

INHALT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	8
3.1	VORLESUNGEN	8
3.2	PRAKTIKA.....	14
3.3	EXKURSIONEN	15
3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN.....	16
4.	PROMOTIONEN.....	34
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	40
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	44
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	62
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	110
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	118
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	125
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	129
9.	LAGEPLÄNE.....	131

1. VORWORT

Liebe Freundinnen und Freunde des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

auch im Jahr 2021 hat das Coronavirus uns wieder vor Herausforderungen gestellt. Während im Sommersemester Präsenzlehre noch nicht möglich gewesen ist, konnte das Wintersemester zunächst in hybrider Form beginnen. Leider hat auch im Vorlesungsbetrieb die Omicron-Variante zugeschlagen und im Winter die Lehre im Vorlesungssaal extrem erschwert. Der direkte Kontakt zwischen Institut und Studierenden und insbesondere unter den KommilitonInnen fehlt seit nunmehr vier Semestern. Seit dem Sommer konnte jedoch dank der verfügbaren Impfstoffe unter entsprechenden Hygieneauflagen der Institutsbetrieb teilweise zur Normalität zurückkehren und der Laborbetrieb verstärkt werden. Damit konnten auch in diesem Jahr Studierende ihre Abschlussarbeiten durchführen. Projekttreffen und Konferenzen haben auch in diesem Jahr nahezu ausschließlich online stattgefunden. Das gilt auch für das Stuttgarter Hochspannungssymposium, das am 2. und 3. März 2021 als Webveranstaltung mit über 300 Teilnehmern erfolgreich nachgeholt werden konnte. Für das Jahr 2022 hoffen wir uns alle wieder in der Filderhalle persönlich treffen zu können. Um der Pandemie etwas aus dem Wege zu gehen, haben wir das Symposium von seinem altbekannten Platz im Frühjahr in den Frühsommer auf den 21. und 22. Juni 2022 verlegt.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir trotz der Widrigkeiten auf ein gelungenes Jahr zurückblicken. Es wurden 46 wissenschaftliche Publikationen in Konferenzbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht, die unsere Forschungsaktivitäten eindrucksvoll dokumentieren. Auch in diesem Jahr können wir drei Kollegen zur erfolgreichen Dissertation gratulieren. Simon Eberlein, Daniel Contreras und Simon Eilenberger promovierten zu den Themen *Small-Signal Stability Modeling and Optimization of Microgrids*, *Estimation of Flexibility Potentials in Active Distribution Networks* und *Optimierte Spannungshaltung im Verteilnetz analysiert auf Basis probabilistischer Lastflussrechnungen*.

Als ehemaliger Doktorand unseres Institutes hat Dr. Wilhelmy einen Preis für herausragende Dissertationen des Institutes gestiftet. 2021 wurde erstmalig dieser Preis durch die Dr. Wilhelmy-Stiftung an Dr. Martin Siegel für seine Dissertation „Calibration Methods for Reproducible and Comparable Electromagnetic Partial Discharge Measurements in Power Transformers“ verliehen.

Im Bereich der Projekte konnten wir in 2021 das Projekt i-LIME, das durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert wurde, erfolgreich zum Abschluss bringen. Gleichzeitig haben wir zwei neue Projekte gestartet: BANULA, gefördert durch das Bundeswirtschaftsministerium, sowie ILA-BW mit der Förderung des Umweltministeriums Baden-Württemberg.

Das Jahr 2021 brachte viele personelle Veränderungen am Institut. Unsere erfahrenen MitarbeiterInnen Denis Müller, Ouafa Laribi, Daniel Contreras, Laura Barreau, Saeed

Khandan Sair und Mehran Tahir haben das Institut verlassen. Neu in unserem Team der wissenschaftlichen Mitarbeiter begrüßen wir Lars Baronat, Fatemeh Ahmadipour, Jonas Graf und Nelly-Lee Fischer. Im Sekretariatsbereich haben wir Sabine Janzen, die aber dankenswerterweise weiter unsere ausländischen Mitarbeiter beim Erlernen der deutschen Sprache unterstützt, und Nicole Schärli verabschiedet. Nicole Schärli war uns viele Jahre eine große Stütze. Nach nun weit mehr als 30 Jahren erfolgreichen Wirkens am Institut verabschieden wir sie schweren Herzens und mit großem Dank in den hochverdienten Vorruhestand. Wir freuen uns, für die Buchhaltung Elisabeth Weilandt am Institut begrüßen zu dürfen. Auch ist Janja Schulz, die zwischenzeitlich als internationale Studiengangsmanagerin bei Infotech gearbeitet hat, erfreulicherweise wieder zurück am IEH. Wir wünschen allen ehemaligen IEHlerInnen alles Gute und viel Erfolg bei ihren neuen Beschäftigungen und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit unseren neuen und alten MitarbeiterInnen.

Ein ganz herzlicher Dank gilt auch unserem langjährigen Lehrbeauftragten Dr. Wolfgang Pfaff von der Robert Bosch GmbH, der viele Jahre die Vorlesung Elektromagnetische Verträglichkeit für Elektrofahrzeuge und EMV in der Automobiltechnik gehalten hat. Wir verabschieden Herrn Pfaff in den wohlverdienten Ruhestand. Gleichzeitig freuen wir uns sehr, seinen Nachfolger begrüßen zu dürfen. Zum Sommersemester 2022 übernimmt Dr. Volker Rischmüller die Vorlesung neben seiner beruflichen Tätigkeit als Vice President Engineering (Electromagnetic Compatibility) im Geschäftsbereich Automotive Electronics der Robert Bosch GmbH.

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

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

Für das Jahr 2022 wünschen wir Ihnen Glück, alles Gute und vor allem Gesundheit.

Stuttgart, im Januar 2022

PREFACE

Dear friends!

In 2021, we continued to face a multitude of challenges due to the ongoing coronavirus pandemic. While onsite teaching was not yet possible in the summer semester, we could return to a mix of onsite and online teaching at the beginning of the winter semester. Unfortunately, the winter semester continues to be marked by the dynamics of the COVID-19 pandemic. The Omicron variant made teaching in the lecture hall extremely difficult, so that the direct contact between the institute and students, and especially among the students, was significantly reduced since four semesters now. With progressing vaccination and in compliance with hygiene concepts, the institute operations and the work in the laboratory have slowly but steadily returned to normal. As a result, students have been able to finish their final theses this year as well. Virtual project meetings and scientific conferences became the standard under COVID-19 this year. This also applies to the Stuttgart High Voltage Symposium, which was successfully held online with over 300 participants on March 2 and 3, 2021. For 2022, we hope to be able to meet everyone again in person at the Filderhalle. In response to the pandemic, we have scheduled the symposium from its usual spring date to early summer to June 21 and 22, 2022.

A look back at the past twelve months in our scientific work shows that despite all the adversities, 2021 was also a very successful year. Over 46 scientific publications published in conference proceedings and journals are documenting our current research activities. This year, we can also congratulate three colleagues on their successful dissertation. Simon Eberlein, Daniel Contreras and Simon Eilenberger received their doctorates on the topics *Small-Signal Stability Modeling and Optimization of Microgrids*, *Estimation of Flexibility Potentials in Active Distribution Networks* and *Optimized Voltage Stability in the Distribution Networks Analyzed on the Basis of Probabilistic Load Flow Calculations*.

Dr. Wilhelmy, a former PhD student of our institute, has endowed a prize for outstanding dissertations of the institute. In 2021, The Wilhelmy Science Award was awarded for the first time to Dr. Martin Siegel for his dissertation "*Calibration Methods for Reproducible and Comparable Electromagnetic Partial Discharge Measurements in Power Transformers*".

In the area of projects, we were able to successfully complete in 2021 the i-LIME project, which was funded by the Baden-Württemberg Ministry for the Environment, Climate and Energy Management. At the same time, we launched two new projects: BANULA, funded by the German Federal Ministry of Economics, and ILA-BW with the support of the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg.

In 2021 we had several personnel changes at our institute. Our experienced staff members Denis Müller, Ouafa Laribi, Daniel Contreras, Laura Barreau, Saeed Khandan Sair and Mehran Tahir have left the Institute. In return, we welcome Lars Baronat, Fatemeh Ahmadipour, Jonas Graf and Nelly-Lee Fischer as new members of

our scientific staff. Sabine Janzen has left our secretary. Thankfully she continues to support our foreign staff members in learning German. Nicole Schärli has also left the institute. She was a great support to us for many years. It is with a heavy heart and many thanks that we bid her farewell in her well-deserved early retirement after more than 30 years of successful work at the institute. We are pleased to welcome Elisabeth Weilandt to the institute for the accounting department. Also Janja Schulz, who in the meantime worked as international study manager at Infotech, is fortunately back at the IEH. We wish the former colleagues all the best in their future employment and look forward to collaborating with the new staff members.

We would also like to express our sincere thanks to our lecturer Dr. Wolfgang Pfaff from Robert Bosch GmbH, who held the lecture Electromagnetic Compatibility for Electric Vehicles and EMC in Automotive Engineering for many years. We wish him all the best for his well-deserving retiree.

At the same time, we are very pleased to welcome his successor Dr. Volker Rischmüller. As of the summer semester 2022 he will take over the lecture in addition to his position as Vice President Engineering (Electromagnetic Compatibility) in the Automotive Electronics division at Robert Bosch GmbH.

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

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

Our best wishes accompany you in 2022. May the New Year bring you good health, happiness, and success.

Stuttgart, February 2022

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

e-mail:

vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de

firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de

Telefon / phone:

+49 (0)711-

Institutsleiter /

Head of Institute:

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

-685-67871

Leiter des Fachgebiets Netzintegration erneuerbarer Energien:

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

-685-67872

Prof. im Ruhestand:

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

Lehrbeauftragte:

Dr.-Ing. Wolfgang PFAFF

Robert Bosch GmbH

Dipl.-Ing. Rainer JOSWIG

Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH

Schneider Electric Energy GmbH

Dr.-Ing. Markus PÖLLER

Moeller & Poeller Engineering GmbH

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

Oberingenieure:

Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI

-685-67878

Dr.-Ing. Michael BELTLE

-685-68061

(Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)

Akademische Mitarbeiter /

Scientific Staff:

M. Sc. Fatemeh AHMADIPOUR (ab 1.4.2021)

-685-69194

M. Sc. Lars BARONAT (ab 5.7.2021)

-685-61523

M. Sc. Laura BARREAU (bis 31.12.2021)

M. Sc. Jonas BERTELMANN

-685-69195

M. Sc. Chandra Prakash BEURA

-685-69152

M. Sc. Matthias BUCHNER

-685-67838

M. Sc. Paul BURKHARDT

-685-61735

M. Sc. Daniel CONTRERAS (bis 1.12.2021)

M. Sc. Deepak DEEPAK

-685-67889

M. Sc. Adrian EISENMANN

-685-67867

M. Sc. Markus FISCHER

-685-61525

M. Sc. Heiner FRÜH

-685-69151

M. Sc. Malte GERBER

-685-69168

M. Sc. Jonas GRAF (ab 1.11.2021)	-685-67844
M. Sc. Michaela GRUBER	-685-67868
M. Sc. Manuel HAUG	-685-60832
M. Sc. Chuxuan HE	-685-67857
M. Sc. Saeed KHANDAN SIAR (bis 31.12.2021)	
M. Sc. Ouafa LARIBI (bis 30.4.2021)	
M. Sc. Markus MILLER	-685-67869
M. Sc. Denis MÜLLER (bis 31.1.2021)	
M. Sc. Sharon MÜLLER	-685-67875
M. Sc. Daniel PASSOW	-685-69165
M. Sc. Jan SCHABEL	-685-67874
M. Sc. Tim STREUBEL	-685-69167
M. Sc. Mehran TAHIR (bis 31.12.2021)	
M. Sc. Kathrin WALZ	-685-69196
M. Sc. Philipp WENGER	-685-69177
M. Sc. Zeenat HANIF (ab 1.10.2021)	-685-67844

Sekretariat /
Secretary:

<i>Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:</i>	
Sabine JANZEN (bis 31.3.2021)	
Elisabeth WEILANDT (ab 1.7.2021)	-685-67870
Annette GUGEL	-685-67880
<i>Hochspannungslabor Ostfildern:</i>	
Konstanze LINS	-685-69175

Buchhaltung /
Accounting:

Nicole SCHÄRLI (bis 31.12.2021)	-685-67876
---------------------------------	------------

Technische Angestellte /
Technical Staff:

Muhammed ACAR, <i>Auszubildender</i> (bis 18.1.2021)	
Can AKGÜL, <i>Mechaniker</i>	-685-67847
Erwin BECK, <i>Mechanikermeister</i>	-685-67847
Lothar EHINGER, <i>Elektromeister</i>	-685-61526
Timon GOLD, <i>Zentralwerkstattleiter</i>	-685-67847
Daniel HARTICH, <i>Mechaniker</i>	-685-67847
Michael HERDTLE, <i>Mechaniker</i>	-685-69161
Edona KUQI, <i>Mechanikermeisterin</i>	-685-67847
Benedikt LUSINSKY, <i>Auszubildender</i>	-685-67847
Hartmut RÖNISCH, <i>Elektrotechniker</i>	-685-67856
Christian WÖLZLEIN, <i>IT-Systemkaufmann</i>	-685-67863

Gastwissenschaftler /
Visiting scientists:

Dr. Pradhan Arpan KUMAR, <i>Humboldt-Stipendiat</i> (bis 20.6.2021)	
--	--

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. K. RUDION**DR.-ING. U. SCHÄRLI*****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. W. R. PFAFF***Elektromagnetische Verträglichkeit in der Automobiltechnik
EMV für Elektrofahrzeuge***

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

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

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Vortragsübungen für Studierende zu wechselnden Themen*

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2 PRAKTIKA

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Grundlagenpraktikum

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

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

- *Sicherheitsseminar*
- *Umwandlung und Übertragung elektrischer Energie*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

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.

DR.-ING. U. SCHÄRLI

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

Wegen der Corona-Pandemie konnten nur zwei Exkursionen im Rahmen Vorlesung "Elektrische Verbundsysteme" stattfinden.

13. Juli 2021, ganztägig:

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

20. Juli 2021, ganztägig:

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



Exkursion zum SuedLink Info-Center der TransnetBW in Leingarten

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 01.11.2020 bis 31.10.2021:

Ajorlou, Ghazaleh

Weiterentwicklung einer Methode zur Aggregation von Flexibilitäten in vermaschten Hochspannungsnetzen mit mehreren vertikalen Kopplungsstellen

Die Netzbetreiber sollten den sicheren und stabilen Betrieb der Stromnetze gewährleisten. Mit der zunehmenden Durchdringung des Netzes mit dezentralen Energieanlagen, insbesondere auf den niedrigeren Spannungsebenen, wird diese Aufgabe immer komplexer. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Methoden entwickelt, um die Flexibilitätsbereitstellung in Verteilungssystemen auf aggregierte Weise darzustellen. In dieser Arbeit wird eine Methode zur Aggregation von Flexibilitäten in vermaschten Hochspannungsnetzen mit mehreren vertikalen Kopplungspunkten zum ÜNB erweitert. Die Methode basiert auf einem zuvor entwickelten linearen Aggregationsalgorithmus und ermöglicht die Bewertung der Flexibilitätsbereitstellung von Netzen mit mehreren Kopplungspunkten.

Development of a method for flexibility Aggregation in meshed HV Grids with multiple vertical interconnection points

Grid operators should ensure the secure and stable operation of power systems. With increasing penetration of distributed energy resources in the grid, especially at lower voltage levels, this task becomes more complex. To assist with this, many methods have been developed to represent the flexibility provision within distribution systems in an aggregated manner. In this work, a method for aggregating flexibilities on meshed HV grids with multiple vertical coupling points to the TSO is extended. The method is based on a previously developed linear aggregation algorithm and allows the assessment of the flexibility provision of grids with multiple interconnection points.

Baronat, Lars

Untersuchung niederfrequenter Teilentladungsströme bei frei beweglichen Partikeln in HGÜ-GIS

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Messung niederfrequenter Ströme an frei beweglichen Partikeln in GIS. Dazu wird ein Versuchsaufbau vorgestellt, um diese Ströme in einer realitätsnahen Anlage zu messen. Der mögliche Messbereich erstreckt sich dabei von Strömen unter 1 μA bis zu mehreren mA, in einem Frequenzbereich des Gleichstroms bis über 1 MHz. Durch den verwendeten Zweibereichsshunt ist es außerdem möglich, in zwei unterschiedlichen Messbereichen zeitgleich zu messen. Mittels einer synchronisierten Hochgeschwindigkeitskamera werden anschließend die Bewegungsmuster der Partikel mit den gemessenen Strömen verglichen und Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden Mechanismen der verschiedenen Bewegungsformen gezogen.

Investigation on low frequency partial discharge currents of free moving particles in HVDC GIS

This thesis deals with the measurement of low frequency currents caused by free moving particles in GIS. For this purpose, an experimental setup is presented, which makes it possible to measure these currents inside a realistic environment. The possible measurement range goes from currents lower than 1 μA up to several mA, with a bandwidth from DC up to over 1 MHz. By using a dual range shunt it is possible to measure in two different measurement ranges at the same time. Using a synchronized high-speed camera, the movement patterns are subsequently compared to the measured currents and inferences are drawn to the underlying physical mechanisms behind the movement patterns.

