgeleitet werden können. Die Ergebnisse der Untersuchung sollen zu einem Hochlauf der Elektrifizierung des urbanen Logistikverkehrs in Städten wie Stuttgart beitragen.

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

M. Sc. Charlotte Wagner

Commercial transport contributes significantly to the traffic volume in many major cities. A large number of incoming and outgoing trucks increases the air and noise pollution in the affected urban areas and, in addition, worsens the CO₂ footprint of the region. Extensive electrification of road freight transport offers the opportunity to avoid harmful greenhouse gas emissions and significantly reduce noise pollution. Especially delivery traffic in urban commercial areas tends to have short distances and, at the same time, a high degree of plannability of the trips. For this use case, e-trucks are already available today that are ready for series production. For a reliable energy supply for a future e-truck fleet, however, many questions remain unanswered. The effects of electrification must be recognized at an early stage in order to be able to prepare the supply grids in metropolitan areas properly. The required space reserves for the installation of adequate charging infrastructure for e-trucks are strongly limited in urban areas. Hence, a regionalization of future charging demands of e-trucks is a crucial issue.

In recent years, distribution network operators have been able to prepare for the ramp-up of energy demands from private electric vehicles. The mobility behavior and associated energy requirements of electric commercial vehicles remain largely unknown to this day. To enable the most resource-efficient grid integration of e-trucks, the timing and required charging energy of the fleet should be known. For this purpose, invasive traffic detectors can be used, for example, to record the existing traffic volume of conventional vehicles. These could be replaced by electric e-trucks in the future. Virtual electrification of existing truck fleets can be used to detect future grid bottlenecks in urban commercial areas at an early stage and identify necessary grid expansion measures. Alternatively, charging management or other combined electric/logistic optimization measures could reduce peak loads and thus avoid or delay grid expansion.

The model-based investigations can be verified with the help of ongoing real laboratories at IEH. In the REALIST project, for example, at least two e-trucks are being used in practice in the Stuttgart area. These will record valuable measurement data over a period of two years, which can be used to derive findings regarding the charging behavior and energy consumption of the e-trucks. The results of the study should contribute to a ramp-up of the electrification of urban logistics transport in cities like Stuttgart.

■ 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.

Am IEH wurde ein Verfahren entwickelt, mithilfe dessen der Ladebedarf von E-Lkw quantifiziert und regionalisiert werden kann. Dies beinhaltet die Generation synthetischer Ladeprofile der Lkw basierend auf Mobilitätsdaten und Fahrzeugparametern. Dieses wurde nun dazu genutzt, um die Netzauswirkungen von E-Lkw-Ladevorgängen an einem Logistikzentrum in zeitreihenbasierten probabilistischen Netzsimulationen zu analysieren (Fig. 1). Das Verfahren wurde dazu auf ein reales industrielles Mittelspannungsnetz (Fig. 2) angewandt.

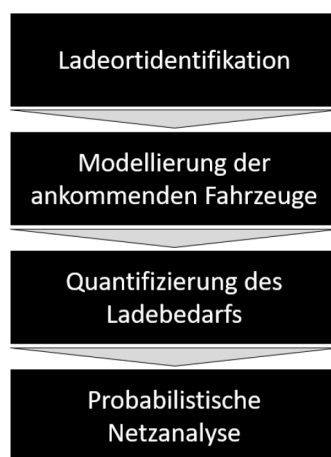


Fig. 1: Ablauf zur Bestimmung der E- Lkw-
Netzauswirkungen.
Charging impact analysis flow chart.

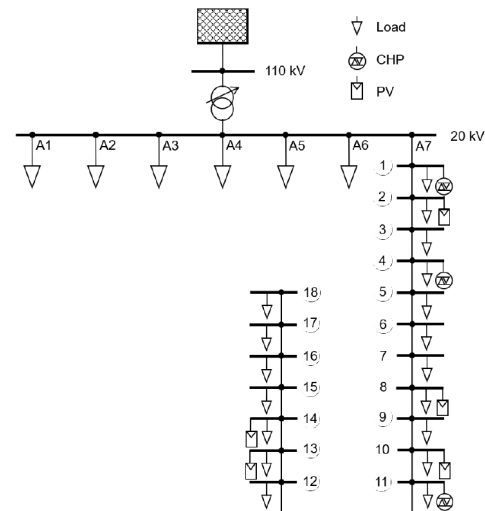


Fig. 2: Topologie des untersuchten
20 kV-Netzes.
Topology of the MV grid.

Es zeigt sich, dass die Auswirkungen auf den Netzanschlusspunkt des Logistikzentrums stark vom betrachteten Elektrifizierungsszenario abhängen. Dabei spielt die Nachladestrategie eine besondere Rolle (Fig. 3). Auch die Netzauswirkungen hängen von diesen Szenarien ab. Besonders beim Vollladen mit hohen Ladeleistungen traten im Untersuchungsgebiet starke Schwankungen der Transformator- und Leitungsauslastungen aus. Im Falle der Leitungen kam es zusätzlich zu seltenen Betriebsmittelüberlastungen. Insgesamt dominierten jedoch die Überlastungen des Netzanschlusspunkts des Logistikzentrums. Im nächsten Schritt soll nun ein kombinierter Hochlauf von Pkw- und Lkw-Ladeinfrastruktur im Untersuchungsgebiet an mehreren Standorten untersucht werden.

■ 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. However, a ramp-up of e-trucks may lead to new challenges in the power grid, for which it has hardly been prepared so far. In addition, e-truck charging differs significantly from electric passenger cars. Therefore, new approaches are needed to consider their charging processes in grid planning and grid operation.

