

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.....	38
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	50
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	54
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	72
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	108
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	120
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	124
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	128
9.	LAGEPLÄNE.....	130

1. VORWORT

Liebe Freundinnen und Freunde des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

im Jahr 2024 verzeichnete Deutschland bedeutende Fortschritte bei der Energiewende. Erneuerbare Energien deckten rund 59 % des Stromverbrauchs und die Bundesnetzagentur genehmigte etwa 1.400 km neue Stromleitungen, mehr als doppelt so viele wie im Vorjahr. Auch im regulatorischen Bereich wurden relevante Anpassungen vorgenommen, um die Umsetzung der Energiewende zu beschleunigen. Insbesondere soll die Einspeisung erneuerbarer Energien effizienter gestaltet werden. Dazu wurden Netzanschlussverfahren beschleunigt und Vorschriften zur Direktvermarktung angepasst. Ein bedeutender Schritt war die Schaffung eines Rechtsrahmens für den Aufbau einer nationalen Wasserstoffinfrastruktur sowie die Weiterentwicklung des Smart-Meter-Rollouts zu einem Smart-Grid-Rollout. Das letztere soll dazu beitragen, dass vorhandene Flexibilitäten aus den verteilten Anlagen besser genutzt werden können und somit die Stabilität des Systems durch eine verbesserte Steuerbarkeit gestützt werden kann. Trotz der positiven Entwicklungen bleibt der Investitionsbedarf weiterhin hoch, um die Klimaziele zu erreichen. Bis 2030 sind Investitionen von über 700 Mrd. Euro erforderlich. Dies erfordert sowohl passende Lösungen als auch qualifiziertes Personal, um die anstehenden Aufgaben stemmen zu können.

Um Schüler*innen die Attraktivität des Ingenieurberufs im Kontext der Energiewende näherzubringen, haben wir neben dem Tag der Erneuerbaren Energien erstmals auch einen Mathematik-Abiturvorbereitungskurs angeboten. An vier Nachmittagen besuchten uns über 200 Schüler*innen, mit denen wir in Kleingruppen Prüfungsaufgaben bearbeiteten. Obwohl ausschließlich Stuttgarter Gymnasien eingeladen wurden, gaben über 50 % der Teilnehmenden an, die Universität Stuttgart zuvor noch nie besucht zu haben. 15 % können sich ein Studium der Elektrotechnik oder der Erneuerbaren Energien vorstellen. Ein solches Format kann somit dazu beitragen, die Hemmschwelle für ein Ingenieurstudium zu senken und langfristig die Zahl der Studienanfänger*innen zu steigern.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir aber auf ein gelungenes Jahr zurückblicken. Es wurden 30 wissenschaftliche Publikationen in Konferenzbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht, die unsere Forschungsaktivitäten eindrucksvoll dokumentieren. Auch in diesem Jahr können wir vier Kollegen zur erfolgreichen Dissertation gratulieren. Saeed Khandan Siar, Michael Schühle, Christian Suttner und Mehran Tahir promovierten entsprechend zu den Themen „*Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren mittels CFD*“, „*Ursachen und Auswirkungen von Gleichströmen in Drehstromnetzen*“, „*Elektromagnetische Störfestigkeit von passiven Kleinsignalwandlern in Mittelspannungsschaltanlagen*“ und „*Objective Interpretation of Frequency Response Analysis of Power Transformers*“. Dr. Mehran Tahir erhielt den Preis für herausragende Dissertationen von der Dr. Wilhelmy-Stiftung für seine Dissertation.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt „MachineEmulate“ konnten wir erfolgreich abschließen. Wir ziehen eine durchweg positive Bilanz und danken dem Fördergeber sowie unseren Projektpartnern für die hervorragende Unterstützung. Parallel dazu haben wir mit dem ebenfalls vom Bundesministerium geförderten Projekt „Isolations- und Alterungstests durch Beanspruchung mit hohen Spannungsflanken“ begonnen. Darüber hinaus bearbeiten wir am Institut eine Vielzahl weiterer Projekte im Bereich der Energietechnik und Digitalisierung. Dazu zählen unter anderem Forschungsarbeiten zur intelligenten Zustandsüberwachung elektrischer Betriebsmittel, zur Integration von Erneuerbaren Energien und Ladeinfrastruktur in zukünftige Stromnetze sowie zur Entwicklung KI-basierter Diagnoseverfahren für Hochspannungskomponenten. Mit diesen Projekten leisten wir einen aktiven Beitrag zur sicheren, nachhaltigen und digitalen Transformation der Energieversorgung.

Das Jahr 2024 brachte auch einige personelle Veränderungen am Institut. Unsere erfahrenen Mitarbeiter*innen Paul Burkhardt, Deepak Deepak, Malte Gerber, Yang Hu, Jan Schabel und Kathrin Walz haben das Institut verlassen. Neu in unserem Team der wissenschaftlichen Mitarbeitenden begrüßen wir Svenja Bayer, Niklas Dölzer, Tengjun Guo, Niklas Hautz, Felix Maute, Theresa Paulus, Han Song und Florian Steinle. Wir wünschen allen ehemaligen IEHler*innen alles Gute und viel Erfolg bei ihren neuen Beschäftigungen und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit unseren neuen und alten Mitarbeiter*innen.

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

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

Stuttgart, im Mai 2025

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

PREFACE

Dear friends!

In 2024, Germany made significant progress in the energy transition. Renewable energies covered around 59% of electricity consumption and the Bundesnetzagentur (Federal Network Agency) approved about 1,400 km of new power lines. This is more than twice as many power lines as in the previous year. Relevant adjustments were also made in the regulatory area in order to accelerate the implementation of the energy transition. In particular, the grid feed-in of renewable energies is to be made more efficient. To this end, grid connection procedures were accelerated and regulations on direct marketing of electricity were adapted. An important step was the creation of a legal framework for the development of a national hydrogen infrastructure and the further development of the smart meter rollout into a smart grid rollout. Smart grids help to ensure that existing flexibilities from the distributed systems can be better utilized and support the stability and reliability of the grid through improved controllability. Despite the positive developments, the need for investment in climate change remains high: over 700 billion euros will be needed by 2030. This requires both suitable solutions and qualified professionals in order to be able to manage the tasks ahead.

In addition to the “Day of Renewable Energies” for school-pupils, we also offered a math exam preparation course for the first time to promote the attractiveness of the engineering profession in the field of energy transition. On four afternoons, during which we worked on exam questions in small groups, over 200 pupils took part.

Although only high-schools in Stuttgart were invited, over 50% of the participants stated that they had never visited the University of Stuttgart before. 15% of them could imagine studying electrical engineering or renewable energies. Such a format can therefore help to lower the barriers to studying Engineering and increase the number of first-year students in the long term.

In the research field we can look back on a successful year. 30 scientific publications were published in conference proceedings and journals, which impressively document our research activities. Also this year, we can congratulate four colleagues on achieving the doctorate degree. Saeed Khandan Siar, Michael Schühle, Christian Suttner and Mehran Tahir completed their doctorates on the topics of “Thermal Modelling of Power Transformers Using Computational Fluid Dynamics”, “Causes and effects of direct currents in power grids”, “Electromagnetic immunity of passive low power instrument transformers in medium-voltage switchgear” and “Objective Interpretation of Frequency Response Analysis of Power Transformers”. Dr. Mehran Tahir received for his dissertation the Dr. Wilhelmy Prize, which is awarded annually by the Dr. Wilhelmy Foundation for an outstanding dissertation.

We successfully completed the “MachineEmulate” project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection. We are very satisfied with the results and would like to thank the funding body and our project partners for their

excellent support. At the same time, we have started the project “Insulation and ageing tests by stressing with high voltage rises”, which is also funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection. We are also working on a number of other projects in the field of energy technology and digitalization. These include research into intelligent condition monitoring of electrical devices, the integration of renewable energies and charging infrastructure into future power grids and the development of AI-based diagnostic procedures for high-voltage components. With these projects, we are making an active contribution to a secure, safe and sustainable digital transformation of the energy supply.

In 2024 were also some personnel changes at our institute: our experienced team members Paul Burkhardt, Deepak Deepak, Malte Gerber, Yang Hu, Jan Schabel and Kathrin Walz have left the Institute. In return, we welcome Svenja Bayer, Niklas Dölzer, Tengjun Guo, Niklas Hautz, Felix Maute, Theresa Paulus, Han Song and Florian Steinle to our scientific team. We wish all former colleagues all the best and much success in their new jobs and look forward to working with our new and current team members.

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

We hope that our annual report will set up new impulses, strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. We would like to draw your particular attention to the chapter on student theses. Abstracts of the Master's theses completed in 2024 you will also find in this annual report.

Stuttgart, May 2025

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail:	Telefon / phone:
	vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de	+49 (0)711-
	firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	
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 <i>Robert Bosch GmbH</i>	
	Dipl.-Ing. Rainer JOSWIG	
	Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH <i>Schneider Electric Energy GmbH</i>	
	Dr.-Ing. Markus PÖLLER <i>Moeller & Poeller Engineering GmbH</i>	
	Hon.-Prof. Dr. Techn. Dr.-Ing. habil. Konstantin PAPAILIOU CIGRE Präsident	
Oberingenieure:	Markus MILLER, M. Sc.	-685-67869
	Dr.-Ing. Michael BELTLE <i>(Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)</i>	-685-68061
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	Fatemeh AHMADIPOUR, M. Sc.	-685-69194
	Lars BARONAT, M. Sc.	-685-61523
	Svenja BAYER, M. Sc. (ab 01.10.2024)	-685-67884
	Johannes BECK, M. Sc.	-685-67803
	Paul BURKHARDT, M. Sc. (bis 31.07.2024)	
	Jonas BUX, M. Sc.	-685-61722
	Deepak DEEPAK, M. Sc. (bis 30.11.2024)	
	Niclas DÖLZER, M. Sc. (ab 01.09.2024)	-685-67874
	Markus FISCHER, M. Sc.	-685-61525
	Nelly-Lee FISCHER, M. Sc.	-685-69138
	Malte GERBER, M. Sc. (bis 31.07.2024)	-685-69168
	Michaela GRUBER, M. Sc.	-685-67868

	Tengjun GUO, M. Sc. (ab 01.08.2024)	-685-69196
	Niklas HAUTZ, M. Sc. (ab 01.12.2024)	-685-67889
	Chuxuan HE, M. Sc.	-685-69194
	Yang HU, M. Sc. (bis 31.07.2024)	
	Stefan KÖBEL, M. Sc.	-685-69193
	Kevin KRATZ, M. Sc.	-685-60832
	Felix MAUTE, M. Sc. (ab 01.04.2024)	-685-69177
	Sharon MÜLLER, M. Sc.	-685-67875
	Theresa PAULUS, M. Sc. (ab 01.10.2024)	-685-61735
	Felipe PROBST, M. Sc.	-685-67885
	Jan SCHABEL, M. Sc. (bis 31.01.2024)	
	Lucia SCHNEE, M. Sc.	-685-69152
	Han SONG, M. Sc. (ab 18.11.2024)	-685-67836
	Florian STEINLE, M. Sc. (ab 01.10.2024)	-685-67817
	Emir SULEJMANI, M. Sc.	-685-67804
	Inti Runa SUPA STÖLBEN, M. Sc.	-685-69139
	Charlotte WAGNER, M. Sc.	-685-67838
	Kathrin WALZ, M. Sc. (bis 31.05.2024)	
	Henrik WISSEL, M. Sc.	-685-67845
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	-685-67876
Technische Angestellte / Technical Staff:	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
	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**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. PAPALIOU***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. MILLER, M. SC.

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. MILLER, M. SC.

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. MILLER, M. SC.

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

30. Januar 2024

Mit Studierenden der Vorlesung "Elektrische Energienetze" wurde die Transformatorenfabrik der Siemens Energy in Kirchheim/Teck besichtigt. Es war eindrucksvoll, das Entstehen der Trockentransformatoren für den Netzbooster der TransnetBW GmbH zu sehen. Besonders erfreulich war es, dass die aktuellen Studierenden von zwei ehemaligen Studenten, die jetzt die Verantwortung für die Produkte tragen, durch die Fabrikhallen geführt wurden.



Besuch bei Siemens Energy in Kirchheim/Teck

1. Februar 2024

Exkursion zur Firma PFISTERER Kontaktsysteme GmbH in Winterbach im Rahmen der Vorlesung Hochspannungsfreileitungen. Neben einer Firmenpräsentation wurden Fachvorträge zu den Themen „HV-Kabel und Garnituren“ sowie „Komponenten und Kontakttechnik“ gehalten. Anschließend konnten die Teilnehmenden bei einer Werksführung inklusive Versuchsvorführung einen Blick hinter die Kulissen werfen.

26. Juni 2024

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

4. Juli 2024

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



3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 01.11.2023 bis 31.12.2024:

Bayer, Svenja

Analyse und Vergleich von Ansätzen zur Modellierung von aggregierten zeitabhängigen Ladelasten von Elektrofahrzeugen auf Übertragungsnetzebene

Aufgrund der Verkehrswende wird ein starker Anstieg der Elektromobilität in Deutschland erwartet, wodurch es immer wichtiger wird, die Last der Ladevorgänge in Netzausbauplanungen und im Betrieb der Verteil- und Übertragungsnetze miteinzubeziehen. Dafür ist eine realistische und möglichst akkurate Modellierung der Ladelasten von elektrischen Personenkraftwagen von Bedeutung. In dieser Arbeit werden zwei Modellierungsansätze, ein fahrzeug- und ein ladestandortbasierter Ansatz, analysiert und miteinander verglichen. Zusätzlich werden die Modellierungsansätze durch neue Daten und die Implementierung zusätzlicher Einflussfaktoren ergänzt. Die Analyse zeigt, dass der fahrzeugbasierte Ansatz vor allem für regionale Modellierungen mit wenigen Fahrzeugen und der ladestandortbasierte Ansatz besonders für hochskalierte Szenarien geeignet ist.

Analysis and comparison of approaches for modeling the aggregated time-dependent charging load of electric vehicles on transmission grid level

The increasing electrification of the transport sector in Germany makes it important to include the charging demand of electric vehicle in the grid operation and expansion planning. This requires a realistic and accurate modelling of the charging demands. Two modelling approaches, a vehicle-based and a charging location-based approach, are therefore analyzed and compared in this thesis. In addition, the approaches are supplemented by new data and the implementation of additional influencing parameters. The analysis shows that the vehicle-based approach is particularly suitable for regional modelling with few electric vehicles and the charging location-based approach is more suitable for upscaled scenarios.

Benner, Simeon

Untersuchung der Einflüsse des Klimawandels auf die Systemplanung mit einem europäischen Energiesystemmodell

Analysis of the Impact of Climate Change on System Planning Based on an European Energy System Model

Bitterolf, Lea

Untersuchung von kostengebundenen Flexibilitätsabrufen von Elektrofahrzeugen

Für Unternehmen, die ihren Mitarbeitenden das Laden ihrer Elektrofahrzeuge ermöglichen wollen, stellt sich vermehrt die Frage, wie der steigende Stromverbrauch gedeckt werden kann. Dabei können sie sich die Energieflexibilität, die Elektrofahrzeuge bieten, zu Nutze machen. In dieser Arbeit wird eine Methodik entwickelt, die das ökonomische Potential des gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen am Intraday-Markt quantifiziert. Darüber hinaus wird auch der

Einfluss der Unsicherheit in der Verfügbarkeit der Elektrofahrzeuge auf die Erlöspotenziale untersucht. Für das gesteuerte Laden ergeben sich im Vergleich zu den Kosten des ungesteuerten Ladens mit Spotpreisen Erlöse, bei einem Festpreismodell hingegen Mehrkosten.

Investigation of cost-based flexibility usage of electric vehicles

For companies that want to enable their employees to charge their electric vehicles, the question increasingly arises as to how the rising electricity consumption can be covered. They can take advantage of the energy flexibility offered by electric vehicles. In this thesis, a methodology is developed to quantify the economic potential of controlled charging of electric vehicles on the intraday market. In addition, the influence of uncertainty in the availability of electric vehicles on the revenue potential is also investigated. Compared to the costs of uncontrolled charging with spot prices, controlled charging results in revenues, whereas a fixed price model results in additional costs.

Blakaj, Arben

Auswertung von Motorströmen an Hochspannungstrennschaltern

Um Veränderungen in der Funktionsfähigkeit eines Trennschalters feststellen zu können, wird ein Werkzeug benötigt, welches in der Lage ist, diese sichtbar zu machen. Dazu erfolgt im Rahmen einer Kooperation zwischen der Uni Stuttgart und der Transnet BW GmbH die Erstellung dieser Arbeit. Auf Basis des im Zuge einer vorausgegangenen Forschungsarbeit entwickelten Messsystems werden in dieser Arbeit die für die Messung des Motorstroms notwendigen Komponenten in einem Messkoffer eingebaut. Es werden Messungen an Freiluft-Trennschaltern in einem Umspannwerk durchgeführt und ausgewertet. Um die Bedienung des Messkoffers zu erleichtern, wird eine Software entwickelt, mit welcher sich eine Messung durchführen lässt und einen Vergleich unterschiedlicher Messungen aus einem Messdatenarchiv ermöglicht.

Evaluation of motor currents on high-voltage disconnectors

To be able to detect changes in the functionality of a disconnector, a tool is required that can make them visible. This work is being prepared as part of a cooperation between the University of Stuttgart and Transnet BW GmbH. Based on the measuring system developed during previous research work, in this work the components required for measuring the motor current are installed in a measuring case. Measurements are carried out on outdoor disconnectors in a substation and evaluated. To make the measurement case easier to use, software is being developed that can be used to start a measurement and enable a comparison of different measurements from a measurement data archive

Blank, Joshua

Untersuchung von Indizes für die Spannungsantwort infolge von Kurzschlüssen in einem auf Umrichtern basierendem Energiesystem

Diese Masterarbeit untersucht Indizes zur Bewertung der Spannungsantwort infolge von Kurzschlüssen in einem Umrichter-basierten IEEE-39-Knoten-Netz. Der steigende

Umrichteranteil führt zu einer Abnahme der Kurzschlussleistung und einem Anstieg der Kurzschlussimpedanz, was eine Neubewertung der Stabilität erfordert. Basierend auf den Kurzschlussimpedanzen wurden Indizes entwickelt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewertung der Spannungsantworten nach Fehlerklärung bei dreipoligen Fehlern getestet. Die Analyse umfasste neun Netzvarianten mit Umrichteranteilen von 77 % bis 0 %. Es wurde festgestellt, dass mit zunehmendem Umrichteranteil die Spannungsantwort stärker ausfällt, jedoch konnte kein eindeutiger Zusammenhang der Indizes über unterschiedliche Umrichteranteile bestätigt oder ausgeschlossen werden.

Investigation of indices for the voltage response due to short-circuit in a converter-based power system

This master's thesis investigates indices for evaluating the voltage response following short circuits in a converter-based IEEE-39 bus system. The increasing share of converters in power grids leads to reduced short-circuit capacity and increased short-circuit impedance. This necessitates a reassessment of fault dynamics and stability in such networks. Indices based on short-circuit impedances were developed and tested for their suitability in evaluating voltage responses after fault clearance of three-phase faults. Simulations for each bus node were conducted across nine network variants with converter shares ranging from 77% to 0%. Results show higher voltage responses with increased converter penetration. However, a definitive relationship between the indices and voltage responses could neither be confirmed nor ruled out.

Dang, Phu Bach

Implementierung eines Monitoringsystems und Auswertung von Bettungsmaterialien zur Anhebung der Stromtragfähigkeit an Hochspannungskabeln

Die Energiewende und der daraus folgende beschleunigte Ausbau erneuerbarer Energien erfordern Maßnahmen zur Erhöhung der Strombelastbarkeit des Übertragungsnetzes. In dieser Masterarbeit wird ein Live-Temperaturmonitoring auf einer Kabelstrecke zwischen Herrenberg und Gültstein untersucht. Das Temperaturmonitoring basiert auf Distributed Temperature Sensing (DTS), die Lichtwellenleiter als Temperatursensoren nutzen. Die Hardware für das Monitoring wird ein Jahr von AP Sensing gemietet. Mithilfe eines FEM-Modells und LoRaWAN-Temperatursensoren wird das Monitoring validiert. Drei thermisch optimierte Bettungsmaterialien, bereitgestellt von Heidelberg Materials, werden mit der Standardbettung verglichen. Die Ergebnisse dienen der Bestimmung von Reserven für höhere Strombelastbarkeiten und der Erstellung einer Handlungsempfehlung für die Netze BW GmbH.

Implementation of a Monitoring System and Evaluation of Bedding Materials to increase the Current Carrying Capacity of High Voltage Cables

The energy transition and the resulting accelerated expansion of renewable energies require measures to increase the current carrying capacity of the transmission grid. This master's thesis examines realtime temperature monitoring on a cable route between Herrenberg and Gültstein. The temperature monitoring is based on

Distributed Temperature Sensing (DTS), which uses fiber optic cables as temperature sensors. The hardware for the monitoring is leased from AP Sensing for one year. The monitoring is validated using an FEM model and LoRaWAN temperature sensors. Three thermally optimized bedding materials, provided by Heidelberg Materials, are compared with the standard bedding. The results are used to determine reserves for higher current carrying capacities and to draw up a recommendation for action for Netze BW GmbH.

Dölzer, Niclas

Untersuchung des Isolationsverhaltens alternativer Gase im inhomogenen elektrischen Feld

Investigation of the Insulation Behavior of Alternative Gases in an Inhomogeneous Electrical Field

Ernst, Patrick

Potenzial der Flexibilitätsaggregation von Wärmepumpen in Niederspannungsnetzen für den netzdienlichen Einsatz in der Mittelspannung

Als integraler Bestandteil der Energiewende stellt die Elektrifizierung des Wärmesektors eine Möglichkeit dar, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Durch die zunehmende Elektrifizierung des Wärmesektors werden die Stromnetze in Zukunft stärker belastet. In Kombination mit dem gleichzeitigen Hochlauf der Elektromobilität und dem Ausbau der Erneuerbaren Energien werden Netzbetreiber vor neue Herausforderungen gestellt. Im Rahmen dieser Arbeit gilt es zu untersuchen, ob es möglich ist, die Flexibilität der elektrischen Wärmeversorgung durch Wärmepumpen aus der Niederspannung zu aggregieren, um diese in der Mittelspannung netzdienlich einzusetzen. Weiterhin soll untersucht werden, wie sich eine Nutzung der Flexibilität auf die unterlagerte Niederspannung auswirkt.

Potential of flexibility aggregation of heat pumps in the low-voltage grid for grid-supporting use in the medium-voltage grid

As an integral part of the energy transition, the electrification of the heating sector represents an opportunity to reduce greenhouse gas emissions. The increasing electrification of the heating sector will place a greater burden on electricity grids in the future. In combination with the simultaneous ramp-up of electromobility and the expansion of renewable energies, grid operators will face new challenges. The aim of this thesis is to investigate whether it is possible to aggregate the flexibility of the electrical heat supply from heat pumps from the low voltage in order to use it in the medium voltage to benefit the grid. Furthermore, it is to be investigated how the use of flexibility affects the downstream low voltage.

Eschmann, Luka

Regionalisierung des zeit- und standortabhängigen Ladebedarfs elektrischer Pkw und Aggregation auf Übertragungsnetzebene in Baden-Württemberg

Der Hochlauf des elektrischen Individualverkehrs bringt neue Herausforderungen für die Stromnetzbetreiber mit sich. Für die Bestimmung des zeit- und standortabhängigen Ladebedarfs wird ein agentenbasiertes Modell entwickelt, welches diesen Ladebedarf

zu realen Stellflächen in Baden-Württemberg zuordnet. Der aus den Simulationen entstehende Ladebedarf wird für die Auswertung an den Knotenpunkten des Übertragungsnetzes aggregiert. Dies ermöglicht Lastflussberechnungen zum Zeitpunkt des maximalen Leistungsbedarfs. Anhand dessen können die Auswirkungen der massiven Integration des elektrifizierten Individualverkehrs auf das Übertragungsnetz untersucht werden. Die Analysen zeigen, dass die regionalen Unterschiede im Ladebedarf für den Betrieb und die Netzplanung des Übertragungsnetzes relevant sind und zukünftig mitberücksichtigt werden sollten.

Regionalization of the Time- and Location-Dependent Charging Demand of Electric Vehicles and Aggregation on Transmission Grid Level in Baden-Wuerttemberg

The ramp-up of electric private transport provides new challenges for grid operators. To determine the time- and location-dependent charging demand, an agent-based model is developed that assigns this charging demand to real parking spaces in Baden-Wuerttemberg. The resulting demand is aggregated to nodes of the transmission grid, which enables load flow calculations at the time of maximum power demand and provides a basis for investigating the effects of this electrification. The analysis shows that the regional differences in charging demand are relevant for the operation and planning of the transmission grid and should be taken into account in the future.

Gutacker, Magnus

Modellierung und Plausibilisierung von synthetischen MS-Netzmodellen für städtische Gewerbegebiete

Die Masterarbeit untersucht die Modellierung synthetischer Stromnetze für Gewerbegebiete zur Integration von E-LKW. Synthetische Netzmodelle basieren auf öffentlich verfügbaren Daten wie Gebäudedaten, Straßenverläufen und Lastprofilen. Mithilfe von Optimierungsverfahren werden Lasten berechnet und Netzstrukturen erstellt. Ziel ist die schrittweise Verbesserung des Modells durch Vergleich mit realen Netzen, insbesondere in Bezug auf Leitungsauslastungen, Transformatoren und Lastverteilungen. Zeitreihenbasierte Lastflussanalysen zeigen, dass zusätzliche Netzinformationen die Modellgenauigkeit erhöhen. Das Modell erfordert jedoch weitere Entwicklung, um Netzplanungen effizient zu unterstützen und die Ladeinfrastruktur für die Elektrifizierung der Logistikbranche zu ermöglichen.

Modelling and plausibility check of synthetic MS-network models for urban commercial areas

The master's thesis focuses on modeling synthetic power grids for industrial areas to support the integration of electric trucks. Synthetic grid models are based on publicly available data such as building information, road layouts, and load profiles. Using optimization methods, loads are calculated, and grid structures are created. The aim is to progressively refine the model by comparing it with real grids, focusing on line utilization, transformer capacity, and load distribution. Time-series load flow analyzes demonstrate that additional grid information enhances model accuracy. However, further development is needed to efficiently support grid planning and enable charging infrastructure for logistics electrification.

Hautz, Niklas

Entwicklung eines Monitoringkonzeptes zur kontinuierlichen Messung von Netzzrückwirkungen

Diese Arbeit entwickelt eine Methode zur kontinuierlichen Messung von Netzzrückwirkungen durch das Laden von Elektrofahrzeugen und beschreibt die Konzeption eines Messsystems zur Erfassung von Strom und Spannungsdaten am öffentlichen Netz und in einer Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Umgebung. Die Methode nutzt Netzanalysatoren zur Messung relevanter Parameter, Fourier-Analysen und Fortescue-Transformationen, um die Daten in aussagekräftige Größen zu überführen. Die Ergebnisse zeigen eine effektive Erfassung der Netzzrückwirkungen, weisen jedoch auf Herausforderungen wie die zeitliche Synchronisation von Datenausschnitten und die Analyse dynamischer Lastwechsel hin. Ein Ausblick umfasst die Weiterentwicklung für größere Ladeinfrastrukturen und die Integration in Energiemanagementsysteme.

Development of a monitoring concept for the continuous measurement of grid disturbances

This thesis develops a method for the continuous measurement of grid disturbances caused by charging electric vehicles and describes the design of a measurement system for recording current and voltage data on the public grid and in a power-hardware-in-the-loop environment. The method uses grid analyzers to measure relevant parameters, Fourier analyzes and Fortescue transformations to convert the data into meaningful quantities. The results show an effective capture of grid feedback, but point challenges such as the temporal synchronization of data sections and the analysis of dynamic load changes. An outlook includes further development for larger charging infrastructures and integration into energy management systems.