Bersch, Christian

Analyse von Oberschwingungen in industriellen Niederspannungsnetzen im Inselbetrieb.

Diese Arbeit analysiert die Oberwellen im Inselnetz und Verbundnetz an einem Fallbeispiel. Dieses besteht aus 64 parallelgeschalteten dreiphasigen Gleichrichtern, die wahlweise von einem Batteriespeicher oder dem öffentlichen Niederspannungsnetz versorgt werden können. Für die Implementierung wurde das Current-Injection-Modell ausgewählt, um die Oberwellenausbreitung simulativ zu untersuchen. Dazu wurden die Oberschwingungsströme eines Gleichrichters gemessen und für jeden der 64 Gleichrichter über eine konstante Stromquelle in einem MATLAB Simulink Modell dreiphasig eingepreßt. Als Netzimpedanz wurde ein Literaturwert herangezogen, an welchem die Oberschwingungsströme harmonische Spannungen verursachen. Unter diesen Randbedingungen konnte die Stromverzerrung mit einer Genauigkeit von etwa 16 % und die Spannungsverzerrung von etwa 15 % simuliert werden.

Analysis of harmonics in industrial low voltage grids in standalone operation.

This work analyses the harmonics in the stand-alone grid and interconnected grid using a case study. This consists of 64 three-phase rectifiers connected in parallel, which can be supplied either by a battery storage system or the public low-voltage grid. The current injection model was selected for the implementation in order to simulatively investigate the harmonic propagation. For this purpose, the harmonic currents of a rectifier were measured and three-phase injected for each of the 64 rectifiers via a constant current source in a MATLAB Simulink model. A literature reference was used as the mains impedance at which the harmonic currents cause harmonic voltages. Under these boundary conditions, the current distortion could be simulated with an accuracy of about 16 % and the voltage distortion of about 15 %.

Braun, Florian

Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung von Transitflüssen

Ziel dieser Masterarbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung von Transitflüssen in einem 380 kV - 110 kV Netzverbund. Hierzu wurden die relevanten Faktoren der Auswirkungen von Transitflüssen auf einen Netzverbund identifiziert. Die

Bewertung dieser Faktoren entspricht einem multidisziplinären Problem, welches mithilfe von Fuzzy-Logik und einem analytischen hierarchischen Prozess (AHP) basierend auf Expertenwissen gelöst wurde. Die Untersuchungsergebnisse zeigen anhand von mehreren untersuchten Testnetzen und einer realen süddeutschen Netzgruppe, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren eine differenzierte Bewertung von Transitflüssen ermöglicht. Zudem können die Bewertungsergebnisse durch eine ebenfalls entwickelte grafische Oberfläche übersichtlich und einfach dargestellt werden.

Development of a Method for the Evaluation of Transit Power Flows

The goal of this thesis was the development of a method for evaluation of transit power flows in a 110 kV – 380 kV network. This required the identification of relevant factors of the implications of transit power flows on a grid. The evaluation of these factors corresponds to a multidisciplinary problem, which was solved using fuzzy-logic and an analytical hierarchical process (AHP). The examination results show that the developed method facilitates a differentiated evaluation of transit power flows by means of examining multiple test grids and a real German grid. Furthermore, the evaluation results can be displayed, using the additionally developed graphical interface.

Brenner, Marina

Untersuchung und Bewertung zeitweiliger Überspannungen im zukünftigen deutschen Übertragungsnetz

Die Stabilität des deutschen Übertragungsnetzes wird maßgeblich durch die zunehmend umrichterbasierte Erzeugung aus erneuerbaren Energien und die Abschaltung netzgekoppelter Synchrongeneratoren fossiler Kraftwerke beeinflusst. Ein Risiko besteht im großflächigen Erzeugungsausfall aufgrund zeitweiliger Überspannungen. In der Masterarbeit wird dieses Risiko anhand eines Netzmodells und Simulationen im Zeitbereich untersucht und bewertet. Die Spannungen übersteigen nicht die seit 2019 geltenden HVRT-Anforderungen an Erzeugungsanlagen. Die geplante Installation von HGÜ-Systemen und STATCOM reduziert zeitweilige Überspannungen deutlich. Das verbleibende Risiko hängt folglich von der Anzahl an Erzeugungsanlagen ab, die diese aktuellen HVRT-Anforderungen noch nicht erfüllen. Generell wird die Relevanz des Risikos eines Erzeugungsausfalls durch temporäre Überspannungen bestätigt.

Investigation and evaluation of temporary overvoltages in the future German Transmission Network

The stability of the German Transmission Network is affected significantly by the increasing generation from inverter-based power plants using renewable energy sources and the disconnection of synchronous machine-based plants that use energy from fossil fuels. One risk is the large-scale tripping of generation due to temporary overvoltages. In the master's thesis, this risk is assessed with the aid of a power system model and time-domain simulations. The voltages do not exceed the HVRT-requirements that apply to plants built as from 2019. The planned installation of HVDC systems and STATCOM has been found to significantly reduce temporary

overvoltages. The remaining risk depends, therefore, on the amount of generation that does not comply with the relatively new HVRT requirements. In general, the relevance of the risk of a loss of generation due to temporary overvoltages is confirmed.

Burlakin, Ilya

Entwicklung eines automatisierten Netzplanungstools auf Basis einer Partikel-Schwarm-Optimierung für einen optimalen Netzausbau

Die Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO) ist eine erfolgreiche populationsbasierte Metaheuristik zur näherungsweise Lösung kombinatorischer und mehrdimensionaler Optimierungsprobleme. Eine binäre Variante der PSO (BPSO) wird zur Bestimmung eines optimalen Netzausbaus in Verteilnetzen entwickelt. Zur Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit und der Minimierung von Ausbaurkosten, ist ein multikriterieller Entscheidungsprozess zu berücksichtigen. Der resultierende Netzausbau basiert auf den häufigsten Maßnahmen zur Leitungsverstärkung in Verteilnetzen. Eine optimale Parametrierung der BPSO wird ermittelt und trägt zu geeigneten Suchstrategien der Partikel in binären Lösungsräumen bei. Die Funktionsfähigkeit des Verfahrens wird anhand eines 5-Knoten-Testsystems und einer realen Netzgruppe erfolgreich bestätigt. Für komplexe Netztopologien ist ein hoher Rechenaufwand feststellbar.

Development of an Automated Network Planning Tool based on Particle Swarm Optimization for Optimal Network Expansion

Particle swarm optimization (PSO) is a successful population-based metaheuristic for solving combinatorial and multidimensional optimization problems. A binary PSO (BPSO) has been developed to determine optimal distribution network expansion planning (DNEP). The BPSO is used as a multi-objective optimization considering (n-1) contingency and minimum expansion costs. In this regard the network expansion is based on the most common types of overhead line reinforcements in distribution networks. An optimal parameterization is determined and results in a fitting search strategy for binary optimization problems. The application of the developed algorithm to a 5-Bus power system and a real distribution network model illustrates the applicability for practical DNEP. High computational costs can be noticed in complex network topologies.

Eherler, Simon

Aufbau einer Methode zur Betrachtung von (n-2)-Ausfällen unter Berücksichtigung von wetterabhängigen Strombelastbarkeiten

In dieser Arbeit wird eine (n-2)-Ausfallanalyse auf Basis einer linearisierten (n-1)-Ausfallanalyse entwickelt. Diese wird an einem Testnetz sowie an einer realen Netzgruppe getestet. Zudem wurde die Methode validiert und mit den Ergebnissen der Newton-Raphson Methode verglichen. Bis zu einer übertragenen Scheinleistung von 150 MVA ist die Differenz der beiden Methoden gering und die entwickelte Methode somit für (n-2)-Untersuchungen ausreichend genau. Danach wurde versucht, die Anzahl der (n-2)-Ausfälle auf die relevantesten auf Basis der geographischen Distanz zu reduzieren, um die Rechenzeit zu verkürzen. Abschließend wurde die (n-2)-Ausfallanalyse um die Betrachtung der dynamischen Strombelastbarkeiten erweitert.

und an einer realen Netzgruppe angewendet, wodurch die Anzahl der Überlastungen reduziert werden konnte.

Development of a method for considering (n-2)-failures with consideration of weather dependent current ratings

In this work, an (n-2) failure analysis is developed on the basis of a linearized (n-1) failure analysis. This is tested on a test network as well as on a real network group. In addition, the method was validated and compared with the results of the Newton-Raphson method. Up to a transmitted apparent power of 15 MVA, the difference between the two methods is small and the developed method is therefore sufficiently accurate for (n-2) investigations. Afterwards, an attempt was made to reduce the number of (n-2) outages to the most relevant ones based on the geographical distance in order to shorten the calculation time. Finally, the (n-2) outage analysis was extended to consider the dynamic current carrying capacities and applied to a real grid group, which reduced the number of overloads.

Horn, Matthias

Thermische Modellierung von Betriebsmitteln in der Erdschlusskompensation

Bei einem einpoligen Erdschluss im Netz werden spezielle Betriebsmittel zur Kompensation des Fehlers benötigt, damit das Netz weiter stabil betrieben werden kann. Diese Betriebsmittel erwärmen sich während der Kompensation und sind dabei auf einen maximalen Dauerbetrieb von 2 Std. bei Nennlast ausgelegt.

Da in den meisten Fällen die Betriebsmittel allerdings nur im Teillastbereich agieren, sind die Verlustleistung und die dadurch verursachte Erwärmung des Betriebsmittels reduziert. In welchem Umfang sich die zulässige Betriebsdauer dadurch verlängert, ohne dass die obere Öltemperatur den zulässigen Grenzwert übersteigt, war Ziel dieser Untersuchung.

Dazu wurden die Messergebnisse von vorliegenden Warmläufen von Petersen-Spulen und Erdungstransformatoren analysiert. Neben dem vorgeschriebenen Warmlauf bei Nennlast wurden auch Teillast-Warmläufe und eine Abkühlkurve betrachtet. Für beide Betriebsmittel wurde ein thermisches Modell entwickelt und dieses auf dessen Zulässigkeit geprüft. Die thermische Modellierung berücksichtigt hierbei die unterschiedliche Verlustleistungsabhängigkeit von Erdungstransformator und Petersen-Spule.

Thermal modeling of operating assets for earth fault compensation

In the event of a single-pole earth fault in the electrical grid, special equipment is required to compensate for the fault so that the network can continue to be operated in a stable manner. These resources heat up during the compensation and are designed for a maximum continuous operation of 2 hours at nominal load.

However, since in most cases the equipment operates only in the partial load range, the power loss and the resulting heating of the equipment are reduced. The aim of this study was to determine the extent to which the permissible operating time is extended without the upper oil temperature exceeding the permissible limit.

To this end, the measurement results of existing warm runs of Petersen coils and grounding transformers were analyzed. In addition to the prescribed warm-up at nominal load, partial load warm-ups and a cooling curve were also considered. A thermal model was developed for both resources and tested for its acceptability. The thermal model considers the different power loss dependence of the grounding transformer and Petersen coil.

Jiang, Fan

Systemauslegung und 3D-Modellierung eines induktiven Ladesystems für EMV-Untersuchungen

Ziel dieser Arbeit ist, die Störcharakteristik eines induktiven Ladesystems zu erforschen. Dafür wird, basierend auf den vorangegangenen Arbeiten, der Prototyp und das 3D-Modell eines induktiven Ladesystems weiterentwickelt.

Die Ergebnisse der Ausarbeitung zeigen, dass der Prototyp nun bei einer normgerechten Resonanzfrequenz von 86 kHz mit einem höheren Wirkungsgrad von über 90% in Betrieb genommen werden kann und eine Ladeleistung von bis zu 3,6 kW liefert. Die simulativ und messtechnisch bestimmten magnetischen Feldemissionen weisen im betrachteten Bereich von 20 kHz bis 30 MHz eine gute Übereinstimmung auf. Demnach ist es möglich, mithilfe des 3D-Modells qualitative Vorhersagen über die Feldemissionen des Prototyps zu treffen.

System design and 3D modeling of an inductive charging system for EMC investigations

This work aims to research the interference characteristics of the inductive charging system. For this purpose, the prototype and the 3D model of an inductive charging system will be taken based on the previous work, and will be further developed.

The results of this elaboration show clearly that the prototype now can be put into operation at a standard-compliant resonance frequency of 86 kHz with a higher efficiency of over 90% and provides charging power of up to 3.6 kW. The magnetic field emissions determined by simulation and measurement show good agreement in the observed range from 20 kHz to 30 MHz. Accordingly, it is possible to make a qualitative prediction about the prototype's field emissions through the 3D model.

Klein, Dominik

Entwicklung einer Methode zur Kompensation der Störeinflüsse von Harmonischen auf Breitband-Impedanzmessung

Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Messdatensätze so aufbereitet werden können, dass die Netzimpedanz trotz Oberwellenverzerrung zuverlässig bestimmt werden kann. Die Methode wurde auf ein Dreiphasen-Wechselstrommodell übertragen und getestet. Die vorgestellte Methode wurde auf einen realen Datensatz angewandt. Es konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Verfahren Messdatensätze so aufbereitet und verbessert, dass daraus die Netzimpedanz zuverlässig bestimmt werden kann - sowohl in Simulationen als auch im praktischen Einsatz.

Development of a method to compensate the distorting effects of harmonics on broadband impedance measurement

A method was developed with which measurement data records can be processed in such a way that the network impedance can be reliably determined despite harmonic distortion. The method was transferred to a three-phase AC model and tested. The presented method was applied to a real data set. It could be shown that the presented method processes and improves measurement data records in such a way that the network impedance can be reliably determined from them - both in simulations and in practical use.

Li, Yang

Auto-Tuning der Gewichtungsfaktoren eines WLS Zustandsschätzers für Verteilnetze auf Basis von Messdaten

In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur automatischen Anpassung von Gewichtungsfaktoren durch die Verwendung eines genetischen Algorithmus (GA) beschrieben, die bei der Weighted Least Squares (WLS) Zustandsschätzung verwendet werden. Da die Gewichte mit den entsprechenden WLS-Schätzergebnissen in Beziehung stehen, wird die Genauigkeit der Zustandsschätzungsergebnisse verwendet, um die Wirksamkeit des vorgeschlagenen genetischen Algorithmus zu testen und zu überprüfen. Um die Genauigkeit der Zustandsschätzungsergebnisse zu bewerten, werden Messdaten verwendet. Die Untersuchungen werden in einem realen deutschen Niederspannungsnetz mit einer begrenzten Anzahl von Validierungsmessungen durchgeführt.

Auto-tuning of the weighting factors of a WLS state estimator for distribution networks based on measurement data

This paper describes an approach for automatically tuning measurement weights used in weighted least squares (WLS) state estimation through usage of a genetic algorithm (GA). Since the weights are related to the corresponding WLS estimation results, the accuracy of the state estimation results is used to test and verify the effectiveness of the proposed genetic algorithm. In order to evaluate the accuracy of the state estimation results, measurement data is used. The studies are conducted in a real German low-voltage system with a limited amount of validation measurements.

Klötzl, Nico

Impedanzanalyse in industriellen Niederspannungsnetzen.

In dieser Arbeit wurden Resonanzen und Instabilitäten an einem Versuchsstand in der ARENA 2036 untersucht. Ein elektrisches Testnetz konnte dabei entweder über das externe Netz oder einen Batteriespeicher im Inselnetzbetrieb versorgt werden. Außerdem wurde auf die Modellierungsmöglichkeiten nichtlinearer aktiver Netzelemente eingegangen. Das reduced-order Modell stellt ein recheneffizientes single input single output-Modell dar, welches zur Modellierung des Batterieumrichters verwendet wird. Mithilfe des Nyquist Kriteriums kann daraufhin systematisch die Stabilität des Netzes unter Variation des Leistungsbezugs der Verbraucher, der Anzahl der Verbraucher, einem Vergleich zwischen detailliertem und aggregiertem

Netzmodell sowie einer genaueren Betrachtung der dämpfenden Eigenschaften der Verbraucher untersucht werden.

Impedance analysis in industrial low voltage grids.

In this thesis, resonances and instabilities were investigated on a test stand in the ARENA 2036. An electrical test grid could be supplied either via the external grid or a battery storage system in isolated grid operation. In addition, the modelling possibilities of non-linear active network elements, which can be divided into SISO models and MIMO models, were discussed. The reduced-order model is a computationally efficient SISO model that is used to model the battery inverter. With the help of the Nyquist criterion, the stability of the grid can then be systematically investigated by varying the power reference of the loads, the number of loads, a comparison between detailed and aggregated grid models and a closer look at the damping properties of the loads.