A method has already been developed at IEH that can be used to quantify and regionalize the charging needs of electric trucks. This includes the generation of synthetic charging profiles of the trucks based on mobility data and vehicle parameters. It has now been used to analyze the grid impact of electric truck charging at a logistics center in time series-based probabilistic grid simulations (Fig. 1). The method was applied to a real industrial medium-voltage grid (Fig. 2).

It can be seen that the effects on the grid connection point of the logistics center strongly depend on the electrification scenario considered. The recharging strategy plays a special role here (Fig. 3). The grid effects also depend on these scenarios. Especially in the case of full charging with high charging powers, strong fluctuations in transformer and line loads occurred in the study area. In the case of the lines, there were also infrequent overloads. Overall, the effects in the area under consideration were still tolerable from a grid perspective, but in the future, the ramp-up of car and truck charging infrastructure at several grid customers must also be considered in parallel.

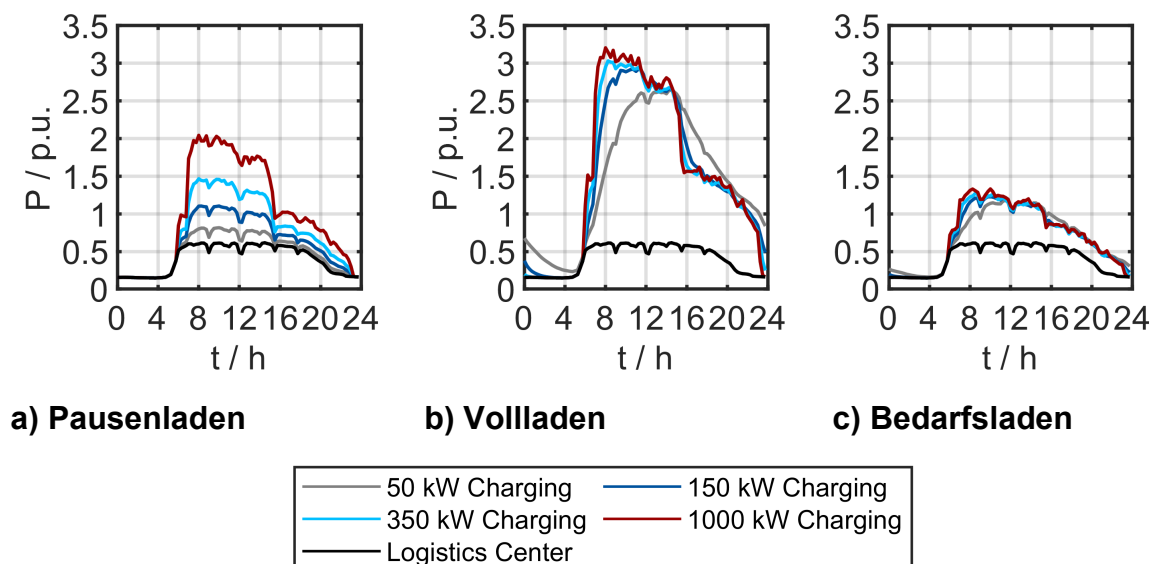


Fig. 3: Mittlere Werktagslast des Logistikzentrums mit und ohne Lkw-Laden.
Mean Workday load at the logistics center with and without truck charging.

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 – Dezember 2023

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 – December 2023

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

Wechselrichter erzeugen aufgrund ihres Schaltverhaltens hohe elektromagnetische Emissionen. Um die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) sicherzustellen, werden deshalb u.a. Prüfungen hinsichtlich der Störaussendung durchgeführt. Da die Motorimpedanz einen entscheidenden Einfluss auf das Emissionsspektrum des zugehörigen Wechselrichters hat, ist eine realistische Belastung zu wählen. Nach dem Stand der Technik wird eine einfache passive Impedanznachbildung als Ersatzlast verwendet oder die spezifische Maschine im Leerlauf betrieben. Um realistische Lastbedingungen herzustellen, bieten einige wenige EMV-Labore Messungen mit einer externen Last am Motor an (hydraulisch oder durch eine zusätzliche Lastmaschine). Nachteilig sind hierbei u.a. die erhöhten Sicherheitsanforderungen aufgrund rotierender Teile sowie hohe Anschaffungs- und Prüfkosten.

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf einen neuen Ansatz, den Einsatz einer aktiven elektrischen Ersatzlast zur Emissionsmessung von Kfz-Wechselrichtern unter realistischen Lastbedingungen. Die aktive Impedanznachbildung soll sowohl das niederfrequente Funktionsverhalten als auch die hochfrequenten (HF) Koppelpfade einer belasteten E-Maschine nachbilden, bei vernachlässigbar geringen Eigenemissionen. Fig. 1 zeigt die an den Wechselrichter (DUT, engl. device under test) angeschlossene sog. elektrische Maschinenemulation.

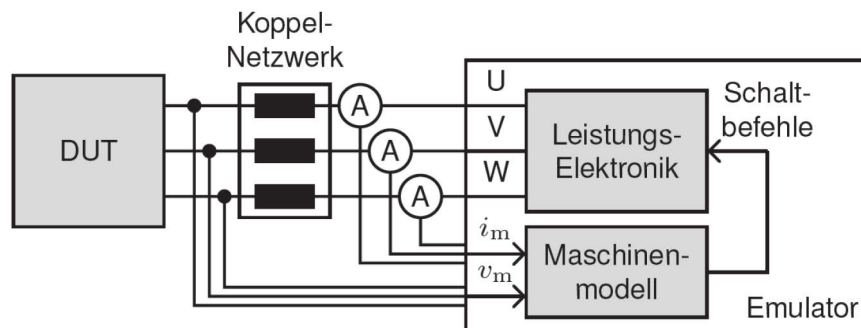


Fig. 1: Blockschaltbild der elektrischen Maschinenemulation.