Kaya, Evrim

Automatisierte Detektion von Photovoltaikanlagen in Quartieren mithilfe maschinellen Lernens auf Grundlage von Luftbildern

Die Dezentralisierung der elektrischen Energieversorgung in Deutschland im Zuge der Energiewende stellt Netzbetreiber vor neue Herausforderungen. Während die Stromversorgung in der Vergangenheit durch vertikale Lastflüsse von der Höchstspannungs- hin zur Niederspannungsebene geprägt war, führt der Ausbau der Erneuerbaren Energien in der Nieder- und Mittelspannung zu höheren horizontalen Lastflüssen innerhalb einer Spannungsebene. Für die wissenschaftliche Untersuchung von Methodiken der Betriebsführung und Planung von Verteilnetzen ist es notwendig, belastbarer Last- und Erzeugungsprognosen in der Niederspannung zu erhalten, welche die veränderten Bedingungen widerspiegeln. Da Kenndaten von PV-Anlagen nicht öffentlich zugänglich sind, bedarf es diese hierzu in einem ersten Schritt synthetisch nachzubilden. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Methodik entwickelt werden, durch welche PV-Anlagen anhand von Luftbildern identifiziert werden können. Mithilfe maschinellen Lernens sollen Luftaufnahmen von Bestandsdaten analysiert werden, um nachfolgend automatisiert PV-Anlagen in Quartieren identifizieren und Lastprofile erstellen zu können.

Automated detection of photovoltaic systems in neighborhoods using machine learning based on aerial images

The decentralization of the electrical energy supply in Germany in the course of the energy transition poses new challenges for grid operators. While in the past the power supply was characterized by vertical load flows from the extra-high voltage to the low-voltage level, the expansion of renewable energies in the low and medium voltage is leading to higher horizontal load flows within a voltage level. For the scientific investigation of methods of operational management and planning of distribution grids, it is necessary to obtain reliable load and generation forecasts in the low voltage that reflect the changed conditions. Since characteristic data of PV systems are not publicly available, they need to be synthetically simulated in a first step. As part of this work, a methodology is to be developed that allows PV systems to be identified using aerial images. With the help of machine learning, aerial photographs of existing data are to be analyzed in order to subsequently automatically identify PV systems in districts and create load profiles.

Lang, Fabian

Untersuchung verteilnetzgebundener Flexibilitätsoptionen mit mehreren Übergabepunkten zur übergeordneten Netzebene

Durch den Einsatz einer Aggregationsmethodik können flexible Einheiten an einem Übergabepunkt aggregiert werden. Diese Arbeit untersucht die Aggregation für ein Verteilnetz mit mehreren Verknüpfungspunkten zur übergeordneten Spannungsebene und analysiert den Einfluss eines übergeordneten Netzes. Für die Untersuchungen werden zwei Stromnetze verschiedener Spannungsebenen gekoppelt. Zur Validierung der Aggregation wird eine Monte-Carlo-Simulation verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass Transitflüsse durch das unterlagerte Netz die Aggregation beeinflussen. Besonders bei Netzen mit mehreren Übergabepunkten ist das Verhalten des übergeordneten Netzes entscheidend für eine effektive Aggregation.

Investigation of distribution grid-bound flexibility options with several interconnection points to the higher grid levels

By using an aggregation methodology, flexible units can be aggregated at a transfer point. This thesis investigates the aggregation for a distribution grid with several interconnection points to the higher voltage level and analyzes the influence of the higher levelled grid. Two power grids of different voltage levels are coupled for the investigations. A Monte Carlo simulation is used to validate the aggregation. The results show that transit flows through the underlying grid influence the aggregation. Especially for grids with several transfer points, the behavior of the higher levelled grid is crucial for effective aggregation.

Lin, Sheau-Yu

Untersuchung von Flexibilitätsoptionen beim Laden von Elektrofahrzeugen

In dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, die Messdaten aus einem realen Verteilnetz und synthetische Profile der Positionen von Elektrofahrzeugen nutzt, um die Auswirkungen von Faktoren wie der Durchdringungsrate von Elektrofahrzeugen, der Ladeausrichtung und Ladeszenarien auf die verfügbare Flexibilität durch

Elektrofahrzeuge zu bewerten. Darüber hinaus werden auch die erhöhten Ladebedarfe nach einem Abruf der Flexibilität untersucht. Die Ergebnisse unterstreichen das signifikante Potenzial von bidirektionalem Laden und gesteuerten Ladeverfahren für ein effizientes Lastmanagement und die Bereitstellung von Flexibilität in Verteilnetzen. Sie betonen auch die Bedeutung der Berücksichtigung der Leistungsgrenze des Transformators für effektive Flexibilitätsanwendungen.

Investigation of flexibility use during electric vehicle charging

This thesis introduces a methodology that utilizes the measurement data within a real distribution system and synthetic EV position profiles to evaluate the impacts of factors such as electric vehicle penetration rates, charging direction, and charging scenarios on the available flexibility provided by electric vehicles. Furthermore, the increased charging demands following the flexibility provision are also assessed. The results highlight the significant potential of bidirectional charging and controlled charging strategies for effective load management and flexibility provision in distribution systems. They also underscore the importance of considering the power limit of the transformer for effective flexibility applications.

Malz, Janina

Untersuchung des Isolationsverhaltens alternativer Gase im inhomogenen elektrischen Feld

Investigation of the Insulation Behavior of Alternative Gases in an Inhomogeneous Electrical Field

Maute, Felix

EMV-U von HV-Batterien

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Methodik zur Simulation und Messung von niederfrequenten Magnetfeldern auf der Ebene von HV-Batteriemodulen entwickelt werden, um die Magnetfeldemission und damit den Einfluss dieser auf die Insassen zu minimieren. Simulativ werden sechs Varianten der 6s6p-Verschaltung von Rundzellen untersucht und mit Gleich- aber auch mit Wechselströmen beaufschlagt. Ein gutes Verhalten hinsichtlich der ausgehenden Feldstärke zeigen die Varianten mit möglichst vielen parallelen Strompfaden. Für die Validierung wird eine der Varianten in einem Messaufbau nachgebildet, mit einem 50 Hz-Strom belastet und das emittierte Magnetfeld bei verschiedenen Abständen und Stromstärken gemessen. Dabei zeigen sich Probleme bei der Erfassung von stark inhomogenen Magnetfeldern mit einer normkonformen 100 cm²-Sonde, welche typischerweise für Messungen entsprechend der ICNIRP-Richtlinie aufgrund des Mittelungsverhaltens verwendet werden.

Environmental Electromagnetic Compatibility of HV Batteries

The aim of this work is to develop a methodology for the simulation and measurement of low frequency magnetic fields at the HV battery module level in order to minimize the emissions and thus their influence on the occupants. Six variants of the 6s6p topology are simulated and subjected to DC and AC. The variants with as many parallel connections as possible show satisfactory behavior with regard to the emitted field strength. For validation, one of the variants is replicated in a measurement setup,

stressed with a current at 50 Hz and the emitted field is measured at different distances and currents. This reveals problems in the detection of strongly inhomogeneous magnetic fields with a standard-compliant 100 cm² probe, which is typically used for measurements according to the ICNIRP guidelines, due to the averaging behavior.

Oetoyo, Anisatur Rizqi

Untersuchung der Genauigkeit der statischen Berechnungsmethode für Anfangs-Kurzschlussströme nach VDE-Methode in einem umrichterbasierten Stromnetz

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Berechnung des Anfangs-Kurzschlussstroms in umrichterdominierten Stromnetzen. Die Berechnung ist entscheidend für die Netzplanung sowie für die Bestimmung des Ausschalt- und Dauerkurzschlussstroms. Der Ersatz von Synchronmaschinen durch Umrichter zur Integration erneuerbarer Energien verändert das Kurzschlussstromverhalten. In dieser Arbeit werden die Kurzschlussstrombeiträge von Synchronmaschinen, netzspeisenden und netzbildenden Umrichtern untersucht. Ein modifizierter Ansatz zur Berechnung des Anfangs-Kurzschlussstroms basierend auf VDE 0102/IEC 60909 wird vorgestellt, der Umrichterbeiträge berücksichtigt. Die Methode wird anhand von RMS-Simulationen im IEEE-39-Bus-System validiert, wobei Synchronmaschinen schrittweise durch Umrichter ersetzt werden. Die Genauigkeit der statischen Berechnungsmethode wird quantitativ bewertet.

Investigation of accuracy of static calculation method for initial short-circuit currents as per VDE method in a converter-based power system

This master's thesis addresses the challenge of initial short-circuit current calculation in converter-dominated power grids. Initial short-circuit current calculations are crucial for grid planning and determining breaking and steady-state fault currents. The replacement of synchronous generators with converters to integrate renewable energy changes the short-circuit current profile. This work examines the fault current behavior and contributions of synchronous machines, grid-following, and grid-forming converters. A modified approach for initial fault current calculation based on VDE 0102/IEC 60909 is proposed, incorporating converter contributions. The method is validated using IEEE-39 bus system RMS simulations, where synchronous generators are progressively replaced with converters.

Paulus, Theresa

Entwicklung einer wahrscheinlichkeitsbasierten Flexibilitätsaggregation für ein präventives Engpassmanagement in aktiven Verteilnetzen

Im Rahmen der Energiewende gewinnen dezentrale Lasten und Erzeuger zunehmend an Bedeutung zur Regelung der elektrischen Energienetze. Ziel dieser Arbeit ist es, probabilistische Prognosen dieser dezentralen Anlagen in die Planung bereitstellbarer Flexibilität und das Ergreifen von präventiven Engpassmanagementmaßnahmen einzubinden. Dazu werden die Wirkleistungsprognosen der flexiblen und nicht flexiblen Anlagen eines Netzgebietes mittels mathematischer Faltung verbunden und der gemeinsame zulässige Betriebsbereich über ein Aggregationsverfahren bestimmt. Für das präventive Engpassmanagement kann so eine Aussage über die

Wahrscheinlichkeiten der Überlastung von Netzbetriebsmitteln getroffen werden. Außerdem kann eine probabilistische Prognose für die verfügbare Flexibilität ermittelt werden, welche am Netzverknüpfungspunkt zur überlagerten Spannungsebene systemdienlich eingesetzt werden kann.

Development of a probability-based flexibility aggregation for a preventive congestion management in active distribution networks

Within the context of the energy transition, decentralized loads and generators are gaining increasing significance for active distribution network management. The objective of this thesis is the integration of probabilistic forecasts of these decentralized assets into the planning of available flexibility and the implementation of preventive congestion management measures. To achieve this, the active power forecasts of both flexible and non-flexible units within a network are combined using mathematical convolution. The common feasible operation region is determined through an aggregation process. This enables making statements about the probabilities of network equipment overload for preventive congestion management. Furthermore, a probabilistic forecast for available flexibility can be determined, which can be utilized for system-serving purposes.

Popal, Matin

Bewertung verschiedener EMV-Messmethoden für leitungsgeführte Störaussendungen von Elektrofahrzeugen

In dieser Masterarbeit wird der HPK Measurement Coupler Kit für Fahrzeugmessungen beim DC-Laden auf seine Eignung zur Erfassung von leitungsgebundenen Störungen untersucht. Der Koppler misst zwar Spannungen zuverlässig, bietet aber keine Entkopplungsmöglichkeiten für hochfrequente Störungen aus Fahrzeugen, was zu überhöhten Messwerten im Frequenzbereich führt und Anpassungen der EMV-Grenzwerte in der Norm IEC 61851-21-1 erforderlich macht. Darüber hinaus erschweren die derzeitigen Berechnungsfehler beim Strom die genaue Bestimmung der Störimpedanz. Für den zukünftigen Einsatz wird empfohlen, den Koppler nur in Verbindung mit einem Linear Impedance Stabilization Network (LISN) zu verwenden.

Evaluation of different EMC measurement methods for conducted emissions from electric vehicles during DC charging

In this master's thesis, the HPK Measurement Coupler Kit for vehicle measurements during DC charging is analysed for its suitability for detecting conducted interference. Although the coupler measures voltages reliably, it offers no decoupling options for high-frequency interference from vehicles, which leads to excessive measured values in the frequency range and necessitates adjustments to the EMC limit values in the IEC 61851-21-1 standard. In addition, the current calculation errors in the current make it difficult to determine the interference impedance precisely. For future use, it is recommended that the coupler only be used in conjunction with a Linear Impedance Stabilisation Network (LISN).

Sander, Marlene

Untersuchung der Leistungswinkelcharakteristik eines umrichterbasierten Energiesystems

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden Leistungswinkel von Synchronmaschinen, netzfolgenden und netzbildenden Umrichtern untersucht und miteinander verglichen. Dazu werden bereits vorhandene Modelle der Simulationssoftware PowerFactory der Firma DigSilent verwendet. Die Modelle werden zunächst in einem 5-Bus-System untersucht. Synchronmaschinen und netzfolgende Umrichter werden zudem in dem IEEE 39-Bus System gegenübergestellt. Zur Untersuchung der Leistungswinkel werden die Systemparameter des Netzes verändert. Dabei werden die Elemente einem 3-phasigen Kurzschluss ausgesetzt. Die Netzänderungen beinhalten die Netzimpedanz und den stationären Zustand vor dem Fehler.

Investigation of power-angle characteristics of converter-based power system

In the context of this master's thesis, power angles of synchronous machines, grid-following, and grid-forming inverters are investigated and compared. Existing models within the simulation software Power Factory by DigSilent are employed for this purpose. Initially, these models are examined within a 5-bus system. Additionally, synchronous machines and grid-following inverters are juxtaposed within the IEEE 39-bus system. To study the power angles, network parameters are modified. Elements are subjected to a three-phase short circuit. The network alterations encompass changes in network impedance and the pre-fault steady-state conditions.

Schan, Simon

Design und Optimierung eines phasengesteuerten Vollbrücken-DC/DC-Wandlers für Automobilanwendungen

Diese Masterarbeit befasst sich mit dem Entwurf und der Optimierung eines phasengesteuerten Vollbrücken-DC/DC-Wandlers, dessen Ausgangsspannung durch Phasenverschiebungssteuerung geregelt wird. Ziel ist die Entwicklung und Implementierung auf einer Leiterplatte (PCB). Während des Ladevorgangs eines Elektrofahrzeugs (EV) werden die leitungsgebundenen elektromagnetischen Störungen im Hoch- und Niederspannungsnetz emuliert und gemessen. Die Arbeit umfasst den Entwurf, den Aufbau und die experimentelle Bewertung des Wandlers hinsichtlich Funktionalität, Leistung und EMV. Die Ergebnisse zeigen, dass der Wandler die EMV-Normen nicht erfüllt, so dass eine zusätzliche Filterung erforderlich ist.

Design and optimization of a phase-shift full-bridge DC/DC converter for automotive applications

This Master's thesis deals with the design and optimization of a full-bridge DC/DC converter whose output voltage is regulated by phase shift control. The aim is to develop and implement it on a printed circuit board (PCB). During the charging process of an electric vehicle (EV), the conducted electromagnetic interference in the high and low voltage network will be emulated and measured. The work includes the design, construction and experimental evaluation of the converter in terms of functionality,

performance and EMC. The results show that the converter does not comply with EMC standards and that additional filtering is required.

Scheffold, Peter

Potentialanalyse der Vermarktung von Flexibilitäten sowie der Bereitstellung von Energiedienstleistungen durch mobile Speicher

Analysis of the supply of energy services through mobile energy storages as well as the commercial potential of the flexibility of these energy storages

Siemer, Kay

Analyse der marktgestützten und netzebenen-übergreifenden Beschaffung von Blindleistung aus Sicht eines Übertragungsnetzbetreibers

Analysis of market-based and cross-grid procurement of reactive power from the perspective of a transmission system operator

Song, Han

Präzise Kontaminationskontrolle in Transformator-Mineralöl: Entwicklung von Protokollen zur präzisen Injektion von Wasserstoff und Feuchtigkeit für bestimmte ppm-Bereiche

Im Betrieb von Transformatoren ist die Entstehung von Teilentladungen unvermeidlich, was die Stabilität und Zuverlässigkeit des Stromnetzes beeinträchtigen kann. Daher spielt die Verwendung von Transformator-Isolieröl eine entscheidende Rolle, um Geräteausfälle zu verhindern. Während des Entladungsprozesses im Transformator finden chemische Reaktionen statt, die zur Bildung von Feuchtigkeit und Wasserstoff im Mineralöl führen. Diese Verunreinigungen können die Leistungsfähigkeit des Isolieröls erheblich mindern. Ziel dieser Arbeit ist es, präzise Methoden zur Analyse der Zusammensetzung von Verunreinigungen im Transformatoröl zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt auf der gezielten Injektion von Wasserstoff und Feuchtigkeit in definierten ppm-Bereichen im Rahmen geplanter Experimente, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Transformatorbetriebs zu verbessern.

Precision Contamination Control in Transformer Mineral Oil: Developing Protocols for Accurate Injection of Hydrogen and Moisture for Targeted ppm Ranges

Partial discharges in transformers are unavoidable and can compromise power grid stability. Transformer insulating oil is essential to prevent equipment failure, but discharge processes generate moisture and hydrogen in the mineral oil, impairing its performance. This study aims to develop precise methods for analyzing impurities in transformer oil. Experiments focus on injecting hydrogen and moisture within defined ppm ranges to assess their impact. The findings aim to enhance the safety and reliability of transformer operation by improving the understanding of contamination effects and optimizing the performance of insulating oil under realistic operating conditions.

Soyal, Tahir

Simulative und messtechnische Analyse der EMV-Wechselwirkungen im Hochvoltssystem eines Elektrofahrzeugs während des konduktiven Ladevorgangs

Diese Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), dem Filterdesign, der Hardwareentwicklung und dem Leiterplattendesign. Im Labor werden die EMV-Wechselwirkungen von Elektrofahrzeugen analysiert. In Eagle wird ein Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) entwickelt. Der Wandler dient als Prüfling (DUT) zur Analyse von Störeinflüssen auf der Hochvolt- (HV) und Niederspannungsseite (LV). Zusätzlich wird eine Simulation mit LTspice XVII durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation und der Labormessungen werden schließlich verglichen und validiert.

Simulative and Metrological Analysis of EMC Interactions in the High-Voltage System of an Electric Vehicle During the Conductive Charging Process

This thesis deals with the basics of electromagnetic compatibility (EMC), filter design, hardware development and PCB design. The EMC interactions of electric vehicles are analyzed in the laboratory. A direct voltage converter (DC/DC converter) is developed in Eagle. The converter is used as a device under test (DUT) to analyze interference on the high voltage (HV) and low voltage (LV) sides. A simulation is also carried out using LTspice XVII. The results of the simulation and the laboratory measurements are then compared and validated.

Stehle, Florian

Messung und Modellierung der HF-Impedanz von elektrisch erregten Synchronmaschinen im passiven und aktiven Zustand

Der Hauptkoppelpfad bei EMV-Prüfungen von Antriebswechselrichtern nach CISPR 25 ist die elektrische Maschine. Um Kosten und Aufwand zu minimieren, soll diese in Zukunft durch eine Maschinenemulation ersetzt werden. Diese erfordert eine präzise Nachbildung der Maschinenimpedanz, um das Klemmenverhalten nachbilden zu können. In dieser Arbeit wurde der Einfluss verschiedener Parameter, wie Drehzahl, Drehrichtung, Erregerstrom, Verschaltung der Erregerwicklung, Temperatur und Positionsabhängigkeit des Rotors messtechnisch bestimmt. Als Parameter großen Einflusses haben sich Temperatur und Rotorposition herausgestellt. Anschließend wurde auf Basis der Messungen und Literaturrecherche ein Modell entwickelt, das die Maschinenimpedanz nachbildet. Das Modell stimmt qualitativ mit den Messungen überein, kann die Messungen aber nicht im Detail nachstellen.

Measurement and modelling of the RF impedance of electrically excited synchronous machines under passive and active operating conditions

The main coupling path in EMC testing of drive inverters according to CISPR 25 is the electrical machine. In order to minimize costs and effort, the electrical machine will be replaced by a machine emulation in the future. This requires a precise simulation of the machine impedance to reproduce the terminal behavior. In this work, the influence of various parameters, such as speed, direction of rotation, excitation current, connection of the excitation winding, temperature and rotor position, was determined using measurements. Temperature and rotor position have proven to have a high

influence. A model was developed based on measurements and literature that simulates the machine impedance. The model agrees qualitatively with the measurements, but cannot reproduce the measurements in detail.

Steinle, Florian

Entwicklung und Aufbau einer resonant reaktiven Abschirmung zur EMV-Optimierung von induktiven Kfz-Ladesystemen

Induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge stellen hohe Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Um magnetische Feldemissionen zu reduzieren, werden resonant reaktive Schildspulen eingesetzt, die nach der Lenzschen Regel arbeiten. Diese Schildspulen werden zunächst in SolidWorks modelliert und anschließend in CST in ein bestehendes Simulationsmodell integriert. Die Dimensionierung von Induktivität und Kapazitäten erfolgt zunächst simulativ und wird anschließend praktisch umgesetzt. Das WPT-System (Wireless Power Transfer) wird sowohl im Best- als auch im Worst-Case-Szenario getestet. In beiden Fällen wird eine Feldreduzierung von etwa 10 dB bei der Betriebsfrequenz erreicht, wobei der Wirkungsgrad um lediglich 2% sinkt.

Development and construction of a resonant reactive shield for EMC optimization of automotive inductive charging systems

Inductive charging systems for electric vehicles face stringent requirements for electromagnetic compatibility (EMC). To reduce magnetic field emissions, resonant reactive shielding coils are used, operating according to Lenz's Law. These shielding coils are first modeled in SolidWorks and then integrated into an existing simulation in CST. The inductance and capacitance are initially dimensioned through simulation, followed by practical implementation. The wireless power transfer (WPT) system is tested under both best-case and worst-case scenarios. In both cases, a field reduction of approximately 10 dB at the operating frequency is achieved, with only a 2% efficiency loss.

Su, Xing

Aufbau und Vergleich der TE-Messmethode für einen umrichter gespeisten Motor

Diese Studie konzentriert sich auf die Verbesserung des Aufbaus der Teilentladungsmessung (TE) in der Wicklung des Elektromotors. Um dieses Ziel zu erreichen, zielt die Forschung darauf ab, 1) einen neuen Aufbau zur Erzeugung von unipolarer PWM Spannung zu implementieren, um die Kosten zu senken, und 2) eine archimedische Spiralantenne zur TE-Signaldetektion zu verwenden. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die archimedische Spiralantenne die Empfindlichkeit der TE-Messung erhöhen kann. Die neue Rechteckwellenplattform kann die ursprüngliche Halbbrückenschaltung ersetzen, wodurch die Ansteuerschaltung vereinfacht, die Kosten gesenkt und die experimentelle Effizienz verbessert werden.

Building and comparing the PD measurement method for inverter-fed motor

This study focuses on improving the partial discharge (PD) measurement setup in the winding of the electric motor. To achieve this goal, this research aims to 1. implement a new drive circuit for generating unipolar square waves to reduce cost, and 2. use an Archimedean spiral antenna for PD signal detection. Experimental results show that the Archimedean spiral antenna can increase the sensitivity of PD measurement. The new square wave platform can replace the original half-bridge circuit, simplifying the drive circuit, reducing cost and improving experimental efficiency.

Tzakova, Iwana

Auswirkung der Elektrifizierung von Bussen als Teil des öffentlichen Personennahverkehrs auf das Übertragungsnetz in Baden-Württemberg

Diese Arbeit befasst sich mit der Modellierung von Ladeprofilen für Elektrobusse und deren Auswirkung auf das Übertragungsnetz in Baden-Württemberg. Dabei wird das Szenario betrachtet, in dem alle Busse batterieelektrisch betrieben sind und zentral in Depots laden. Es werden die Einflüsse der Außentemperatur und der Busgröße auf den Verbrauch berücksichtigt. Es werden Lastprofile für die 142 identifizierten Busdepots abgeleitet. Die benötigte Leistung der Depots wird zur bestehenden Netzlast hinzugefügt. Der Einfluss der zusätzlichen Lasten wird bezüglich der Spannung an den Knoten, der Transformator- und der Leitungsauslastungen analysiert.

Impact of the Electrification of Busses as Part of the Public Transport System on Transmission Grid

This thesis develops a model for generating charging profiles for electric buses to investigate the impact of the electrification of bus transport on the transmission grid. In the considered scenario all buses are battery electric and charge at assigned depots. The external temperature and bus size are taken into account when assessing energy consumption. Load profiles are derived for the 142 identified bus depots. The required power of the depots is added to the existing grid load. The impact of these additional loads is analyzed in terms of voltage levels at the nodes and transformer and line utilization.

Ulherr, Felix

Entwicklung einer Simulationsumgebung zur zeitreihenbasierten Analyse des Flexibilitätspotentials von Power-to-Heat-Technologien in Wohngebäuden

Aus dem Hochlauf der Wärmepumpen und der hiermit verbundenen Elektrifizierung der Wärmeversorgung folgt eine stärkere Belastung des Stromnetzes. Um den kosten- und planungsintensiven Netzausbau zu verhindern, gilt es Flexibilisierungspotentiale zu identifizieren und den Lastverlauf von Wärmepumpen zu optimieren. Diese Flexibilisierung muss im Interesse der Kunden sein, damit sie angenommen wird und ihre beabsichtigte Wirkung entfalten kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik zur Untersuchung des Flexibilisierungspotentials von Power-to-Heat im Wohngebäudebereich für Einfamilienhäuser entwickelt. Dafür wird ein thermisches RC-Simulationsmodell aufgebaut, um mithilfe von flexiblen Stromtarifen den

Strombezug für die Gebäudeheizung kosteneffizient zu optimieren. Dabei steht das Einsparpotential der Heizkosten für den Kunden im Vordergrund. Darüber hinaus erfolgt eine kurze Einschätzung des Potentials für die systemdienliche Lastflexibilisierung, sowie ein Kostenvergleich verschiedener Heizsysteme. Es zeigt sich, dass durch die Optimierung der Wärmebereitstellung für das betrachtete Beispielgebäude bis zu 8,9 % an Kosten gegenüber einer rein temperaturgeregelten Betriebsweise eingespart werden können. Die Optimierung kann außerdem zu einer systemdienlichen Lastverschiebung beitragen durch die Erhöhung des Anteils an Erneuerbaren Energien am Strommix der Wärmepumpe.

Development of a simulation environment for time-series-based analysis of the flexibility potential of power-to-heat technologies in residential buildings

The ramp-up of heat pumps and the associated electrification of the heat supply will place a greater burden on the electricity grid. To prevent costly and planning-intensive grid expansion, it is important to identify potential for flexibility and to optimize the load profile of heat pumps. This flexibilization must be in the interest of customers so that it is accepted and can have its intended effect. As part of this work, a methodology is developed to investigate the flexibilization potential of power-to-heat in the residential building sector for single-family homes. For this purpose, a thermal RC simulation model is set up in order to optimize the electricity supply for building heating cost-efficiently with the help of flexible electricity tariffs. The focus here is on the potential savings in heating costs for the customer. In addition, there is a brief assessment of the potential for system-based load flexibilization and a cost comparison of different heating systems. It is shown that optimizing the heat supply for the example building in question can save up to 8.9 % in costs compared to a purely temperature-controlled mode of operation. Optimization can also contribute to load shifting in line with the system by increasing the proportion of renewable energies in the heat pump's electricity mix.