Kovacheska, Mihaela

Entwicklung eines Abrufkonzeptes zur netzdienlichen Steuerung von Flexibilitäten durch die überlagerte Netzebene

Es wurde ein Abrufkonzept für Flexibilität aus Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speichereinrichtungen im überlagerten Netz entwickelt. Mit diesem Konzept werden flexible dezentrale Anlagen netzorientiert gesteuert, um Systemdienstleistungen im überlagerten Netz bereitzustellen. Im Rahmen der Arbeit wird die Umsetzung von Engpassmanagementmaßnahmen mit Flexibilität der unterlagerten Netze untersucht. Das Abrufkonzept basiert auf zwei aufeinander aufbauenden Optimierungsproblemen. Einem, um die neuen Betriebspunkte für den Stromaustausch mit den unterlagerten Netzen zu bestimmen, um den Engpass zu lösen. Danach werden die Betriebspunkte der einzelnen flexibel bereitstellenden Einheiten optimiert.

Development of a retrieval concept from overlayered grids for grid-supporting control of flexibilities

A retrieval concept for flexibility from generation, consumption and storage facilities in underlying grids was developed. With this concept, flexible decentralized plants are controlled in grid-oriented way in order to provide ancillary services in the overlying grid. In the scope of the work the implementation of congestion management measures with flexibility of underlying grids is investigated. The retrieval concept is based on two consecutive optimization problems. One to determine the new operating points for the power exchange with the underlying grids in order to solve the congestion. And a second optimizes the operating points of the individual flexibly providing units.

Kreizer, Linda

Datenbasierte Analyse zur Lösung von Herausforderungen im Niederspannungsnetz aufgrund der Energie- und Verkehrswende

Data-based analysis to address the challenges in the low-voltage grid due to the energy and traffic turnaround

Lißner, Nikola-Jonathan

Modellierung des Verbrauchs elektrischer Lkw zur Bestimmung des Energiebedarfs und der Netzauswirkungen einer elektrischen Großstadtbelieferung

In dieser Arbeit wurde zur Kompensation der oft ungenauen Herstellerangaben zu Verbrauch und Reichweite elektrischer Nutzfahrzeuge ein Fahrzeugmodell in MATLAB/Simulink erstellt. Durch die Integration der simulierten Verbrauchswerte in ein Modell des Transportverkehrsaufkommens im Raum Stuttgart konnte beispielhaft der Energie- und Ladebedarf einer vollelektrifizierten Stadtbelieferung ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen neben den großen Herausforderungen einer elektrischen Stadtbelieferung an bestehende Energieinfrastrukturen auch vielfältige Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energie- und Ladebedarfs. Der modulare Aufbau der entwickelten Modelle ermöglicht eine gute Skalierbarkeit und Anpassung an zukünftige Entwicklungen. Die Ergebnisse dieser Arbeit können dem Aufbau umfassender Modelle elektrifizierter Transportkonzepte dienen.

Modelling of the Consumption of Electric Trucks to determine the Energy Demand and the Effects on the Electricity Grid of an electric City Supply.

Due to inaccurate manufacturer's data on consumption and range of electric utility vehicles, this work provides a MATLAB/Simulink based vehicle model. By integrating the simulated consumption values into a model of the transport traffic volume in Stuttgart, the energy and charging requirements of an electrified urban transport concept can be determined. The results illustrate both the challenges to the existing energy infrastructure and a multitude of possible measures for the reduction of energy and charging demands. The modular structure of the developed models enables scaling and adaptation to future developments.

Müller, Artur

Anwendung eines RL-Algorithmus zur Verringerung von Netzurückwirkungen auf verschiedene Netztopologien.

Diese Arbeit umfasst die Einbindung der Netztopologie eines realen elektrischen Netzes in ein bestehendes Reinforcement Learning (RL) Framework. Der Agent des RL-Frameworks wird mit Hilfe von unterschiedlichen Einsatzplänen der Industriemaschinen trainiert und lernt über das Feedback der Umgebung selbst Einsatzpläne zu erstellen. Mit diesen sollen die integrierten Industriemaschinen so gesteuert werden, dass eine Verbesserung der Power Quality im Maschinenpark begünstigt wird. Die Implementierung der Netztopologie erfolgt anhand eines dreiphasigen Netzmodells. Bei der Integration des Netzmodells kommt es zu einer erheblichen Erhöhung der Rechenlast. Die Zielsetzung der Arbeit ist daher die Implementierung eines anwendbaren Netzmodells und die Reduzierung der Rechenlast.

Application of a RL-Algorithm for Power Quality Mitigation in Different Grid Topologies.

This thesis comprises the integration of a realistic grid topology into an existing Reinforcement Learning (RL) framework. The agent of the RL-framework is trained

with operation plans of industrial machines, that are part of the industrial grid. The RL-framework's environment teaches the agent how to create new operation plans. The operation plans are to be used in the controlling of the machines, so that the power quality in the industrial grid improves. The integration of the grid topology is done via a three-phase grid model. The result of the grid implementation is a considerable increase in computational effort. Thus, the condition for a practical implementation of the RL-framework is a tremendous reduction of the computational effort.

Ney, Fabian

Konzeption eines Bilanzkreismonitorings unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Redispatch 2.0 und des grenzüberschreitenden Kapazitätshandels auf die Bilanzkreistreue

Conceptual Design of a Balancing Group Monitoring Considering the Effects of Redispatch 2.0 and Cross-Border Capacity Trading

Pesler, Daniel

Inferenz industrieller Datenanalytik anhand realer Netzqualitätsproblestellungen.

Diese Arbeit befasste sich mit der Zeitreihenprognose durch das Modell des langen Kurzzeitgedächtnisses. Die zu prognostizierenden Zeitreihen bestehen aus Strom- und Spannungsverläufen aus den Lastverläufen einer Stromtankstelle. Ziel der Prognose der Zeitreihen ist die Detektion und Klassifikation von Power-Quality-Fehlerfällen. Grundlegende Probleme liegen in den stochastischen Signalanteilen dieser Strom- und Spannungsdaten, welche nicht prognostizierbar sind. Am Ende dieser Analyse wurde ein skalarer Kennwert evaluiert, um die Prognostizierbarkeit des Datensätzen abzuschätzen. Ein weiteres Ziel der Arbeit war die Validierung dieses Kennwertes durch Ansätze des unüberwachten Lernens.

Inference of industrial data analytics based on real Power Quality problems.

This thesis dealt with time series forecasting by LSTMs. The time series to be predicted comprises current and voltage trends from the load curves of an electricity charging station. The objective of forecasting the time series is the detection and classification of power quality events. Fundamental problems are caused by stochastic signal components of the current and voltage data, which cannot be predicted. At the end of this analysis, a scalar characteristic value was used to estimate the predictability of the data set. A further objective was to further validate this parameter using unsupervised learning approaches.

Sauter, Johannes

Untersuchungen zur transienten Stabilität im zukünftigen deutschen Übertragungsnetz

Investigations on transient stability in the future German Transmission Grid

Singer, Bernd

Implementierung und Analyse von Modellen für das Betriebsmittelmonitoring zur Steigerung der Übertragungskapazität in 110 kV Netzen

Die vorliegende Arbeit präsentiert die Auswirkungen äußerer Wetterbedingungen (Umgebungstemperatur, Wind, Sonneneinstrahlung) auf die maximal zulässige Übertragungskapazität von Freileitungen, Kabeln und Transformatoren in der Verteilnetzebene. Durch den Einbezug von Wetterdaten soll die Übertragungskapazität der Betriebsmittel erhöht werden, um zukünftige Maßnahmen für einen Netzausbau zu reduzieren. Hierfür werden die Modelle zur Bestimmung der Strombelastbarkeit nach dem CIGRE-Standard (Freileitungen), IEC 60 287 (Kabel) und IEC 600076-7 (Transformator) aufgebaut und analysiert. Die Berücksichtigung von äußeren Wettereinflüssen führt zu einer Reduzierung der überlasteten Leitungen bzw. Transformatoren im betrachteten Netzgebiet. Diese Arbeit zeigt den Nutzen von zukünftigen Monitoring-Maßnahmen, um die Übertragungskapazität im Verteilnetz zu erhöhen.

Implementation and Analysis of Models for HV Equipment Monitoring to increase the Transmission Capacity in 110 kV Grids

This paper presents the effects of external weather conditions (ambient temperature, wind, solar radiation) on the maximum allowable transmission capacity of overhead lines, cables, and transformers in the distribution network level. By including weather data, the transmission capacity of the operating resources is to be increased to reduce future measures for grid expansion. For this purpose, the models for determining current carrying capacity are built and analyzed according to the CIGRE standard (overhead lines), IEC 60 287 (cables) and IEC 600076-7 (transformer). The consideration of external weather influences leads to a reduction of overloaded lines and transformers in the considered network area. This work shows the benefit of future monitoring measures to increase the transmission capacity in the distribution network.

Supa Stölben, Inti Runa

Untersuchung der EMV beim Laden von Elektrofahrzeugen

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

Investigation of EMC during charging of electric vehicles

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

Tu, Ning

Leitungsmodellierung für die Simulation von Bussystemen im Fahrzeug

Um Bussysteme hinreichend genau in der Fahrzeugumgebung simulieren zu können, werden genaue Leitungsmodelle benötigt. In einem solchen Leitungsmodell werden unter anderem Einflussfaktoren wie der Skin-Effekt und dielektrische Verluste berücksichtigt. In dieser Arbeit werden ein bestehender Messaufbau und Beschreibungsmodelle für Kabel erweitert. Unter anderem wird der Einfluss der Umgebungstemperatur in das bestehende Modell mitaufgenommen.

Line Modelling for the Simulation of Bus Systems in Vehicles

In order to be able to simulate bus systems with sufficient accuracy in the vehicle environment, accurate line models are required. In such a cable model, influencing factors such as the skin effect and dielectric losses are taken into account. In this work, an existing measurement setup and description models for cables are extended. Among other things, the influence of the ambient temperature is included in the existing model.

Wackenhut, Norbert

Dynamische Betrachtung der thermischen Strombelastbarkeit von Freileitungen

In dieser Masterarbeit erfolgt eine Untersuchung von Freileitungen in Bezug auf die Temperaturentwicklung des Leiterseils sowie den äußeren Einwirkungen, welche die Leiterseiltemperatur beeinflussen. Anhand eines theoretischen Modells zur Bestimmung von Strombelastbarkeiten werden Leitertemperaturen berechnet, die von Strömen, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen sowie Sonneneinstrahlungen und Umgebungstemperaturen beeinflusst werden. Ziel dieser Masterarbeit bildet dabei die Vorhersage der Leitertemperatur von Freileitungen, um auf Ausfälle und Zuschaltungen von Betriebsmitteln im Netz schneller reagieren und damit nicht nur einen sicheren Netzbetrieb gewährleisten zu können, sondern auch eine effizientere Nutzung der bestehenden Transportkapazitäten zu erreichen. Hierzu wird ein Entwurf auf Grundlagen der kurativen Netzbetriebsführung veranschaulicht.

Dynamic consideration of the thermal current rating of overhead lines

In this master thesis, an investigation of current-conducting overhead lines was performed with regard to the temperature development of the conductor rope as well as the influences that affect the conductor rope temperature. Based on a model for the determination of current load capacities, conductor temperatures were calculated. Both of these parameters are affected by currents, wind speeds and wind directions as well as solar radiation and ambient temperatures. The aim of this study is to elaborate a theoretical model for the calculation and therefore systematic prediction of the conductor temperature of overhead lines. The use of this model is intended to enable a rapid response to thermally induced failures of overhead lines. Additionally, it should provide not only a safe network operation, but also to achieve a more efficient use of the existing transport capacities. For this purpose, a design based on curative network management was simulated.

Zhang, Hailun

Untersuchung der Einflussparameter bei Emissionsmessungen nach CISPR 25

Die Weiterentwicklung in der Automobilelektronik hat zu einer steigenden Anzahl an Bussystemen in Steuergeräten geführt. Was den Messaufbau für Emissionsmessungen dieser Komponenten komplex macht. Dies bedeutet, dass nicht mehr der in der Norm CISPR 25 vorgegebene Messaufbau verwendet werden kann. In dieser Arbeit werden die Emissionen verschiedener Messaufbauvarianten verglichen, mit dem Ziel Einflussfaktoren auf die abgestrahlte Feldstärke zu finden.

Investigation of the influence parameters in emission measurements according to CISPR 25

Further development in automotive electronics has led to an increasing number of bus systems in control units. Which makes the measurement setup for emission measurements of these components complex. This means that the measurement setup specified in the CISPR 25 standard can no longer be used. In this work, the emissions of different measurement setups are compared with the aim of finding influencing factors on the radiated field strength.

Zhu, Yuxin

PD measurement of the inverter-fed electrical machine with UHF sensor and HFCT

This paper focuses on the influence of pulse width modulated (PWM) power supply parameters on partial discharge (PD) activities. High Frequency Current Transformer (HFCT) and Ultra-High Frequency (UHF) sensor combined with filter and wavelet denoise techniques are used to evaluate the PD activity of the insulation system of an inverter-fed electrical machine with hairpin windings under different PWM parameters (e.g., duty cycle, switching frequency and rise time). Firstly, the time domain and frequency domain characteristics of the switching noise of power supply and PD signals obtained by HFCT and UHF are analyzed. Spectrum analysis is conducted to determine the cutoff frequency of the high-pass filter to obtain the PD signal. The measurements are performed on a hairpin sample, and the partial discharge inception

voltage (PDIV) under different PWM parameters and environment parameters are recorded to analyze the influence of these parameters on PDIV. Then, measurements are carried out on the stator to analyze the PD activity on stator winding.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 01.11.2020 bis 31.10.2021:

NAME	THEMA
Affar, Ayoub	Ausbreitung von hochfrequenten Signalen in gasisolierten Schaltanlagen. Propagation of high-frequency signals in gas-insulated switchgear.
Alhameed Soubar, Abed	Untersuchung der gesamten harmonischen Verzerrung (THD) einer induktiven Ladestraße am Netzanschlusspunkt anhand eines Simulationsmodells. Investigating the total harmonic distortion (THD) of an inductive charging road at the grid connection point using a simulation model.
Arteaga Garcia, Pablo (*)	Modelling and Simulation of Virtual Synchronous Machine for Smart Grids Application.
Böhringer, Dennis	Weiterentwicklung einer Methodik zur Integration von Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr in die Stromnetzplanung. Development of a Methodology for Integrating Electric Mobility in Commercial Transport into Grid Planning.
Bosch, Michael	The measurement and analysis of the partial discharge of the motor with hairpin winding.
Bouhlel, Mohamed Amine	Teilentladungsdiagnostik an Partikeln auf freiem Potential in HGÜ-GIS. Partial Discharge Diagnostic on Floating Particles in HVDC-GIS.
Braun, Florian (*)	Evaluierung von 3D-Kopplungsmodellen passiver Filterbauelemente. Evaluation of 3D coupling models of passive filter elements.
Christl, Dominik (*)	Untersuchung verschiedener Kontaktwerkstoffe in Vakuumschaltern. Investigation of different contact materials in vacuum interrupters.
Dangelmeyr, Maximilian	Implementierung einer Schnittstelle in Python zur Impedanzmessung mittels eines Linearverstärkers. Implementation of an interface in Python for impedance measurement using a linear amplifier.
Demartin, Elias (*)	Entwurf und Analyse eines verteilten Regelalgorithmus zur Verringerung der Netzbelastung. Design and analysis of a distributed control algorithm for grid load reduction.
Dölzer, Niclas	Impedanzmessung von elektrischen Maschinen im aktiven Betrieb.

	Impedance Measurement of Electrical Machines in Active Operating Condition.
Epple, Simon (*)	Optimierung des netzdienlichen Einsatzes von Flexibilitäten in Niederspannungsnetzen mittels Maschine Learning. Optimisation of the operation of flexibilities in low-voltage grids using machine learning.
Erb, Jonathan (*)	Implementierung und Bewertung einer Zustandsprognose für ein reales Niederspannungsnetz. Implementation and evaluation of state prediction for a real low voltage system.
Fink, Tobias	Simulation der Emissionsmessung eines Wechselrichters nach CISPR 25. Simulation of the emission measurement of an inverter according to CISPR 25.
Fischer, Nelly-Lee (*)	Weiterentwicklung eines Quotenmodells zur netzdienlichen Nutzung von Flexibilitäten im Verteilnetz. Development of a grid-friendly quota model to facilitate the use of flexibility in distribution grids.
Fröschle, Lisa	Simulative Systemanalyse eines DC-Industrienetzes. Simulative system analysis of an industrial DC grid.
Glitsch, Fabian	Überprüfung der Eignung von Live-Verkehrsdaten für die Integration von Elektromobilität in Netzbetrieb und -planung. Analysis of Live Traffic Data for the Integration of Electric Mobility in Grid Operation and Planning.
Göhring, Fabian (*)	Entwicklung des Blindleistungsverhaltens im Verteilnetz der Netze BW. Development of reactive power behavior in the distribution grid of Netze BW.
Goldmann, Rafael (*)	HF Impedanzmessungen von KfZ-Traktionsbatterien und Entwicklung einer passiven Lastnachbildung für EMV-Emissionsmessungen. HF impedance measurements of automotive traction batteries and development of a passive load replication for EMC emission measurements.
Gu, Yuqiang (*)	EMV-technische Untersuchung von Rogowski-Sensoren für den Netzschutz. EMC Investigation of Rogowski Sensors for Grid Protection.
Heber, Tatiana (*)	Small-signal Modelling of Power Converters for Smart Grids Applications
Jiang, Jing (*)	Partial discharge of the electric vehicle traction motor with the hairpin winding.
Johann, Achim	Analyse von Power Quality Ereignissen in Messdaten mittels Unsupervised Learning. Analysis of power quality events in measurement data using unsupervised learning.
Kasrawi, Mohammad A.M.	Design of Converters for a Multi-Machine System.
Klein, Dominik	Auswirkung verschiedener Randbedingungen auf die Resynchronisation von inverterbasierten Microgrids.