Block diagram of the electrical machine emulation.

Als Topologie für die Leistungselektronik wird ein versetzt taktender Wechselrichter gewählt, s. Fig 2. Die vier parallelen Halbbrücken pro Phase werden um eine Viertelperiode versetzt angesteuert. Dadurch erhöht sich die effektive Schaltfrequenz, der Stromrippel und somit auch die EMV-Emissionen werden minimiert. Um die Emissionen weiter zu verringern, soll der aktuelle Prototyp um ein Filter ergänzt werden. Zusätzlich ist eine Schaltung zur Nachbildung des HF-Verhaltens der nachgebildeten elektrischen Maschine notwendig. Die Charakterisierung der HF-Impedanz eines Motors kann entweder simulativ mithilfe einer FEM-Analyse oder durch Messungen im aktiven Betrieb bestimmt werden.

■ EMC compliant Electrical Machine Emulation

M. Sc. Michaela Gruber

Inverters generate high electromagnetic emissions due to their switching behavior. In order to ensure electromagnetic compatibility (EMC), emission measurements are therefore carried out in addition to other tests. Since the motor impedance has a decisive influence on the emission spectrum of the associated inverter, a realistic load is mandatory. Conventional tests use a simple passive impedance emulation as equivalent load, or operate the specific machine in idle mode. To establish realistic load conditions, a few EMC laboratories offer measurements with an external load on the motor (hydraulic or by an additional load machine). Disadvantages here include the increased safety requirements due to rotating parts as well as high acquisition and testing costs.

The research project focuses on a new approach, the use of an active electrical equivalent load for emission measurements of automotive inverters under realistic load conditions. The active impedance emulation is intended to reproduce both the low-frequency functional behavior and the high-frequency (RF) coupling paths of a loaded electric machine, with negligible intrinsic emissions. Fig. 1 shows the so-called electrical machine emulation connected to the test inverter (DUT, device under test).

An interleaved switched inverter is chosen as the topology for the power electronics, see Fig 2. The four parallel half-bridges per phase are controlled with an offset of a quarter period. This increases the effective switching frequency, minimizes the current ripple and thus also the EMC emissions. To further reduce emissions, a filter is to be added to the current prototype. In addition, a circuit is needed to emulate the RF behavior of the emulated electrical machine. The characterization of the RF impedance of a motor can be determined either by simulation using an FEM analysis or by measurements in active operation.

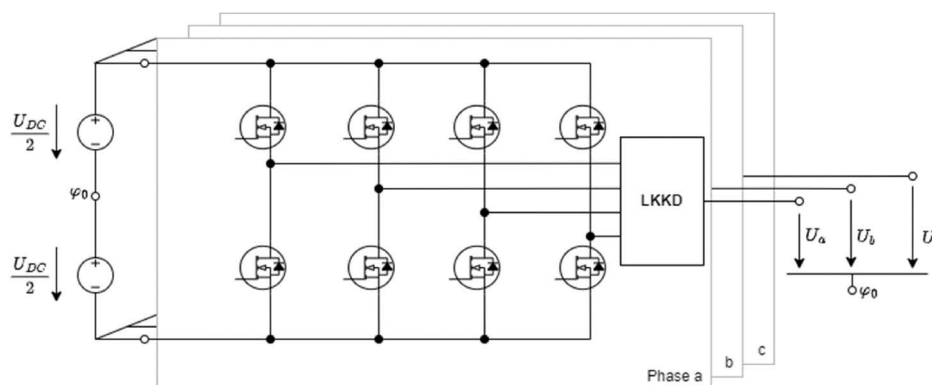


Fig. 2: Blockschaltbild des versetzt taktenden Wechselrichters.
Block diagram of the interleaved switched inverter.

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 Traktionsbatterie (siehe Fig. 1). Während des konduktiven Ladevorgangs stellt dieses System aufgrund der schnell schaltenden Leistungselektronik eine hochfrequente Emissionsquelle dar, die sich negativ auf Komponenten des Elektrofahrzeugs selbst auswirken kann (im Sinne der klassischen Kfz-EMV), aber auch kritische Wechselwirkungen mit externen, an dasselbe Stromnetz angeschlossenen Geräten (im Sinne der Netzqualität, PQ) verursachen kann. Daher sind EMV-Untersuchungen der leitungsgebundenen Emissionen und der Störfestigkeit während des Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen erforderlich.

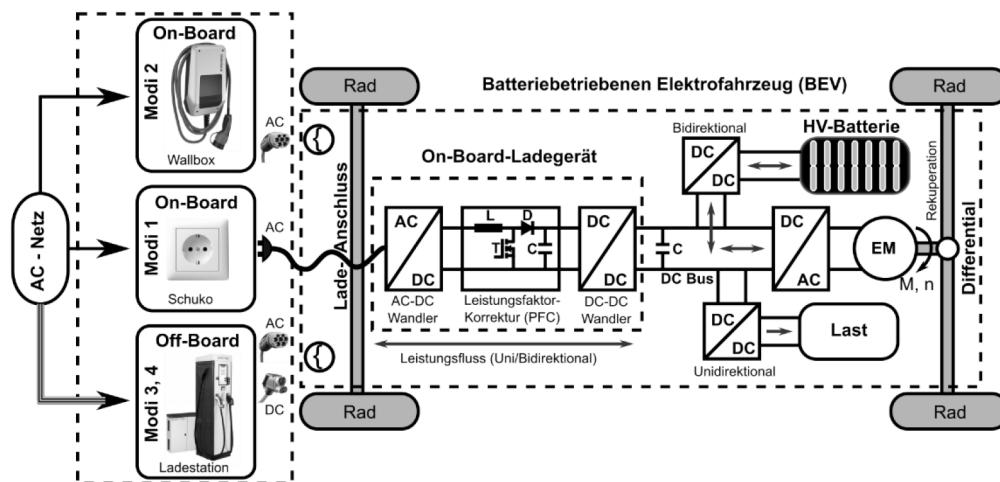


Fig. 1: Konduktive Lade-Infrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge.
Conductive charging infrastructure for battery electric vehicles.