Vollmer, Jan

Erstellung und Charakterisierung von Elektrolyseur-Lastprofilen für die Flexibilitätsanalyse von Elektrolyseursystemen

Generation and Characterization of Electrolyzer Load Profiles for the Flexibility Analysis of Electrolyzer Systems

Wolf, Simon

Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien von Wärmepumpen auf Niederspannungsnetze

Diese Masterarbeit untersucht die Auswirkungen von Wärmepumpen auf Niederspannungsnetze anhand eines Simulationsmodells. Die Wohngebäude im Netz werden durch ein thermisches Gebäudemodell dargestellt, das die Beheizung mittels Wärmepumpen simuliert. Um die Netzbelastungen zu analysieren, werden verschiedene Betriebsstrategien von Wärmepumpen untersucht. Diese Strategien werden anhand unterschiedlicher Netzszenarien bewertet, die sowohl technische Entwicklungen im Zuge der Energiewende als auch verschiedene Energieeffizienzklassen von Wohngebäuden abbilden. Ziel der Arbeit ist es, die

Belastungen der Netzbetriebsmittel und Spannungsgrenzen durch die verschiedenen Betriebsstrategien zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration von Wärmepumpen erhebliche Netzbelastungen verursacht, insbesondere bei Optimierungsstrategien, die zu einer hohen Gleichzeitigkeit des Betriebs führen. Außerdem wird deutlich, dass energieeffiziente Gebäude wesentlich zur Reduzierung dieser Lasten und zur Verbesserung der Netzstabilität beitragen können. Dies unterstreicht die Bedeutung energetischer Optimierungen und flexibler Steuerungsstrategien für den zukünftigen Netzbetrieb.

Impact of Different Operating Strategies of Heat Pumps on Low-Voltage Grids

This master's thesis analyses the impact of heat pumps on low-voltage networks using a simulation model. The residential buildings within the network are represented by a thermal building model that simulates heating via heat pumps. To analyze the resulting grid loads, various operational strategies for heat pumps are investigated. These strategies are evaluated based on different network scenarios, which take into account both different technical developments and different energy efficiency classes of residential buildings. The aim of this study is to assess the load on grid infrastructure and voltage limits caused by different operational strategies. The results show that the integration of heat pumps causes a considerable load on the grid, especially with optimization strategies that lead to a high simultaneity of operation. It also shows that energyefficient buildings can make a significant contribution to reducing these loads and improving grid stability. This underlines the relevance of energy optimization and flexible control strategies for future grid operation.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 01.11.2023 bis 31.12.2024:

NAME	THEMA
Bonn, Soeren	Analyse und Bewertung einer Bedarfsprognose-Methode für Ladeinfrastruktur im Wirtschaftsverkehr Analysis and evaluation of a demand forecasting method for charging infrastructure in commercial transport
Breitling, Jannik	Weiterentwicklung von simulationsbasierten Ladevorgängen verschiedener elektrischer Fahrzeugflotten Advanced development of simulation-based charging processes for various electric vehicle fleets
Dahm, Erik (*)	Entwicklung und Aufbau der Leistungselektronik für eine elektrische Maschinenemulation Development and Construction of Power Electronics for Electrical Machine Emulation
Dang, Phu Bach (*)	Untersuchung des Temperaturverhaltens von Energiekabeln Examination of the temperature behaviour of Power Cables
Dogukan, Bolat	Untersuchung aktueller AC-Ladetechnologien für Elektrofahrzeuge hinsichtlich Funktionalität und EMV-Verhalten Investigation of current AC charging technologies for electric vehicles with regard to functionality and EMC behavior

Dzsida, Hanna (*)	<p>Simulation der Stromerzeugung aus einem geschlossenen geothermischen Kreislauf und Analyse des Flexibilitätpotenzial für das Strom- und Wärmenetz im Raum Stuttgart</p> <p>Simulation of electricity generation from a closed geothermal loop and analysis of the flexibility potential for the electricity and heating grid in the Stuttgart area</p>
Eberhardt, Adrian	<p>Generation synthetischer knotenscharfer vertikaler Netzlastzeitreihen im Übertragungsnetz in Baden-Württemberg</p> <p>Generation of node-specific vertical grid load time series on transmission grid level</p>
Ehrle, Philipp (*)	<p>Entwicklung einer Simulationsumgebung zur zeitreihenbasierten Erzeugung der Lastprofile von Wärmepumpen in Wohnquartieren</p> <p>Development of a simulation environment for time-series-based generation of the load profiles of heat pumps in residential areas</p>
Ernst, Patrick (*)	<p>Analyse des Potentials synthetischer Netzmodelle zur Abschätzung der Auswirkungen der Wärme- und Verkehrswende auf Niederspannungsnetze</p> <p>Analysis of the potential of synthetic grid model to estimate the impact of the heat and transport transition on low-voltage grids</p>
Frank, Philipp (*)	<p>Analyse verschiedener Prognosemodelle zur Flexibilitätsanalyse im Verteilnetz</p> <p>Analysis of different forecasting models for flexibility analysis in the distribution grids</p>
Gees, Vinzenz	<p>Weiterentwicklung von simulationsbasierten Ladevorgängen im Vergleich zu realen Ladevorgängen</p> <p>Further development of simulation-based charging processes in comparison to real charging processes</p>
Gremmelspacher, Joel (*)	<p>Entwicklung eines Gesamtkonzeptes der Energieversorgung von fahrerlosen Transportfahrzeugen innerhalb einer Anlage zur automatisierten Kommissionierung in der Intralogistik</p> <p>Development of an overall concept for the energy supply of automated guided vehicles within a system for automated order processing in intralogistics</p>
Gupta, Harsh (*)	<p>Modeling of a wind turbine in a real-time simulator for investigation of harmonics in WT transformers</p>
Gutacker, Magnus (*)	<p>Analyse von Einflussfaktoren auf Redispatch-Situationen zur Unterstützung von Planprozessen</p> <p>Analysis of influencing factors on redispatch situations to support planning processes</p>
Häußler, Samuel (*)	<p>Analyse und Vergleich von Regionalisierungsansätzen zur Verortung der Elektromobilitätslast im Übertragungsnetz</p> <p>Analysis and comparison of regionalization approaches for locating electromobility load on transmission grid level</p>

Hautz, Niklas (*)	<p>Entwicklung einer Methode zur aktiven Beeinflussung der Spannungsqualität in einer Power-Hardware-in-the-Loop Umgebung</p> <p>Development of a method for actively influencing power quality in a power-hardware-in-the-loop setup</p>
He, Wie (*)	<p>Berücksichtigung des (n-1)-Kriteriums im verlustoptimierten Netzbetrieb</p> <p>Consideration of the (n-1) criterion in loss-optimized grid operation</p>
Huang, Zhongnan	<p>Einsparpotenzial durch kostenoptimiertes Parkhaus-Lademanagement</p> <p>Savings potential through cost-optimized parking lot charging management</p>
Jana, Arnab (*)	<p>Analyse des Erwärmungsprozesses von Freileitungen auf Basis des CIGRE-Temperaturmodells</p> <p>Analyzing the heating process of overhead lines based on the CIGRE temperature model</p>
Kartenberg, Jannis (*)	<p>Untersuchung stochastisch basierter Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen</p> <p>Investigation of stochastic based charging profiles for electric vehicles</p>
Kaya, Evrim (*)	<p>Entwicklung eines PV-Planungssimulationstools zur technischen und wirtschaftlichen Analyse der direkten Einspeisung in das Bahnstromnetz</p> <p>Development of a PV planning simulation tool for the technical and economic analysis of direct integration into the railway power supply network</p>
Khan, Muhammad Maahin (*)	<p>Planning and realization of thermal and EMI optimization of the PWM half bridge in use</p>
Knappe, Christoph	<p>Untersuchung und Modellierung eines Logistikzentrums mit neuartigem Energiemanagementsystem</p> <p>Investigation and Modeling of a Logistics Center with an Innovative Energy Management System</p>
Knufinke, Linda (*)	<p>Modellierung eines städtischen Gewerbegebietes und Untersuchung der Auswirkungen von E-Lkw auf das Stromnetz</p> <p>Modelling of an urban commercial area and investigation of the impact of e-trucks on the power grid</p>
Kohn, Philip	<p>Implementierung eines intelligenten Lademanagements und Analyse von Prognosefehlern bei Parkvorgängen</p> <p>Implementation of intelligent charging management and analysis of forecasting errors for parking processes</p>
Lang, Fabian (*)	<p>Untersuchung des Einflusses von Kompensationsanlagen auf die Netzverluste</p> <p>Investigation of the influence of compensation systems on grid losses</p>
Li, Xiao (*)	<p>CNC-gestützter Sprühdruck für die Herstellung von Elektroden für HASEL-Aktuatoren</p> <p>CNC-Based Spray Printing for Electrodes Fabrication of HASEL Actuators</p>

Mitschele, Jonas	Synthetische Netzmodellierung von Gewerbegebieten für die Integration von E-LKW Synthetic power grid modeling of commercial areas for the integration of electric trucks
Mück, Felix	Emissionsarme Ansteuerung für einen mehrzweigigen Wechselrichter Low-Emission Control for a Multi-Branch Inverter
Neuhäuser, Jan	Dielektrische Festigkeit alternativer Isoliergase unter homogenen und schwach inhomogenen Feldbedingungen bei Wechselspannung Dielectric strength of alternative insulating gases under homogeneous and weakly inhomogeneous field conditions at AC voltage
Niegel, Alexander (*)	Optimierung des Ladeverhaltens von EVs zum Ausgleich asymmetrischer Belastungen Optimization of EV charging behavior to balance asymmetrical loads
Pflästerer, Luca (*)	Entwicklung eines Messsystems zur Auswertung von Motorströmen an Trennschaltern Development of a measurement system for the evaluation of motor currents in high voltage disconnectors
Popal, Matin (*)	Untersuchung eines Inline-Kopplers als alternatives EMV-Messverfahren für leitungsgeführte Störaussendungen auf Gleichstromleitungen Investigation of an inline-coupler as an alternative EMC measurement method for conducted emissions on DC lines
Rath, René (*)	Bestimmung von temporären Strombelastbarkeiten (TATL) eines Stromkreises im Rahmen des geförderten Forschungsprojektes PROGRESS Determination of the temporary admissible transmission loading (TATL) of a circuit as part of the funded research project PROGRESS
Riedmiller, Stefan (*)	Implementierung von Unsicherheitsfaktoren zur Flexibilitätsaggregation von Elektrofahrzeugen Implementation of uncertainty factors for the flexibility aggregation of electric vehicles
Röhm, Pia	Potentialanalyse für kostenoptimiertes Laden von Elektrofahrzeugen Analysis of potential of cost-optimized charging of electric vehicles
Sakac, Melanie (*)	Entwicklung einer Simulationsumgebung zur zeitreihenbasierten Erzeugung elektrischer Lastprofile in Stadtquartieren Development of a simulation environment for the time-series-based generation of electrical load profiles in urban districts

Schreiber, Hannes	<p>Untersuchung des Stromabrisses in Vakuumschaltern mit optimierten Kontaktwerkstoffen und überlagertem Magnetfeld</p> <p>Investigation of current chopping in vacuum interrupters with optimized contact materials and superimposed magnetic field</p>
Sorg, Nicholas	<p>Einfluss der Last auf den Abrissstrom in Vakuumschaltern</p> <p>Influence of the load on the chopping current in vacuum interrupters</p>
Spehl, Patrick	<p>Aufbau und EMV-Charakterisierung eines Kompensationsnetzwerks für induktive Kfz-Ladesysteme</p> <p>Design and EMC characterization of a compensation network for inductive automotive charging systems</p>
Steinsberger, Pascal	<p>Entwicklung und Analyse eines Stromnetzmodells für Stuttgart-Weilimdorf in pandapower mit Schwerpunkt auf der Integration von E-Lkw</p> <p>Development and analysis of an electricity grid model for Stuttgart-Weilimdorf in pandapower with a focus on the integration of E-truck charging stations</p>
Stöffler, Benjamin	<p>Untersuchung des Lebensdauerverlustes von Leistungstransformatoren mithilfe thermischer Modellierung auf Basis von Temperaturmessdaten für verschiedene Lastprofile</p> <p>Investigation of the service life loss of power transformers using thermal modelling on the basis of temperature measurement data for different load profiles</p>
Wahl, Kevin	<p>Planung und Durchführung von Alterungsversuchen an PCBs unter PWM-Spannung</p> <p>Planning and realization of aging tests on PCBs using PWM voltage</p>
Wilhelm, Ben	<p>Optimierung einer Streifenleiterantenne für Störfestigkeitsmessungen an Komponenten von Kraftfahrzeugen</p> <p>Optimization of a stripline antenna for electromagnetic immunity testing of automotive components</p>
Wolf, Simon (*)	<p>Kostenuntersuchung für das bidirektionale Laden von Elektrofahrzeugen auf Basis von Batteriealterungseffekten</p> <p>Cost analysis for bidirectional charging of electric vehicles based on battery aging effects</p>

4. PROMOTIONEN

▪ **Thermische Modellierung von Leistungs- transformatoren mittels CFD**

Saeed Khandan Siar, M. Sc.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Riedelbauch

Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2024

Aufgrund der zunehmenden Anzahl dezentraler Energieerzeugungsanlagen, die auf erneuerbaren Energiequellen basieren, ist ein Ausbau der Stromnetze erforderlich. Leistungstransformatoren sind im Stromnetz Schlüsselkomponenten und haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Übertragungs- und Verteilnetze. In diesem Zusammenhang ist es von entscheidender Bedeutung, die schädlichen Auswirkung von thermischen Belastungen in Leistungstransformatoren während ihrer Lebensdauer zu minimieren. Zur Erhöhung der Lebensdauer und der zulässigen Belastbarkeit von Leistungstransformatoren gilt es die Kühlsysteme zu optimieren.

Thermische Belastungen in den Wicklungen sowie höhere Temperaturen innerhalb des Transformators führen zu einer beschleunigten thermischen Alterung und begünstigen daher eine schnellere Materialalterung. Zur Sicherstellung der notwendigen Zuverlässigkeit eines Leistungstransformators ist die Minimierung der thermischen Belastung in den Windungen entscheidend. Darüber hinaus wird die Motivation der wissenschaftlichen Ausarbeitung dargelegt und eine Einführung in die Grundprinzipien der Leistungstransformatoren mit den wichtigsten Konzepten der Kühlmethoden gegeben.

In dieser Dissertation wird das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren mittels numerische Strömungssimulation (CFD) behandelt. Die Untersuchung wird zunächst basierend auf Messdaten realer Leistungstransformatoren und Wicklungsmodellen aus dem Labor durchgeführt. Anschließend werden entsprechende numerische CFD-Wicklungsmodelle erstellt und eine Netzempfindlichkeitsanalyse durchgeführt. Dies soll die Genauigkeit der numerischen Berechnungen der Simulationen sicherstellen.

Darüber hinaus werden die Auswirkungen der Variation der Öltemperatur auf die thermische Antriebskraft und die Dichteänderung des Öls berücksichtigt, da Ölmaterialien temperaturabhängige Eigenschaften aufweisen. Insgesamt zielt diese Forschung darauf ab, Einblicke in das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren zu gewinnen, um ihre Lebensdauer und Zuverlässigkeit in Energieübertragungs- und Verteilungssystemen zu optimieren.

Diese Arbeit bietet einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik in der thermischen Modellierung von Leistungstransformatoren. Anschließend werden die grundlegenden Gleichungen und Prinzipien der Fluidströmung und der Wärmeübertragung erläutert. Die Quellen der Leistungsverluste in Transformatoren werden während den numerischen Untersuchungen als Anfangsrandbedingungen der mehrdimensionalen Differentialgleichungen eingesetzt. Außerdem wird der Einfluss der erzeugten Wärme auf das thermische Verhalten der Transformatoren dargestellt.

In diesem Zusammenhang ergibt sich aus den Untersuchungen die Erkenntnis, dass eine geringere Höhe der horizontalen Kanäle zu einer besseren Kühlleistung des Wicklungsmodells führt. Darüber hinaus wird dieses Design nicht nur die Strömungswirbel beim Eintritt in die horizontalen Kanäle reduziert, sondern ermöglicht auch eine gleichmäßigere Ölverteilung innerhalb der Kühlkanäle.

Diese Studie untersucht ebenfalls die thermische Leistungsfähigkeit von biologisch abbaubarem Ölmaterial im OD-Kühlmodus in Verbindung mit dem geometrischen Design der Wicklungen. Die Ölflussverteilungen sind bei Anwendung verschiedener Ölmaterialien unterschiedlich. Natürliches Esteröl erreicht eine ähnliche durchschnittliche Wicklungstemperatur wie Mineralöl, vorausgesetzt, dass das Konzept der forcierten Kühlungssysteme mit ölgeleiteter Struktur angewendet wird. Darüber hinaus ist bei gleichen Betriebsbedingungen die Ölverteilung des natürlichen Esteröls durch die Kühlkanäle homogener.

Dies sorgt für eine gleichmäßigere Ölverteilung in den horizontalen Kühlkanälen. Die Position der Heißpunkttemperatur wird zwar nicht signifikant beeinflusst, jedoch führt die Anwendung von natürlichem Esteröl zu einer Senkung der Heißpunkttemperatur.

Die Einflüsse ungleichmäßiger Wärmeverlustverteilungen, die unter den Betriebsbedingungen von Leistungstransformatoren sehr häufig vorkommen, werden ebenfalls in dieser Arbeit untersucht. Höhere Wärmeverluste führen zu höherem Durchschnitt und Heißpunkttemperaturen bei verschiedenen Öleinlaufemperaturen in den Wicklungen. Bei einer gleichmäßigen Wärmeverlustverteilung hängt die Position der Heißpunkttemperatur direkt von der Ölflussverteilung ab. Bei einer ungleichmäßigen Wärmeverlustverteilung kann sich die Position der Heißpunkttemperatur jedoch ändern.

Daher wird durch die Verwendung eines Noppenbands die Degradierung der thermischen Leistung von Scheibenwicklungen wirksam reduziert. Zusätzlich zur stationären Analyse des thermischen Verhaltens von Leistungstransformatoren wird das instationäre thermische Verhalten im natürlichen Abkühlungsmodus numerisch und experimentell geprüft. Die Auswirkung der thermischen Antriebskräfte, der sogenannte Auftriebseffekt, wird transient simuliert. Die Berechnung der Heißpunktfaktoren wird für verschiedene Wicklungskonstruktionen dargestellt.

- **Thermal Modelling of Power Transformers Using Computational Fluid Dynamics**

Saeed Khandan Siar, M. Sc.

Power grids have improved rapidly due to the latest developments in energy transmission and the rapid expansion of renewable energy uses. Power transformers have become vital equipment in providing a sustainable power network in energy transmission and distribution systems. In this regard, it is essential to minimize the harmful effects of thermal stresses in power transformers during the lifetime of the power transformer. Therefore, identifying the source of heat losses within the transformer is the primary step, followed by determining the optimized cooling systems that can increase the lifetime of the power transmission systems and allowable loading capacity. This is because thermal stresses in the windings of a power transformer can increase the failure rate during operations, leading to accelerated thermal ageing and shortened lifetime. As higher temperatures within the power transformers can result in faster material degradation, it is crucial to address the thermal stresses to ensure the reliability of the power transformer.

This study examines the thermal behavior of power transformers using the Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical method. First, the investigation is performed based on measured data from real power transformers and winding models in the laboratory and the corresponding numerical CFD winding models suitable for the investigations are created and a mesh sensitivity analysis is carried out to ensure their accuracy before using the numerical models. Furthermore, the effects of changing oil temperature on the thermal driving force are considered since oil materials have temperature dependent characteristics. Overall, this research aims to gain insights into the thermal behavior of power transformers to improve their lifetime and reliability in energy transmission and distribution systems.

Furthermore, the state-of-the-art of transformers is reviewed first, discussing the motivation behind the study and introducing the basic principles of power transformers and the main concepts of cooling methods. Then, the governing equations and the fundamental principles of fluid flow and heat transfer are explained. The sources of power losses within transformers are introduced as initial boundary conditions during investigations. Furthermore, this work highlighted the impact of generated heat on the thermal behavior of the transformers.

It examines operational parameters like fluid flow rate and inlet temperature to determine the significant influence of the Reynolds and Prandtl numbers. Based on the result, we can conclude that the Reynolds number dominates in forced cooling mode. In the meantime, this study employs a geometrical study to identify the effects of different dimensions on the vertical and horizontal cooling channels to determine the reliability and accuracy of the numerical CFD calculations.

In this light, this study establishes that the lower height of the horizontal channels leads to a better cooling performance of the winding model. Furthermore, reducing eddies at the inlet of the horizontal channels leads to a more uniform oil distribution within the cooling channels.

This study also examines the thermal performance of using biodegradable oil material in OD cooling mode. Along with the geometrical design of the windings, the winding temperature and oil flow distributions of different oil materials are investigated. It is determined that natural ester oil has a lower average winding temperature than mineral oil under force cooling conditions with an OD structure.

Moreover, the study observes that the oil distribution of natural ester through the cooling channels is more evenly under identical operational condition. It also provided a more uniform share of oil for horizontal cooling channels. In this light, while the position of the hot spot temperature remains unchanged, the use of natural ester oil results in a significant reduction of hot spot temperature in OD cooling mode.

This study analyses the effects of non-uniform heat loss distributions, which are very common in the operating conditions of power transformers. Higher heat losses lead to higher average and hot spot temperatures at different oil inlet temperatures of the windings. For a uniform heat loss distribution, the location of the hot spot temperature depends directly on oil flow distribution. However, considering the non-uniform heat loss distribution, the location of hot spot temperature might change. The study also examines the impact of a winding design equipped with additional vertical cooling channel, including an extra vertical cooling channel in the middle of the pass.

The results show that using additional vertical cooling channel reduces the average winding temperature and keeps the hot spot temperature lower, effectively reducing the degradation in disc type windings. In addition to conducting steady-state analyses, this study analyses the transient thermal behavior of power transformers in natural cooling mode. The research also considers the buoyancy effect over time and calculates hot spot factors for various winding designs. During the transient thermal behaviour, it is observed that the rate of the temperature rise at the initial time is more pronounced. As the temperature increases, the viscosity of the oil decreases and the cooling oil flows throughout all the channels.

- **Ursachen und Auswirkungen von Gleichströmen in Drehstromnetzen**

Michael Schühle, M. Sc.

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichterin:

Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour

Tag der mündlichen Prüfung:

01.10.2024

Induktive Betriebsmittel wie Transformatoren, Spulen oder Wandler sind ausschließlich für den Betrieb bei Wechselspannungen geeignet. Durch Störungen oder ungewollte Einflüsse können diese im Netz jedoch mit einem zusätzlichen parasitären Gleichstrom beaufschlagt werden.

Die Arbeit zeigt die Auswirkungen und Folgen, die durch parasitäre Gleichströme in induktiven Betriebsmitteln entstehen. Dabei wird zuerst auf die grundlegende Funktion von induktiven Betriebsmitteln geschaut. Um die Effekte von Gleichstrom in einer Simulation nachbilden zu können, wird in einem ersten Schritt ein Simulationskonzept entwickelt, welches elektrische und magnetische Netzwerke mithilfe des Jiles-Atherton Modells nachbilden kann. Dadurch können alle Effekte des Eisenkerns wie Sättigung und Hysterese, welche für die Auswirkungen von Gleichstrom relevant sind, in der Simulation nachgebildet werden. Das Simulationskonzept ist so flexibel gehalten, dass beliebige induktive Betriebsmittel nachgebildet werden können. Als Simulationsumgebung kommt MATLAB Simulink mit der Simscape-Erweiterung zum Einsatz. Nachdem die prinzipielle Funktionsweise des Simulationskonzeptes anhand eines Laboraufbaus nachgewiesen wurde, wird anschließend der Gleichstromeinfluss auf einen induktiven Stromwandler untersucht. Dieser verfügt über Mess- und Schutzkerne, welche sich hinsichtlich ihrer Gleichstrombeeinflussung deutlich unterscheiden.

Um Gleichströme in Übertragungsnetzen messen und identifizieren zu können, wird ein Messsystem entwickelt, mit dem Gleichströme an geerdeten Sternpunkten von Transformatoren gemessen werden können. Durch die kurzschlussfeste Auslegung bis 15 kA stellt der Einsatz des Messgerätes kein Sicherheitsrisiko für den stabilen Netzbetrieb dar. Das Messsystem kann neben Gleichstrom auch Wechselstromanteile bis $3,75\text{ kHz}$ messen. Der kombinierte Messbereich beträgt 85 A , welche mit einer Diskretisierung von 24 Bit aufgelöst werden.

Die stärkste, jedoch nur kurzzeitig auftretende Gleichstrombeeinflussung wird durch geomagnetisch induzierte Ströme (GIC) hervorgerufen. Die Arbeit zeigt die Weiterentwicklung eines Berechnungsmodells für diese GIC-Ströme. Dabei werden Messdaten von verteilten Erdmagnetfeld Messstationen und ein globales Leitfähigkeitsmodell verwendet, um anhand eines ausgewählten Netzausschnittes die GIC-Ströme zu berechnen. Mit den historischen Daten der Magnetfeld-Messstationen

können besonders starke Ereignisse berechnet werden, um eine Worst-Case Abschätzung für die Gleichstrombelastung durch GIC-Ströme zu erhalten.

■ **Causes and effects of direct current in power grids**

Michael Schühle, M. Sc.

Inductive equipment such as power transformers, shunt reactors or current transformers are only suitable for operation at alternating voltages. Due to disturbances or unwanted influences, they can be subjected to an additional parasitic direct current in the network.

The contribution shows the effects and consequences caused by parasitic direct currents in inductive equipment. First, the basic function of inductive equipment is discussed. To simulate the effects of DC, a simulation concept is developed in a first step, which can simulate electrical and magnetic networks using the Jiles-Atherton model. Thus, all effects of the iron core, such as saturation and hysteresis, which are relevant for the effects of direct current, can be reproduced in the simulation. The simulation concept is kept flexible so that any inductive equipment can be simulated. MATLAB Simulink with the Simscape extension is used as the simulation environment. After the basic functionality of the simulation concept has been demonstrated by means of a laboratory setup, the direct current influence on an inductive current transformer is then investigated. This has measuring and protection cores, which differ significantly in terms of their DC current influence.

To be able to measure and identify DC currents in transmission networks, a measuring system is developed which can be used to measure DC currents at grounded neutral of transformers. Due to the short-circuit-proof design up to 15 kA, the use of the measuring device does not represent a safety risk for stable network operation. In addition to direct current, the measuring system can also measure alternating current components up to 3.75 kHz. The combined measuring range is 85 A which are resolved with a discretization of 24 bit.

The strongest, but only short time occurring direct current influence is caused by geomagnetically induced currents (GIC). The work shows the further development of a computational model for these GIC currents. Here, measured data from distributed geomagnetic field measurement stations and a global conductivity model are used to calculate GIC currents based on a selected network section. Using the historical data from the magnetic field measurement stations, particularly strong events can be calculated to provide a worst-case estimate for DC exposure to GIC currents.

- **Elektromagnetische Störfestigkeit von passiven Kleinsignalwandlern in Mittelspannungsschaltanlagen**

Christian Suttner, M. Sc.

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow

Tag der mündlichen Prüfung:

08.11.2024

Mittelspannungsschaltanlagen sind ein zentraler Bestandteil elektrischer Energieverteilungsnetze. Sie werden verwendet, um elektrische Verbindungen zwischen Netzknoten herzustellen und zu unterbrechen. Für den Schutz und die Steuerung dieser Anlagen werden die elektrischen Zustandsgrößen permanent von elektronischen Kontrollsystemen überwacht. Damit die Messung der hohen Spannungen und Ströme durch die Steuerung möglich wird, müssen diese zunächst in Signale mit kleineren Pegeln umgewandelt werden. Diese Aufgabe wird klassischerweise von induktiven Schutz- oder Messwandlern mit hoher Signalleistung erfüllt. Eine derart hohe Leistungsabgabe wird in modernen Applikationen einerseits nicht benötigt und führt andererseits zu einem großen Bauraumbedarf, Wärmeverlusten und verschiedenen weiteren Problemen bei der Auslegung.

Als unkonventionelle Alternative zu den klassischen induktiven Wandlern kommen aktuell auch vermehrt Kleinsignalwandler (engl.: Low Power Instrument Transformer; kurz: LPIT) mit geringer Signalleistung zur Anwendung, die große Messbereiche mit hohen Genauigkeitswerten und geringen Baugrößen vereinen. Aufgrund der grundsätzlich anderen Auslegung, des geringen Störabstandes und der teilweise benötigten nachträglichen Signalintegration stellt sich allerdings die Frage, ob die Störfestigkeit dieser Systeme im realen Schaltanlagenbetrieb jederzeit sichergestellt werden kann.