	Effect of different boundary conditions on the resynchronization of inverter-based microgrids.
Kovacs, Christian (*)	Entwicklung einer SiC-MOSFET Kaskade. Development of a SiC-MOSFET cascade.
Kube, Daniel	Bestimmung und Regionalisierung des Ladebedarfs einer Elektrifizierung des deutschen Wirtschaftsverkehrs anhand von Kartendaten. Charging demand determination and regionalization of an electrified German commercial transport based on cartographic data.
Liu, Xi (*)	Impact of Power Electronics Converters on Power System Dynamics.
Malz, Janina	Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren des Heimladens elektrischer Pkw für die Netzplanung und deren Verifizierung mit Ergebnissen aus Reallaboren. Determination of Home Charging Simultaneity Factors for Grid Planning and their Verification with Results from real Laboratories.
Makiatu, Muhammad Arrayyaan	Modeling and Simulation of Synchronverter for Smart Grid Applications.
Mathes, Lukas	Untersuchung der Auswirkungen auf die MS-Netze bei einer Zunahme von erneuerbaren Energien, Elektromobilität und Wärmepumpen. Analysis of the effects on the MV-grids of an increase in renewable energies, electromobility and heat pumps.
Maute, Felix	Untersuchung der Eigenschaften von DC-Lichtbögen. Investigation of the properties of DC arcs.
Ney, Fabian (*)	Approximierung fehlender MaBiS Zeitreihen zur täglichen Bewertung von Bilanzkreisen. Approximation of missing MaBiS time series for the daily evaluation of balancing groups.
Oetoyo, Anisatur Rizqi	Modelling of Grid-tied Converters with DC-side Dynamics.
Pflästerer, Luca	Entwicklung einer Regelschleife zur Optimierung des Wirkungsgrads bei induktiven Kfz-Ladesystemen. Development of a control loop for efficiency optimization in inductive charging systems.
Popal, Matin	Vergleich verschiedener Ladestandards in Bezug auf Schutzfunktionen Comparison of different charging standards in terms of protective functions.
Rebholz, Samuel	Simulation und Regelung eines Inselnetzes mit SOFCs (Solid Oxide Fuel Cell) zur zuverlässigen Versorgung eines Data Centers. Simulation and control of an island network with SOFCs (Solid Oxide Fuel Cell) for reliable supply of a data center.
Rettenberger, Tobias (*)	Hybride Zustandsschätzung im 110 kV-Netz. Hybrid State Estimation for a 110 kV Grid.
Sakac, Melanie	Entwurf von Wechselrichtern für Smart Grid-Anwendungen. Design of Converters for Smart Grid Applications.
Schroeder, Jakob Joel	Entwicklung eines intelligenten Batteriemanagementsystems

	Development of an intelligent battery management system
Schwarz, Daniel (*)	Vergleich verschiedener Ladestandards in Bezug auf Schutz- und Überwachungsfunktionen. Comparison of different charging standards with regard to protection and monitoring functions.
Sow, Bassirou	Machbarkeitsanalyse des Einsatzes von Brennstoffzellen-Lkw im deutschen Fernverkehr vergleichend zur alternativen Nutzung von Oberleitungs-Lkw. Feasibility study of the use of fuel cell trucks in German long-distance transport compared to the use of overhead line trucks.
Sulejmani, Emir	Entwicklung und Aufbau eines Frequenz-Tracking-Systems für die optimale Arbeitspunkteinstellung bei induktiven KFZ-Ladesystemen. Development and setup of a frequency tracking system for optimal operating point adjustment in inductive automotive charging systems.
Tausk, Jan	Aufbau eines Hochfrequenz-FEM-Modells einer E-Maschine. Design of a High-Frequency FEM Model of an Electric Machine.
Tozan, Emre	Anwendung von Deep Learning Methoden in der Zustandsbewertung von Leistungstransformatoren. Application of Deep Learning Algorithms in the Condition Assessment of Power Transformers.
Tran, David (*)	Geberfreie Regelung einer Permanentmagneterregten Synchronmaschine. Sensorless Control of a Permanent Magnet Synchronous Machine.
Wenjie, Fan	Lokalisierung von Teilentladungsquellen in Leistungstransformatoren mithilfe einer TDOA-Datenbank. Localization of Partial Discharge Sources in Power Transformers using a TDOA Database.
Wissel, Henrik	Entwicklung eines Modells in Matlab Simulink zur Analyse der Einflussfaktoren auf den Verbrauch elektrischer Fahrzeuge und deren Ladeverhalten. Development of a Model in Matlab Simulink to analyse the Factors which affect Electric Vehicle Consumption and Charging Behavior.
Wurth, Caroline (*)	Entwicklung eines Tools zum optimierten Netzausbau anhand von Planungsprämissen. Development of a tool for optimized grid expansion based on planning premises.
Zhang, Zhongran (*)	Weiterentwicklung einer EMV-Prüfsoftware. Further Development of an EMC Test Software.
Zollmarsch, Catharina (*)	Analyse der Spannungen eines Verteilnetzes unter Anwendung von Performanceindizes. Analysis of the voltages in a distribution network based on performance indices.

4. PROMOTIONEN

■ **Modellierung und Optimierung der Kleinsignalstabilität von Mikronetzen**

M. Sc. Simon Eberlein

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. D. Westermann

TU Ilmenau

Tag der mündlichen Prüfung:

15.06.2021

Die zunehmende Integration erneuerbarer Energien führt zu neuen Herausforderungen für elektrische Energienetze. Mikronetze sind eine Blaupause für zukünftige elektrische Netze mit einem hohen Anteil an verteilten Erzeugungsanlagen und geringer synchroner Erzeugung. Diese Arbeit behandelt die Kleinsignalstabilität von Mikronetzen im Inselbetrieb.

Die Modalanalyse wird als geeignete Methode zur Bewertung der Stabilität herangezogen, auf Grund der größeren Flexibilität im Vergleich zu anderen Ansätzen, wie beispielsweise der Impedanzmethode. Modelle von Wechselrichtern, Diesel-Synchronmaschinen und Windturbinen mit doppelt-gespeister Asynchronmaschine sowie deren netzbildende oder netzstützende Regelkonzepte werden implementiert. Die Mikronetze werden im dq0-Referenzsystem modelliert, um die numerische Effizienz zu erhöhen, ohne die Genauigkeit des Modells zu beeinträchtigen, sowie um stabile Betriebspunkte und die Linearisierung zu ermöglichen.

Ein evolutionärer Algorithmus, der speziell auf Optimierungsprobleme mit rechenintensiven Fitnessfunktionen zugeschnitten ist, wird entwickelt. Der evolutionäre Algorithmus wird dazu verwendet, die Reglerparameter in verschiedenen Szenarien, von kleinen Mikronetzen mit wenigen Knoten bis hin zu großen Benchmark-Systemen, zu optimieren.

Es wird gezeigt, dass Mikronetze, welche durch netzbildende Wechselrichter dominiert werden, sehr stabil sind, wenn sorgfältig ausgelegte und optimierte Regler verwendet werden. Die Verwendung einer virtuellen Impedanz ist von entscheidender Bedeutung für die Stabilität. Der Einfluss verschiedener Varianten und Erweiterungen der Droop-Regelung, welche in der Literatur zu finden sind, ist dagegen vergleichsweise gering.

Unter realistischen Bedingungen, d.h. mit den optimierten Parametersätzen, werden anschließend Ansätze zur Modellreduktion validiert bzw. überprüft. Es zeigt sich, dass die Vernachlässigung der inneren Spannungs- und Stromregelschleifen von netzbildenden Wechselrichtern, welche in der Literatur häufig vorzufinden ist, wegen des Einflusses der Spannungsregelschleife keine gültige Vereinfachung ist. In dieser Arbeit wird stattdessen ein Modell fünfter Ordnung hergeleitet, welches die dominanten Modi nahezu unbeeinflusst lässt.

■ **Small-Signal Stability Modelling and Optimization of Microgrids**

M. Sc. Simon Eberlein

The growing penetration of power systems with distributed energy resources entails new challenges for power systems. Microgrids are a model of future low inertia power systems due to the large share of distributed energy resources. This work focuses on the small-signal stability of islanded microgrids.

Modal analysis is selected as the most appropriate method to assess the stability of microgrids due to its enhanced flexibility compared to other approaches, such as the impedance method. Models for inverters, diesel synchronous machines and wind turbines with doubly-fed induction generators with grid-forming and grid-supporting droop controllers are implemented. Microgrids are modelled in the dq0 reference frame to enhance the numerical efficiency without losing accuracy and to establish stable operating points for linearization and modal analysis.

An evolutionary algorithm tailored to optimization problems with a computationally intensive fitness evaluation is proposed. The evolutionary algorithm is used to optimize the controller parameters in various scenarios, ranging from small microgrids with only a few nodes to large benchmark microgrids.

It is shown that microgrids dominated by grid-forming inverters are very stable systems if well-designed and if optimized controllers are used. In particular, the implementation of a virtual impedance is crucial for the stability. The impact of droop control variants and extensions found in literature, such as the transient or frame transformation droop, is small in comparison. Furthermore, the share of synchronous machines in the microgrid has a strong influence on the stability and the optimized values of the controller parameters.

Model order reduction approaches are reviewed and validated under realistic condition, i.e. using the optimized parameter sets. It is seen that the neglect of the inner voltage and current control loops of grid-forming inverters, as often applied in literature, is not a valid assumption due to the influence of the voltage controller. Instead, a fifth order model is proposed in this work, which is shown to preserve the dominant modes. Simplifying the network lines with the phasor model or a first order Taylor expansion is feasible in LV networks due to the low time constants of LV lines.

Finally, the impact of inaccurate synchronization of the microgrid at the transition from islanded to grid-connected mode of operation is investigated. The loadings of microgrid components are particularly large when the voltage angles are not aligned in the moment the breaker closes. The impact of frequency or magnitude deviations is comparatively low.

■ **Ermittlung von Flexibilitätspotenzialen in aktiven Verteilnetzen**

M. Sc. Daniel Alfonso Contreras Schneider

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik

Universität Bremen

Tag der mündlichen Prüfung:

04.10.2021

Das Ersetzen von konventionellen Kraftwerken durch eine Vielzahl verteilter Energieerzeugungsanlagen in den Mittel- und Niederspannungsnetzen stellt große neue Herausforderungen für Planungs- und Betriebsprozesse von Verteilnetzen dar. Einige wenige konventionelle Kraftwerke zu steuern, erfordert deutlich weniger Ressourcen, als der Betrieb einer Vielzahl dezentraler Anlagen, um deren Flexibilität für Netzdienstleistungen zu nutzen. Die meisten Netzdienstleistungen werden jedoch auf der Übertragungsnetzebene benötigt, so dass ein vertikaler Stromtransport notwendig ist, was neue Methoden erfordert, um zu quantifizieren, wie viel Flexibilität auf der Verteilnetzebene bereitgestellt werden kann.

Die Feasible Operation Region (FOR) ermöglicht die Erfassung des aggregierten Flexibilitätspotenzials von DEA innerhalb von Verteilnetzen, wobei die technischen Restriktionen sowohl der Anlagen als auch des Netzes berücksichtigt werden.

Diese Arbeit schlägt eine neuartige Methode zur Berechnung der FOR vor, die LFA-Methode (Linear Flexibility Aggregation), die auf der Lösung mehrerer völlig linearer OPF basiert. Dieser Ansatz bietet im Vergleich zu ähnlichen Methoden, z.B. Monte-Carlo-Simulationen oder nicht-linearen OPF-basierten Methoden, eine erhebliche Reduktion der Rechenzeit. Die Linearisierung der Leistungsflussgleichungen wirkt sich zwar auf die Genauigkeit der Lösung aus, was aber angesichts der reduzierten Rechenzeit akzeptabel ist.

In dieser Arbeit wird die Anwendung des LFA-Algorithmus aus drei verschiedenen Perspektiven analysiert. Zunächst wird die Qualität des Ansatzes sorgfältig untersucht, um die Auswirkungen des linearen Modells bei der FOR-Berechnung zu quantifizieren und alle relevanten Parameter zu identifizieren, die die Berechnungszeit beeinflussen. Dann wird die Anwendung der Methode zur Analyse der langfristigen Bereitstellung von Flexibilität eines Verteilnetzes demonstriert. Schließlich wird die Einbeziehung des FOR-Konzepts in einen Engpassmanagement-Ansatz, einschließlich Redispatch auf der Verteilnetzebene, demonstriert, wo die Vorteile des schnellen Algorithmus zum Tragen kommen.

Allgemein kann die Koordination zwischen Netzbetreibern erheblich von der schnelleren Berechnung des FOR profitieren, so dass dies nicht nur in Netzplanungs-, sondern auch in alltägliche Betriebsprozesse einbezogen werden kann.

■ **Estimation of Flexibility Potentials in Active Distribution Networks**

M. Sc. Daniel Alfonso Contreras Schneider

Replacing conventional power plants by distributed energy resources (DER) in the MV and LV grids poses great new challenges for the planning and operation of distribution grids. Controlling a handful of conventional power plants demands significantly less resources than operating numerous decentralized plants, especially when it involves the supply of ancillary services to maintain the grid stability. Nevertheless, most ancillary services are required at the transmission system level, meaning that vertical supply of flexibility becomes necessary, requiring new methods to quantify how much flexibility can be provided from distribution (DSO) to transmission system operators (TSO). The feasible operation region (FOR) allows capturing the aggregated flexibility potential of DER within a distribution grid, while respecting the technical restrictions of both plants and grid.

This thesis proposes a novel approach to compute the FOR, the Linear Flexibility Aggregation (LFA) method, based on the solution of linear OPF. With the objective of reducing the computation time and without compromising the accuracy of the assessed FOR.

The LFA algorithm is comprehensively evaluated throughout this thesis, focusing on the accuracy of speed of the approach. The analysis quantifies the impact of the linear OPF model in the FOR computation, as well as it identifies all relevant parameters that can have an impact in the computation time.

It is shown that the proposed method provides a considerable reduction in processing time compared to similar methods, e.g. Monte-Carlo simulations or non-linear OPF-based methods. The linearization of the power flow equations has an impact in the accuracy of the solution, however, the trade-off with the reduction of the computational time is acceptable.

The dissertation closes with the suggestion of three use cases for the LFA method. Firstly, it is described how a fast computation of the FOR could be used to study the long-term provision of flexibility in distribution grids. Secondly, the usage of the LFA for the vertical aggregation of flexibility over different voltage levels is shown. Finally, the inclusion of the FOR concept in a congestion management approach, including redispatch at the distribution grid level is demonstrated. The proposal and analysis of these use cases applied to large distribution grids would not have been possible without a fast and reliable computation algorithm, like the LFA.

Overall, the coordination between grid operators can benefit significantly from the fast computation of the FOR, allowing its inclusion not only in planning processes, but also in everyday operation processes.

- **Optimierte Spannungshaltung im Verteilnetz analysiert auf Basis probabilistischer Lastflussrechnungen**

Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

OVGU Magdeburg

Tag der mündlichen Prüfung:

16.11.2021

Um realistische Aussagen über die Auswirkungen der Energiewende treffen zu können, wird ein reales Niederspannungsnetz in einer Simulationsumgebung nachgebildet. Realitätsgetreue Einspeise- und Verbrauchsmodelle werden aus mehrjährigen Messdatenreihen erstellt, klassifiziert und in eine Matrix überführt, die saisonale Abhängigkeiten, Wetter- und Einstrahlungsdaten berücksichtigt. Diese mehrfach aufbereitete Datenbasis in Verbindung mit dem Netzmodell sowie den Komponentenmodellen und Regeleinheiten stellt die Grundlage der in dieser Arbeit entwickelten, probabilistischen Simulationsumgebung dar. Die Umgebung wird für Lastflussrechnungen in der aktuellen Netzkonfiguration sowie für zukünftige Ausbauszenarien genutzt. Um das Spannungshaltungspotenzial der gefundenen Optionen darzustellen, werden Regeleinheiten und Komponentenmodelle für regelbare Ortsnetztransformatoren, Photovoltaikwechselrichter und Quartierspeicher entwickelt. Die umgesetzten Konzepte zur Spannungsbeeinflussung basieren auf technischen Anschlussbedingungen, normativen Vorgaben und eigenen Entwicklungen, die im Bereich des technisch Möglichen liegen. Für jedes Verfahren und jedes Modell werden eine einfache und eine optimierte Reglervariante entwickelt. Die einfache Variante legt den Fokus auf einen kostengünstigen und aufwandsarmen Einsatz, während die optimierte durch eine Parameteroptimierung auf das technisch mögliche Potenzial der Spannungshaltung bei minimaler Auslastung der Spannungsbänder zielt. Als Ergebnisse stehen der Funktionsnachweis der Regelverfahren und Parametrierungen sowie das Potenzial im Bereich der Spannungshaltung. Als besonders effizient hat sich die Methode der „Lastabhängigen Sollwertanpassung des Spannungszielwerts“ für den regelbaren Ortsnetztransformator in Kombination mit einer spannungsabhängigen Blindleistungsregelung bzw. einer stufenlosen Wirkleistungsregelung von Photovoltaik-Wechselrichtern hervorgetan.