In diesem Forschungsprojekt werden die externen Einflüsse wie die Länge des Ladekabels, Anbindung der Fahrzeugkarosserie, sowie die Ladeleistung auf das EMV-Verhalten der EVs im gekoppelten Ladebetrieb systematisch untersucht. Fig. 2 zeigt das Ersatzschaltbild für das Laden mit Wechselstrom (AC) sowie zwei mögliche Hauptstörstrompfade (I_{CM1} und I_{CM2}). Dabei wurde eine zweite Masseplatte (GND_2) zur Nachbildung der Fahrzeugkarosserie eingeführt, wodurch die Kapazität zum Bezugspotential (GND_1) berücksichtigt wird. Zum Messen der Störspannungen wird netzseitig eine AC-Netznachbildung und fahrzeugseitig eine HV-Netznachbildung eingesetzt. Zudem werden Störstrom-Messungen mithilfe einer Stromzange (HF-Stromwandler) und Impedanz-Messungen mithilfe eines Impedanz-Analyzers durchgeführt. Diese Untersuchungen werden sowohl im Labor als auch bei realen Fahrzeugen durchgeführt und mit Simulationsmodellen (LT-Spice) verifiziert.

System consideration of EMC in the conductive charging process of electric vehicles

M. Sc. Inti Runa Supa Stölben

The electric drive system of electric vehicles (EVs) consists of the electric motor, the inverter, on-board charging unit, direct current converter and traction battery (Fig. 1). During the conductive charging process, this system represents a high-frequency emission source due to the fast-switching power electronics, which can negatively impact components of the EV itself (in terms of classical automotive EMC) but also can cause critical interactions with external power devices connected to the same electrical grid (in terms of power quality, PQ). Therefore, EMC investigations of conducted emissions and immunity during the charging process of EVs are required.

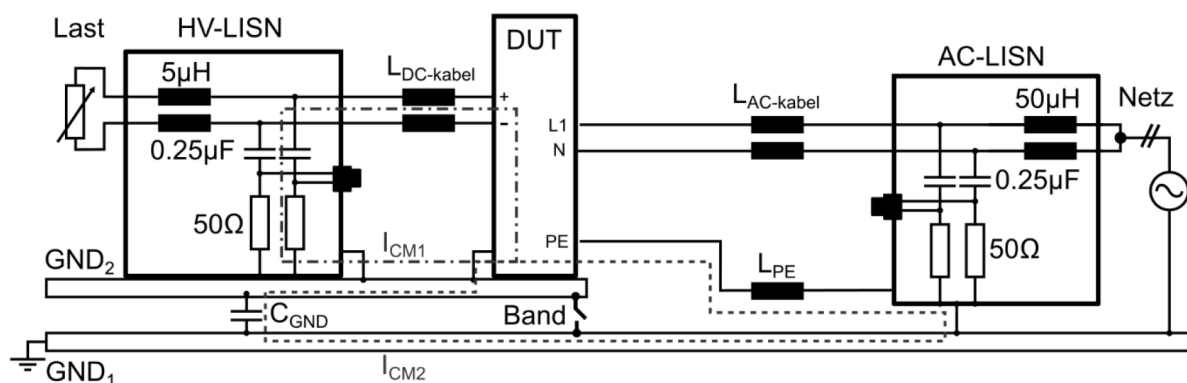


Fig. 2: Ersatzschaltbild des Prüfaufbaus mit zwei Masseflächen und dem Hauptstrompfad des Gleichtakts.

Equivalent circuit of the test setup with two ground planes and the main current path of common-mode.

In this research project, the external influences such as the length of the charging cable, connection of the vehicle body, as well as the charging power on the EMC behavior of the EVs in coupled charging operation are systematically investigated. Fig. 2 shows the equivalent circuit diagram for charging with alternating current (AC) as well as two possible main interference current paths (I_{CM1} and I_{CM2}). A second ground plane (GND_2) has been introduced to replicate the vehicle body, allowing for capacitance to the reference potential (GND_1). To measure the interference voltages, an AC-line impedance network (LISN) is used on the grid side and a HV-LISN on the vehicle side. In addition, interference current measurements are carried out with a current clamp (HF current transformer) and impedance measurements with an impedance analyzer. These investigations are carried out both in the laboratory and on real vehicles and verified with simulation models (LT-Spice).

■ 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 und 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.