In dieser Arbeit werden die grundsätzlichen Mechanismen für elektromagnetische Beeinflussungen von LPIT-Applikationen aufgezeigt. Die Fehlerbilder unterscheiden sich dabei praktisch vollständig von den aus konventionellen Applikationen bekannten Phänomenen und sind insbesondere auf die bei einigen Arten von Kleinsignalstromwandlern (LPCT) implementierte Signalintegration zurückzuführen. Anhand von Simulationen wird gezeigt, dass ein Verzicht auf die Integration bei diesen Wandlern nicht möglich ist und die Integration auch nicht so ausgelegt werden kann, dass Beeinflussungen ausgeschlossen sind. Um eine hohe Störfestigkeit zu gewährleisten ist es daher essenziell, starke Einkopplungen von den Primär- auf die Sekundärkreise zu vermeiden.

Die im Vergleich zur konventionellen Technik veränderten Koppelpfade zwischen Primär- und Sekundärseite werden beleuchtet und die Auswirkungen der Unterschiede auf die genormten Prüfverfahren zum Nachweis der Störfestigkeit dargelegt. Anhand von Messungen in Komponententests wird aufgezeigt, dass vor allem die EMV-

Abschirmung, die Kabelschirmbehandlung und die symmetrische Struktur der Spulenkörper einen großen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von elektromagnetischen Beeinflussungen haben. Es wird jeweils die günstigste und ungünstigste Kombination dieser Eigenschaften identifiziert.

Diese werden dann in einer Versuchsschaltanlage während realer Schalthandlungen untersucht und die gemessenen Störsignale im Zeit- und Frequenzbereich mit jenen verglichen, die während der EMV-Typprüfung an den elektronischen Schutz- und Steuergeräten, bzw. Merging Units anliegen. Dabei zeigt sich, dass die geprüften Pegel im Realbetrieb selbst im günstigsten Fall in einem weiten Frequenzbereich um mehrere Größenordnungen überschritten werden.

Es werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, um die Lücke zwischen den normativ spezifizierten Prüfverfahren und den Anforderungen aus dem realen Schaltanlagenbetrieb zu schließen. Unter anderem wird eine neue Methode zur Einkopplung von Prüfstörgrößen vorgeschlagen, die zu einer realistischeren Beanspruchung führt als das standardisierte Prüfverfahren.

- **Electromagnetic immunity of passive low power instrument transformers in medium-voltage switchgear**

Christian Suttner, M. Sc.

Medium-voltage switchgear is a vital component of electrical energy distribution networks. They are used to establish and interrupt electrical connections between grid nodes. To protect and control these systems, the currents and voltages are permanently monitored by electronic control systems. For this purpose, the measurable variables must first be converted into signals with lower levels. This task is traditionally fulfilled by inductive instrument transformers with high signal power. However, such a high power output is not required in modern applications while simultaneously it leads to large space requirements, heat losses and various other problems in the design.

As an unconventional alternative to classic instrument transformers, low power instrument transformers (short: LPIT) are increasingly being used. Those combine large measuring ranges with high accuracy values and small sizes. However, due to the fundamentally different design, the low signal-to-noise ratio and the subsequent signal integration that is sometimes required, the question arises as to whether the electromagnetic immunity of these systems can be ensured at any time during real switchgear operation.

This work shows the basic mechanisms for electromagnetic influences on LPIT applications. The error patterns differ practically completely from the phenomena known from conventional applications and are particularly due to the signal integration implemented in some types of small signal current transformers (LPCT). Simulations

show that it is not possible to forgo integration with these converters and that the integration cannot be designed in such a way that influences are excluded. To ensure high immunity to interference, it is therefore essential to achieve high attenuation between primary and secondary circuits.

The changed coupling paths between the primary and secondary sides compared to conventional technology are highlighted and the effects of the differences on the standardized test procedures for proving immunity to interference are explained. Measurements in component tests show that EMC shielding, cable shield treatment and the symmetrical structure of the coil formers have a major influence on the probability of electromagnetic interference. The most favorable and unfavorable combination of these properties is identified.

These are then examined in a test switchgear during real switching operations and the measured interference signals in the time and frequency range are compared with those present on the electronic protection and control devices or merging units during the EMC type test. It turns out that the tested levels in real operation are exceeded by several orders of magnitude over a wide frequency range, even in the best case.

Various options are shown to close the gap between the normatively specified test procedures and the requirements of real switchgear operation. Among other things, a new method for coupling test disturbance variables is proposed, which leads to more realistic stress than the standardized test method.

▪ **Objective Interpretation of Frequency Response Analysis of Power Transformers**

Mehran Tahir, M. Sc.

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Ebrahim Rahimpour

Tag der mündlichen Prüfung:

25.11.2024

Today the world is changing, and the power grid continues to increase in complexity by integrating intermittent renewables, distributed energy resources, etc. All these factors result in more dynamic loading of the transformer which increases the likelihood of failures. The majority of in-service transformers were installed during the period of rapid economic expansion during the 1980s. Irrespective of the changing generation and demand trends, transformers are expected to last for 30 – 40 years, thus, many transformers are well beyond their intended life. This situation has motivated utilities to implement more efficient maintenance and life expansion strategies in the life cycle of power transformers. These strategies demand proper asset management along with

the development of advanced and comprehensive diagnostic methods for transformers.

Among advanced methods, Frequency Response Analysis (FRA) has gained popularity as a sensitive diagnostic test to assess the mechanical integrity of the active part of the transformer. In the last decade, many research efforts have been carried which led to the standardization of FRA measurement procedures. However, the interpretation of FRA results is still backed by the analysis of skillful personnel due to the lack of a standard criteria. Consequently, many international working bodies, i.e., CIGRE, IEEE, and IEC are working in parallel to develop a standard for the condition assessment of the transformer based on FRA results. In contribution to this necessity, this research has proposed some novel methodologies for the objective interpretation of FRA results.

A failure mode analysis is conducted to identify the type of failures in the active part of the transformers. As a consequence, a categorized list of failure modes was compiled. Subsequently, a study on the characterization of the effects of failure modes on FRA was carried out. For this purpose, real case studies are presented, and the effects of different failure modes are discussed objectively. Afterward, deviation patterns are generated that summarize the characteristic impact of individual faults on FRA results. Investigation result shows that it is possible to classify different faults based on their deviation patterns in various frequency sub-bands. The failure mode deviation patterns are the basis for the objective interpretation of FRA results. Based on these characterizations, non-expert users can also gain a better understanding of the difference between two FRA results.

Focusing on the current challenge of developing an effective assessment tool, this study provides a detailed analysis of statistical methods to interpret frequency response measurements. In this research, five criteria for an appropriate numerical index are defined. All indices are evaluated with selected case studies and indices which qualify all criteria are selected as appropriate indices. However, it is not possible to set thresholds for the selected indices as they rely on fixed frequency ranges that can lead to erroneous conclusions. To mitigate these limitations, a vector-based numerical method is defined. Subsequently, a winding assessment factor is introduced, and a criterion of abnormality is proposed as an indication of the deformed transformer winding.

This thesis also presents an optimized method to obtain a turn-based 3D high-frequency model of a transformer using the finite integration technique. The novelty of this model is that FRA traces are directly obtained from the 3D model of windings without estimating and solving lumped parameter circuit models. In this model, precise and accurate fault simulations are possible. The model is validated with measurements for the healthy and deformed state of the windings. Good principle agreement of simulation results with the measurements proves the applicability of the model for FRA interpretation studies. The model can be used to generate a large database for different types of winding faults, as it is possible to import a CAD file of the transformer into the

software and directly calculate their frequency response without intermediate calculation steps.

In the framework of this research, a simple approach is introduced to estimate the main parameters of the equivalent circuit of a power transformer from different types of FRA measurements. For this purpose, a high-frequency model of a three-phase, three-limb core-type transformer is employed. The effect of transformer equivalent circuit parameters on FRA signature is analysed through sensitivity studies. To overcome the drawbacks of the conventional indicators, these extracted parameters are then used as identifiers to diagnose fault quantitatively. The performance of the proposed method is analysed with different case studies.

It is foreseen that the application of intelligent systems will continue to grow in the future and both manufacturers and utilities will start to implement the intelligent systems into their diagnostic instruments. Accordingly, in this doctoral thesis, an expert system for automatic interpretation of FRA has also been developed. In expert system, the numerical indices and machine learning techniques are combined to establish a method for automatic interpretation of FRA. Five machine learning algorithms are studied, and real case studies are considered to verify the performance of the expert system. The results suggest that the expert system can reliably identify the six common states of the transformer with good accuracy, and without much human intervention.

In conclusion, the proposed methodologies give insight into the transformer frequency response measurements and ease the objective interpretation of FRA results. Thus, this research provides a way forward towards the establishment of the standard algorithm for a reliable and automatic assessment of transformer FRA results.

▪ **Algorithms for Event-Based Non-Intrusive Load Monitoring**

Florian Liebgott, M. Sc.

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Bin Yang

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion

Tag der mündlichen Prüfung:

20.02.2024

- **Optimiertes Lademanagement von E-Kfz zur Spannungsstabilisierung im Niederspannungsnetz**

Sebastian Helm, M. Sc.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

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

Tag der mündlichen Prüfung (TU Clausthal): 14.06.2024

- **VHF Magnetic and Electric Sensors for Partial Discharge Measurements in GIS**

Christian Mier Escurra, M. Sc.

Hauptberichter: Prof. ir. Peter Vaessen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung (TU Delft): 08.07.2024

- **Zustandsidentifikation von Nieder- und Mittelspannungsnetzen mit wertebeschränkten Pseudo-Messwerten unter Anwendung von Affiner Arithmetik**

Dipl.-Ing. Maximilian Schmidt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

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

Tag der mündlichen Prüfung (TU Dresden): 24.10.2024

- **Trajektorienvorhersage für die automatische Optimierung der Routenplanung mobiler Roboter in der Intralogistik**

Andreas Löcklin, M. Sc.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. h. c. Michael Weyrich

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

Tag der mündlichen Prüfung: 21.11.2024

5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Hochspannungstechnik

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

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

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

RESEARCH ACTIVITIES

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

High Voltage Engineering

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

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

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

Elektrische Energieversorgung / Smart Grids

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

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

Elektromagnetische Verträglichkeit

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

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

Electrical Power Supply / Smart Grids

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

Most relevant topics on this field are:

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

Electromagnetic Compatibility

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

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

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

- **Forschungsprojekt:
Teilentladung in passiven Komponenten**

Laufzeit: April 2022 – Juni 2025

Ziel 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 unbekanntenen 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 für Maschinenelemente (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 gewonnenen Erkenntnisse können von durch Leitfäden und durch ein 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 – June 2025

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



- **Forschungsprojekt:
Isolations- und Alterungstests durch Beanspruchung
mit hohen Spannungsflanken**

Laufzeit: November 2024 – Oktober 2026

Dieses Projekt bildet die Grundlage zur Untersuchung von Alterungseffekten und Ausfallverhalten von Isolationssystemen durch den Einsatz neuartiger Leistungshalbleiter. Der Einsatz dieser schnellschaltenden Leistungshalbleiter verspricht u.a. eine hohe Leistungsdichte, welche insbesondere in mobilen Anwendungen von großer Relevanz ist. Allerdings zeigt sich durch das schnelle Schaltvermögen ein beschleunigtes Alterungsverhalten von Isolationssystemen. Zuverlässige Systeme stellen in allen Industrieanwendungen und insbesondere in der Elektromobilität wesentliche Wirtschaftlichkeitsfaktoren dar: Ausfallzeiten führen zu entsprechenden Kosten und Akzeptanzproblemen. Um solche Ausfälle zu vermeiden, müssen diese Alterungseffekte verstanden und vermieden werden. Da es für die entsprechenden Anwendungen noch keine standardisierten Testverfahren gibt, müssen diese zunächst entwickelt und erprobt werden. Dieses Projekt wird dafür eine geeignete Testeinheit entwickeln. Diese Einheit muss definierte Prüfprofile mit extrem schnellen Schalttransienten erzeugen und zugleich Teilentladungen detektieren und von den Störeinflüssen der Schalttransienten differenzieren können. Um Isolationssysteme kostengünstig und effektiv zu untersuchen wird zudem ein Prüfling entwickelt, der nicht nur Rundlackdraht wie bei herkömmlichen Drahtpaarprüflingen untersucht, sondern eine praxisnahe Kombination aus Rundlackdraht und Isolationsharz betrachtet. Für eine erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens wird zunächst zusammen mit Industriepartnern inkl. KMUs der detaillierte Wissensstand aus Praxissicht herausgearbeitet und dieser durch aktuelle Forschungsergebnisse ergänzt. Mithilfe umfangreicher Messreihen werden Alterungseffekte untersucht und modelliert. Der anwenderfreundliche Transfer in die Industrie wird durch eine entsprechende Handreichung zur Isolationsprüfung sichergestellt und umfangreich aufgearbeitet, sodass diese auch Eingang in zukünftige standardisierte Prüfnormen findet.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INDUSTRIELLE
GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG



- **Research Project:
Insulation and ageing tests by stressing with high
voltage rises**

Period: November 2024 – October 2026

This project forms the basis for investigating the ageing effects and failure behavior of insulation systems through the use of new types of power semiconductors. The use of these fast-switching power semiconductors promises, among other things, a high power density, which is particularly relevant in mobile applications. However, the fast switching capacity results in accelerated ageing behavior of insulation systems. Reliable systems are key economic factors in all industrial applications and especially in electromobility: Downtimes lead to corresponding costs and acceptance problems. In order to avoid such failures, these ageing effects must be understood and avoided. As there are no standardized test procedures for the relevant applications as of yet, these must first be developed and tested. This project will develop a suitable test unit for this purpose. This unit must generate defined test profiles with extremely fast switching transients and at the same time be able to detect partial discharges and differentiate them from the interference effects of the switching transients. In order to test insulation systems cost-effectively and efficiently, a test specimen is also being developed that not only tests enameled round wire, as is the case with conventional wire pair test specimens, but also examines a practical combination of enameled round wire and insulation resin. For the successful realization of the project, the detailed state of knowledge from a practical perspective will first be worked out together with industrial partners, including SMEs, and then supplemented by current research results. Ageing effects will be investigated and modelled with the help of extensive series of measurements. The user-friendly transfer to industry will be ensured by a corresponding handout on insulation testing and extensively processed so that this can also be incorporated into future standardized testing norms.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INDUSTRIELLE
GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG



▪ Oberflächenladungen auf Stützern in DC-GIS

Lars Baronat, M. Sc.

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

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

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



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

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht des Aufbaus. Im hinteren Bereich stehen die beiden 350 kV-DC-Quellen sowie ein eigens konstruierter Trenntransformator zur Versorgung des Roboters. An der Seilkonstruktion über den DC-Quellen hängt ein externes Widerstandsnetzwerk, welches die Hochspannungskomponenten untereinander verbindet. Das Versuchskompartiment mit den Stützern und dem Roboter befindet sich in der GIS im vorderen Bereich.

▪ Surface Charges on spacers in DC GIS

Lars Baronat, M. Sc.

The growing use of high voltage DC (HVDC) systems has also led to an increased interest in gas insulated switchgear (GIS) for HVDC applications. Due to the use of direct current there are effects like the accumulation and migration of charges on insulator surfaces, which 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. This way the surface potentials of the spacers can be measured and the surface charges can be calculated from the measured potentials.



Fig 2: Übersicht über den Versuchsaufbau
Overview of experimental setup

Figure 2 shows an overview of the experimental setup. In the back are the two 350 kV DC sources along with a custom isolation transformer that is used to supply power to the robot. The connections between the high-voltage components are made via an external resistor network which is hanging from ropes above the setup. The test compartment containing the spacers and the robot is located inside of the GIS in the foreground.

▪ **Teilentladung und Alterungsverhalten passiver Komponenten unter pulsformiger Spannung**

Jonas Bux, M. Sc.

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

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

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

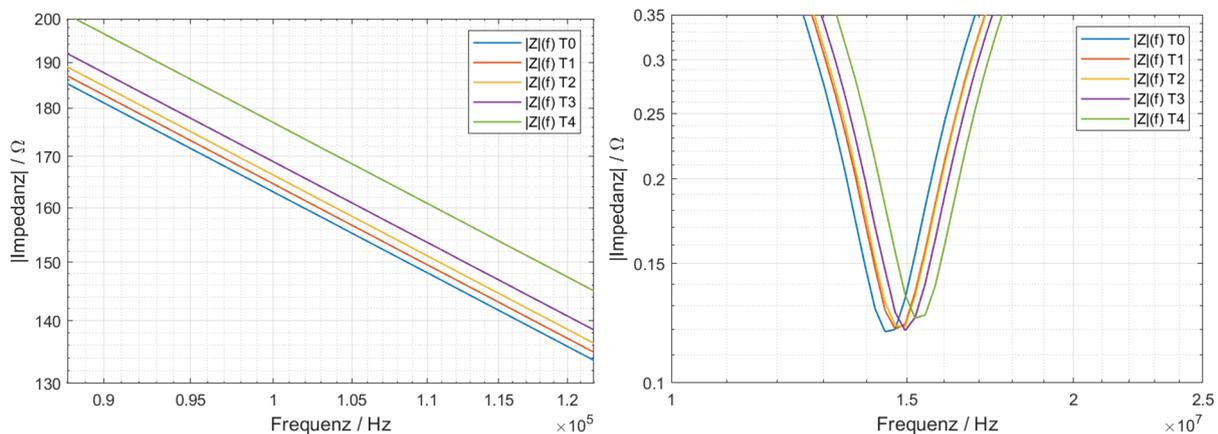


Fig. 1: Verschiebung der Impedanz eines Folienkondensators in ersten Versuchen
Impedance shift of a film capacitor in preliminary long-term tests

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

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

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

Jonas Bux, M. Sc.

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

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

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

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

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

▪ **Alternative Isoliergase für elektrische Betriebsmittel** **Niclas Dölzer, M. Sc.**

Seit vielen Jahrzehnten wird Schwefelhexafluorid (SF_6) als Isoliergas in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) und anderen gasisolierten Betriebsmitteln eingesetzt. Es bietet für diese Anwendung hervorragende Eigenschaften, ist aber gleichzeitig mit einem GWP von ca. 25.000 CO_2 -e auch das klimaschädlichste aller Treibhausgase. Mit der Novellierung der EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase im März 2024 wird die Installation von GIS mit fluorierten Gasen mit einem GWP > 10 als Isoliermedium beginnend ab 2026 in der EU verboten, sofern geeignete Alternativen zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund werden alternative Isoliergase mit geringem GWP untersucht. Hierbei stehen Gase natürlichen Ursprungs (N_2 , O_2 , CO_2) sowie Gemische daraus im Fokus, da diese ein GWP ≤ 1 aufweisen und eine sehr unkomplizierte Handhabung ermöglichen.

Eine wichtige Fragestellung ist, inwiefern sich das Entladungsverhalten der alternativen Gase unter schwach sowie stark inhomogenen elektrischen Feldbedingungen von jenem in SF_6 unterscheidet. Dies ist sowohl für die Isolationskoordination von Betriebsmitteln als auch für die Detektion von Fehlstellen innerhalb dieser Betriebsmittel durch Messung von Teilentladungen (TE) relevant.

Mithilfe von Elektrodenanordnungen, welche die Feldbedingungen innerhalb von GIS nachbilden, wird das Entladungsverhalten verschiedener Gase (und Gasgemische) bei unterschiedlichen Betriebsdrücken untersucht. Fig. 1 zeigt beispielhaft eine solche Anordnung und Fig. 2 ermittelte Ergebnisse auf.

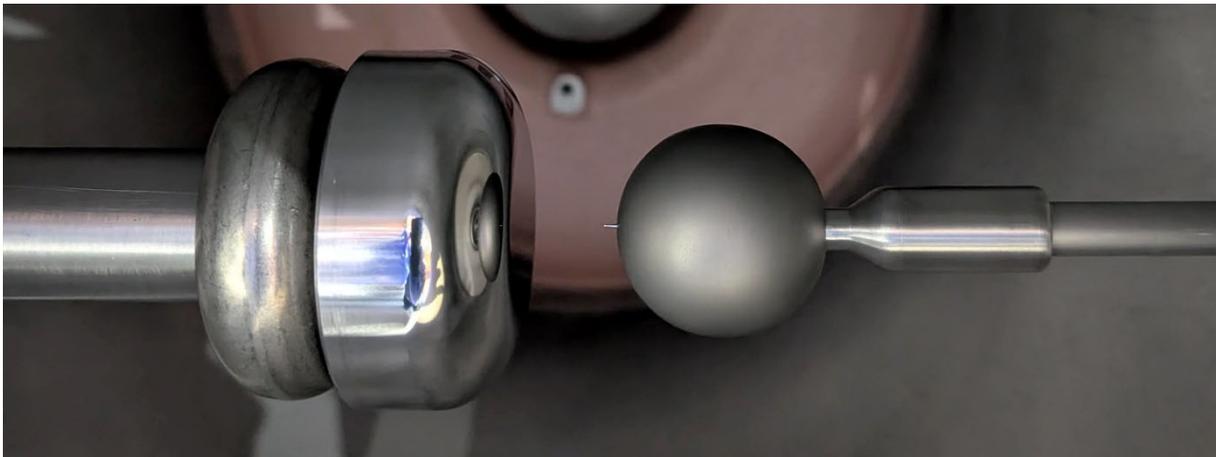


Fig. 1: Elektrodenanordnung zur Untersuchung des Entladungsverhaltens unter stark inhomogenen Feldbedingungen
Electrode arrangement for investigating the discharge behavior under strongly inhomogeneous field conditions

▪ Alternative Insulating Gases for electrical Equipment

Niclas Dölzer, M. Sc.

For many decades, sulfur hexafluoride (SF_6) has been used as an insulating gas in gas-insulated switchgear (GIS) and other gas-insulated equipment. It offers excellent properties for this application, but with a GWP of approx. 25,000 $\text{CO}_2\text{-e}$, it is also the most climate-damaging of all greenhouse gases. With the EU Regulation concerning fluorinated greenhouse gases in March 2024, the installation of GIS with fluorinated gases with a GWP > 10 as an insulating medium will be banned in the EU beginning from 2026, provided suitable alternatives are available. For this reason, alternative insulating gases with a low GWP are being investigated. The focus here is on gases of natural origin (N_2 , O_2 , CO_2) and mixtures thereof, as these have a GWP ≤ 1 and are very easy to handle.

An important question is to what extent the discharge behavior of the alternative gases differs from that in SF_6 under weakly and strongly inhomogeneous electrical field conditions. This is relevant both for the insulation coordination of equipment and for the detection of faults within this equipment by measuring partial discharges (PD).

The discharge behavior of different gases (and gas mixtures) at different operating pressures is investigated using electrode arrangements that simulate the field conditions within GIS. Fig. 1 shows an example of such an arrangement and Fig. 2 indicates the obtained results.

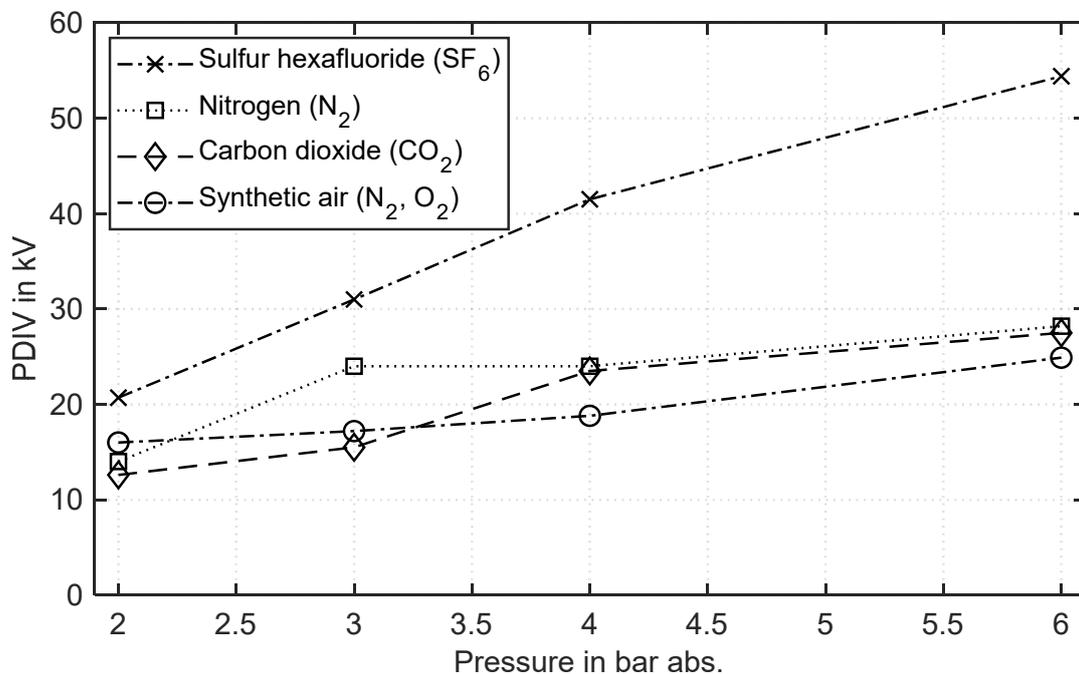


Fig. 2: Mit einem UHF-Sensor ermittelte Teilentladungseinsetzspannungen (PDIV)
 Partial discharge inception voltages (PDIV) determined with an UHF sensor

▪ Statistisches Ausschaltverhalten von Vakuumschaltern

Markus Fischer, M. Sc.

In Vakuumschaltern wird bei Unterbrechungsvorgängen der im Moment der Kontakttrennung entstehende Schaltlichtbogen aus verdampfendem Kontaktwerkstoff gebildet. Kurz vor Erreichen des natürlichen Stromnulldurchgangs wird der Lichtbogen aufgrund mangelnder Energiezufuhr instabil und kann abrupt abreißen. Besonders bei kleinen Strömen induziert der hohe Stromgradient in induktiven Betriebsmitteln eine transiente Überspannung, welche die Isolierfestigkeit überschreiten und zu Schäden führen kann. Der Lichtbogenabriss wird durch den Chopping- bzw. Abrissstrom I_{ch} charakterisiert, welcher den Augenblickswert des Laststroms unmittelbar vor dessen Unterbrechung darstellt. Zur Reduzierung werden zwei Maßnahmen genauer betrachtet. Mittels einer gezielten Wahl der Schaltkontaktwerkstoffe soll der Lichtbogen länger bis zum Stromnulldurchgang aufrechterhalten werden. Zusätzlich wird der Einfluss überlagerter (extern erzeugter) axialer Magnetfelder auf das Lichtbogenabrissverhalten untersucht.

Zur genauen Analyse des Abrissverhaltens wird eine statistische Bewertung mithilfe von drei grafischen Darstellungen durchgeführt. In der ersten wird der über den Mittelwert (M) errechnete Abrissstrom I_{ch} über der magnetischen Flussdichte B mit Kennzeichnung der Standardabweichung (SD) dargestellt. Jedem Wert liegen dabei 50 Öffnungsvorgänge zu Grunde. Für einen Kontaktwerkstoff auf Kupferbasis mit Carbid- und Kohlenstoff-Additiv ergibt sich das in Fig. 1 dargestellte Ergebnis. Fig. 2 enthält die Boxplot-Darstellung derselben Messreihe. Hier wird I_{ch} über den Median berechnet und die tatsächlich aufgetretenen Extrema angegeben. Für den Schaltfall ohne überlagertes Magnetfeld (erster Datenpunkt in Fig 1 und 2) ist in Fig. 3 die Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. In Fig. 1 und 2 ist erkennbar, dass der minimale Strom I_{ch} ohne Magnetfeldeinfluss erzielt werden kann. Der Vergleich beider Darstellungen zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Mittelwert und Median. Allerdings sind über die Standardabweichung allein keine Schalthandlungen ohne Stromabriss ($I_{ch} = 0$ A) bei $B = 0$ T identifizierbar. Der tatsächliche Anteil kann nur über die Wahrscheinlichkeitsverteilung in Fig. 3 bestimmt werden.