Am Ende der Arbeit werden eine Verallgemeinerung der Komponenten- und Regelmodelle auf ein ermitteltes Referenznetz und der allgemeine Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten Verfahren dargestellt. Ebenso werden die Regelmodule anhand des finanziellen Aufwands und des Nutzens im Hinblick auf eine Vermeidung bzw. Verzögerung von Netzausbau bewertet. Auch hier zeigt sich der Einsatz eines regelbaren Ortsnetztransformators im Untersuchungsgebiet als Mittel der Wahl.

■ **Optimized Voltage Stability in Distribution Networks analyzed by probabilistic Load Flow Calculations**

Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

For realistic predictions on the effects of the energy transition (“Energiewende”), in particular the heavily increased feed-in into low-voltage grids, a real world low-voltage grid is emulated in a simulation environment. For realistic feed-in and consumption models, daily profiles are derived from multi-annual measurement data series, classified into groups and transferred into a measurement data matrix accounting seasonal dependencies, weather information and irradiation data. This repeatedly improved database in conjunction with the network model, as well as the component models and the control units, form the basis of the probabilistic simulation environment developed in this work. It is used for load flow calculations in the current network configuration as well as for future expansion scenarios. In order to identify development paths for voltage stability in the low-voltage network and to present the efficiency of the options found, component models for controllable distribution transformers, inverters of photovoltaic units, as well as a local area storage unit are being developed and appropriate control units are designed. For each component model and every method, a simple variant and an optimized one are developed. The simple variant puts focus on a potentially fast and cost-effective or low-effort implementation. The optimized variant aims at methods and procedures based on greatly improved parameterization and thus shows a technically feasible solution to keep the voltage within its normative specifications.

Main results of this work are the proof of function of several control and regulation methods as well as the proposed parameterizations and the performance evaluation of the methods in the field of voltage maintenance and over / undervoltage prevention. Particularly efficient in the study area was the method of "load-dependent setpoint adjustment of the voltage target value" for the controllable distribution transformer in combination with a voltage-dependent reactive power control or a continuous active power control of photovoltaic inverters. At the end of the thesis, a generalization of the component and control models with respect to a determined reference network and the general proof of concept / efficiency of the developed methods are presented. Likewise, the control modules are evaluated on the basis of cost and benefit in terms of avoidance or delay of grid expansion. Again, the utilization of a controllable distribution transformer proves as method of choice in the study area.

5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Hochspannungstechnik

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

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

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

RESEARCH ACTIVITIES

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

High Voltage Engineering

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

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

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

Elektrische Energieversorgung / Smart Grids

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

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

Elektromagnetische Verträglichkeit

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

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

Electrical Power Supply / Smart Grids

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

Most relevant topics on this field are:

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

Electromagnetic Compatibility

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

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

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

- **Forschungsprojekt „ZÜbReNe“:
Steigerung der Zuverlässigkeit und Überlastbarkeit
von Betriebsmitteln zur Reduktion von Netzausbau**

Laufzeit: November 2019 – Oktober 2022

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

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Period: November 2019 – October 2022

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

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

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

■ **Elektromagnetische Verträglichkeit von Mittelspannungsschaltanlagen**

M. Sc. Laura Barreau

Durch Mittelspannungsschaltanlagen können Netztopologien geändert und im Fehlerfall ein selektiver Netzschutz realisiert werden. Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) dieser Anlagen befasst sich zum einen mit den von Mittelspannungsschaltanlagen ausgesendeten Störgrößen. Zum anderen beschäftigt sie sich auch mit der Störfestigkeit von Schutz- und Messgeräten, welche in diesen Anlagen verbaut sind. Speziell gasisolierte Anlagen stellen für diese Geräte eine schwierige elektromagnetische Umgebung dar. Durch die Einkopplung von Störgrößen beispielsweise in Signalleitungen können Fehlfunktionen, Störungen und Beschädigungen an Schutz- und Messgeräten auftreten.

Der Schwerpunkt dieser Forschung liegt derzeit in der Störfestigkeitsprüfung von Strommesssystemen für den Netzschutz mit Rogowski-Sensoren. Systeme mit Kleinsignalwandlern (LPIT) wie Rogowski-Sensoren bieten gegenüber klassischen Stromwandlern einige Vorteile, stellen aber auch andere Anforderungen an die Störfestigkeitsprüfung.

Die elektromagnetische Beeinflussung der in Mittelspannungsschaltanlagen eingebauten Schutz- und Messgeräte ist während Schalthandlungen besonders kritisch. Während des Schaltens sowohl von Leistungsschaltern als auch von Trennern kann es zu Vor- und Rückzündungen kommen. Dadurch entstehen schnelle Spannungsänderungen, welche zu kapazitiven Störeinkopplungen in Kleinsignalwandler wie Rogowski-Sensoren führen. Eine der Problematiken dabei ist, dass der tatsächliche Wert der eingekoppelten Störspannungen bisher nicht ausreichend bekannt ist. Des Weiteren liefern die für die Strommessung eingesetzten Rogowski-Sensoren einen Spannungswert als Sekundärgröße, welcher die zeitliche Ableitung des Primärstromes darstellt. Dies macht eine anschließende Integration des Sekundärsignals notwendig. Sprungförmige Signalverläufe, wie sie durch Störeinkopplungen entstehen können, führen bei der Signalintegration zu langen Einschwingvorgängen, welche zu einer Überfunktion des angeschlossenen Schutzgerätes führen können. Die zweite Problematik dabei ist, dass die Verträglichkeitslevel der Auswertesysteme bisher nicht ausreichend bekannt sind.

Ziel dieser Forschung ist es zum einen die von Mittelspannungsschaltanlagen ausgesendeten Störgrößen und die Störfestigkeit der in diesen Anlagen eingebauten Schutz- und Messgeräte genauer zu untersuchen. Zum anderen sollen Methoden entwickelt, untersucht und evaluiert werden, mit denen die ausgesendeten Störgrößen realitätsnaher nachgebildet werden können. Mit diesen nachgebildeten Störgrößen kann die Störfestigkeit von Schutz- und Messgeräten geprüft werden.

■ **Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switchgear**

M. Sc. Laura Barreau

Medium voltage switchgear can be used to change network topologies and to provide selective network protection in the event of a fault. The electromagnetic compatibility (EMC) of these systems deals on the one hand with the disturbance variables emitted by medium voltage switchgears. On the other hand, it also deals with the immunity to interference of protection and measuring devices installed in these systems. Especially, gas-insulated systems represent a difficult electromagnetic environment for these devices. The coupling of disturbance variables, for example in signal lines, can cause malfunctions, interference and damage to protection and measuring devices.

The focus of this research is currently on the immunity testing of current measurement systems for network protection with Rogowski sensors. Systems with low power instrument transformers (LPIT) like Rogowski sensors offer some advantages compared to classical current transformers, but also place different demands on the immunity test.

The electromagnetic interference of the protection and measuring devices installed in medium voltage switchgears is particularly critical during switching operations. During switching of circuit breakers and disconnectors, prestrikes and restrikes may occur. This causes rapid voltage changes, which lead to capacitive disturbance couplings into low power instrument transformers such as Rogowski sensors. One of the problems is that the actual value of the coupled disturbance voltages is not yet sufficiently known. Furthermore, the Rogowski sensors used for current measurement provide a voltage value as a secondary signal, which represents the time derivative of the primary current. This makes a subsequent integration of the secondary signal necessary. Abrupt changes of the signal, as they can be caused by interferences, lead to long transient processes during signal integration, which can lead to an overfunction of the connected protection device. The second problem is that the compatibility levels of the evaluation systems are not sufficiently known.

The aim of this research is, on the one hand, to examine more closely the disturbance variables emitted by medium voltage switchgears and the immunity of the protection and measuring devices installed in these systems. On the other hand, methods are to be developed, examined and evaluated with which the emitted disturbances can be simulated more realistically. With these simulated disturbance values the immunity of protection and measuring devices can be tested.

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

M. Sc. Chandra Prakash Beura

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

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

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

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

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

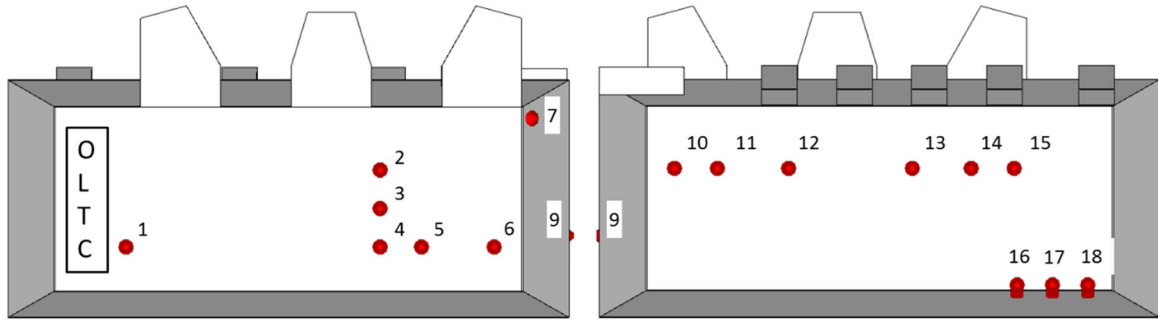


Fig. 1: Sensor distribution over tank surface for HV side (left) and MV/LV side (right)

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

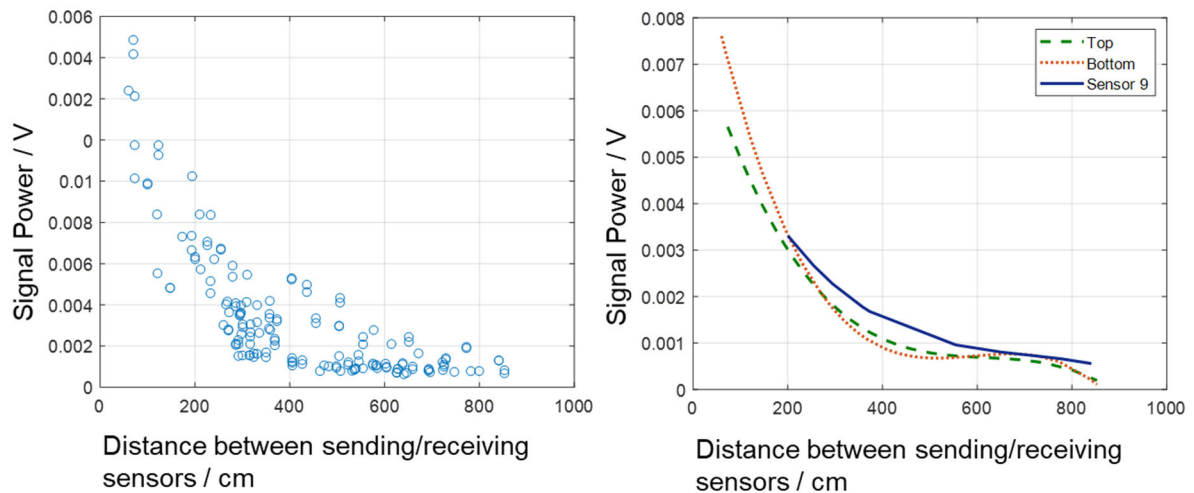


Fig. 2: Signal power of sending-receiving antenna pairs vs distance (left) and fitted curves for different groups of antennas (right)

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

■ Stromabriss in Vakuumschaltern

M. Sc. Markus Fischer

Vakuumschalter zeichnen sich durch ihre hohe Schaltfähigkeit bei kompakter Bauform aus. Der Schaltlichtbogen, der während eines Öffnungsvorgangs im Moment der mechanischen Kontakttrennung entsteht, kann im Vakuum nur aus verdampftem Material der Schaltkontakte bestehen. Bei kleinen zu unterbrechenden Strömen im Bereich von $I = 45 \text{ A}$ brennt dieser vor Erreichen des natürlichen Stromnulldurchgangs so instabil, sodass es zum abrupten Abriss mit einem hohen Stromgradienten kommt. An induktiven Verbrauchern führt dies zu transienten Überspannungen mit der Folge von Beschädigungen.

Durch einen auf den Laststrom synchronisierten Schaltvorgang, bei dem die Kontakttrennung direkt im Stromnulldurchgang erfolgt, lässt sich diese Problematik umgehen. Andere Maßnahmen setzen direkt an den Betriebsmitteln mit Schutzschaltungen aus Überspannungsableitern an, womit aber nur die Auswirkung und nicht die Ursache des Stromabrisses behoben wird. Ein wichtiger Einflussfaktor auf das Abrissverhalten ist das Material der verwendeten Schaltkontakte. Bereits veröffentlichte Ergebnisse haben gezeigt, dass auf Lastschalthandlungen optimierte Werkstoffe einen deutlich niedrigeren Stromabrisswert als Materialien für Leistungsschalter aufweisen. Zusätzlich ist die Beeinflussung des Lichtbogens auch über ein extern angelegtes Magnetfeld möglich. Die Kombination bzw. Überlagerung der Einflussfaktoren Werkstoff und Magnetfeld wird im Rahmen dieser Forschung genauer untersucht.

Für die Ermittlung der Stromabrisswerte werden Schalthandlungen in einem einfachen ohmschen Lastkreis, wie in Fig. 1 gezeigt, durchgeführt. In Fig. 2 ist der Stromabriss I_{ch} gegenüber der magnetischen Flussdichte B für den Werkstoff Kupfer-Chrom (CuCr) dargestellt, wie er bei Leistungsschaltern zum Einsatz kommt. In einem Bereich von $B = 30 \dots 80 \text{ mT}$ lässt sich ein Minimum des Stromabrisses durch das Magnetfeld erreichen. Im Gegensatz hierzu zeigen sich in Fig. 3 für das Lastschalter-Kontaktmaterial Wolframcarbid-Silber (WCAg) insgesamt niedrigere Stromabrisswerte mit einem Minimum ohne die Einwirkung eines Magnetfelds.

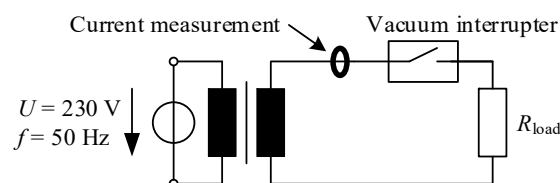


Fig. 1: Ersatzschaltbild des gesamten Versuchsaufbaus.
Equivalent circuit of the entire experimental setup.

■ Current Chopping in Vacuum Interrupters

M. Sc. Markus Fischer

Vacuum interrupters are characterized by a high switching capability with a compact design. The switching arc in vacuum, which occurs during an opening process at the moment of mechanical contact separation, can only consist of vaporized material of the switching contacts. In the case of small currents which has to be interrupted in the range of $I = 45 \text{ A}$, this arc gets instable before reaching the natural current zero crossing and abruptly chops with a high current gradient. At inductive loads, this causes transient overvoltages resulting in damages.

This problem can be avoided by a switching operation synchronized to the load current, where the contact separation is directly in the current zero crossing. Other solutions are applied directly to the equipment with protective circuits like surge arrestors, which, however, only eliminate the effect and not the cause of the current chopping. The material of the used switching contacts is an important factor influencing the chopping behavior. Previously published results have shown that materials optimized for load switching operations have a significantly lower chopping current value than materials for circuit breakers. In addition, the arc can also be influenced by an externally applied magnetic field. The superimposition of the influencing factors material and magnetic field will be investigated in more detail within this research.

For the determination of the chopping current values, switching operations are performed in a simple resistive load circuit as shown in Fig. 1. Fig. 2 shows the chopping current I_{ch} over the magnetic flux density B for the material copper-chromium (CuCr), as used in circuit breakers. In a range of $B = 30 \dots 80 \text{ mT}$, a minimum of the chopping current can be obtained by the magnetic field. In contrast, Fig. 3 shows lower chopping current values in total for the load switching contact material tungsten carbide silver (WCAg) with a minimum without the influence of a magnetic field.

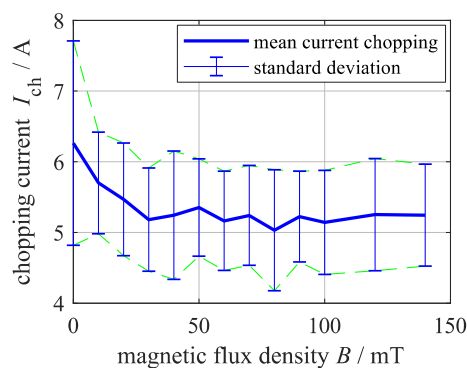


Fig. 2: CuCr-Schaltkontakte.
CuCr switching contacts.