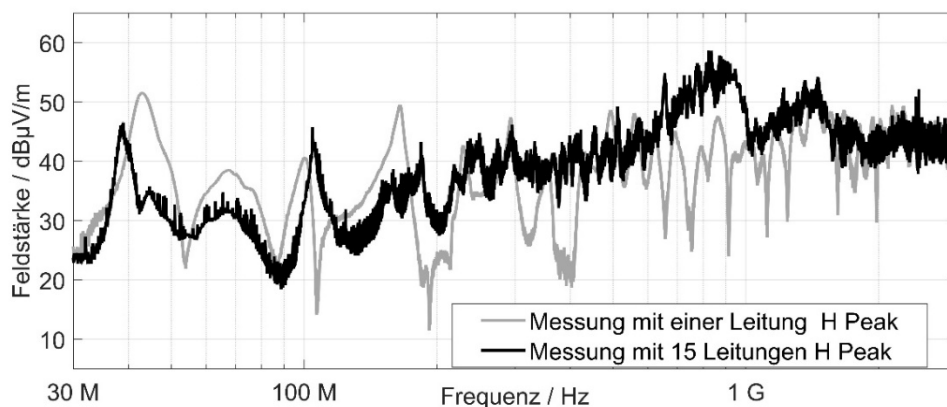


Fig. 2 Gestrahlte Emissionen des Messaufbaus mit einer Leitung im Vergleich zu 15 Leitungen

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.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

T. Streubel, C. Kattmann, A. Eisenmann, K. Rudion

Characterization of Supraharmonic Emission from Three Different Electric Vehicle Charging Infrastructures in Time and Frequency Domain.
Energies 2022, 15(2), 394, January 2022, doi: 10.3390/en15020394.

S. Khandan, M. Gerber, S. Tenbohlen

Untersuchung der thermischen Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren.
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 139, Issue 1, Februar 2022,
pp. 110–118, doi: 10.1007/s00502-022-00999-1

K. Tyroller, T. Yalcinoz, K. Rudion

Comprehensive Day-Ahead Marketing Model Considering N-1 Security and Renewables.
Journal of Energy Engineering, Volume 149, Issue 1, February 2022.

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

Power Quality Mitigation via Smart Demand-Side Management Based on a Genetic Algorithm.
Energies 2022, 15(4), 1492, February 2022, doi: 10.3390/en15041492.

H. Früh, S. Müller, D. Contreras, K. Rudion, A. von Haken, B. Surmann

Coordinated Vertical Provision of Flexibility from Distribution Systems.
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 38, Issue 2, March 2023, pp. 1832-1842,
DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3162041

S. Coenen, S. Markalous, M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen, S. Hoek, P. Fehlmann,
R. Schwarz, T. Linn, U. Kempf, M. Weber, J. Fuhr, e.a.

Improvements to PD measurements for factory and site acceptance tests of power transformers.
ELECTRA, N°321, April, 2022

A. K. Pradhan and S. Tenbohlen

Oil Conductivity Estimation of Transformer Insulation by Switching Impulse Application.
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 29, no. 2, pp. 420-427,
April 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3157925.

M. Buchner, D. Deepak, K. Rudion

Validation of an impedance measurement by deliberate destabilization of a power hardware in the loop setup.

CIREN Porto Workshop 2022: E-mobility and power distribution systems, Porto, Portugal, June 2 – 3, 2022, pp. 1019-1023.

S. Müller, H. Früh, K. Rudion, A. von Haken, B. Surmann

Evaluation of the Feasible Provision of Flexibility in Distribution Networks with Advanced Grid Monitoring.

2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2022, Manchester, Great Britain, June 12 – 15, 2022, pp. 1-7

M. Gerber, S. Tenbohlen, N. Majer, T. Lainck

Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren anhand einer Heißpunkttemperaturmessung.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2022, Leinfelden-Echterdingen, 21.-22. Juni 2022

D. Passow, M. Beltle, S. Tenbohlen, M. Heckel, J. Hohloch, L. Höfer, C. Kattmann und M. Siegel

Kabelmuffen mit integrierter TE- und Temperatursensorik für eine autarke Zustandsüberwachung.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2022, Leinfelden-Echterdingen, 21.-22. Juni 2022

C. He, M. Beltle, S. Tenbohlen, T. Hubert, S. Schmidt and J. Schneider

Partial Discharge Characteristic of Hairpin Windings for Inverter-Fed Motors.

IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), Palermo, Italy, July 3 – 7, 2022, pp. 49-52

D.A. Contreras, N. Fischer, S. Müller, K. Rudion, M. Frankenbach, A. von Haken, B. Surmann

An Iterative Quota Calculation Method for Congestion Management and Optimal Grid Utilization.

22nd Power Systems Computation Conference - PSCC, Porto, Portugal, June 27-July 1, 2022.

M. Miller, K. Rudion, H. Nägele, J. Schnaars

A Grid Reinforcement Approach for an optimized Planning of High-Voltage Distribution Grids under Consideration of Line Loading Indicators.

IET Renewable Power Generation, Vol. 16, Issue 9, Juli 2022, pp 1841-1852, DOI: 10.1049/rpg2.12442

M. Haug, M. Beltle, S. Tenbohlen

Bewertung verschiedener Verfahren zur Impedanzmessung von Batteriemodulen.

EMV Köln 2022, 12.-14. Juli 2022

M. Gruber, N. Dölzer, M. Beltle, S. Tenbohlen

Motor-Impedanzmessungen im aktiven Betriebszustand anhand einer permanentmagnetenerregten Synchronmaschine.

EMV Köln 2022, 12.-14. Juli 2022

J. Bertelmann, M. Beltle, S. Tenbohlen, R. Eidher

Kompensation von Asymmetrien im Aufbau beim gegenphasigen Inverterbetrieb zur Gleichtaktauslöschung.

EMV Köln 2022, 12.-14. Juli 2022

S. Tenbohlen, C.P. Beura, S. Khandan, M. Gerber, M. Tahir, S. Hägele, A. Großhans, M. Weber, M. Hässig

Use of Multiphysics Simulation Tools for Making a Digital Twin of Power Transformers.