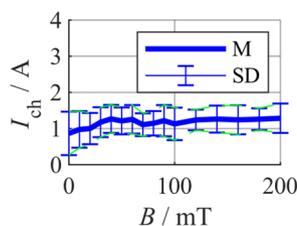


Fig. 1: Mittelwert mit SD
Mean value with SD

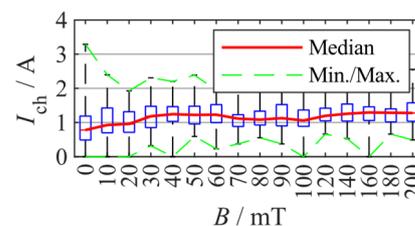


Fig. 2: Boxplot
Boxplot

■ Statistical Switch-Off Behavior of Vacuum Interrupters

Markus Fischer, M. Sc.

The switching arc during interruption processes in vacuum interrupters at the moment of mechanical contact separation is created from evaporating contact material. Near the natural current zero crossing the arc gets instable due to decreasing energy input and can chop abruptly. This can be critical, especially at low currents in inductive load circuits. The high current gradient induces a transient overvoltage at the load, which can exceed the insulation strength and cause damages. The arc chopping is characterized by the chopping current I_{ch} , which represents the instantaneous value of the current before its interruption. To reduce this current two measures are considered in more detail. By a proper choice of the switching contact materials the arc should be maintained until the current zero crossing. Also, the influence of superimposed (externally generated) axial magnetic fields on the arc chopping behavior is examined.

For a better analysis of the chopping behavior a statistical evaluation is performed using three graphical plots. In the first, the chopping current I_{ch} determined via the mean value (M) is shown in relation to the magnetic flux density B with marking of the standard deviation (SD). Each value is based on 50 opening processes. For a copper-based contact material with carbide and carbon additive, the result is shown in Fig. 1. Fig. 2 contains the boxplot of the same series of measurements. Here, I_{ch} is calculated using the median and the extremes are also indicated. For the switching case without superimposed magnetic field (first data point in Fig. 1 and 2), the probability distribution is shown in Fig. 3. In Figs. 1 and 2 it is evident that the minimum current I_{ch} can be achieved without the influence of a magnetic field. The comparison of both diagrams shows a good agreement between the mean and median values. However, the standard deviation alone cannot be used to identify any switching operations without current chopping ($I_{ch} = 0$ A) at $B = 0$ T. The exact ratio can only be determined using the probability distribution in Fig. 3.

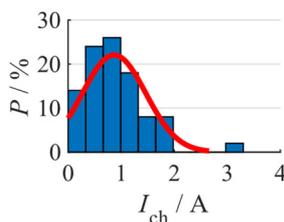


Fig. 3: Wahrscheinlichkeitsverteilung
Probability distribution

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

Tengjun Guo, M. Sc.

Power transformers are critical assets in power systems, ensuring efficient transmission and distribution of electricity. The reliability and longevity of these transformers depend on the condition of their insulation systems, which are susceptible to Partial Discharges (PD). PD, a localized electrical discharge that does not bridge the insulation, is a precursor to insulation failure. Early detection and localization of PD are essential to prevent catastrophic failures and maintain operational integrity. Conventional PD detection methods are Dissolved Gas Analysis, conventional PD measurement according to IEC 60270, acoustic, and Ultra-High Frequency (UHF) methods. The principle of UHF detection lies in capturing electromagnetic waves generated by PD activity within the frequency range of 300 MHz to 3 GHz.

Ultra-High Frequency (UHF) methods have emerged as an advanced technique for PD detection. For example, in a transformer, the tank acts as a Faraday cage, and the low-pass filter characteristics of the graded bushing provide a shielding effect to external disturbances. These offer advantages such as high sensitivity and reduced interference from external noise. Additionally, a significant advantage of UHF is its potential for three-dimensional localization of PD sources, which enables precise identification of fault locations. However, challenges such as signal attenuation within transformer structures, complex wave propagation paths, and the need for precise time-of-arrival measurements require further investigation.

This research will focus on designing high-sensitivity UHF antennas by optimizing antenna geometry, material selection, and bandwidth to enhance the detection of weak PD signals. Computational electromagnetics will be employed to simulate and refine antenna performance within the complex environment of power transformers. To improve PD localization accuracy, arrival time errors will be analyzed by modeling signal propagation and identifying factors such as multipath effects and noise interference. Advanced signal processing techniques and machine learning algorithms will be proposed to correct time delays and predict PD locations more accurately. By addressing these challenges, this research seeks to contribute to the development of robust diagnostic tools that enhance the reliability and maintenance strategies of power transformers, ensuring their efficient operation and extended lifespan.

▪ **Partial discharge (PD) Measurement of Hairpin Motors for Electric Vehicle and Lifetime Analysis**

Chuxuan He, M. Sc.

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

To investigate the degradation of the hairpin winding, the hairpin-in-slot emulation is selected as the device under test (DUT), as shown in Figure 1. The degradation mechanism of the hairpin winding covered with polyamide imide (PAI) insulation material is analyzed by considering the interaction of thermal stress and electrical stress. The test setup is shown in Figure 2.



Fig. 1 Hairpin-in-slot emulation used for the degradation analysis

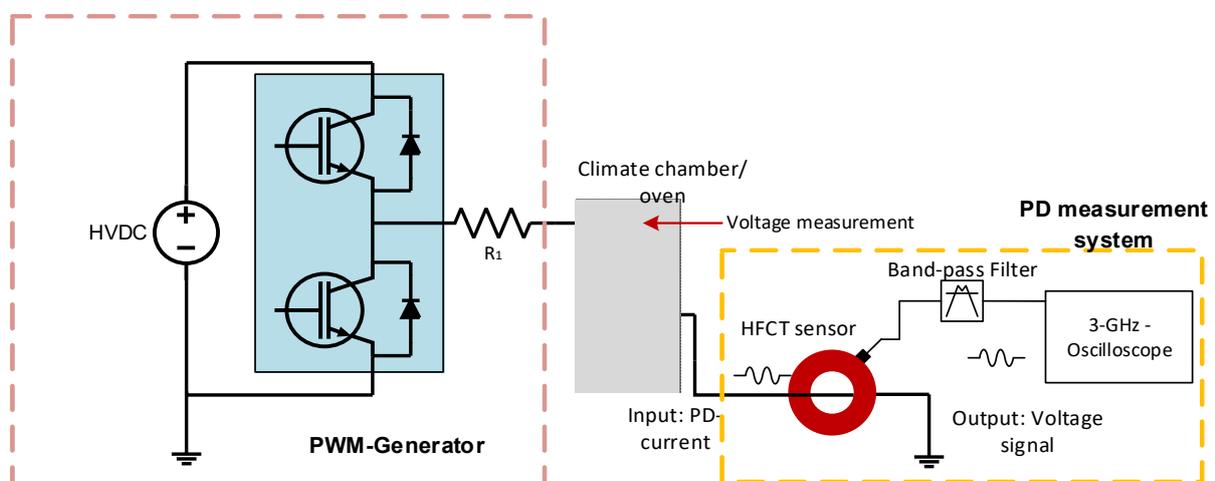


Fig. 2 Schematic of the aging test system for applying variable electrical parameters to hairpin windings at a defined ambient temperature

It is shown that the high temperature and high amplitude of the applied voltage accelerate the degradation of the hairpin winding. However, the analysis of the PD data shows that they can only describe the degradation of the test specimens to a limited extent. Therefore, in a subsequent project, it will be analyzed how the degradation and the remaining lifetime can be assessed with other measurements and a more accurate model.

▪ **Untersuchung von internen Resonanzen in Hochspannungswicklungen**

Felipe Luis Probst, M. Sc.

Leistungstransformatoren sind einer Vielzahl von elektromagnetischen Transienten ausgesetzt, wie z. B. Blitzschlägen, Schaltvorgängen und Einschaltüberspannungen, die zu einer erheblichen Belastung ihrer dielektrischen Isolierung und potenziell zu Ausfällen führen können. Diese Transienten können aus externen Quellen oder durch Interaktionen zwischen dem Transformator und dem angeschlossenen Stromnetz entstehen.

Ein zentrales Zuverlässigkeitsproblem ist die innere Resonanz innerhalb der Hochspannungswicklung, bei der eine der natürlichen Frequenzen des Transformators durch ein Transientenereignis angeregt wird. In einem solchen Fall können die Spannungspegel in der Wicklung die Nennwerte erheblich überschreiten, selbst wenn die Spannung an den Klemmen des Transformators innerhalb der spezifizierten Grenzen bleibt. Eine genaue Modellierung und das Verständnis dieser Resonanzen sind wesentliche Schritte, um Isolationsschäden und Transformatorausfälle zu verhindern.

Die genaue Analyse dieser internen Überspannungen erfordert jedoch ein Modell, das die Reaktion der Hochspannungswicklung auf transiente Bedingungen darstellen kann. Die meisten bestehenden Modelle basieren auf präzisen Wicklungsgeometrien oder proprietären Daten, die in der Regel von den Herstellern eingeschränkt sind, was die praktische Nutzung solcher Modelle in unabhängigen Analysen begrenzt.

Diese Forschung konzentriert sich daher auf die Entwicklung eines „Black-Box“-Modells, das eine detaillierte Analyse der inneren Resonanzen ohne Zugang zu proprietären Informationen ermöglicht. Fig. 1 veranschaulicht das Konzept des vorgeschlagenen Black-Box-Modells. Dieses Modell basiert auf Messungen der Admittanz und der Spannungsübertragungsfunktionen und bietet einen robusten, zuverlässigen Ansatz zur Bewertung des Wicklungsverhaltens und potenzieller Resonanzbedingungen.

▪ **Investigation of Internal Resonances in High Voltage Windings**

Felipe Luis Probst, M. Sc.

Power transformers face a range of transient electromagnetic events, such as lightning strikes, switching operations, and energization overvoltages, which can lead to significant stress on their dielectric insulation and, potentially, to failures. These transients may arise from external sources or from interactions between the transformer and the connected power network.

A key reliability concern is internal resonance within the high-voltage winding, where one of the transformer’s natural frequencies is excited by a transient event. When this occurs, voltage levels within the winding can far exceed rated values, even if the terminal voltages remain within specified limits. Accurately modeling and understanding these resonances are essential steps to prevent insulation damage and transformer failures.

However, accurately analyzing these internal overvoltages requires a model that can represent the high-voltage winding’s response to transient conditions. Most existing models rely on precise winding geometry or proprietary data that manufacturers typically restrict, which limits the practical use of such models in independent analyzes.

Therefore, this research focuses on developing a “black-box” model that allows for detailed analysis of internal resonances without the need for proprietary information. Fig. 1 illustrates the concept of the proposed black-box model.

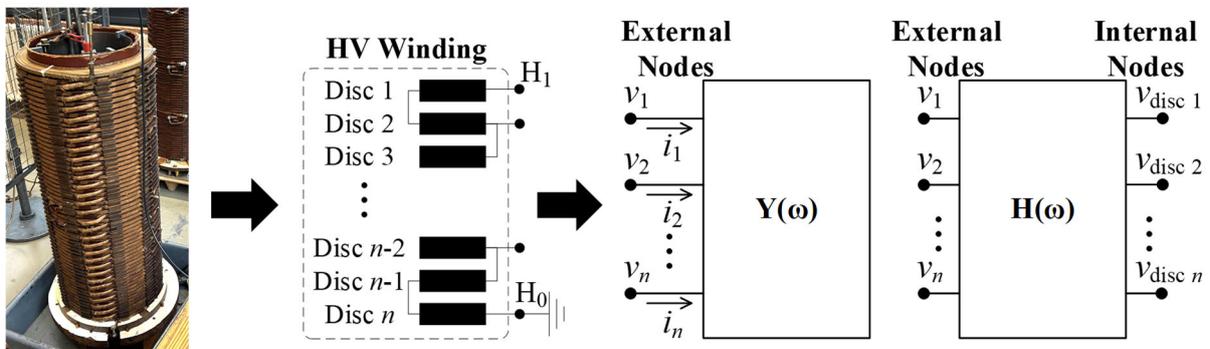


Fig. 1: Black-Box-Modell einer Hochspannungswicklung
Black-box model of high-voltage winding

This model is based on admittance and voltage transfer function measurements, providing a robust, reliable approach to assess winding behavior and potential resonance conditions.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

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

Laufzeit: Juli 2020 – Juni 2025

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 2025

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

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

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

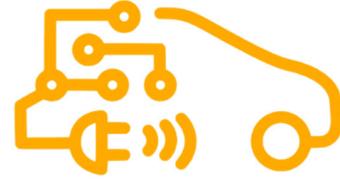


Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

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

▪ **Forschungsprojekt „BANULA“**

Laufzeit: Oktober 2021 – September 2025



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

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

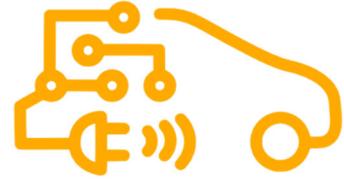
Das Vorhaben wird im Rahmen der Förderinitiative des BMWK zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität (Elektro-Mobil) beim DLR Projektträger gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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



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

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

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

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Laufzeit: Juli 2022 – August 2026

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 Stadtbefahrung zu schaffen. Durch die Analyse und virtuelle Elektrifizierung bestehender Stückgutverkehrs-Touren in Stuttgart können Auswirkungen auf logistische Prozesse und das regionale Stromnetz abgeleitet werden. Dies kann als Entscheidungsgrundlage für diverse Akteure, wie die Landeshauptstadt (LHS) Stuttgart, dienen. Eine „Go-to-Market“-Strategie stellt sicher, dass die Ergebnisse nachhaltig zur Elektrifizierung des Lieferverkehrs beitragen.

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

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



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

Period: July 2022 – August 2026

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 & Speditions-Union GmbH u. Co. KG, BPW Bergische Achsen KG, Daimler Truck AG, Intralogistik-Netzwerk in Baden-Württemberg e.V., the state capital Stuttgart, Netze BW GmbH, Schwarz Logistik GmbH, Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., Stuttgart Netze GmbH and Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg e.V. are also participating as associated partners.

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



- **Forschungsprojekt „Park4Flex“:
Untersuchung der Flexibilitätpotenziale 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

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

Laufzeit: Februar 2023 – Januar 2026

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

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

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Period: February 2023 – January 2026

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

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

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

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Laufzeit: April 2023 – März 2029

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

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

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

Period: April 2023 – March 2029

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

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

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

Johannes Beck, M. Sc.

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

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

Johannes Beck, M. Sc.

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

▪ **Load-flow-based Calculation of Initial Short-Circuit Currents for Converter-based Power System**

Deepak Deepak, M. Sc.

The initial short-circuit current is a critical parameter for power system planning and operation. The calculation of the initial fault current is traditionally performed using VDE 0102, which has been widely applied to classical power systems with synchronous generators. However, the proportion of power electronics-based generators connected to the grid, primarily to integrate renewable energy sources, is steadily increasing. This shift results in a different short-circuit response from the system due to variations in the physical and operational characteristics of these generators.

The key question is: How accurately can we calculate the initial short-circuit current for converter-based power systems using static methods?

The initial fault response of grid-following converters (GFLs) depends on the pre-fault operating point. At the instant of the fault, these GFLs inject the pre-fault operating current. This behavior is attributed to the controller action of the converter, which regulates the current and requires time to update its set-point to inject fault current according to low-voltage ride-through (LVRT) logic. Consequently, the contribution of GFLs to the fault current is limited to their pre-fault operating currents. Based on this understanding, a load-flow-based calculation method is proposed to compute the initial fault current in systems with a generation mix of SGs and GFLs. The proposed method is validated using the IEEE-39 bus system, as shown in Fig. 1. In this system, synchronous generators are progressively replaced with WT Type-4B, which operate as GFLs.

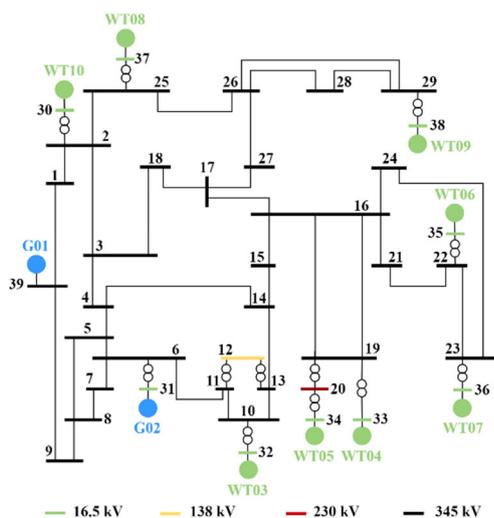


Fig. 1 shows IEEE-39 bus test system

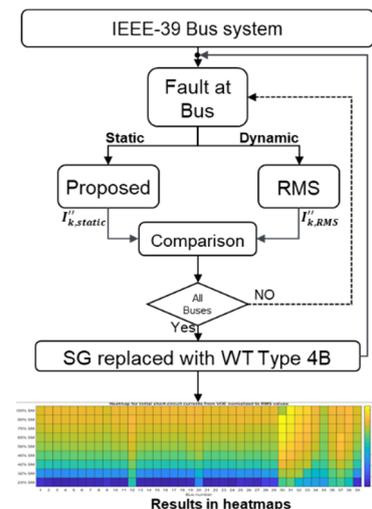


Fig. 2 shows the workflow

Faults are created at each bus, and the results from the proposed method are compared with RMS simulations. The workflow of the proposed method is depicted in Fig. 2.

The comparison of the fault current calculated from the proposed load-flow-based method with the RMS simulation can be seen in Fig. 3. The Y-axis shows the percentage of synchronous machines in the system, and on the X-axis are the fault bus numbers. Each cell in this heatmap presents the ratio of initial fault currents from static and RMS simulation when the short-circuit occurs at the fault bus number. It can be seen that the proposed method is able to calculate the initial fault currents with higher accuracy (max +3% error) for all the proportions of generators and also at all the buses in the test system. This is currently being submitted for the publication.

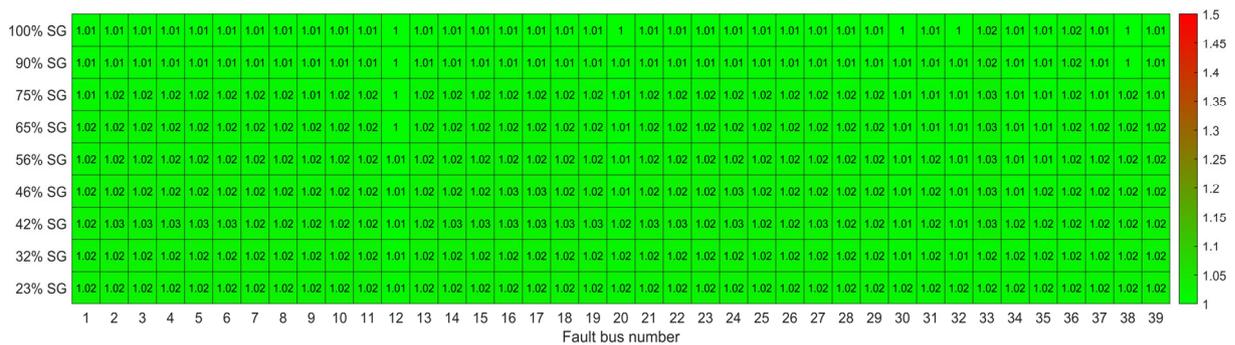


Fig. 3 shows the comparison of initial short-circuit currents calculation between the proposed load-flow-based static method and RMS simulations

▪ **Netzintegration von Elektromobilität in Übertragungsnetze**

Nelly-Lee Fischer, M. Sc.

Gemäß der Zielsetzung der Bundesregierung sollen bis 2030 15 Millionen e-Pkw auf deutschen Straßen unterwegs sein und eine Million öffentliche Ladepunkte zur Verfügung stehen. Zudem wurde in diesem Jahr der Aufbau eines Schnellladenetzes für e-Lkw beschlossen. Die Integration dieser Elektromobilitätslasten kann zu neuen Herausforderungen im Übertragungsnetz führen, die bei der Netzplanung und im Netzbetrieb berücksichtigt werden müssen. Daher ist es notwendig Ansätze zu entwickeln, mithilfe derer die hinzukommenden Lasten quantifiziert und verortet werden können.

Fig. 1 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden entwickelten Ansätze zur zeit- und ortsabhängigen Modellierung der e-Pkw Last. Beim bottom-up Ansatz wird für jedes Fahrzeug ein individuelles Fahr- und Ladeprofil berechnet. Beim top-down Ansatz dagegen das Lastprofil jedes Ladepunkts. Für beide Ansätze wurde eine netzknotenscharfe Verortung der Ladelast auf Übertragungsebene entwickelt, um so die regionalen Unterschiede der Lastverteilung an den Höchstspannungsknoten bestimmen und untersuchen zu können. Fig. 2 zeigt einen beispielhaften Vergleich.

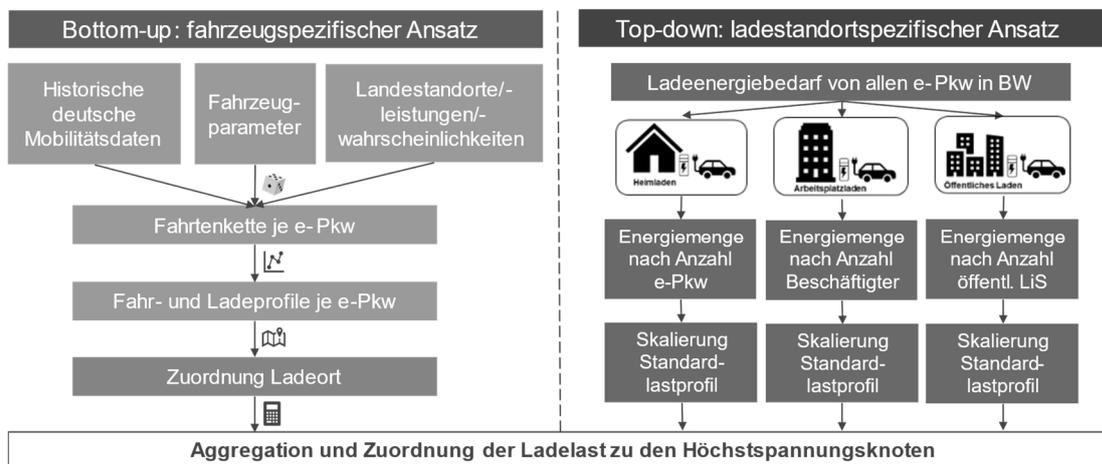


Fig. 1: Ansätze zur Modellierung des e-Pkw Ladebedarfs

Approaches for modeling the charging demand of electric passenger cars

Neben der Bestimmung der Elektromobilitätslast wird im Forschungsprojekt BANULA zudem eine Veränderung des Ladeverhaltens untersucht, welches durch die Umsetzung des sogenannten Durchleitungsmodells verursacht werden würde. Dieses ermöglicht die Mitnahme des eigenen Ladetarifs, sodass z.B. auch beim Arbeitgeber oder an öffentlicher Ladeinfrastruktur zum gleichen Preis wie zuhause geladen werden kann. Die Potentiale, die sich z.B. durch die Verschiebung der heute typischen Abendspitze ergeben, sind Teil der gegenwärtigen Modellierung und Untersuchung.

- **Integration of electromobility in transmission grids**
Nelly-Lee Fischer, M. Sc.

The German government's target is to have up to 15 million electric passenger cars on German roads by 2030, and one million public charging points should be available. Additionally, this year saw the decision to establish a fast-charging network for electric trucks. Integrating this demand from electromobility could present new challenges for the transmission grid, which must be considered in both grid planning and operations. Therefore, it is necessary to develop approaches to quantify and locate these additional loads.

Figure 1 shows a comparison of the two approaches developed for the time- and location-dependent modeling of the electric passenger car load. In the bottom-up approach, an individual driving and charging profile is calculated for each electric passenger car, while the top-down approach models the load profile for each charging point. For both approaches, precise localization of the calculated charging load on transmission grid level has been developed in order to determine and analyze the regional differences in the load distribution at extra-high-voltage nodes. Figure 2 provides an exemplary comparison.

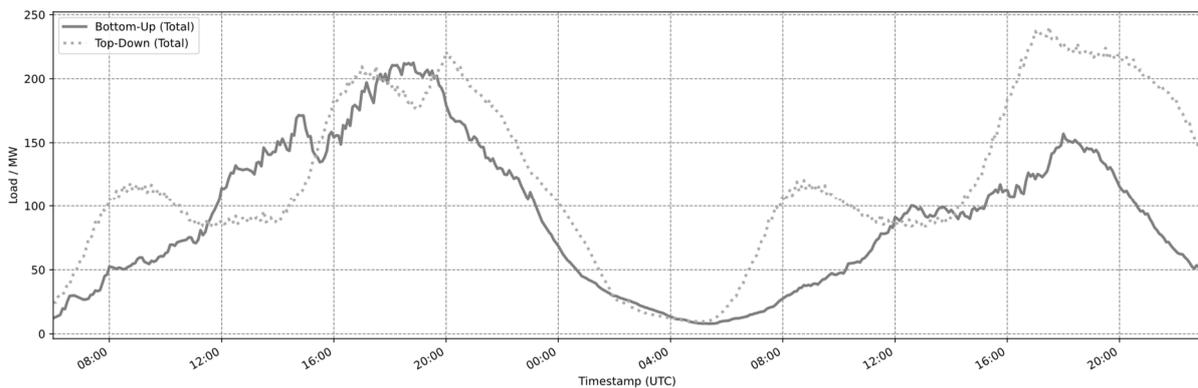


Fig. 2: Vergleich von bottom-up vs. top-down Ansatz für zwei Tage im Winter
 Comparison of bottom-up and top-down approach for two days in winter

In addition to the determination of the electromobility load, the BANULA research project is also investigating a change in charging behavior that would be caused by the implementation of the so-called pass-through model. This model allows users to retain their own charging tariff, meaning that, for instance, they could charge at work or at public charging stations for the same price as they do at home. The potential that arises, for example, from shifting today's typical evening peak is part of the current modeling and investigation.

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

Stefan Köbel, M. Sc.

Der Transformationsprozess in der elektrischen Energieversorgung erfordert eine Flexibilisierung von Last und Erzeugung sowie den Ausbau von Speicherkapazitäten. Dies könnte zukünftig aus batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen durch intelligente Ladekonzepte und bidirektionale Ladefunktionen bereitgestellt werden.

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

In einer Systemstudie wird als Grundlage zunächst für verschiedene Standorte und Zeiten das Park- und Mobilitätsverhalten modelliert. Darauf aufbauend wird eine durch Fahrzeug und Nutzungsverhalten eingrenzende verfügbare Flexibilität ermittelt und anschließend analysiert, welche Abruf-Potentiale für verschiedene Use-Cases vorhanden sind. Für die Flexibilität werden die folgenden drei Faktoren berücksichtigt:

- Der Energiebedarf leitet sich aus dem primären Zweck der Batterie im Elektrofahrzeug ab. Es muss während des Ladevorgangs eine bestimmte Energiemenge geladen werden, damit die anschließende Fahrt durchgeführt werden kann. Flexibilität beim Laden der Batterie als Sekundärnutzung muss dies berücksichtigen.
- Die Verfügbarkeit ergibt sich aus den Ankunfts- und Abfahrtszeitpunkten und grenzt ein, wann Flexibilität mit dem Fahrzeug bereitgestellt werden kann. Es wird dafür angenommen, dass unmittelbar nach der Ankunft das Elektrofahrzeug am Ladepunkt eingesteckt bzw. zur Abfahrt wieder ausgesteckt wird und damit über den gesamten Parkvorgang das Fahrzeug an der Ladeinfrastruktur verfügbar ist.
- Für die Ladeleistung wird unterstellt, dass sie im Rahmen eines AC-Ladevorgangs, unabhängig vom Ladestand der Fahrzeugbatterie und der Umgebungstemperatur, während das Elektrofahrzeug an der Ladeinfrastruktur angesteckt ist, in einem Bereich zwischen einer maximalen und minimalen Ladeleistung beliebig angepasst werden kann.