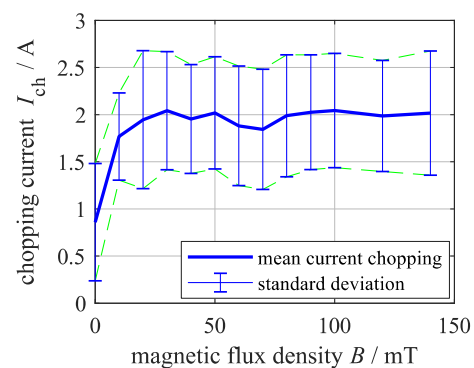


Fig. 3: WCAg-Schaltkontakte.
WCAg switching contacts.

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

M. Sc. Malte Gerber

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

Das dazu verwendete thermische Modell wurde unter der Berücksichtigung der verschiedenen Wärmeübertragungsphänomene im Transformator optimiert und vom IEH vorgeschlagen. Hierfür werden sowohl die natürliche Konvektion von Öl und Luft als auch die natürliche Strahlung im Kühler berücksichtigt. Außerdem werden, je nach Kühlungsart, sowohl die erzwungene Bewegung des Öls durch Ölpumpen als auch die erzwungene Bewegung der Luft durch Ventilatoren berücksichtigt. Fig. 1 zeigt die thermisch-elektrische Analogie dieses Wärmeübertragungsverhaltens. Durch die Bestimmung des gesamten thermischen Widerstandes gelingt eine genauere Berechnung der oberen Öltemperatur. Die Parametrisierung des thermischen Modells erfolgt durch die Aufzeichnung des Betriebszustandes über einen längeren Zeitraum. Durch die Berechnung der oberen Öltemperatur ist auch eine Berechnung der Heißpunkttemperatur und somit eine Abschätzung der Überlastbarkeit des Transformators bei gegebenen Umgebungsparametern möglich.

Die weitere Validierung der thermischen Modellierung sowohl bei Kupplungs- und Verteilnetztransformatoren als auch die Implementierung des Modells in ein Monitoringsystem stellen unter anderem Ziele des Forschungsprojektes „ZÜbReNe“ dar. Dieses Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Darüber hinaus sollen weitere Umweltparameter, wie die Sonneneinstrahlung oder die Windgeschwindigkeit und deren Einfluss auf die thermische Modellierung, untersucht werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind die verschiedenen Thermischen Modelle auf ihre Genauigkeit in der Vorhersage der oberen Öltemperatur untersucht worden. Hierbei wurde bisher ein Hauptaugenmerk auf die thermische Modellierung von Windparktransformatoren gelegt. Diese sehen eine stark volatile Last, wodurch die Modellierung des thermischen Verhaltens schwieriger wird

■ Validation of thermal models for the overload capacity of transformers

M. Sc. Malte Gerber

Due to the progressive development of the ongoing energy transition, the energy supply structure is changing from centralized to decentralized energy generation. In this context resources must be expanded to prevent an overload of resources. To enable overloading of transformers and thus prevent costly expansion, the thermal load and consequently the premature aging of the transformer must first be estimated. If the hot spot temperature in the oil rises above the prescribed limit value of 98°C according to IEC 60076-7, the transformer cannot be overloaded without any negative aging effects. By permanently monitoring the thermal behavior by means of a monitoring system, the possible overload at current environmental parameters can be estimated using the thermal model of the transformer.

The thermal model used for this purpose was optimized under consideration of the different heat transfer phenomena in the transformer and proposed by IEH. For this purpose, both the natural convection of oil and air and the natural radiation in the cooler are considered. In addition, depending on the type of cooling, both the forced movement of the oil by oil pumps and the forced movement of the air by fans are examined. Fig. 1 shows the thermal-electrical analogy of this heat transfer behavior. By determining the total thermal resistance, a more precise calculation of the upper oil temperature is possible. The parameterization of the thermal model is done by recording the operating condition over a longer period. By calculating the upper oil temperature, it is also possible to calculate the hot spot temperature and thus estimate the overload capacity of the transformer at given ambient parameters.

The further validation of the thermal modelling for both coupling and distribution transformers as well as the implementation of the model in a monitoring system are among the goals of the research project "ZÜbReNe". This project is funded by the Federal Ministry of Economics and Energy. In addition, further environmental parameters, such as solar radiation or wind speed and their influence on thermal modelling are to be investigated. Within the scope of the research project, the various thermal models have been investigated for their accuracy in predicting the upper oil temperature. So far, the focus has been on the thermal modeling of wind farm transformers. These see a highly volatile load making the modeling of the thermal behavior more difficult.

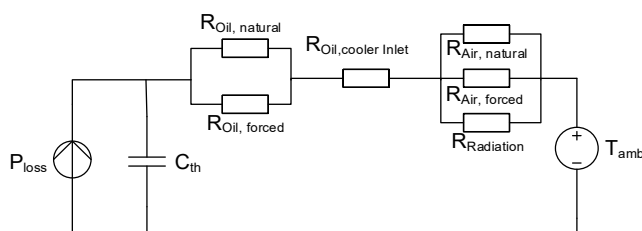


Fig 1:
thermisch-elektrische Analogie
verbessertes thermisches Modell
thermal electrical analogy of the
improved model

PD Measurement of Motors for Electric Vehicles

M. Sc. Chuxuan He

With the wider use of the electrical motor with hairpin wound stator, its reliability becomes a focus aspect to ensure the requirements regarding lifetime, which heavily depends upon the electric insulation health and conductivity of the winding. Insulation stresses can originate from increasing battery voltages and fast transients from the inverter drive system: Transient voltage distributions along windings result in high local electric field strength. 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. According to IEC 60034-18-42-2017, the PD measurement under impulse condition is also important for the insulation analysis of the motor. Therefore, it is worth to analyze the PD characteristic under impulse condition. Fig. 1 shows the platform used for the PD measurement under impulse measurement, which can regulate the rise time, fall time, frequency and the amplitude of the output.

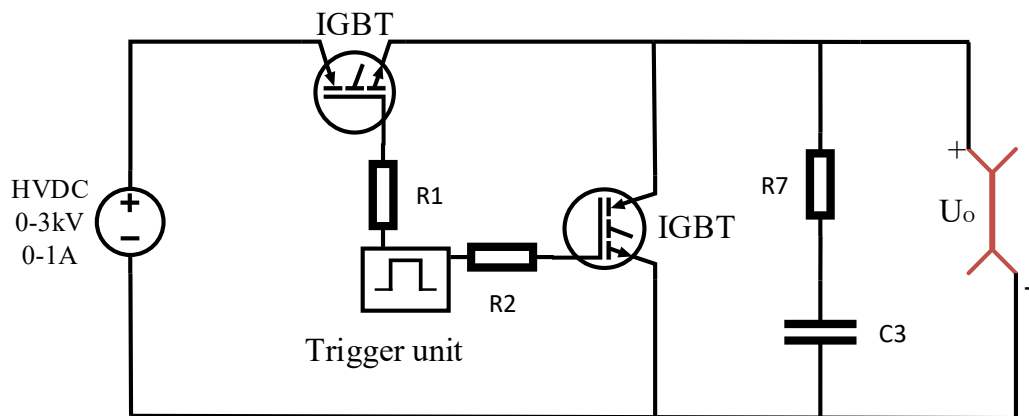


Fig. 1: Test platform for the PD measurement under impulse condition.

However, under impulse conditions, the PD signal overlaps with the impulse signal, as shown in Fig. 2. The widely-used PD measurement method with the coupling capacitor is not applicable to the impulse condition due to the frequency limit. The high-frequency measurement method should be a new attempt. According to the fast Fourier transform (FFT) shown in Fig. 3, the difference in the frequency band of the background noise and the PD signal can be used for PD signal detection. Hence, the broadband methods shown in IEC 60270, such as ultra-high frequency (UHF) sensors and high-frequency current transformer (HFCT), allow the measurement of PD signal under impulse conditions.

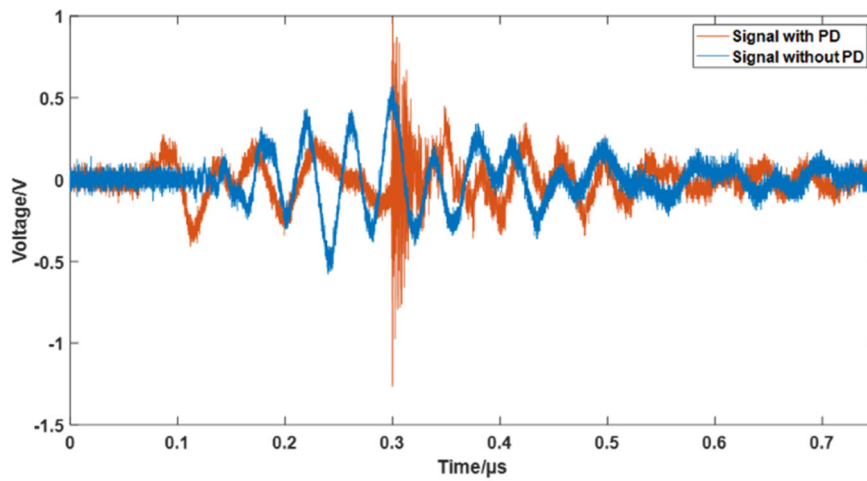


Fig. 2: Superposition of PD signal and the impulse signal.

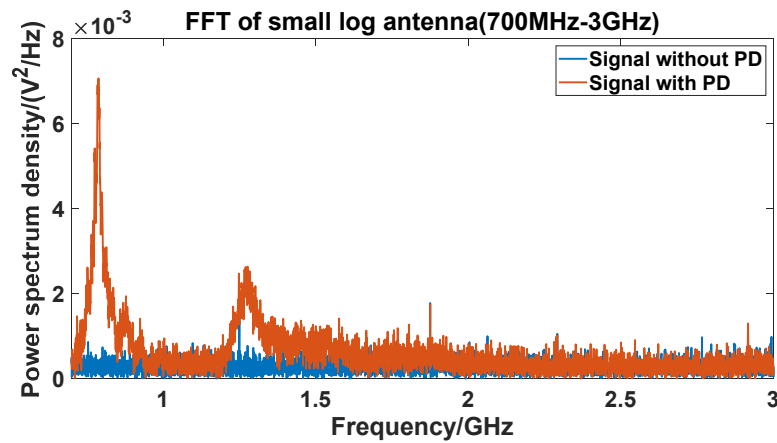


Fig. 3: FFT analysis of the background noise and PD signal measured by UHF sensor.

The influence factors, including electrical stress and environmental stress, on the PD phenomenon, are also under investigation. It is shown that the repetition rate of the impulse voltage and temperature have an effect on the PD inception voltage (PDIV), and PD extinction voltage (PDEV). The duty cycle of the impulse has an effect on the number of the PD signals measured in one cycle but has no effect on the PDIV and PDEV. The study of the characteristic of the PD phenomenon under different conditions is still undergoing.

■ Thermisches Monitoring von Kabelstrecken und Kabelmuffen

M. Sc. Daniel Passow

In Folge des Ausbaus und der Transformation der Energienetze durch den Zubau erneuerbarer Energien ergeben sich neue Herausforderungen für die Betreiber in Bezug auf die Überlastbarkeit ihrer Übertragungsstrecken. Im Fall von VPE Kabeln kann die maximal zulässige Leitertemperatur von 90 °C als limitierender Faktor bei der Strombelastbarkeit gesehen werden. Da die standardisierten Berechnungsverfahren einen großen Geltungsbereich abdecken sollen, stellen die getroffenen Annahmen in der Regel eine konservative Abschätzung dar. Um die Übertragungskapazität eines Kabels zu steigern, kann ein Real Time Thermal Rating (RTTR) mit faseroptischer Temperaturmessung (DTS) eingesetzt werden. DTS nutzt Lichtwellenleiter, um eine räumliche Auflösung der Temperaturverteilung zu ermöglichen, ein Beispiel hierfür ist in Abb. 1 gegeben. Die Leitertemperatur wird dann auf Basis standardisierten thermischen Kabel Modelle berechnet. DTS Systeme erwecken den Eindruck, die komplette Temperaturverteilung entlang einer Kabelstrecke darzustellen, jedoch fehlen Information über die Temperaturverteilung innerhalb von Kabelmuffen. Dies hat die folgenden Gründe: Erstens fehlen standardisierte thermische Modelle, zweitens fehlt ein definiertes Interface für die Temperaturmessung an Kabelmuffen. In der Regel werden die Glasfasern im Bereich der Muffe gespleißt, es entsteht ein mehr oder weniger undefiniertes Interface. Um ein thermisches Modell für Muffen zu entwickeln, wurden in Kooperation mit Industriepartnern Laborversuche durchgeführt. Auf deren Basis wurde eine FEM (Finite Elemente Methode) Modellierung durchgeführt. Abb. 2 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Verbindertemperaturen. Das Simulationsergebnis nähert die Messung akkurat an. Zukünftiger Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung einer intelligenten Muffe unter Integration des thermischen Modells zur Beurteilung der Temperatur in der Muffe.

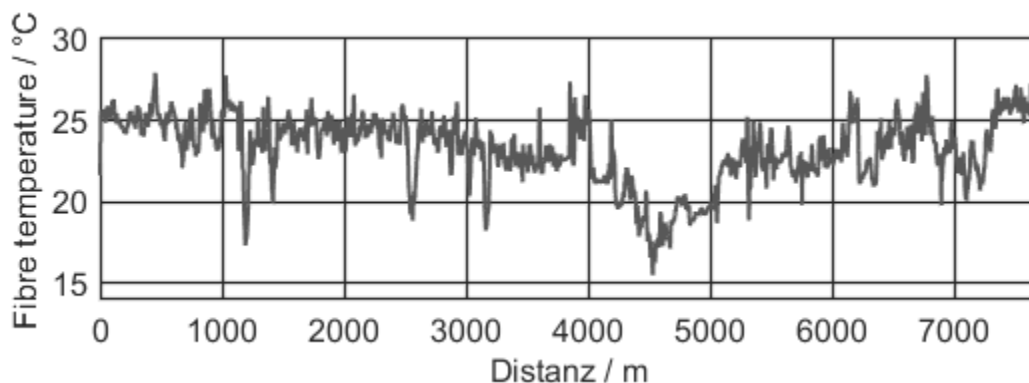


Fig. 1: Glasfasertemperaturdaten, aufgetragen über der Distanz der Kabelstrecke.
Fibre temperature plotted against the length of the cable circuit.

■ Thermal Monitoring of Cable Circuits and Joints

M. Sc. Daniel Passow

The rapid expansion and transformation of power grids due to the implementation of renewable energies challenges grid operators with questions regarding the overload capacities of their transmission lines. In case of XLPE cables a maximum conductor temperature of 90 °C can be considered as limiting factor for the ampacity rating of the corresponding circuit. Since the scope of standardized ampacity calculations is to cover a large number of different cases, these calculations generally present a conservative approximation. In order to increase the capacity of a cable a real time thermal rating (RTTR) via distributed temperature sensing (DTS) is required. DTS systems use an optical fibre, which is applicated to the power cable to offer a spatial resolution of the temperature distribution along the cable. An example for the spatial resolution of the temperature distribution along a cable route is given in Fig. 1. In order to obtain the conductor temperature standardized thermal models are used, requiring the fibre temperature and the current as input data. While DTS systems give the impression to cover the temperature distribution along the complete cable route they generally lack temperature information about joints. This is related to the following reasons. First, no standardized thermal models for joints exist. Second, useful temperature measurements require a defined measurement interface. Instead of offering a defined interface the optical fibre is spliced at the joint interconnection, which gives a more or less undefined interface depending on the position of the splice box. In order to develop a thermal model for joints laboratory experiments are carried out in cooperation with industrial partners. Furthermore, a FEM (Finite Element Method) model was developed to simulate the connector temperature. A comparison of the measured and simulated connector temperatures is given in Fig. 2. This shows, that the model offers an accurate approximation of the connector temperature. Further research focuses on the development of smart joint, which implements a thermal model to offer real time thermal rating for joints.

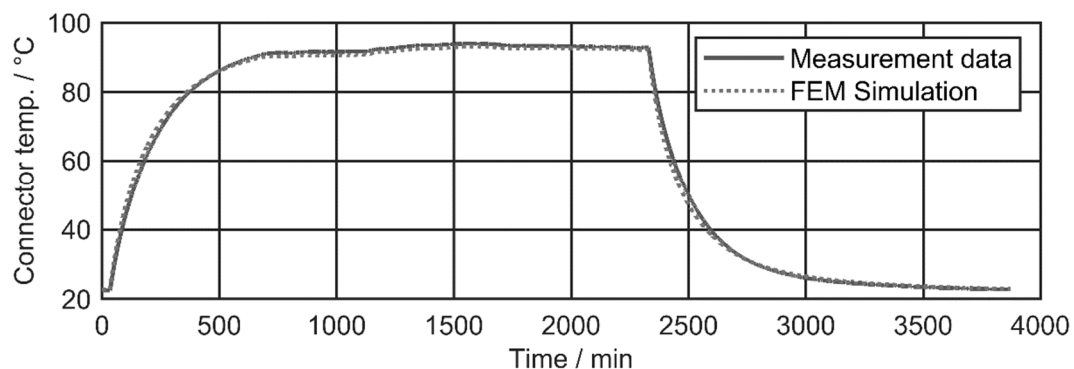


Fig. 2: Verbindertemperatur, Vergleich zwischen Messung und Simulation.
Connector temperature, comparison between measurement and simulation.