Cigré Session 2022, Paris, D1-11111

S. Coenen, S. Markalous, M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen, S. Hoek, P. Fehlmann, R. Schwarz, T. Linn, U. Kempf, M. Weber, J. Fuhr, e.a.

Improvements to PD measurements for factory and site acceptance tests of power transformers.

Cigré Technical Brochure 861, Paris, 2022

I.R. Supa Stölben, J. Bertelmann, M. Beltle, S. Tenbohlen, Ch. Bersch, K. Spanos
Investigation of Ground Impedances effecting EMC during Charging Operations of Electric Vehicles.

2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2022), Gothenburg, Sweden, September 5-8, 2022, pp. 457-460

DOI: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9900978

C.P. Beura, M. Beltle, P. Wenger, S. Tenbohlen

Experimental Analysis of Ultra-High-Frequency Signal Propagation Paths in Power Transformers.

Energies. 2022; 15(8):2766

S. Eberlein, K. Rudion

Impact of Inner Control Loops on Small-Signal Stability and Model-Order Reduction of Grid-Forming Converters. IEEE Transactions on Smart Grids, Vol. 14, Nr. 8, August 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3220723.

K. Walz, K. Rudion, C.-M. Moraw, M. Eilers

Probabilistic Impact Assessment of Electric Truck Charging on a Medium Voltage Grid.
2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Novi Sad, Serbia, October 10 – 12, 2022.

D.A. Contreras, N. Fischer, S. Müller, K. Rudion, M. Frankenbach, A. von Haken, B. Surmann

An Iterative Quota Calculation Method for Congestion Management and Optimal Grid Utilization.

Electric Power Systems Research, Volume 212, November 2022, 108380, ISSN 0378-7796, DOI:10.1016/j.epsr.2022.108380.

M. Miller, P. Burkhardt, K. Rudion, H. Nägele

Optimal Medium Voltage Grid Planning under Consideration of Dynamic Current Ratings of Underground Cables and E-Mobility

Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2022), Valletta, Malta, November 7-9, 2022.

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

Classification of Partial Discharge Sources in HVDC Gas Insulated Switchgear using Neural Networks.

VDE Hochspannungstechnik 2022; ETG-Symposium 2022, Berlin, 8.-10. November 2022

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

Abrissverhalten von Vakuumschaltlichtbögen bei Anwendung neuartiger Schaltkontaktmaterialien und Geometrien mit Überlagerung axialer Magnetfelder.

VDE Hochspannungstechnik 2022, 8.-10. November 2022, Berlin, ETG Fachbericht 169, S.326-332

M. Gerber, S. Tenbohlen, N. Majer, T. Lainck

Monitoring von Heißpunkttemperaturen zur Überlastabschätzung bei Leistungstransformatoren.

VDE Hochspannungstechnik 2022, Berlin, Germany, 8.-10. November 2022

D. Passow, M. Beltle, S. Tenbohlen, M. Heckel, J. Hohloch, L. Höfer, C. Kattmann und M. Siegel

Validation of a PD-Monitoring System for Power Cables by Evaluating Joints with Defined Assembly Defects.

VDE Hochspannungstechnik 2022, 8.-10. November 2022, Berlin

M. Gruber, N. Dölzer, M. Beltle, S. Tenbohlen

Motor-Impedanzmessungen im aktiven Betriebszustand anhand einer permanentmagneterregten Synchronmaschine.

Proceedings EMV Kongress 2022, 2022, S. 101-108, <https://doi.org/10.15488/12553>

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

Condition Assessment of Power Transformers by UHF PD Measurements.

9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- | | |
|--------------|---|
| 13.01.22 | CIGRE WG A2.60 TF2, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 01.03.22 | ETG Q2 Sitzung, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 15.-16.03.22 | Seminar an der TAE „Grundlagen der Hochspannungstechnik“
Technische Akademie Esslingen Ostfildern
Leitung: Prof. S. Tenbohlen |
| 17.03.22 | VDE ETG Fachtagung V2 „Übertragung und Verteilung“, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion |
| 17.03.22 | Webseminar „Flexibilität im Stromsystem - Erkenntnisse aus der
Strommarktstudie des BEE“, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion |
| 07.04.22 | ETG Q2 -Sitzung des Programmausschusses, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 07.04.22 | CIGRE WG A2.62 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 28.-29.04.22 | Technischer Beirat Omexom Deutschland, Mannheim
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 03.05.22 | Deutscher Arbeitskreis CIGRE A2 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 03.05.22 | CIGRE WG A2.57 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 10.5.22 | Network ² -Kolloquium 2022
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, Prof. S. Tenbohlen, M. Miller |
| 10.-11.05.22 | Sitzung des DKE/K 124 "Hochspannungs- und Hochstrom-
Prüftechnik"
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 11.05.22 | VDE Jahresforum, Dresden
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 19.05.22 | CIGRE WG D1.70 TF3 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 25.05.22 | CIGRE A2.60 Plenary Meeting May 2022, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 31.05.22 | UTRA Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen |
| 02.-03.06.22 | CIREN Workshop 2022, E-mobility and power distribution systems,
Porto, Portugal
Teilnehmer/Beitrag: M. Buchner |
| 07.06.22 | CIREN Flexibility working group, online
Teilnehmer: S. Müller |