Für ein Elektrofahrzeug beschreibt der erlaubte Flexibilitätsbereich die Einhaltung seines Energiebedarfs mit den erlaubten Ladebereichsgrenzen während seiner Verfügbarkeit an der Ladeinfrastruktur.

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

Stefan Köbel, M. Sc.

The transformation process in the electrical energy supply requires a flexibilization of load and generation as well as the expansion of storage capacities. In future, this could be provided by battery-powered electric vehicles through intelligent charging concepts and bidirectional charging functions.

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

In a system study, the parking and mobility behavior is first modelled for different locations and times. Based on that, the available flexibility, which is limited by the vehicle and usage behavior, is determined and then analyzed to determine which utilization potential is available for various use cases. The following three factors are taken into account for flexibility:

- The energy requirement is derived from the primary purpose of the battery in the electric vehicle. A certain amount of energy must be charged during the charging process so that the following journey can be completed. Flexibility when charging the battery as a secondary purpose must take this into account.
- The availability depends on the arrival and departure times and limits when flexibility can be provided with the vehicle. It is assumed that the electric vehicle is plugged into the charging point immediately after arrival and unplugged again for departure, meaning that the vehicle is available at the charging infrastructure for the entire parking process.
- The charging power is assumed to be adjustable as required within a range between a maximum and minimum charging power during an AC charging process, regardless of the charge level of the vehicle battery and the ambient temperature while the electric vehicle is plugged into the charging infrastructure.

For an electric vehicle, the permitted flexibility range describes the compliance of its energy demand with the permitted charging range limits during its time of availability at the charging infrastructure.

Für einen unidirektionalen Ladevorgang ist im unteren Teil der Fig. 1 der Bereich durch die kumulierten Ladeenergieverläufe, startend bei 0 zum Ankunftszeitpunkt und endend bei der gewünschten Ladeenergie zum Abfahrtszeitpunkt, von dem frühestmöglichen (AFAP) und dem spätestmöglichen schnellsten (ALAP) Ladeszenario eingegrenzt. Die Flexibilität im Leistungsbereich wird im oberen Teil der Abbildung durch die Leistungsgrenzen eingefasst.

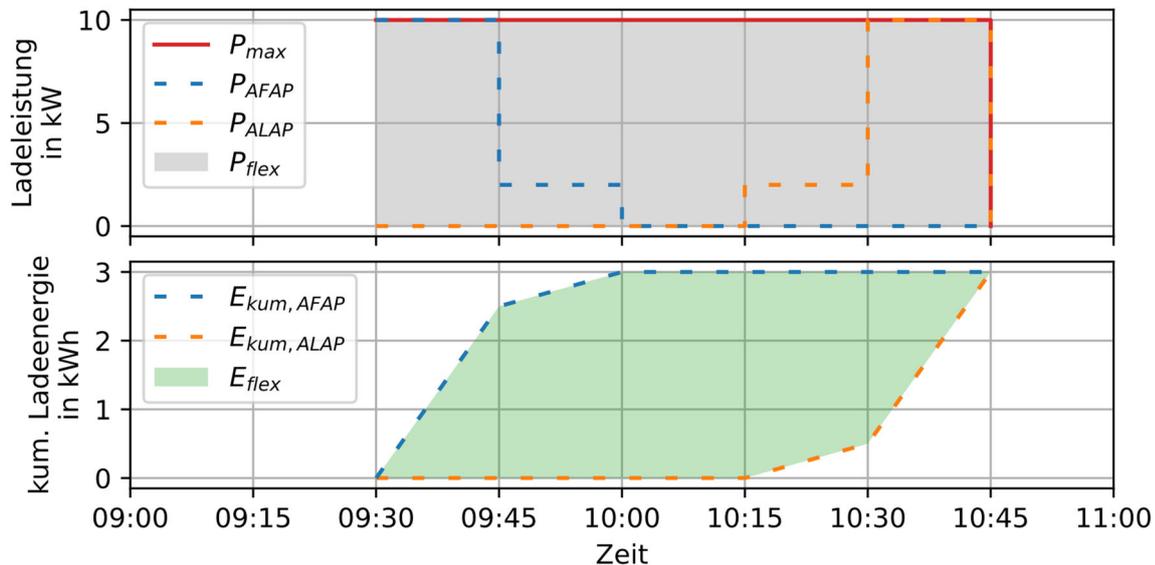


Fig. 1: Flexibilität im Leistungsbereich P_{flex} (oben) wird während der Standzeit von 1h 15 min durch P_{max} eingefasst, während im Ladeenergiebereich die Flexibilität E_{flex} (unten) durch die kumulierten Ladeenergieverläufe $E_{kum,AFAP}$ und $E_{kum,ALAP}$ von 0 auf die zu ladende Energie von 3 kWh eingegrenzt wird. Flexibility in the power domain P_{flex} (top) is bounded by P_{max} during the dwell time of 1h 15 min, while in the energy domain, flexibility E_{flex} (bottom) is constrained by the cumulative charging energy curves $E_{kum,AFAP}$ and $E_{kum,ALAP}$, ranging from 0 to the target charging energy of 3 kWh.

Diese Betrachtungsweise entkoppelt das Flexibilitätspotential von dessen Zweck. Auf dieser Basis können verschiedene Einsatzzwecke der Flexibilität bei Ladevorgängen verglichen werden. Ein sogenannter Flexibilitätsabruf muss für jeden Zeitpunkt im Flexibilitätsbereich liegen.

Für die Bewertung der Flexibilität eines ganzen Ladeparks kann die beschriebene Flexibilität der einzelnen Elektrofahrzeuge zu einer Ladeinfrastruktur-Flexibilität aggregiert werden. Dazu werden unter Berücksichtigung einer maximalen Netzanschlussleistung für die Ladeinfrastruktur die kumulierten Ladeenergieverläufe aufaddiert. Der aggregierte Flexibilitätsbereich aus etwa 700 Elektrofahrzeugen ist in Fig. 2 dargestellt.

In der Systemstudie werden die Flexibilitätsbereiche und die sich daraus ergebenden Potentiale für verschiedene Einsatzzwecke und Parkhaustypen untersucht.

For a unidirectional charging session, the lower part of Figure 1 shows the range defined by the cumulative charging energy curves, starting at 0 at the arrival time and ending at the desired charging energy at the departure time. The range is bounded by the earliest feasible (AFAP) and the latest possible (ALAP) charging scenarios. The flexibility in the power domain is shown in the upper part of the figure and is constrained by the power limits.

This approach decouples the flexibility potential from its purpose. This allows different applications of flexibility in charging processes to be compared. A flexibility utilization must be within the flexibility range for each point in time.

To assess the flexibility at charging infrastructure level, the flexibility of the individual electric vehicles as described can be aggregated to create a charging infrastructure flexibility. For this purpose, the cumulative charging energy curves are added up, taking into account a maximum grid connection power for the charging infrastructure. The aggregated flexibility range from around 700 electric vehicles is shown in figure 2.

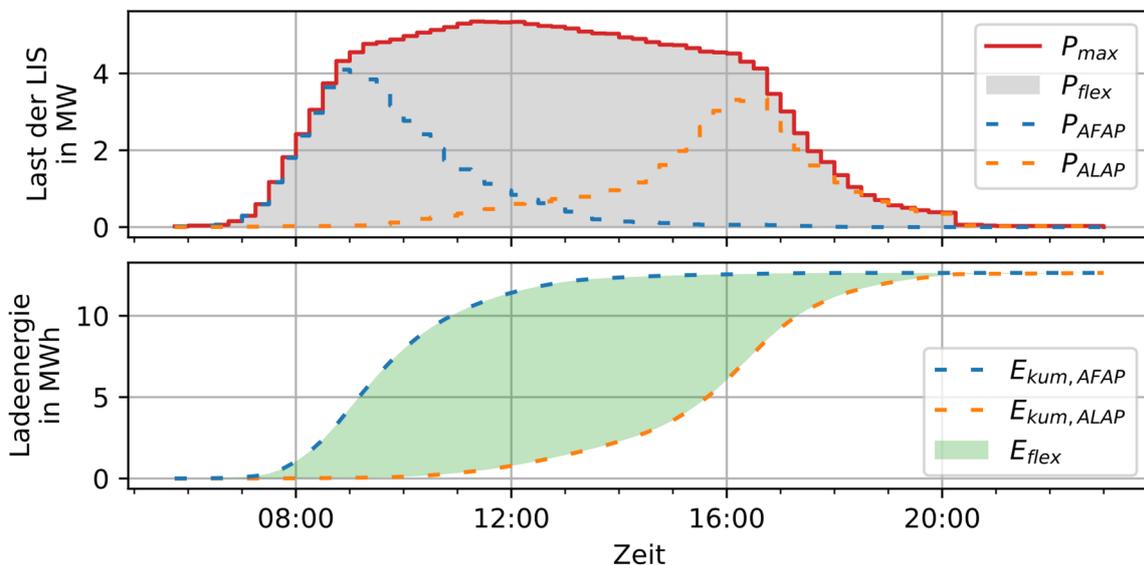


Fig. 2: Aggregierter Flexibilitätsbereich für Ladepunkte in einem Parkhaus mit etwa 700 unidirektionalen Ladevorgängen ohne Netzanschlusslimitierung. Die Flexibilität im Leistungsbereich (oben) leitet sich aus der Belegung im Parkhaus ab, während die Ankunfts- und Abfahrtschwerpunkte der Ladevorgänge die aggregierten kumulierten Ladeenergieverläufe (unten) prägen.

Aggregated flexibility range for charging points in a parking garage with about 700 unidirectional charging sessions without grid connection limitation. The flexibility in the power domain (top) is derived from the occupancy of the parking garage, while the typical arrival and departure times of the charging sessions shape the aggregated cumulated charging energy curves (bottom).

The system study examines the areas of flexibility and the resulting potential for various applications and car park types.

- **Spannungsebenen übergreifende Flexibilitäts-
koordination unter Berücksichtigung von verteilnetz-
seitigen Netzrestriktionen**

Kevin Kratz, M. Sc.

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

In diesem Zusammenhang können dezentrale Erzeugungsanlagen und steuerbare Lasten flexibel genutzt werden, damit ein intelligenter Stromnetzbetrieb umgesetzt werden kann. Da diese Betriebselemente größtenteils in der Verteilnetzebene angeschlossen sind, ist eine funktionsfähige Koordination zwischen Verteilnetz- und Übertragungsnetzbetreibern notwendig. Denn gerade Letzteren stehen immer weniger eigene Maßnahmen zur Verfügung, um den Netzbetrieb zu steuern und Engpässe zu vermeiden, weshalb beispielsweise immer mehr Redispatch-Maßnahmen notwendig sind und diese vermehrt aus dem Verteilnetz herangezogen werden müssen.

Um die Koordination zwischen den Netzbetreibern zu vereinfachen und die Bereitstellung der Flexibilität möglichst anonym zu halten, wurde am IEH eine Methodik zur Aggregation aller flexiblen Anlagen innerhalb eines Netzbereichs entwickelt. Diese berücksichtigt zudem die Restriktionen innerhalb des betrachteten Netzabschnittes hinsichtlich der Übertragungskapazitäten aller Leitungen und Transformatoren sowie der Spannungsbandgrenzen. So können, wie in Abbildung 1 dargestellt, einzelne Anlagen innerhalb einer Netzgruppe zusammengefasst und aggregiert werden und dieses aggregierte Flexibilitätspotential kann dann auf der nächsten Spannungsebene bereitgestellt werden. Auf den darüberliegenden Spannungsebenen können dann die aggregierten Flexibilitätspotentiale sowie die Potentiale weiterer flexibler Anlagen wiederum zusammengefasst werden, wodurch sich ein kaskadierendes Konzept zur Nutzung der Flexibilitäten ergibt.

Eine zentrale Herausforderung hierbei besteht darin, die bereits existierende Methodik zur Bestimmung aggregierter Flexibilitätspotentiale so zu erweitern, dass diese über mehrere Spannungsebenen hinweg anwendbar ist, wie in Abbildung 1 dargestellt. Dabei wird zunächst untersucht, wie diese Methodik anwendbar ist, wenn mehrere Verknüpfungspunkte von einer zur nächsten Spannungsebene existieren. Eine solche Topologie lässt sich vor allem auf höheren Spannungsebenen mit einem erhöhten

- **Flexibility coordination over different voltage levels considering distribution grid-side restrictions**

Kevin Kratz, M. Sc.

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

In this context, decentralized generation units and controllable loads can be used flexibly to enable intelligent power grid operation. Since these operational elements are mostly connected at the distribution grid level, effective coordination between distribution system operators (DSOs) and transmission system operators (TSOs) is essential. This is especially important because TSOs are increasingly running out of their own available measures to control grid operations and prevent congestion, making redispatch measures more necessary and requiring them to increasingly draw on resources from the distribution grid.

To simplify coordination between grid operators and to keep the provision of flexibility as anonymous as possible, the IEH has developed a methodology for aggregating all flexible units within a specific grid area. This methodology also takes into account the constraints within the considered grid section, including the transmission capacities of all lines and transformers, as well as voltage band limits. As illustrated in Figure 1, individual units within a grid group can be aggregated, and the resulting flexibility potential can then be made available at the next voltage level. On the higher voltage levels, these aggregated flexibility potentials—along with the potentials of additional flexible units—can be further combined, resulting in a cascading concept for utilizing flexibility.

A central challenge in this context is to expand the existing methodology for determining aggregated flexibility potentials so that it can be applied across multiple voltage levels, as illustrated in Figure 1. The first step is to examine how this methodology can be applied when multiple interconnection points exist between two voltage levels. Such topologies are commonly found at higher voltage levels with increased meshing but can also occur at the low-voltage (LV) level in some cases.

Moreover, when multiple interconnection points exist between voltage levels, the mutual influence of the connected voltage levels must be considered. It becomes

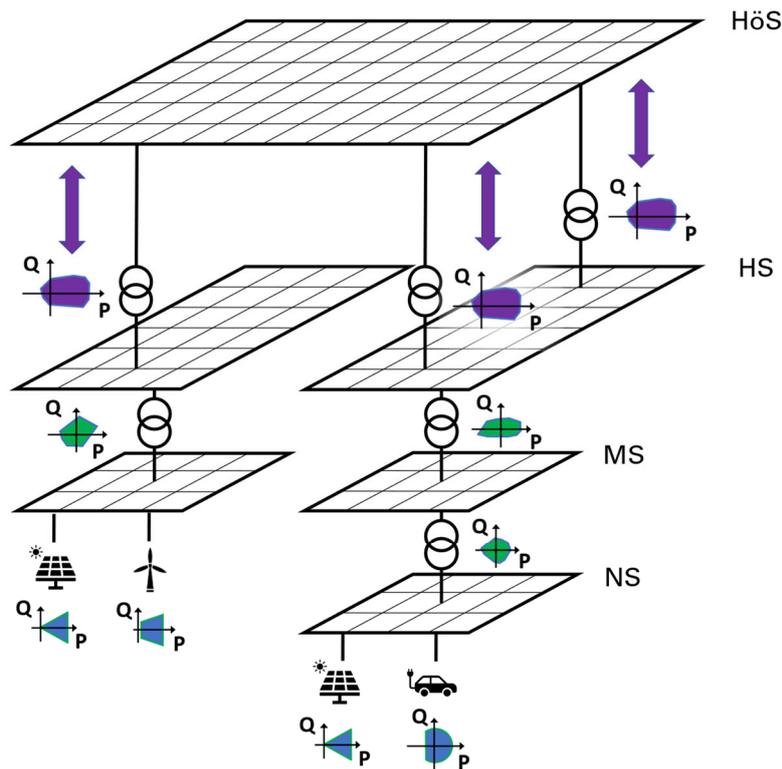


Fig. 1: Schematische Darstellung der kaskadierenden Flexibilitätspotentiale über mehrere Spannungsebenen zur Koordinierung zwischen verschiedenen Netzbetreibern
 Schematic representation of the cascading flexibility potential across several voltage levels for coordination between different grid operators

Vermaschungsgrad finden, ist aber auch in manchen Fällen bereits auf der Niederspannung (NS) - Ebene anzutreffen. Weiterhin kommt bei der Betrachtung mehrerer Verknüpfungspunkte zwischen den Spannungsebenen der gegenseitige Einfluss der verknüpften Spannungsebenen zum Tragen. Es zeigt sich, dass sich in solchen Fällen Transitflüsse der oberen auf die untere Spannungsebene einlagern, wodurch die Leitungen zusätzlich belastet werden, weshalb sich folglich auch das Flexibilitätspotential reduzieren kann. Darüber hinaus werden weitere mögliche Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Spannungen, die sich an den jeweiligen Übergabepunkten ergeben, untersucht.

Zusätzlich zu den Flexibilitätspotentialen und deren methodischer Bestimmung ist dann die Koordinierung von Abrufprozessen Gegenstand von Untersuchungen. So sollen die berechneten Potentiale schließlich genutzt werden, um beispielsweise Engpässe auf den höheren Spannungsebenen zu beseitigen. Da bei einem Abruf aber der gesamte Zustand im Netz verändert wird, sind Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen notwendig und inwiefern die ursprünglich berechneten Potentiale fehlerbehaftet sein können.

evident that in such cases, transit flows from the upper to the lower voltage level can occur, leading to additional loading of the lines and, consequently, a potential reduction in the available flexibility. Additionally, other possible influencing factors—such as the voltages that arise at the respective transfer points—are also analyzed.

Beyond the determination of flexibility potentials and the associated methodology, the coordination of activation processes is another subject of investigation. The aim is to ultimately use the calculated potentials, for example, to eliminate congestion at higher voltage levels. However, since each activation alters the overall state of the grid, it is necessary to analyze the resulting effects and assess to what extent the originally calculated potentials may be subject to error.

▪ **Nutzung betrieblicher Flexibilitäten im aktiven Verteilnetzbetrieb**

Sharon Müller, M. Sc.

Die voranschreitende Energiewende führt zu einem Wandel des Energieversorgungssystems und bringt grundlegend neue Rollen für die beteiligten Akteure, insbesondere Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber sowie Endkunden und Aggregatoren von flexibler und dezentraler Leistungsbereitstellung. Im Projekt flexQgrid wurde daher 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 dezentralen Photovoltaik- und zwei Windenergieanlagen zeichnet sich das untersuchte Netzgebiet durch eine Vielzahl an steuerbaren Lasten wie Elektromobilität, Wärmepumpen oder elektrischen Speichersystemen aus. Mit Hilfe intelligenter Gebäude-Energiemanagementsysteme konnte der Einsatz der einzelnen flexiblen Anlagen sowohl kosteneffizient für den Endkunden als auch netz- und systemdienlich optimiert werden. Eine großflächig installierte Smart Meter Infrastruktur in drei Niederspannungsnetzen sowie dem überlagerten Mittelspannungsnetz ermöglichte sowohl eine nahezu echtzeitfähige Steuerung der Flexibilitäten als auch eine hochaufgelöste Überwachung und Auswertung der realen Netzzustände.

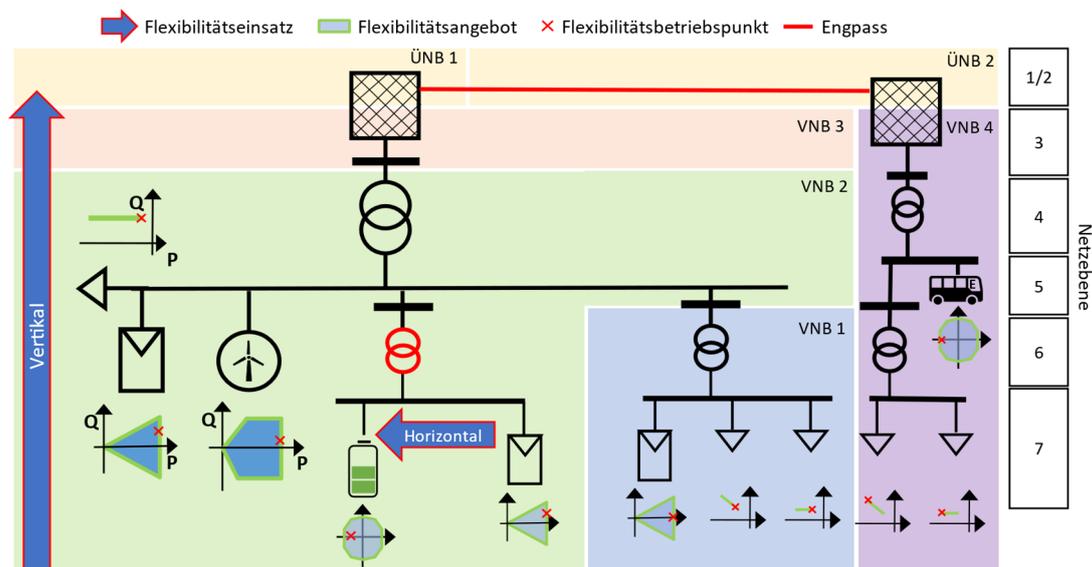


Fig.1: Schematische Darstellung des deutschen Energieversorgungssystems mit den verschiedenen Netzebenen und Netzbetreibern

Schematic representation of the German energy supply system with the various grid levels and grid operators

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

Sharon Müller, M. Sc.

The advancing energy transition is transforming the energy supply system and creating fundamentally new roles for involved actors, especially distribution and transmission system operators, as well as end users and aggregators of flexible and decentralized power resources. In the flexQgrid project, a network area was therefore examined that already exhibits the typical characteristics of an active distribution network, making it a solid basis for investigating future grid operations involving all relevant partners.

In addition to a very high penetration of decentralized photovoltaic systems and two wind turbines, the investigated network area is characterized by a variety of controllable loads such as electric mobility, heat pumps, and electrical storage systems. Using intelligent building energy management systems, the operation of individual flexible units was optimized both cost-effectively for the end user and in a way that benefits the grid and the overall system. A large-scale smart meter infrastructure installed in three low-voltage grids as well as in the upstream medium-voltage grid enabled near real-time control of flexibilities and high-resolution monitoring and evaluation of the actual grid conditions.

The findings from the project are also applicable to the energy supply system in Germany. Figure 1 shows a schematic representation of the interaction between decentralized flexibilities, grid levels, and grid operators. Due to the wide range of potential use cases for flexibility, both horizontal use (within the same grid voltage level) and vertical use (towards the upstream grid level) of flexible assets are conceivable. Since every activation of flexibility affects regular grid operations, a high degree of coordination is required among the different grid operators. Various concepts for coordinating flexibilities are discussed (see Figure 2). They mainly differ in who validates the feasibility of a flexibility offer and coordinates its deployment.

In both the hybrid and the DSO-centered model, the respective DSO plays a leading role in evaluating the use of flexibility. Since different DSOs can be involved in the distribution grids in Germany, these concepts may need to be implemented in a cascading manner involving multiple DSOs. These models are evaluated using insights from the flexQgrid living lab.

Die Ergebnisse aus dem Projekt können auch auf das Energieversorgungssystem in Deutschland angewandt werden. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Zusammenspiels aus dezentralen Flexibilitäten, Netzebenen und -betreibern. Durch die Vielzahl an verschiedenen Einsatzzwecken für Flexibilität ist sowohl eine horizontale Nutzung (innerhalb der Anschlussspannungsebene) als auch ein vertikaler Einsatz (für das überlagerte Netze) der flexiblen Anlagen denkbar. Da jede Aktivierung von Flexibilität auch Folgen für den regulären Netzbetrieb hat, ist ein hoher Koordinationsaufwand zwischen den verschiedenen Netzbetreibern nötig. Es werden verschiedene Konzepte zur Koordinierung von Flexibilitäten diskutiert, siehe Abbildung 2. Im Wesentlichen unterscheiden sie sich darin, wer die Zulässigkeit eines Angebots validiert und seinen Einsatz koordiniert. In dem hybriden und dem VNB-zentrierten Modell übernimmt der jeweilige VNB eine führende Rolle in der Bewertung des Flexibilitätseinsatzes. Da in Deutschland in den Verteilnetzen verschiedene Netzbetreiber beteiligt sein können, sind die Konzepte gegebenenfalls kaskadierend auf mehrere VNBs anzupassen. Diese Konzepte werden auf Basis der Erkenntnisse aus dem Reallabor flexQgrid evaluiert.

Im hybriden Ansatz wird die Flexibilität einer Anlage direkt dem ÜNB angeboten und von diesem auch abgerufen. Die Validierung wird jedoch durch den VNB durchgeführt, sodass alle Angebote dem VNB kommuniziert und etwaige Beschränkungen durch das Netz an den ÜNB zurückgemeldet werden müssen. Der VNB-zentrierte Ansatz sieht die zentrale Rolle zur Kommunikation mit der Anlage bei dem VNB, in dessen Netz die Flexibilitäten verbaut sind. Er aggregiert alle Angebote und gibt diese an die überlagerte Spannungsebene weiter. Die aggregierte Flexibilität wird als Schnittstelle zwischen den Spannungsebenen genutzt. Ein aggregiertes Netzgebiet geht als flexible Anlage in die Berechnungen des überlagerten Netzbetreibers ein. Bei beiden Modellen sind keine internen, kritischen Informationen, wie Messdaten, digitale Zwillinge des Netzes oder personenbezogene Daten auszutauschen.

Die zielgerichtete Nutzung des bereits vorhandenen und zukünftig stark ausgebauten Potentials an dezentraler Flexibilität in den Verteilnetzen kann einen wichtigen Beitrag zu einem verlässlichen und günstigeren Energieversorgungssystem leisten. Es bietet das Potential zur Beschleunigung der Energiewende und durch aktive Teilnahme von Prosumern auch deren Akzeptanz. So kann das Zusammenspiel verschiedener Flexibilitätseinsätze sowohl für das Verteilnetz als auch für das Übertragungsnetz entwickelt, anhand realer Netzdaten evaluiert und bewertet werden. Ziel ist es, die Besonderheit der Flexibilitätserbringung aus volatilen Verteilnetzen aufzuzeigen und die Möglichkeit zu eröffnen, Regulatorik und Gesetzgebung entsprechend anzupassen. Mit Hilfe klarer Vorgaben kann so der Einsatz von Flexibilität vereinfacht und Akteuren wie Anlagenbetreibern, Flexibilitätsdienstleistern, Aggregatoren und Netzbetreibern ein regulatorischer Rahmen und Planungssicherheit gewährleistet werden.

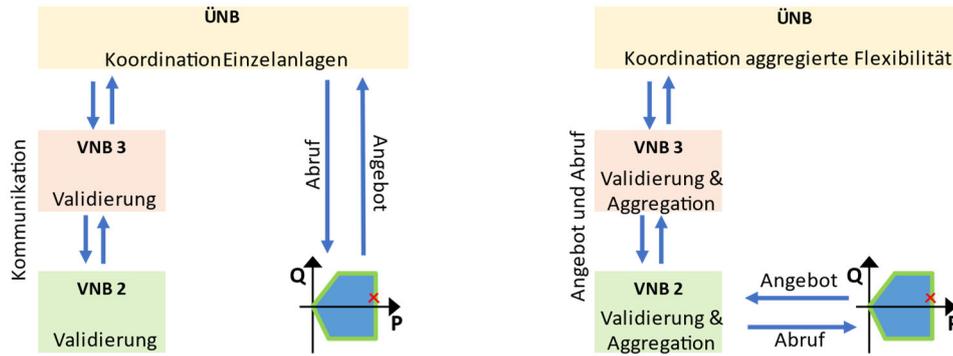


Fig. 2: Darstellung der Konzepte zum Flexibilitätsaustausch zwischen Übertragungs- und Verteilnetz mit aktiver Beteiligung der VNBs
 Concepts for flexibility exchange between the transmission and distribution grid with active participation of the DSOs

In the hybrid model, the flexibility of an asset is offered directly to the TSO and also activated by it. However, the validation is carried out by the DSO, so all offers must be communicated to the DSO, and any network-related constraints must be reported back to the TSO. The DSO-centered approach places the central role for communicating with the asset in the hands of the DSO whose grid hosts the flexibility. This DSO aggregates all offers and forwards them to the upstream voltage level. The aggregated flexibility acts as the interface between the grid levels. The aggregated grid area is treated as a single flexible asset in the calculations of the upstream grid operator. In both models, no internal or sensitive data—such as measurement data, digital network twins, or personal data—needs to be exchanged.