■ **Teilentladungen bei Partikeln auf freiem Potential in HGÜ GIS**

M. Sc. Philipp Wenger

Der Defekt eines Partikels auf freiem Potential (auch: floating electrode, FE) bezeichnet ein leitfähiges Objekt ohne elektrischen Kontakt zu einer Elektrode, z. B. ein Partikel, im Isolationsmedium (in diesem Fall unter Druck stehendes SF₆-Gas). Dabei bleibt das Partikel in einem bestimmten, normalerweise unveränderten Abstand zu den Elektroden. Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes akkumuliert das Partikel elektrische Ladungsträger auf seiner Oberfläche und erhält durch kapazitive und resistive Kopplung ein elektrisches Potential. Außerdem schließt das Partikel eine elektrische Potentialdifferenz entsprechend seiner Länge in Richtung des ungestörten elektrischen Feldes kurz. Die elektrische Ladung, die das Partikel aufnehmen kann, hängt von seiner Geometrie, seiner Lage zwischen den Elektroden und der elektrischen Feldverteilung zwischen den coaxialen Elektroden, sowie dem überlagerten elektrischen Feld in unmittelbarer Nähe der Partikelspitzen ab. Je nach aufgenommenen Ladung und dem Isolationsvermögen des umgebenden Isoliermediums können Teilentladungen, Teildurchschläge des kleinen Gasspalts d_{PE} und Durchschläge des gesamten Isoliersystems ausgelöst werden. Diese Entladungen emittieren akustische, elektromagnetische und optische Emissionen, die mithilfe von Teilentladungsmesssystemen erfasst werden können.

Der Versuchsaufbau besteht aus handelsüblichen GIS-Komponenten, die für ein 320 kV HGÜ-System entwickelt wurden. Das Prüfgesäß (siehe Abb. 1) ist über eine Luft-SF₆-Durchführung an eine dreistufige Greinacherkaskade angeschlossen, die eine maximale Gleichspannung von bis zu $U_{DC} = \pm 550$ kV bereitstellt.

Die von dem Partikel emittierten Teilentladungen (TE) werden gleichzeitig mittels drei unterschiedlicher Messprinzipien mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Neben der UHF-Breitbandmesstechnik wird eine Photomultiplieröhre (PMT) zur Erfassung des an den Partikelspitzen emittierten Lichts eingesetzt. Außerdem wird der Entladungsstrom mit einer Shuntmessung erfasst (Messbandbreite im Bereich von $bw = DC \dots 1$ MHz). Dafür wird ein Tellersensor gegenüber des TE-Defekts an das Gehäuse angeflanscht. Ladungsträger, die an den Partikelspitzen erzeugt werden, wandern als Strom durch das Isoliergas zum Sensor. Der Strom setzt sich aus impulsbehafteten Anteilen (TE-Impulse) und Gleichstromanteilen zusammen, die bei Glimmentladungen entstehen. Die Beobachtungen werden im Hinblick auf die Amplitude der TE-Pulse und deren Wiederholungsrate ausgewertet, um ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Entladungsmechanismen zu erlangen.

Partial Discharge of Floating Electrode Defect in HVDC GIS

M. Sc. Philipp Wenger

The floating electrode (FE) defect refers to an isolated metallic object, such as a particle, in the isolation material (in this case pressurized SF_6 gas) in a certain, typically unaltered distance to the electrodes. Under the influence of an electric field the FE accumulates electric charge carriers on its surface and acquires an electrical potential due to capacitive and resistive coupling. Moreover, the particle short circuits an electrical potential difference according to its length in the direction of the undisturbed electric field. Thus, the electrical voltage that a FE can acquire is a function of its geometry, location in the gas gap and the distribution of the electric field between the coaxial electrodes and the electric field in close vicinity to the particle's tips. Depending on the voltage acquired by the FE and the withstand strength of the surrounding insulation medium, partial discharges, partial breakdowns of the small gas gap d_{PE} and breakdowns of the entire insulation system may be triggered. These discharges emit acoustic, electromagnetic and optical emissions, which can be detected by partial discharge (PD) measuring systems.

The experimental setup consists of commercially available GIS components developed for a 320 kV VDC system. The test vessel (given in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) is connected via an air- SF_6 bushing to a three stage Cockcroft-Walton generator, which provides a DC voltage up to $V_{\text{DC}} = \pm 550$ kV.

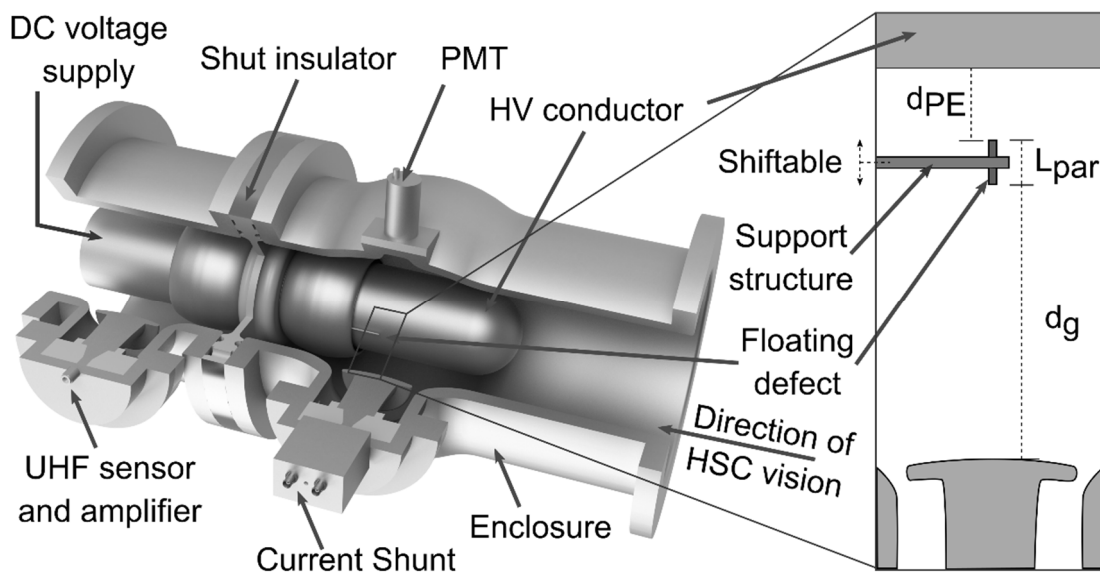


Fig. 1: (a) Versuchsaufbau für zeitsynchronisierte TE-Messungen mit UHF, optischem und Shuntmesssystem
 (b) GIS Elektrodenkonfiguration mit Partikel auf freiem Potential.
 (a) Experimental setup for time-synchronized recording of PD signals using UHF, optical and current measuring systems;
 (b) GIS Electrode configuration with floating defect.

Bei der Bewertung von Betriebsmitteln, die mit Wechselspannung beaufschlagt werden ist der Einsatz von phasenaufgelösten Teilentladungsmuster (PRPD) zur Beurteilung und Erkennung von dielektrischen Defekten bereits seit mehreren Jahrzehnten ein erprobtes Diagnosetool. Aufgrund der fehlenden Phaseninformation kann dieses Hilfsmittel allerdings nicht bei Gleichspannungsanwendungen herangezogen werden. Ersatzweise kommt deshalb das Verfahren der Puls-Sequenz-Analyse (PSA) vermehrt zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird das Verhältnis von mehreren - typischerweise dreier - aufeinanderfolgenden Teilentladungsimpulse hinsichtlich ihrer Primärgrößen (Amplitude, zeitlicher Abstände, o.ä.) ermittelt und gegenübergestellt. Die damit erzeugten Cluster können von Experten visuell bewertet und dem entsprechenden Defekt zugeordnet werden. Abb. 2 zeigt exemplarisch das PSA Diagramm eines Partikels auf freiem Potential bei einer angelegten Gleichspannung von $U_{DC} = -320$ kV. Typisch für diesen Defekt ist die sternförmige Struktur beim Vergleich der TE-Impulsamplituden (Abb. 2 oben links). Auffallend sind zudem die geringen zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen TE-Impulsen, die teilweise geringer als $\Delta t < 1 \mu s$ sind.

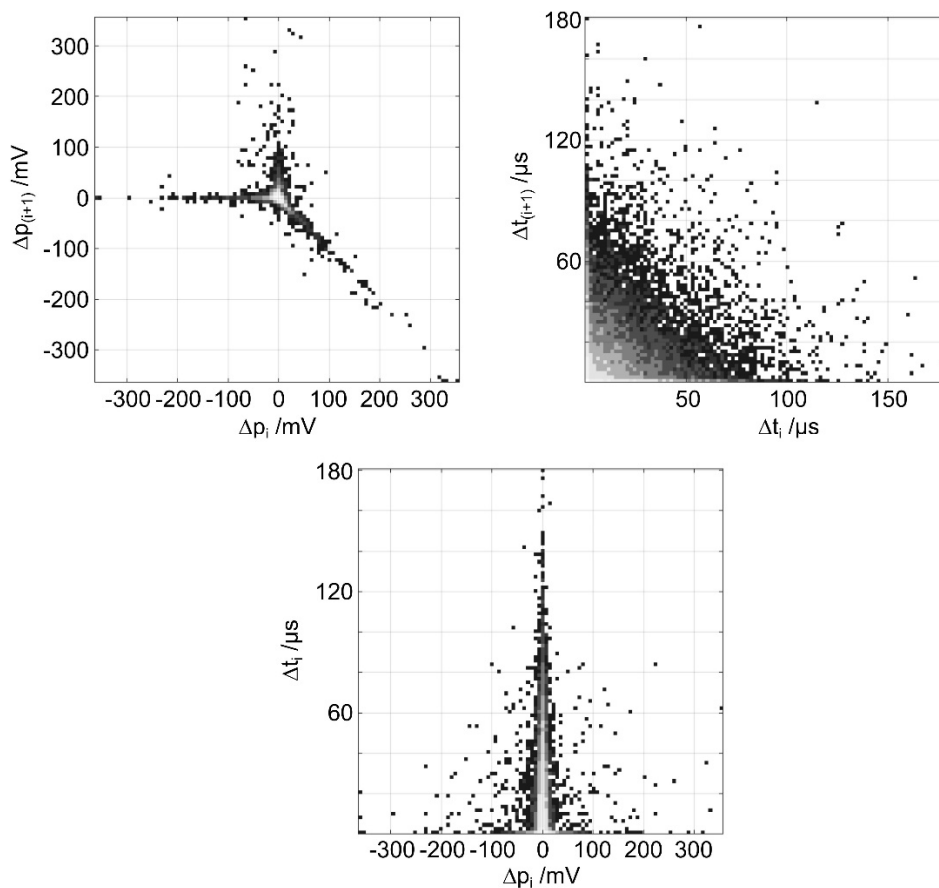


Fig. 2: PSA-Diagramm eines Partikels auf freiem Potential bei $U_{DC} = -350$ kV.
PSA diagram of a particle on floating potential at $V_{DC} = -350$ kV.

PD emitted by the FE is recorded in the time domain by a fast sampling oscilloscope using three different measurement principles simultaneously: In addition to wideband UHF-PD measuring technique, a photomultiplier tube (PMT) is used to record light emitted at the particle's tips. Moreover, the discharge current is measured with a current shunt (measurement band-width in the range of $bw = DC \dots 1 \text{ MHz}$). For this purpose, a plate electrode is flanged to the enclosure in front of the PD defect. Charge carriers generated at the particle's tips, migrate as a current through the gas gap to the plate electrode. The current can have different discharge features, such as pulseless PD and PD impulses. The observations are evaluated in terms of PD pulse magnitude and repetition rate, in order to gain a more advanced understanding of the defect behaviour.

Usage of phase resolved partial discharge pattern (PRPD) for the detection and characterisation of PD defects in AC power grid components has been a proven diagnostic tool for several decades. However, due to the lack of phase information, this tool cannot be used in DC applications. Therefore, the pulse sequence analysis (PSA) method is increasingly used as a substitute. In this method, the ratio of several (typically three) successive partial discharge pulses is determined and compared with respect to their primary quantities (amplitude, time intervals, etc.). The clusters generated can be visually evaluated by experts and assigned to the corresponding defect. Fig. 2 shows an example of the PSA diagram of a particle at free potential with an applied DC voltage of $V_{DC} = -320 \text{ kV}$. Typical for this defect is the star-shaped pattern, if comparing the PD pulse amplitudes (Fig. 2 top left). Furthermore, FE detects show short time intervals between the individual PD pulses, which can be as short as $\Delta t < 1 \mu\text{s}$.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

■ Forschungsprojekt „C/sells“

Laufzeit: Januar 2017 – März 2021

Im Rahmen des Projektes C/sells wird die Idee verfolgt, vielfältige Infrastrukturzellen intelligent zu einem Gesamtsystem zu integrieren. Dabei sollen sich die einzelnen Zellen durch die Anpassung von lokaler Erzeugung und Last nach entsprechenden Kriterien selbst optimieren können. Durch die internen Handlungen innerhalb jeder Zelle und durch ein gemeinschaftliches Handeln zwischen Zellen entsteht eine robuste Versorgungsinfrastruktur, die eine optimierte Integration von erneuerbaren und dezentralen Erzeugern ermöglicht.



Für die Umsetzung dieser Idee es ist notwendig, die bisherigen Abläufe zwischen den zahlreichen Akteuren innerhalb des elektrischen Energieversorgungssystems anzupassen bzw. neu zu entwickeln und umzusetzen. Dies bezieht sich auf die Prozesse zwischen den unterschiedlichen Netzbetreibern aus verschiedenen Spannungsebenen und auf die Prozesse zwischen Strommarkt und Netzbetrieb. Die Umsetzung dieser Prozesse erfordert die Betrachtung von organisatorischen und technischen Aspekten. Dabei spielt der Austausch notwendiger Informationen mit einem passenden Abstraktionsgrad zwischen individuellen Komponenten, die an den Optimierungsprozessen aktiv teilnehmen sollen, eine zentrale Rolle.

In den Arbeitspaketen des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart geht es um die Entwicklung eines Systems zur Überwachung der Spannungsqualität und die Erforschung der Inselnetzbildung als Mittel zur Erhöhung der Versorgungssicherheit.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ Research Project “C/sells”

Period: January 2017 – March 2021

Within the scope of the project C/sells the idea of integrating diverse intelligent infrastructure cells into a power system. The aim of the project is to allow the individual cells to adapt local energy generation and consumption based on various criteria in order to optimize operation. By internal management of each cell and communication between the cells as a network, a more robust power supply infrastructure is possible. This allows a more optimized integration of renewable and decentralized energy generation.



For the implementation of this idea, it is necessary to adapt existing models and develop new concepts between the numerous participants within the electrical energy grid. This aspect is particularly true for processes between the different network operators for the distinctive power system voltage levels, processes regarding the electricity market and grid operation. The implementation of the processes requires the consideration of organizational and technical aspects. Especially the communication of essential information with a specified degree of abstraction between the components, participating in the optimization process, plays a significant role.

In the work packages the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology at the University of Stuttgart will develop a monitoring system for power quality and will research the islanding of microgrids as a measure to increase sustained energy supply.

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

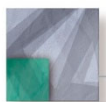
- **Forschungsprojekt „i-LIME“:
Intelligentes Ladeinfrastruktur-Management
für Elektromobilität**

Laufzeit: Juli 2019 – Juni 2021

Im Rahmen des Projektes i-LIME wird ein Konzept eines mehrstufigen, intelligenten Lademanagementsystems für Parkhäuser entwickelt, im Feldtest umgesetzt und in einer Testphase praktisch erprobt. Dieses soll als eine Alternative zum konventionellen Netzausbau dienen und die Integration von Ladeinfrastruktur, insbesondere in bestehenden, wie auch bei neu gebauten Parkhäusern, unterstützen. Dazu wird in einem Parkhaus eine zentrale Ladeinfrastruktur mit intelligenten Regelungs-, Kommunikations- und Ladefunktionen aufgebaut und mit einem elektrischen Pufferspeicher verknüpft. Ein übergeordnetes Lademanagementsystem liefert dabei einen optimierten Leistungsvorgabewert unter Berücksichtigung last- und netzseitiger Restriktionen.

Signifikante Randbedingungen des Systems und Anforderungen der E-Kfz-Halter an die Ladeinfrastruktur, wie Speicherzustand, Akkufüllung und künftige Einspeisung aus erneuerbaren Energien werden berechnet und von einem lokalen, untergeordneten Lademanagementsystem durch dynamisches, zeitversetztes Laden der Elektrofahrzeuge berücksichtigt. Ein Optimierungsalgorithmus, der alle restriktiven Parameter auf Netz- und Verbraucherseite berücksichtigt stellt dabei den Kern des übergeordneten Lademanagementsystems und damit des Teilprojekts des IEH dar. Dieser soll unter Berücksichtigung von relevanten Randbedingungen und unter Einbeziehung gegebener Freiheitsgrade, wie z.B. zeitversetztes Laden und mögliche Spitzenkappung durch den Batteriespeicher, eine zulässige Quote für die summarische Ladeleistung des Parkhauses ermitteln.