- 12.-15.06.22 2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Manchester, Great Britain, online
Teilnehmer/Beitrag: S. Müller
- 21.06.22 Umweltabend – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 21.-22.06.22 Stuttgarter Hochspannungssymposium 2022 – High Voltage Goes Green
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, D. Passow, M. Gerber
- 29.06.22 Podiumsdiskussion „Wärmewende klimafreundlich gestalten – mit der ‚Wasserstoff-Insel Öhringen‘ zeigen wie’s geht!“, Öhringen
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 27.6.-1.7.22 PSSC 2022 Power Systems Computations Conference, Porto, Portugal
Teilnehmer/Beiträge: N. Fischer, S. Müller
- 03.-07.07.22 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), Palermo, Italy
Teilnehmerin/Beitrag: C. He
- 12.-14.07.22 Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV Köln 2022
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, M. Gruber, J. Bertelmann, M. Beltle, M. Haug
- 19.07.22 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 28.07.22 VDE Hochspannungstechnik Sitzung des Programmausschusses, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 26.08-2.09.22 CIGRE Session 2022, Paris, Frankreich
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 28.08.22 CIGRE D1.01 AG Meeting, Paris, Frankreich
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 30.08.22 CIGRE A2 Study Committee Meeting, Paris, Frankreich
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 31.08.22 CIGRE WG A2.60 Meeting, Paris, Frankreich
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 15.09.22 VDE Konferenz Ausschuss "Studium, Beruf und Gesellschaft", online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 19.09.22 UTRA Committee Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 21.09.22 VDE ETG FB V2 Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 06.10.22 CIRED Working Group „Network Planning & System Design with Flexibility
Teilnehmer: S. Müller

- 10.-12.10.22 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Novi Sad, Serbia
Teilnehmerin/Beitrag: K. Walz
- 11.10.22 CIGRE/CIRED Informationsveranstaltung, Mannheim
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.10.22 CIGRE DAK C1 Sitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 26.10.22 University of Queensland's Australasian Transformer Innovation Centre (TIC) Webinar for Continuing and Professional Development (CPD), online
Vortragender: Prof. S. Tenbohlen
- 07.-09.11.22 MedPower 2022, Valetta, Malta
Teilnehmer/Beitrag: M. Miller
- 08.-10.11.22 VDE-Hochspannungstechnik 2022, Berlin
Leitung: Prof. S. Tenbohlen, Teilnehmer: M. Beltle, Ch. He, D. Passow, M. Fischer, Ch. Beura, M. Gerber
- 17.11.22 CMD2022 (9th Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis), online
Keynote: Prof. S. Tenbohlen
- 22.11.22 CIGRE WG A2.62 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 24.11.22 CIGRE DAK SC6 Sitzung, Berlin
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 29.11.22 UTRA Conference 2022, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 01.12.22 10. Smart Grids-Kongress Baden-Württemberg
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 01.-02.12.22 Technischer Beirat Omexom Deutschland, Frankfurt
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 05.12.22 CIRED WG Flexibility, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, S. Müller
- 14.12.22 UTRA Committee meeting, 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 Freiluftantenne 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 Netzwerkanalysatoren, Breitbandmessempfänger 10 Hz-6 GHz. versch. Signalgeneratoren 9 kHz-6 GHz. Diverse Oszilloskope 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 Störfestigkeit, 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 Ortungssysteme. Die Systeme unterstützen verschiedene Analyseverfahren.
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlagspannungsmessgerät, Gaschromatographen (Vakuumtgasung- und Headspace), Ölaufbereitungsanlagen für Mineralöl und Bioester

Power Quality Analyzer

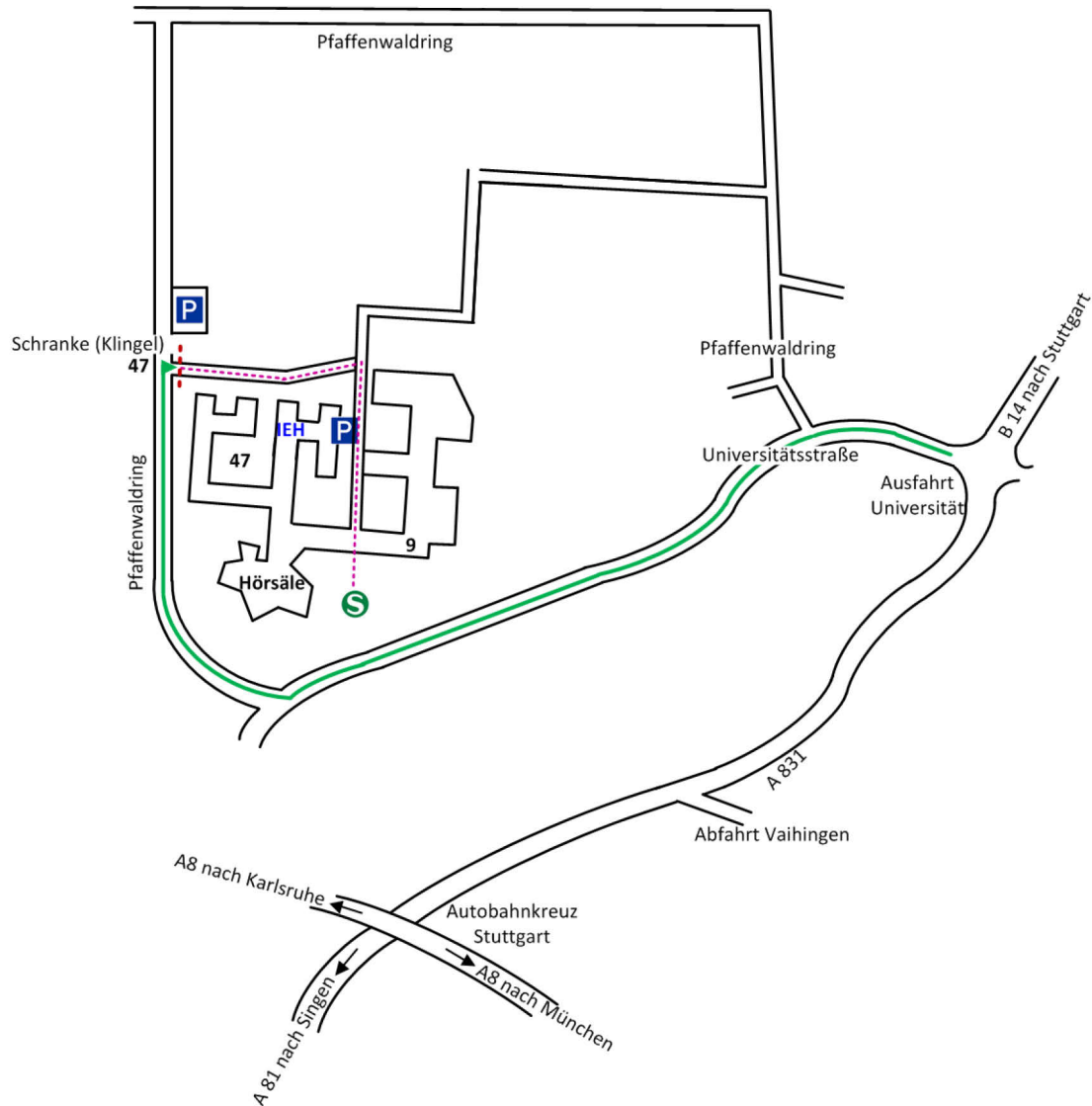
dreiphasige Strom- und Spannungsmessung bis zur 3000. Harmonischen (150 kHz), kontinuierliche Transientenerkennung mit 500 kS/s, Visualisierung auf Webseite