Targeted utilization of the existing and future significantly expanded potential of decentralized flexibility in distribution grids can make an important contribution to a reliable and more affordable energy supply system. It has the potential to accelerate the energy transition and, through the active participation of prosumers, to increase acceptance. In this way, the interaction of different flexibility applications can be developed for both distribution and transmission networks, evaluated using real grid data, and assessed.

The goal is to highlight the specific challenges of providing flexibility from volatile distribution networks and to pave the way for adjusting regulations and legislation accordingly. With clear guidelines, the use of flexibility can be simplified, and a regulatory framework and planning certainty can be provided for stakeholders such as asset operators, flexibility service providers, aggregators, and grid operators.

▪ **Optimale Betriebsmittelauslastung in der kurativen Netzführung**

Lucia Schnee, M. Sc.

Durch die zunehmende Einspeisung von erneuerbaren Energien und den gleichzeitigen Zuwachs an neuen Verbrauchern kommt es unter anderem im Hochspannungsnetz zu einer erhöhten Betriebsmittelauslastung. Darum soll zusätzlich zum präventiven Engpassmanagement zukünftig auch die kurative Netzführung eine Rolle spielen.

In der kurativen Netzführung kann die Strombelastung von Betriebsmitteln im Fehlerfall kurzzeitig höher sein als deren statische Nennstrombelastbarkeit. Grund dafür ist, dass die tatsächliche Betriebsmitteltemperatur die Belastungsgrenze bestimmt. Aufgrund der thermischen Trägheit wird das Temperaturlimit bei kurzfristig höherem Strom nicht sofort erreicht. Dadurch muss im ungestörten Betrieb weniger Kapazität für Fehlerfälle reserviert werden. Das führt dazu, dass bei kurativer Netzführung die Betriebsmittel im Normalbetrieb höher ausgelastet werden können als bei präventiver Netzführung.

Inwieweit eine höhere Auslastung von Freileitungen im ungestörten Betrieb durch kurative Netzführung möglich ist, wird im Rahmen der Forschungs Kooperation Network² mit der Netze BW GmbH am IEH näher untersucht. Die Grundlage für diese Untersuchung stellt die nähere Betrachtung des kontinuierlichen Temperaturverlaufs von Freileitungen während der gesamten kurativen Wirkungskette dar. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Die kurative Wirkungskette beginnt bei der Vorbelastung im ungestörten Betrieb, setzt sich über den Fehlereintritt mit einer Höherauslastung als der Nennstrombelastbarkeit fort und endet nach dem vollständigen Wirken der kurativen Maßnahme. Während dieses Prozesses darf das Temperaturlimit des Leiterseils nicht überschritten werden. Dies wird mit der kurativen Maßnahme sichergestellt, die dafür sorgt, dass die Höherauslastung im Fehlerfall innerhalb kurzer Zeit wieder zurückgeführt wird. Als kurative Maßnahme kann beispielsweise die Abregelung von erneuerbaren Energieanlagen dienen.

Um die maximale Strombelastbarkeit im ungestörten Betrieb zu bestimmen, wird folgender Ansatz gewählt: Zunächst wird angenommen, dass die Leitertemperatur am Ende der Wirkungskette gerade das zulässige Temperaturlimit erreicht. Ausgehend vom Temperaturlimit wird dann die Leitertemperatur rückgerechnet. Dabei wird die zulässige Temperatur im ungestörten Betrieb ermittelt, indem die Temperaturveränderungen entlang der Wirkungskette berücksichtigt werden. Die zulässige Temperatur im ungestörten Betrieb ermöglicht es, die maximale Stromstärke im ungestörten Betrieb zu bestimmen.

■ Optimum Utilization of Resources in Curative Grid Management

Lucia Schnee, M. Sc.

The increasing feed-in of renewable energies and new consumers are leading to higher capacity utilization in the high-voltage grid, among other things. In addition to preventive congestion management, curative grid management will also be used in the future.

With curative grid management, the current load may briefly exceed the rating current in the event of a fault, as the temperature of the equipment determines the limit. Due to the thermal inertia, the temperature limit is not reached immediately. This means that more capacity can be used in normal operation and utilization can be increased compared to preventive grid management.

The extent to which a higher utilization of overhead lines is possible in undisturbed operation through curative grid management is being investigated in more detail at the IEH as part of the Network² research cooperation with Netze BW GmbH. The investigation is based on the continuous temperature curve of overhead lines during the curative effect chain - from the preload during normal operation to the temporary overload in the event of a fault and the reduction through curative measures. The curative measures - such as the curtailment of renewable energy systems - ensure that the temperature limit of the conductor is not exceeded. This is shown in Figure 1.

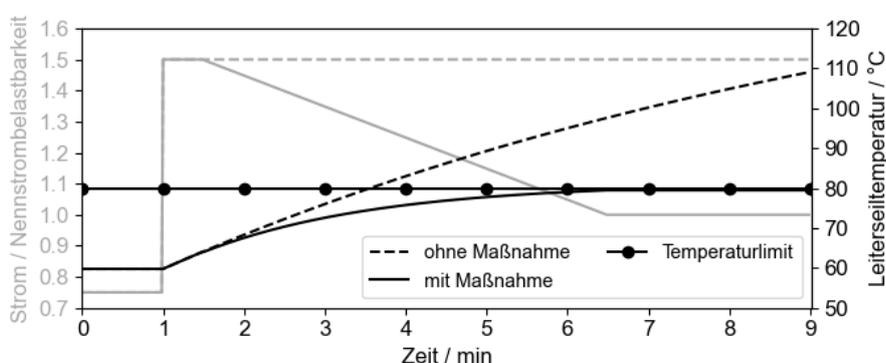


Fig1: Strom- und Temperaturverlauf während kurativer Wirkungskette
Current and Temperature Curve during Curative Action Chain

The following approach is used to determine the maximum current in undisturbed operation: First, it is assumed that the conductor temperature at the end of the active chain just reaches the permissible temperature limit. The conductor temperature is then recalculated based on the temperature limit. The permissible temperature in undisturbed operation is determined by taking into account the temperature changes along the active chain.

- **Netzintegration von Wirtschaftsverkehr im urbanen Raum**

Charlotte Wagner, M. Sc.

Die Elektrifizierung des urbanen Lieferverkehrs in Kombination mit der Nutzung erneuerbarer Energien ist essenziell zur Reduktion von CO₂-Emissionen. Stromnetze, Stadtlogistik und Kommunen müssen durch passende Rahmenbedingungen frühzeitig darauf vorbereitet werden. Im interdisziplinären Forschungsprojekt REALIST werden innovative Konzepte für klimafreundliche Stromversorgung und elektrische Stadtlogistik entwickelt und in einem Reallabor erprobt.

Drei batterieelektrische 7,5-Tonnen-E-LKW kommen für emissionsfreie städtische Lieferungen zum Einsatz. Statt des ursprünglich geplanten Starts im Januar 2023 erhielten die Partnerunternehmen GLS, Rhenus High Tech und Emons ihre Fahrzeuge Mitte 2024. Abbildung 1 zeigt die Übergabe des e-Canter von Daimler Trucks/FUSO am 13. Juni 2024 an Emons Transporte. Die anderen beiden Fahrzeuge sind BAX-Modelle von BWP Bergische Achsen KG.

Die geplanten Touren umfassen bis zu 200 km, was mit einer Batterieladung möglich ist. Voraussetzung ist eine zuverlässige Vollladung sowie eine präzise Abschätzung des Energieverbrauchs, auch unter anspruchsvollen Bedingungen wie schwerer Ladung, Zusatzverbrauchern oder Höhenunterschieden. Interviews bestätigen die Machbarkeit, weshalb die Speditionen Interesse an der Anschaffung weiterer E-LKW zeigen.



Fig. 1: Fahrzeugübergabe am Speditionshof von Emons in Ditzingen
Vehicle handover at the Emons logistics yard in Ditzingen

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

Charlotte Wagner, M. Sc.

The electrification of urban delivery traffic, combined with the use of renewable energy, is essential for reducing CO₂ emissions. Power grids, urban logistics, and municipalities must be prepared early through appropriate framework conditions. The interdisciplinary research project REALIST develops innovative concepts for climate-friendly power supply and electric urban logistics, which are tested in a real-world laboratory.

Three battery-electric 7.5-ton E-trucks are used for emission-free urban deliveries. Instead of the originally planned start in January 2023, the partner companies GLS, Rhenus High Tech, and Emons received their vehicles in mid-2024. Figure 1 shows the handover of the e-Canter from Daimler Trucks/FUSO to Emons Transporte on June 13, 2024. The other two vehicles are BAX models from BWP Bergische Achsen KG.

The planned routes cover distances of up to 200 km, achievable with a single battery charge. This requires reliable full charging and accurate estimation of energy consumption, even under challenging conditions such as heavy loads, auxiliary energy demands, or significant elevation changes. Interviews confirm the feasibility of these distances, which motivates the logistics companies to consider acquiring additional E-trucks.

- **Parkraumbeteiligung an der marktbasierter Flexibilität bereitstellung zur Netzstabilisierung bei steigender Integration von erneuerbaren Energien**

Henrik Wissel, M. Sc.

Die Dezentralisierung der Energieerzeugung erhöht die Energiekapazität im Niederspannungsnetz, während die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen die Lasten steigert. Bis 2030 plant die Bundesregierung 15 Millionen Elektrofahrzeuge auf den Straßen und eine Million öffentliche Ladepunkte. Dies belastet das Niederspannungsnetz, insbesondere die Ortsnetzstationen und die begrenzte Anschlussleistung von Gebäuden.

Intelligente Verbraucher wie Wärmepumpen und Ladestationen ermöglichen dank ihrer IT-Fähigkeit neue Ansätze: Netzbetreiber und Energievermarkter können Lasten gezielt steuern und so intelligente Netze entwickeln, die das Niederspannungsnetz entlasten und Anschlussgrenzen einhalten. Zudem können Energievermarkter Lasten zeitlich verlagern, um bei niedrigen Strompreisen Energie zu verbrauchen und bei hohen Preisen einzuspeisen, was die Stromkosten für Verbraucher senkt.

Im Rahmen des Projektes Park4Flex wird ein umfassendes Konzept entwickelt, welches sich von der Erweiterung der Ladeinfrastruktur über die Entwicklung von Methoden zur Aggregation der sektorübergreifenden Flexibilitäten bis hin zur Vermarktung der Flexibilitäten und Klärung der regulatorischen Rahmenbedingungen erstreckt.

Der aktuelle Stand ist in Fig. 1. dargestellt. Zur Validierung des entwickelten Konzeptes wird dieses während eines Feldtests in einem Parkhaus mit ca. 20 Ladepunkten umgesetzt. Parallel dazu wird ein zweiter Feldtest an der Universität Stuttgart durchgeführt, um den Einfluss bidirektionaler Ladevorgänge auf die Flexibilität zu erproben.

Daneben wird ein Messkonzept entwickelt, um an beiden Standorten die Netzurückwirkungen sowie die Interoperabilität der Ladeinfrastrukturen zu testen. Dabei sollen auch ungeplante Abbrüche der Ladevorgänge identifiziert und Lösungsmöglichkeiten zur Vermeidung ausgearbeitet werden. Auf Grundlage der erzielten Erkenntnisse werden die Güte und Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Lösung bewertet sowie Handlungsempfehlungen erarbeitet.

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

Henrik Wissel, M. Sc.

The decentralization of energy generation is increasing the energy capacity in the low-voltage grid, while the increasing spread of electric vehicles is increasing loads. By 2030, the German government plans to have 15 million electric vehicles on the roads and one million public charging points. This will put a strain on the low-voltage grid, especially the local grid stations and the limited connected load of buildings. Smart consumers such as heat pumps and charging stations enable new approaches thanks to their IT capability: grid operators and energy marketers can control loads in a targeted manner and thus develop smart grids that relieve the low-voltage grid and comply with connection limits. Energy marketers can also shift loads over time in order to consume energy when electricity prices are low and feed it in when prices are high, which reduces electricity costs for consumers.

As part of the Park4Flex project, a comprehensive concept is being developed, ranging from the expansion of the charging infrastructure to the development of methods for aggregating cross-sector flexibilities to the marketing of flexibilities and clarification of the regulatory framework (Fig. 1). To validate the developed concept, it will be implemented during a field test in a multi-storey car park with around 20 charging points. At the same time, a second field test will be carried out at the University of Stuttgart to test the influence of bidirectional charging processes on flexibility. In addition, a measurement concept is being developed to test the grid feedback and the interoperability of the charging infrastructures at both locations. Unplanned cancellations of charging processes are also to be identified and possible solutions developed to prevent them. Based on the findings, the quality and cost-effectiveness of the proposed solution will be assessed and recommendations for action developed.

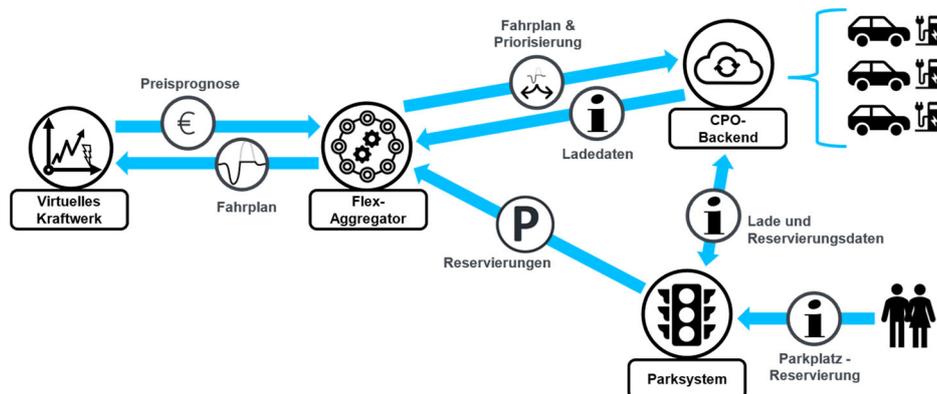


Fig. 1: Gesamtkonzept des Flexibilitätsabrufs im Projekt Park4Flex.
Overall concept of the flexibility request in the Park4Flex project.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

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

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

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

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Period: July 2021 – September 2024

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

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

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

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Laufzeit: Dezember 2021 – August 2025

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 – August 2025

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

Michaela Gruber, M. Sc.

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

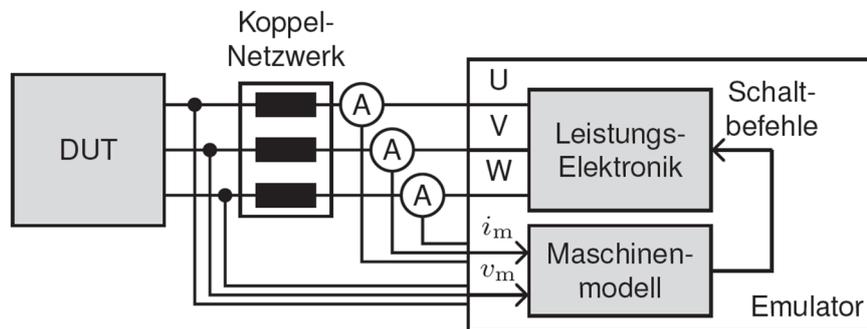


Fig. 1: Blockschaltbild der elektrischen Maschinenemulation
Block diagram of the electrical machine emulation

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

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

▪ **EMC compliant Electrical Machine Emulation**

Michaela Gruber, M. Sc.

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

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

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

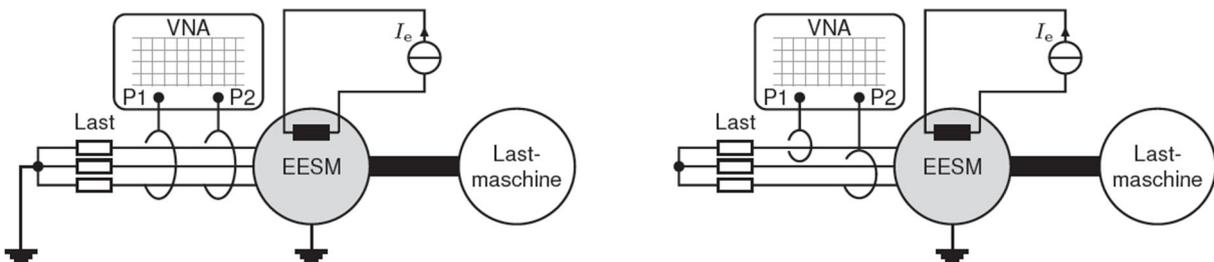


Fig. 2: Messmethodik zur Bestimmung der Gleich- (links) und Gegentaktimpedanz im aktiven Betrieb

Block diagram of the common mode (left) and differential mode impedance measurement in active operation

EMV-U von HV-Batterien

Felix Maute, M. Sc.

Die aktuellen Entwicklungen von Hochvolt-Batteriesystemen (HV-Batteriesysteme) in Elektrofahrzeugen hinsichtlich größeren Ladeleistungen und damit höheren Lade- und Betriebsströmen (bis zu 1 kA) führen zu signifikanten magnetischen Gleichfeldern im Fahrzeuginnenraum. Es wird untersucht, inwiefern die Magnetfeldemission durch Optimierung der HV-Batterie minimiert werden kann, um den Einfluss auf die Insassen und die Beeinflussung von medizinischen Implantaten zu begrenzen.

Unterschiedliche Verschaltungsarten werden dabei zum einen simulativ in CST mit Hilfe von FEM-Simulationen entwickelt und zum anderen anschließend mit Messungen validiert. Hierfür wird zunächst ein modularer Nachbau eines Batteriemoduls mit Dummy-Zellen erstellt (Fig. 1), mit welchem verschiedene Verschaltungsvarianten auf deren Magnetfeldemissionen untersucht werden können. Der Aufbau ermöglicht dabei Stromstärken von bis zu 500 A.

Erste Untersuchungen zeigen bei der magnetischen Feldstärke großes Optimierungspotential von bis zu 80 % und sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Simulationen (Fig. 2) und den Messungen mit einer Abweichung kleiner 10 %. Auf den validierten Modellen aufbauend werden die Betrachtungen künftig auf die Gesamtbatterie ausgeweitet.



Fig. 1: Nachbau Batteriemodul (links) und Messung mit H-Feld-Sonde (rechts)
 Replica battery module (left) and measurement with H-field probe (right)

■ Environmental EMC of HV Batteries

Felix Maute, M. Sc.

The current developments of high-voltage battery systems (HV battery systems) in electric vehicles with regard to higher charging powers and thus higher charging and operating currents (up to 1 kA) lead to significant DC magnetic fields in the vehicle interior. The extent to which magnetic field emissions can be minimized by optimizing the HV battery is being investigated in order to determine the impact on the occupants and the influence on medical implants.

Different types of wiring are being developed in CST using FEM simulations and then validated with measurements. For this purpose, a modular replica of a battery module with dummy cells is created (Fig. 1) first, so that different wiring variants can be tested for their magnetic field emissions. The design enables currents of up to 500 A.

Initial investigations show great optimization potential of up to 80 % for the magnetic field strength and very good agreement between the simulations (Fig. 2) and the measurements with a deviation of less than 10 %. Based on the validated models, the considerations will be extended to the entire battery in the future.

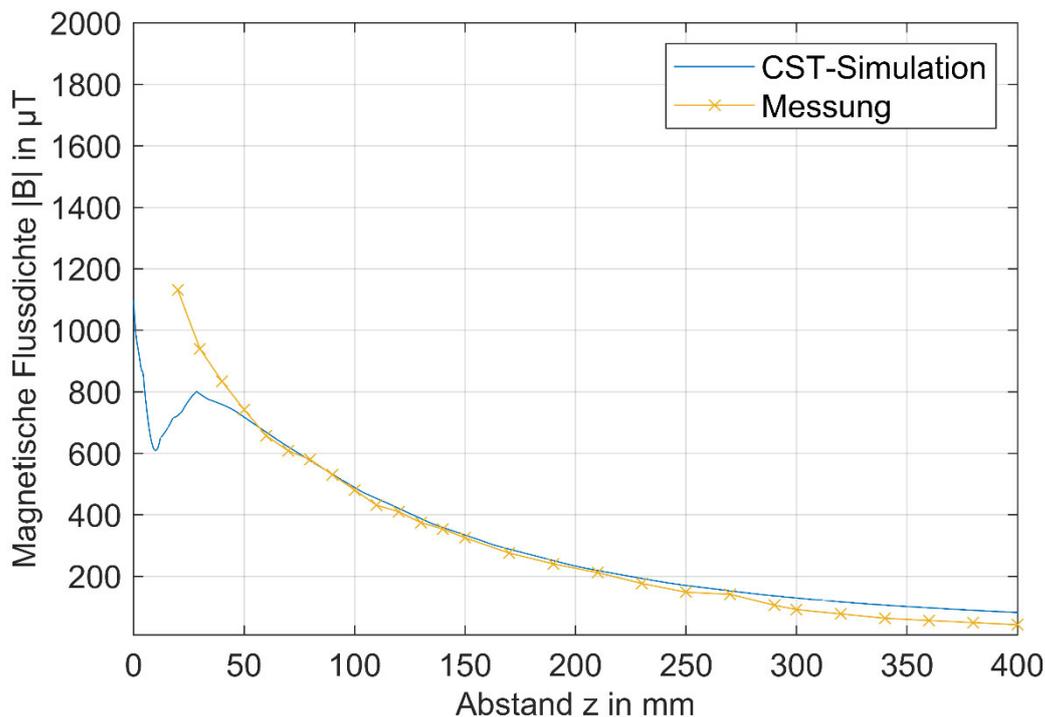


Fig. 2: Verlauf der magnetischen Flussdichte in z-Richtung über Modulmittelpunkt
Magnetic flux density curve in z-direction over module center point

▪ Systembetrachtung der EMV beim konduktiven Ladevorgang von Elektrofahrzeugen

Inti Runa Supa Stöbén, M. Sc.

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

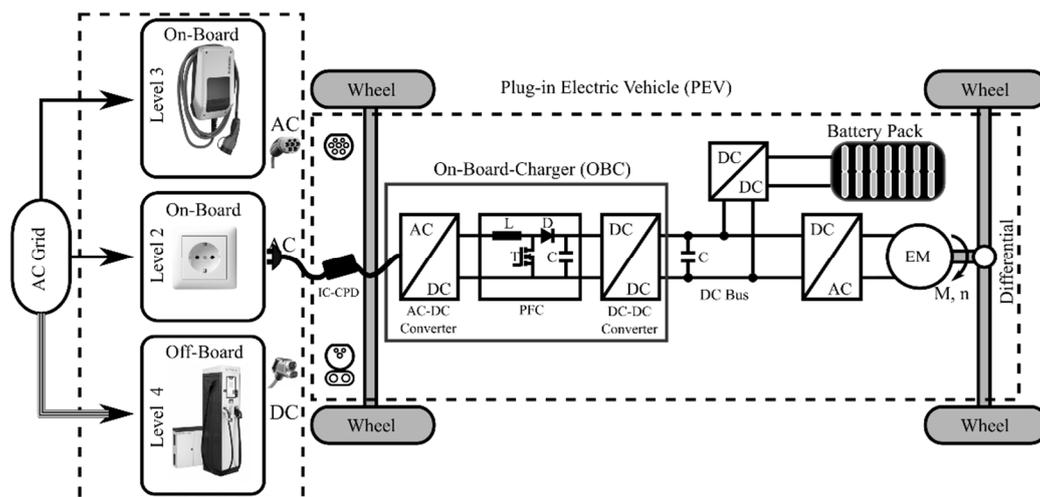


Fig. 1: Konduktive Lade-Infrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge
Conductive charging infrastructure for battery electric vehicles

In diesem Forschungsprojekt werden die äußeren Einflüsse wie Länge des Ladekabels, Anbindung an die Fahrzeugkarosserie und Ladeleistung auf das EMV-Verhalten von EVs im gekoppelten Ladebetrieb systematisch untersucht. Dazu werden sowohl Tests im EMV-Labor als auch unter realen Bedingungen während des Ladens (in Mode 2, 3 und 4) durchgeführt. Abbildung 2 zeigt schematisch die Messungen an einer DC-Ladestation im Mode 4.

Es wurden auch alternative Messmethoden getestet, bei denen die Hochspannungs-LISN (HV-LISN) durch einen HV-Richtkoppler ersetzt wurde, um die HF-Störungen galvanisch zu trennen. Auch im Bereich Power Quality konnten erste Tests im Mode 3 durchgeführt werden.

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

Inti Runa Supa Stölben, M. Sc.

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

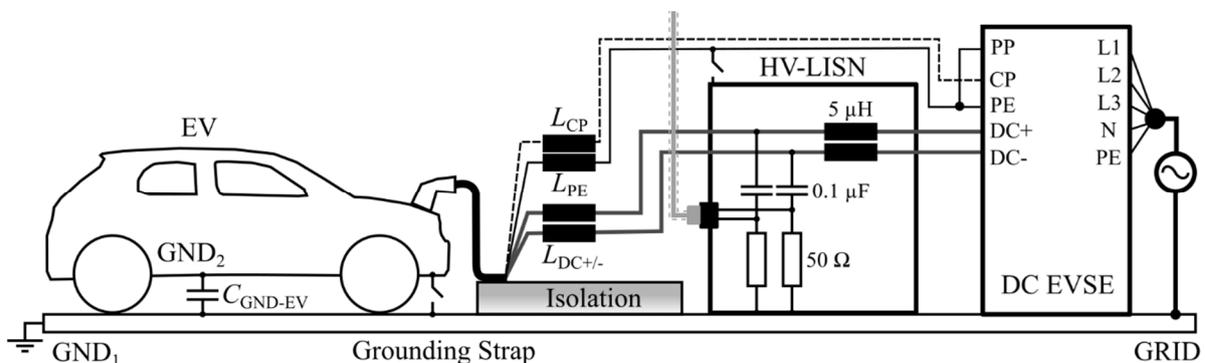


Fig. 2: Schematischer Aufbau für Störspannungsmessungen an realen Fahrzeugen beim DC-laden (Mode 4)
Schematic setup for interference voltage measurements on real vehicles during DC-Charging (mode 4)

In this research project, the external influences such as the length of the charging cable, connection to the vehicle body and charging power on the EMC behavior of EVs in coupled charging mode are systematically investigated. To this end, tests are carried out both in the EMC laboratory and under real conditions during charging (in modes 2, 3 and 4). Figure 2 schematically shows the measurements at a DC charging station in mode 4.

Alternative measurement methods were also tested in which the high voltage LISN (HV-LISN) was replaced by an HV directional coupler in order to galvanically isolate the RF interference. Initial tests were also carried out in Mode 3 in the area of power quality.

EMV von induktiven Kfz-Ladesystemen

Emir Sulejmani, M. Sc.

Das induktive Laden von Elektrofahrzeugen bringt besondere Herausforderungen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) mit sich. Im Fokus der Forschung steht die Minimierung elektromagnetischer Störeinflüsse, um die Kompatibilität mit empfindlichen Systemen sicherzustellen. Da die Anforderungen durch immer strengere EMV-Grenzwerte in zukünftigen Normen weiter steigen werden, fließen diese bereits heute in die Entwicklung ein, um die Technologie normgerecht und zukunftssicher zu gestalten. In Fig. 1 ist das abgestrahlte H-Feld des aktuellen Ladesystems mit zirkularer Spulenwicklung und einer Leistung von 3,6 kW in Bezug zu verschiedenen Grenzwertvorschlägen dargestellt.

Zur Reduktion des H-Feldes werden diverse Ansätze entwickelt und evaluiert. Dazu zählen beispielsweise resonant reaktive Schildspulen, die seitlich am Fahrzeug angebracht werden können und keine Spannungsversorgung benötigen. Die Wirksamkeit dieser und weiterer Methoden wird mithilfe von Magnetfeldmessungen an einem Prüfaufbau gemäß SAE J2954 analysiert. In Fig. 2 wird die Funktionsweise der Schildspulen beim Einsatz in einem Ladesystem mit einer Ausgangsleistung von 3,6 kW dargestellt.

Der Amateurfunk spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung induktiver Ladesysteme, da die von diesen Systemen emittierten elektromagnetischen Wellen Funkfrequenzen stören können. Neben der Reduktion des H-Feldes ist daher auch eine Untersuchung des E-Feldes entscheidend, um Funkstörungen zu vermeiden. Eine detaillierte Analyse der elektrischen Feldstärken ermöglicht es, potenzielle Störquellen frühzeitig zu erkennen und die Anforderungen der EMV sowie die Interessen des Amateurfunks zu berücksichtigen.

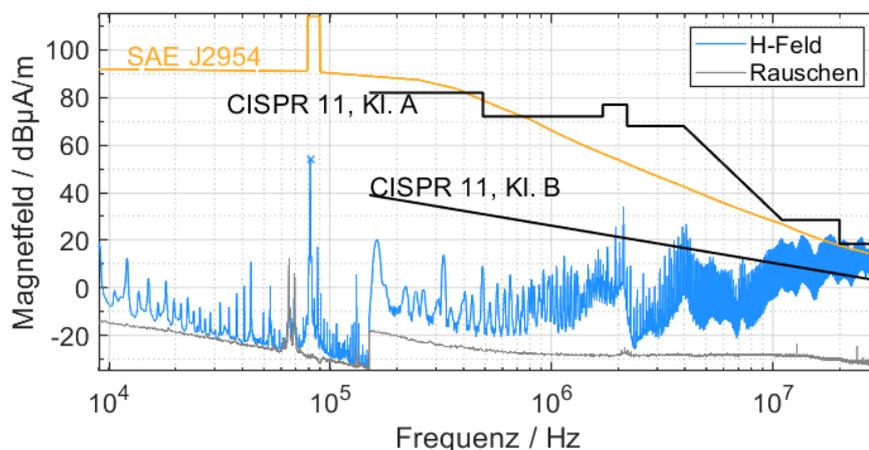


Fig. 1: H-Feldstärke in 3 m Abstand bei zentrierter Spulenausrichtung und einer Ladeleistung von 3,6 kW
 H-field strength at a distance of 3 m with centered coil alignment and a charging power of 3.6 kW

▪ EMC of automotive inductive charging systems

Emir Sulejmani, M. Sc.

The inductive charging of electric vehicles poses particular challenges in the area of electromagnetic compatibility (EMC). The focus of research is on minimizing electromagnetic interference in order to ensure compatibility with sensitive systems. As the requirements will continue to increase due to ever stricter EMC limits in future standards, these are already being incorporated into development today in order to make the technology standard-compliant and future-proof. Fig. 1 shows the radiated H-field of the current charging system with circular coil winding and a power of 3.6 kW in relation to various proposed limit values.

Various approaches are being developed and evaluated to reduce the H-field. These include, for example, resonant reactive shield coils that can be attached to the side of the vehicle and do not require a power supply. The effectiveness of these and other methods is analyzed using magnetic field measurements on a test setup in accordance with SAE J2954. Fig. 2 shows how the shield coils work when used in a charging system with an output power of 3.6 kW.

Amateur radio plays an important role in the development of inductive charging systems, as the electromagnetic waves emitted by these systems can interfere with radio frequencies. In addition to the reduction of the H-field, an investigation of the E-field is therefore also crucial in order to avoid radio interference. A detailed analysis of the electric field strengths makes it possible to identify potential sources of interference at an early stage and to take into account the requirements of EMC and the interests of amateur radio.

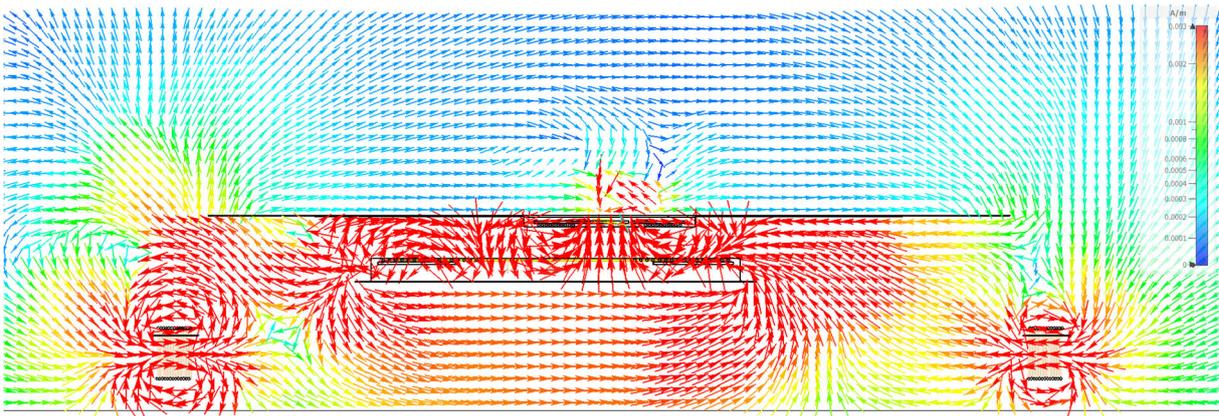


Fig. 2: Simulative Untersuchung des H-Feldes beim Einsatz von resonant reaktiven Spulen und einer Ladeleistung von 3,6 kW.
 Simulative investigation of the H-field when using resonant reactive shields and a charging power of 3.6 kW.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

A. F. Londono, K. Rudion

Charging Load and Flexibility Assessment of Electric Last-Mile Delivery Van Fleets based on Semi-Synthetic Mobility Profiles. 11th Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, NEIS 2023, Hamburg 4-5 September 2023.

J. Beck, N. Fischer, K. Rudion

Modeling High Power Chargers at Highway Rest Stops Using Data on Real Usage Behavior.

PESS 2023 – Power and Energy Student Summit, Bielefeld, Germany, November 15-17, 2023, pp. 19-24.

F. L. Probst, M. Beltle, S. Tenbohlen

Measurement of Transient Overvoltages by Capacitive Electric Field Sensors.

Sensors 2024, 24, 1357. <https://doi.org/10.3390/s24051357>.

S. Tenbohlen, P. Picher, X. Zhang, I. Fofana, Z. Wang

Overloading of power transformers

Transformers Magazin, Volume 11, Issue 3, 2024.

E. Sulejmani, M. Beltle, S. Tenbohlen

Untersuchung von Gleichtaktströmen in induktiven Kfz-Ladesystemen und deren Auswirkungen auf Magnetfeldemissionen.

In: Garbe, Heyno (Hrsg.): Proceedings EMV Kongress 2024: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit. Aachen: Apprimus, 2024, S. 279-286, doi: 10.15488/16991.

L. Ranzinger, S. Uhrig, S. Tenbohlen

Analysis and Modelling the Frequency Response of Rotating Machines Regarding Fault Diagnosis Using SFRA.

IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 39, No. 1, pp. 747-756, March 2024, doi: 10.1109/TEC.2023.3315341.

M. Gruber, M. Beltle, S. Tenbohlen

Untersuchung von Gleichtaktströmen in induktiven Kfz-Ladesystemen und deren Auswirkungen auf Magnetfeldemissionen.

EMV Köln 2024, 12.-14. März 2024, DOI: 10.15488/16962, S. 323-330.

M. Gruber, M. Beltle, S. Tenbohlen

Modellierung der Motor-Impedanz einer elektrisch erregten Synchronmaschine anhand von Messungen im aktiven und passiven Betrieb.

Proceedings EMV Kongress 2024: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, 2024, S. 323-330, <https://doi.org/10.15488/16996>.

Ph. Mell, Ch. He, M. Dazer, M. Beltle

Lifetime Model Winding Insulation.

Proceedings of the FVV Transfer + Networking Event 2024: FVV e.V., 2024, Würzburg, Germany, March 13-15, 2024.

A. F. Londono M., K. Rudion

Modeling and Assessment of Unidirectional Charging Strategies for Electric Vans in Last-Mile Parcel Delivery Operations.

The Sixteenth Annual IEEE Green Technologies (GreenTech) Conference
April 3 – 5, 2024, Springdale, Arkansas, USA.

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

Onsite Messung von transienten Überspannungen mittels kapazitiver Feldsensoren.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2024, Stuttgart, Juni 11-12, 2024, pp. 225-230.

P. B. Dang, S. Tenbohlen, M. Schultheiss

Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2024, Stuttgart, Juni 11-12, 2024.

N. Fischer, K. Walz, K. Rudion

Combined Modelling of Different Electric Vehicle Fleets for Estimation of Grid Impact and Flexibility Potential.

CIREC Workshop 2024, Vienna, Austria, June 19-20, pp. 91-95, doi: 10.1049/icp.2024.1886.

H. Wissel, S. Müller, K. Rudion,

Evaluation of the Flexibility Provision Behaviour of Different Charging Strategies for Electric Vehicles.

CIREC Workshop 2024, Vienna, Austria, June 19-20, pp. 316-319, doi: 10.1049/icp.2024.2035.

S. Müller, K. Kratz, K. Rudion, M. -A. Frankenbach and B. Surmann,

Influence of Uncertainty in Predictive Congestion Management for the Ancillary Service Provision by Active Distribution Networks.

18th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Auckland, New Zealand, June 24 -26, 2024.

Ch. He, Ph. Mell, M. Beltle, M. Dazer, S. Tenbohlen

Degradation Model of Hairpin Winding in Inverter-fed Motors Considering Thermal and Electrical Stress.

Internationales Stuttgarter Symposium (ISSYM 2024), Springer Vieweg, Wiesbaden, Germany, July 2-3, 2024.

I. R. Supa Stölben, M. Beltle, S. Tenbohlen,

Electromagnetic Compatibility Assessment of Electric Vehicles during DC-Charging with European Combined Charging System.

2024 Stuttgart International Symposium, Stuttgart, July 2024, SAE Technical Paper No. 2024-01-3008. doi:10.4271/2024-01-3008. DOI:10.4271/2024-01-3008.

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

Impact of Applied Voltage on the Frequency Response Measurements for Transient Modeling of Capacitive Voltage Transformers.

2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Berlin, Germany, August 18-22, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE61955.2024.10676160.

S. Tenbohlen, D. Martin

Analysis of AC Transformer Reliability.

D1-11842, CIGRE Session Paris, August, 2024.

R. Berkemeier, R. Bach, N. Peck, S. Tenbohlen

Comparison of Phase Resolved Partial Discharge Pattern of Electrical and UHF PD Measurements for the Use at Cable Terminations.

D1-11138 CIGRE Session Paris, August 2024.

S. Tenbohlen, D. Martin, R. Asano, Z. Hanif, P. P. Ramos, E. teNyenhuis, e.a.

Analysis of AC Transformer Reliability.

Technical Brochure 939, CIGRE, 2024.

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

Factors influencing the Chopping Current in Vacuum Interrupters.

9th ITG International Vacuum Electronics Workshop (IVEW) 2024, Bad Honnef, Germany, August 28-30, 2024.

K. Schiewaldt, B. Albuquerque de Castro, J. A. Ardila-Rey, M. N. Franchin, A. L. Andreoli, S. Tenbohlen

Assessment of UHF Frequency Range for Failure Classification in Power Transformers.

Sensors 2024, 24. Jg, Nr. 15, S. 5056, <https://doi.org/10.3390/s24155056>.

L. Ranzinger, S. Uhrig, S. Tenbohlen, S. Plötz

Transferability of SFRA measurements between rotating machines of different power class and type.

2024 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika) (pp. 1-6). IEEE 2024, September.

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

Effects of Optimized Switching Contact Materials, Aging, and Superimposed Axial Magnetic Field on Chopping Current in Vacuum Interrupters.

IEEE Transactions on Plasma Science, DOI: 10.1109/TPS.2024.3485995, Vol. 52, Issue 9, September 2024, pp 4419-4427.

A. F. Londono M., K. Rudion

Quantifying the Impact of Bidirectional Charging on the Degradation of LiFePO₄ Electric Van Batteries in LMD Operations

Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (NEIS 2024) September 16 – 17, 2024, Hamburg, Germany.

N. Fischer, J. Beck, S. Bayer, K. Rudion, N. Maksymchuk, R. Enzenhöfer

Top-Down Approach for Modelling of Aggregated Electric Vehicle Charging Load based on Real Data.

2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Dubrovnik, Croatia, October 14-17, 2024.

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

Improved Accuracy in Calculation of Initial Fault Current in Converter-based Power Systems.

2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), Dubrovnik, Croatia, October 14-17, 2024.

A. Guimarães Carvalho, L. Pick, S. Tenbohlen, T. Elfert

Modelling Geomagnetically Induced Currents in the German Transmission Grid for 2023 Geomagnetic Storms.

VDE High Voltage Technology 2024, 11.-13. November 2024, Berlin, Tagungsband ETG-Fachbericht 175, S. 62-67.

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

Statistisches Ausschaltverhalten von Vakuumschaltern mit optimierten Kontaktwerkstoffen und überlagerten axialen Magnetfeldern.

VDE Hochspannungstechnik 2024, 11.-13. November 2024, Berlin, ETG Fachbericht 175, S. 499-506.

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 17.01.24 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 18.01.24 CIGRE WG D1.78 Meeting, online
Teilnehmer: N. Dölzer, M. Beltle
- 22.01.24 CIGRE A2.60 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 23.01.24 UTRA Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 05.02.24 DAK C6 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 19.02.24 WindForS Full Assembly 2024, Donzdorf
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 19.02.24 CIGRE WG D1.78 Meeting, online
Teilnehmer: N. Dölzer
- 23.02.24 Advancing Sustainable Energy - Stadtwerke Stuttgart's Hydrogen-Powered Solutions, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 28.02-01.03.24 Messe Zukunft Handwerk / Seifitz-Preisverleihung, München
Teilnehmer: M. Beltle
- 14.-15.3.24 Doktorandenseminar „Magdeburger-Lena-Kreis“, 50Hertz
Netzquartier, Berlin
Teilnehmende: Prof. K. Rudion, N. Fischer (Beitrag), S. Müller
(Beitrag), C. Wagner, J. Beck
- 20.03.24 NetzImpuls, Steuern statt Bauen: Intelligente Märkte und Netze,
electro suisse, Aarau, Schweiz
Teilnehmerin/Beitrag: C. Wagner
- 08.04.24 VDE Hochspannungstechnik - Programmausschuss, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 09.04.24 Smart Grids-Gespräche " §14a EnWG - Potenziale und Hürden",
online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 15.04.24 CIGRE DAK C6 Strategierunde, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 15.04.24 CIGRE WG D1.78 Meeting, online
Teilnehmer: N. Dölzer
- 16.-17.4.24 DVWG Summit 2024: Reallabore – Von der Forschung in den
Alltag, Wuppertal
Teilnehmerin/Beitrag: C. Wagner

- 18.-19.04.24 Technischer Beirat Omexom, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 22.04.24 CIGRE DAK C6 Workshop, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 24.04.24 CIGRE Sitzung DAK A2, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 07.05.24 CIGRE A2.60 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 14.-15.05.24 DKE/K 124 Gremium Normung, Bonn
Teilnehmer: M. Beltle
- 28.05.24 UTRA Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 05.06.24 CIGRE D1.01 AG Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 05.06.24 Forschungsvereinigung Antriebstechnik FVA Arbeitskreis
Mechatronik, Hannover
Teilnehmer: J. Bux
- 11.-12.06.24 Stuttgarter Hochspannungssymposium 2024, Leinfelden-
Echterdingen
Leitung/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, F. L. Probst, M. Gerber,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 13.06.24 CIGRE A2.60 TF4 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 17.06.24 Umweltabend – Ministerium für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 19.-20.06.24 CIRED Workshop 2024, Wien, Österreich
Teilnehmende/Beiträge: N. Fischer, H. Wissel
- 20.06.24 LISKON 2024, Berlin
Teilnehmerin: C. Wagner
- 24.06.24 CIGRE DAK C6 Workshop, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 09.07.24 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, Karlsruhe
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 09.07.24 Smart Grids-Gespräche "Smart Meter, dynamische Tarife,
Flexibilität – wie entstehen daraus neue Geschäftsmodelle?",
Karlsruhe
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 16.07.24 CIGRE 2024 D1.74 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 18.-22.08.24 2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering
and Applications (ICHVE), Berlin
Teilnehmer/Beitrag: F. L. Probst

- 25.-30.08.24 CIGRE 2024, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 25.08.24 CIGRE D1.01 AG Meeting, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 27.08.24 CIGRE A2.60 plenary Meeting, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 28.08.24 CIGRE A2 Study Committee Meeting, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 28.-30.8.24 9th ITG International Vacuum Electronics Workshop (IVEW) 2024,
Bad Honnef
Teilnehmer/Beitrag: M. Beltle, M. Fischer
- 10.09.24 UTRA Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 18.09.24 TransFORM 2024 – TransnetBW, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 25.09.24 CIGRE Sitzung DAK A2, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 27.09.24 Sitzung DKE/UK 222.1, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 30.9.24 CIGRE DAK C6 Workshop, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 07.-09.10.24 2nd Asset Insights User Forum for Europe and SSA, Porto
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 10.-12.09.24 CIGRE WG D1.78 Meeting, online
Teilnehmer: N. Dölzer, M. Beltle
- 10.10.24 Forschungsvereinigung Antriebstechnik FVA Arbeitskreis
Mechatronik, Darmstadt
Teilnehmer: J. Bux, M. Beltle
- 14.-17.10.24 IEEE PES ISGT Europe 2024, Dubrovnik, Kroatien
Teilnehmende/Beiträge: N. Fischer, D. Deepak
- 16.10.24 Gebietskonferenz Weilimdorf, Stuttgart
Teilnehmende/Beiträge: C. Wagner, Prof. K. Rudion
- 20.-23.10.24 SEPOC 2024 - 16th Seminar on Power Electronics and Control,
Santa Maria-RS, Brasilien
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 22.10.24 Netzsicherheit 24 – Konferenz, Schwäbisch Hall
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 05.-06.11.24 Seminar an der TAE „Grundlagen der Hochspannungstechnik“
Technische Akademie Esslingen Ostfildern
Leitung: Prof. S. Tenbohlen
- 11.-13.11.24 VDE Hochspannungstechnik, Berlin
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, M. Beltle, M. Fischer

- 11.-13.11.24 VDE-Hochspannungstechnik 2024, Berlin
Leitung: Prof. S. Tenbohlen, Teilnehmer/Beitrag: M. Beltle, M. Fischer
- 13.11.24 Technischer Beirat Omexom Deutschland, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 13.11.24 8. Jahresveranstaltung Strategiedialog Automobilwirtschaft BW, Messe Karlsruhe, Messestand für die Projekte: BANULA, Park4Flex und REALIST, Standbetreuer*in: N. Fischer, S. Köbel, C. Wagner
- 19.11.24 CIGRE A2.07 AG Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 25.11.24 UTRA Annual Conference, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 26.-27.11.24 Seminar an der TAE „Teilentladungen in hoch beanspruchten elektrischen Isolierungen“, Technische Akademie Esslingen Ostfildern
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Dr. Beltle
- 02.12.24 CIGRE A2.03 AG Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 03.12.24 Technical Seminar on “Exchanging Knowledge and Experience of Power Transformer Diagnostic and Failure Finding”, organized by IEEE Thailand Section in collaboration with Thai-German School of Engineering, Bangkok
Leitung: Prof. S. Tenbohlen
- 04.12.24 12. Smart Grids Kongress, Fellbach
Teilnehmende: Prof. K. Rudion, S. Bayer, M. Miller
- 10.-11.12.24 Informationstagung der Forschungsvereinigung Antriebstechnik FVA, Würzburg
Teilnehmer: M. Beltle
- 11.12.24 CIGRE WG D1.78 Meeting, online
Teilnehmer: N. Dölzer, M. Beltle
- 13.12.24 Technical Seminar on the Application of Condition Assessment Techniques for Power Transformers, organized by CIGRE Malaysia in collaboration with Tenaga Nasional Berhad, Kuala Lumpur
Leitung: Prof. S. Tenbohlen
- 18.12.24 Technical Seminar on Condition Assessment Techniques for Power Transformers, organized by CitiPower, Melbourne, Australia
Leitung: Prof. S. Tenbohlen

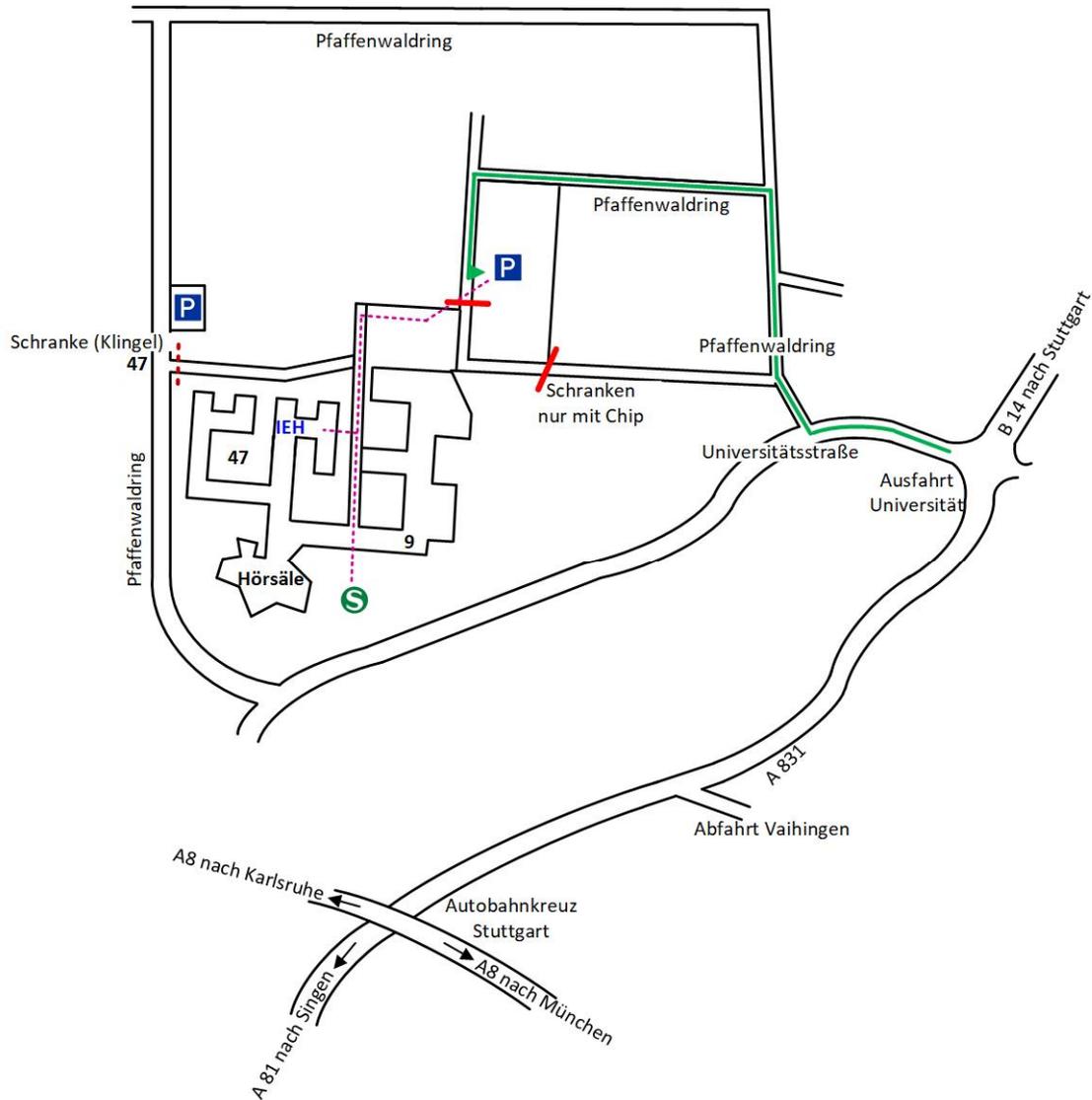
8. PRÜFEINRICHTUNGEN

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)
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 CIPSR 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

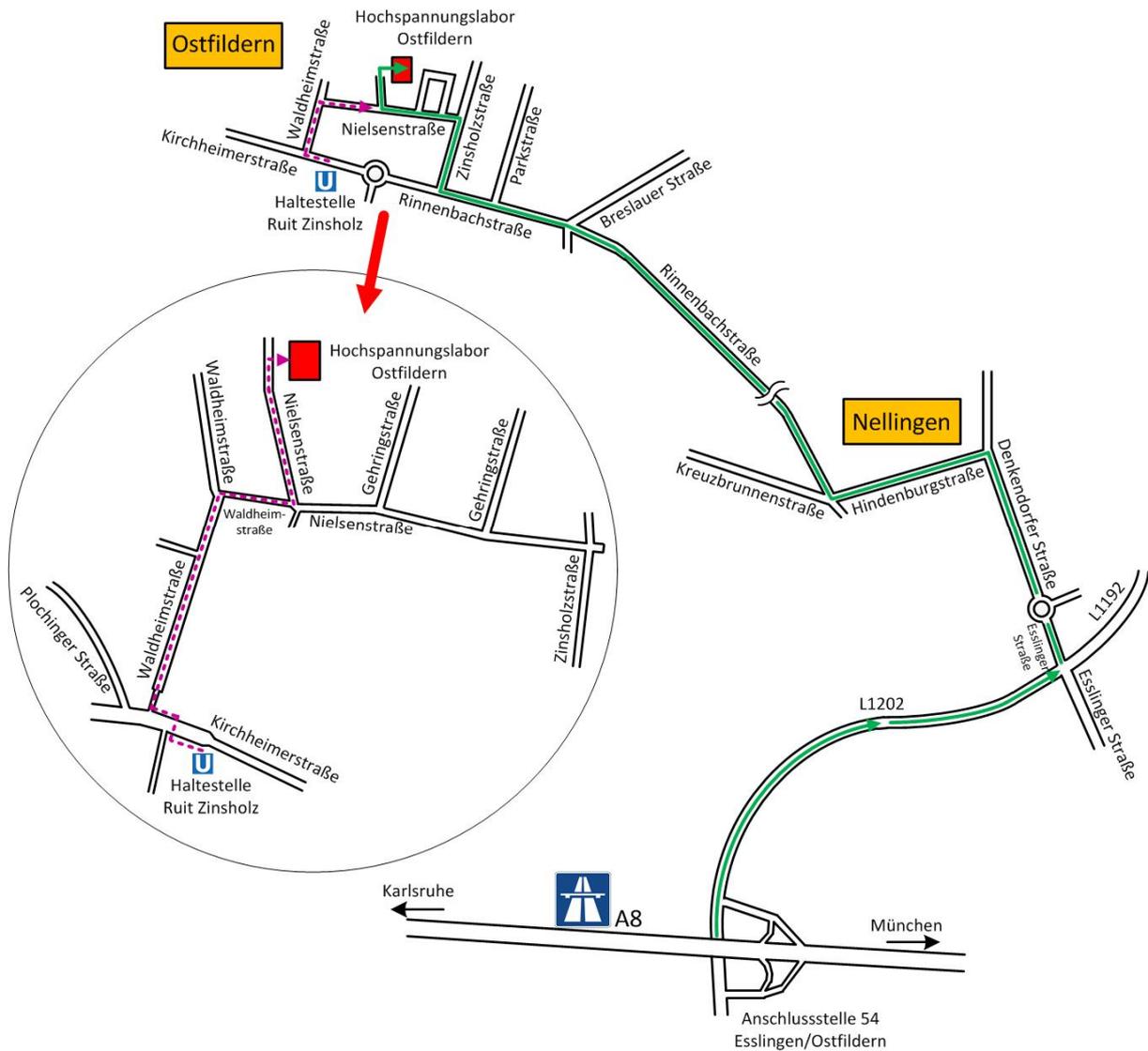


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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)