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

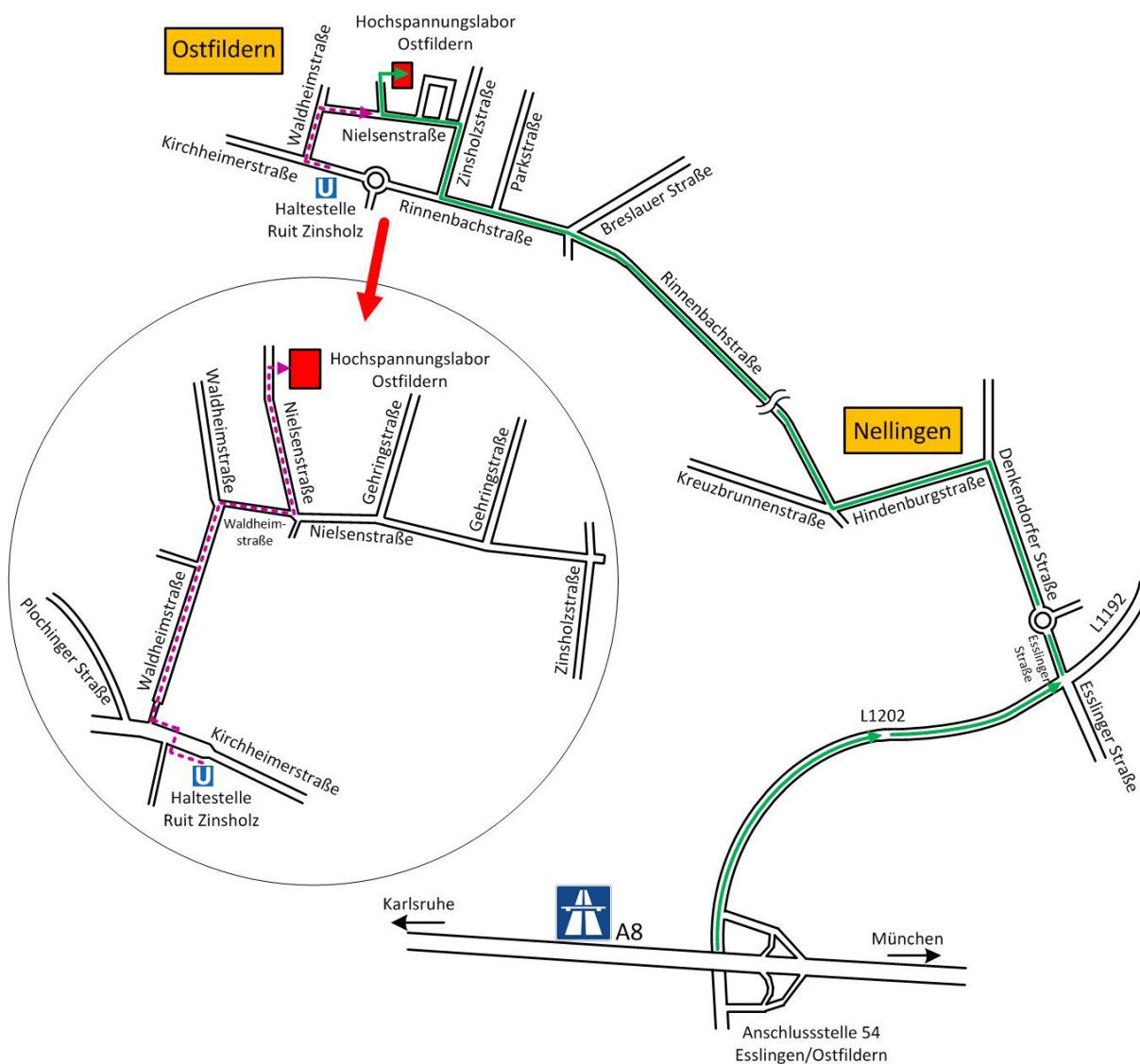


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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)