Ziel ist eine Überlastung des Anschlusspunktes und ggf. des umliegenden Netzes dadurch aktiv vermeiden zu können. Zusätzlich wird ein PQ-Monitoringsystem entwickelt und in einem Feldversuch erprobt, das die Beobachtung von Netzurückwirkungen durch die Ladevorgänge ermöglicht und eine Anpassung der Ladeleistungsquoten durch Anbindung an das übergeordnete Lademanagement ermöglicht.



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

- **Research Project „i-LIME”:
Intelligent Management System for Charging
Electrical Vehicles**

Period: July 2019 – June 2021

Within the i-LIME project, a novel multi-level intelligent management system for the charging of electrical vehicles will be developed and field-tested. This is expected to provide an alternative to conventional grid expansion plans for grid operators, as well as support the integration of charging infrastructure, especially in the case of parking garages. A central management infrastructure with intelligent functions will be adapted to control the charging profiles of a set of electrical vehicles chargers in a parking garage, integrated with a buffer storage system. An over layered load management system automatically sets an optimal performance target value to control the charging of the electrical vehicles. Various load and grid side restrictions are taken into consideration to calculate these factors, as well as the state of charge of the storage system, future renewable energies feed-in, and the requirements of the electrical vehicle owner. Based on the results of the over-layered control system, a local charging management system will provide a dynamic and time-shifting charging profile of the respective electric vehicles.

The load prognosis of the car park is fed with the corresponding customer load profiles and the associated vehicle types. The condition of the network and the evaluation of the network perturbations induced by the electric vehicles will be monitored using a power quality monitoring system in order to ensure trouble-free operation, as the charging process of electrical vehicles is known for producing power quality issues in power grids. The developed system will be verified in real test conditions based on a real parking garage in the city of Stuttgart.



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Laufzeit: Oktober 2019 – September 2022

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

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



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

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

Period: October 2019 – September 2022

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

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

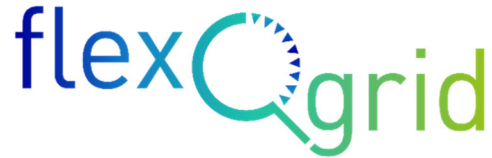
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Laufzeit: November 2019 – Oktober 2022

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



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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektpartner bei der Auftaktveranstaltung

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

Period: November 2019 – October 2022

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



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

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag



Storage system at field test location

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

Laufzeit: Juli 2020 – Juni 2024

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

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

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



Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

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

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

Period: July 2020 – June 2024

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

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

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



Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

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

- **Forschungsprojekt „ILA-BW“:
Intelligentes netzdienliches Lademanagement in
Baden-Württemberg**

Laufzeit: August 2021 – Dezember 2022

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

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

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

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

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

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

Period: August 2021 – December 2022

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

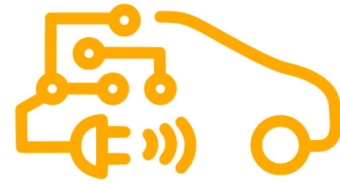
On these locations, prospective analysis will be conducted regarding the use of smart charging management systems in the electric power system as an alternative to conventional grid expansion and to support the integration of charging infrastructure in the parking areas. The technical feasibility of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

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

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

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

- **Forschungsprojekt „BANULA“**
Laufzeit: Oktober 2021 – September 2024



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 Energie (BMWi) 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 BMWi zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität (Elektro-Mobil) beim DLR Projektträger gefördert.

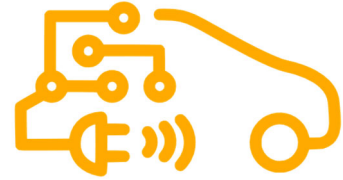
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



- **Research Project „BANULA“**
Period: October 2021 – September 2024



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 Energy (BMWi).

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 BMWi funding initiative for the promotion of research and development in the field of electric mobility (Elektro-Mobil) at the DLR project management organization.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



DLR Projektträger

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ Einfluss von Oberschwingungen auf die Identifizierung der Breitband-AC-Netzimpedanz für Stabilitätsstudien

M. Sc. Matthias Buchner

Die Netzimpedanz ist ein wichtiger Parameter und wird zur Durchführung von impedanzbasierten Stabilitätsanalysen für den Betrieb von netzgekoppelten Systemen wie leistungselektronischen Solar-, Wind- und anderen dezentralen Stromerzeugungssystemen verwendet. Die Ermittlung der Netzimpedanz mit Hilfe von Breitbandsignalen ist eine beliebte Methode, deren Robustheit jedoch stark von den durch nichtlineare Lasten oder Leistungselektronik verursachten harmonischen Störungen abhängt [1][2].

Die Systemantwort kann durch ein Breitbandsignal bestimmt werden, das mehrere Frequenzen auf einmal anregt. Zu diesem Zweck wird eine binäre Sequenz maximaler Länge (MLBS) verwendet, die mit einem rückgekoppelten Schieberegister leicht erzeugt werden kann [3]. Das Spektrum der in dieser Arbeit verwendeten Anregungssequenz ist in Fig. 1a dargestellt, eine Vergrößerung des Spektrums ist in Fig. 1b zu sehen.

Die Auswirkungen von Harmonischen auf die Impedanzmessung werden anhand des in Fig. 2 dargestellten Systems untersucht. Die Referenznetzimpedanz (1) ist ein rein ohmsch mit einem Widerstand von $0,1\Omega$ und führt daher zu keiner Kopplung.

Der harmonische Strom i_{Harm} wird durch einen dreiphasigen Diodengleichrichter erzeugt und hat die entsprechenden Eigenschaften [4]. Um die Netzimpedanz zu messen, wird ein Erregerstrom i_{Exct} in das Netz eingespeist. Die Netzimpedanz Z wird anhand der Spannungsantwort des Netzes in Form von v_{Exct} berechnet.

Die rote Linie ist der Bodeplot in Abb. 3 der analytischen Referenzübertragungsfunktion, die blauen Kreise stellen die geschätzte Netzimpedanz ohne harmonische Verzerrungen dar und die grünen Sternchen die geschätzte Netzimpedanz mit harmonischen Verzerrungen. Die analytisch ermittelte Übertragungsfunktion und die Impedanz ohne harmonische Verzerrungen stimmen überein. Die geschätzte Impedanz des gestörten Systems weicht dagegen in Betrag und Phase deutlich ab. Da die Netzimpedanz Z rein ohmsch ist, gibt es keine Kopplung zwischen der d- und q-Achse. Die eingespeisten Oberschwingungsströme führen jedoch zu einer Kopplung der Achsen.

Die vom Gleichrichter eingespeisten Oberschwingungen dominieren im Vergleich zu den anderen Oberschwingungen deutlich und führen zu den ausgeprägten Resonanzen und Phasensprüngen in der berechneten Netzimpedanz.

■ Influence of Harmonics on Broadband AC Grid Impedance Identification for Stability Studies

M. Sc. Matthias Buchner

Grid impedance is an important parameter and is used to perform impedance-based stability analysis for the operation of grid-connected systems, such as power electronics-interfaced solar, wind and other distributed power generation systems. The identification of grid impedance with the help of broadband signals is a popular method, but its robustness depends strongly on the harmonic disturbances caused by non-linear loads or power electronics [1][2].

The system response can be determined by a broadband signal that excites several frequencies at once. For this purpose a maximum-length binary sequence (MLBS) is used, which can be easily generated by a feedback shift register [3]. The spectrum of the excitation sequence used in this work is shown in Fig 1a and a magnification of the spectrum is shown in Fig 1b.

The effects of harmonics on impedance measurement are investigated using the system shown in

Fig 2. The reference grid impedance (1) is pure ohmic with a resistance of 0.1Ω and does due to this not introduce any cross-coupling.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \quad (1)$$

The harmonic current i_{Harm} is generated by a three-phase diode rectifier and has the corresponding characteristics [4]. To measure the grid impedance, an excitation current i_{Exct} is injected into the grid. The grid impedance Z is calculated based on the voltage response of the power system in the form of v_{Exct} .

Stabilitätsanalysen oder Abschätzungen der Übertragungsfunktion auf der Grundlage der Frequenzgangdaten werden durch die von den Oberschwingungen verursachten Resonanzen und Phasensprünge erschwert. Für den Einsatz von breitbandigen AC-Netzimpedanzen in Netzen mit hohem Anteil an Leistungselektronik müssen Verfahren entwickelt werden, die die Oberschwingungsstörungen kompensieren oder zumindest die ungünstigen Frequenzbereiche entfernen.

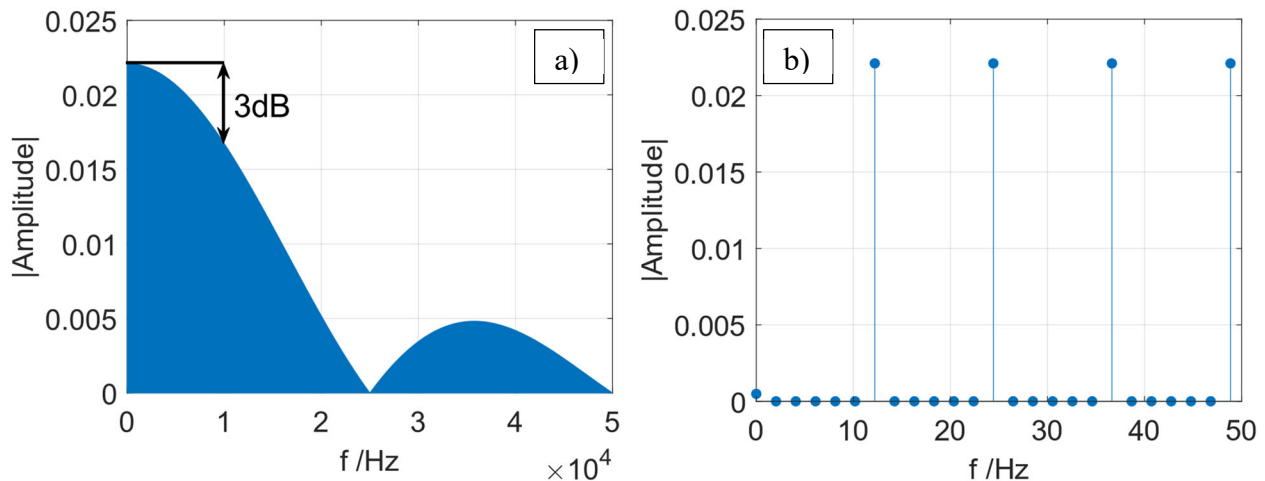


Fig 1: Spectrum des Anregungsstroms.
Spectrum of excitation current.

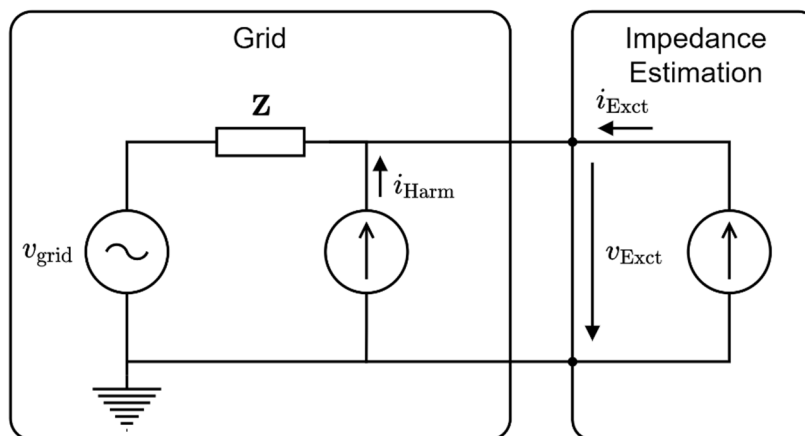


Fig 2: Szenario für die Untersuchung des Einflusses von Harmonischen auf die Identifizierung der Breitbandimpedanz.
Scenario for the investigation of influence of harmonics on broadband impedance identification.

The red line is the bode plot in Fig 3 of the analytical reference transfer function, the blue circles represent the estimated grid impedance without harmonic distortions and green asterisks represent the estimated grid impedance with harmonic distortions. The analytically determined transfer function and impedance without harmonic distortions matches with each other. The estimated impedance of the disturbed system on the other hand differs significantly in magnitude and phase. Since the grid impedance Z is purely ohmic, there is no coupling between the d and q axis. The injected harmonic currents, however, lead to a coupling of the axes.

The harmonics injected by the rectifier clearly dominate in comparison to the other harmonics and lead to the pronounced resonances and phase jumps in the calculated grid impedance. Stability analyses or estimation of the transfer function based on the frequency response data become difficult due to the resonances and phase jumps caused by the harmonics. Methods must be developed to compensate for the harmonic disturbances or at least to remove the invalid frequency ranges if broadband AC grid impedance will be used in networks with a high proportion of power electronics.

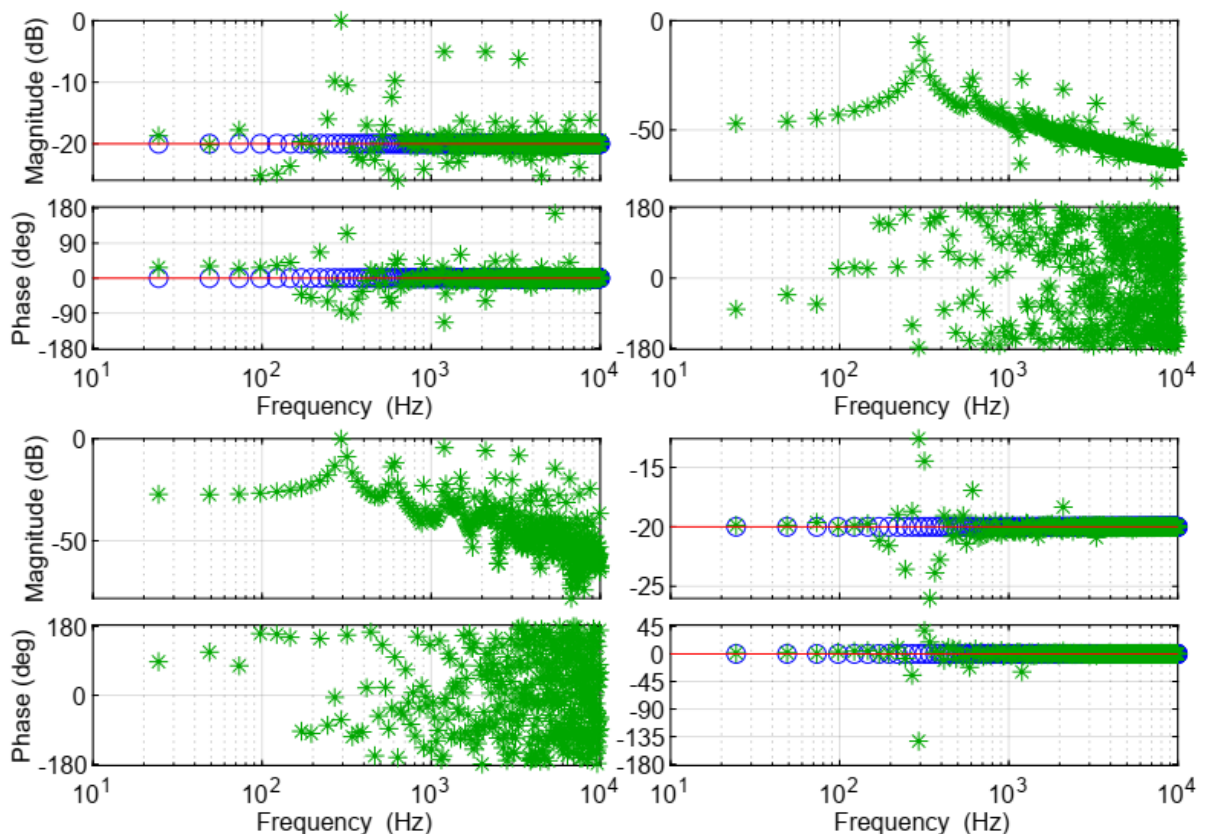


Fig 3 Bode-Plot der Referenzübertragungsfunktion Z als rote Linie, die Impedanz des Szenarios ohne harmonische Verzerrung als blaue Kreise und die Impedanz des Szenarios mit harmonischer Verzerrung als grüne Sternchen

Bode plot of the reference transfer function Z as red line, the impedance of the scenario no harmonic distortion as blue circles and the impedance of the scenario with harmonic distortion as green asterisks

- [1] A. Riccobono, E. Liegmann, A. Monti, F. Castelli Dezza, J. Siegers, and E. Santi, "Online wideband identification of three-phase AC power grid impedances using an existing grid-tied power electronic inverter," in *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2016*, 2016.
- [2] M. Jaksic, Z. Shen, I. Cvetkovic, D. Boroyevich, R. Burgos, and P. Mattavelli, "Wide-bandwidth Identification of small-signal dq impedances of ac power systems via single-phase series voltage injection," in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015*, 2015.
- [3] T. Roinila, M. Vilkkö, and J. Sun, "Broadband methods for online grid impedance measurement," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013*, 2013.
- [4] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. R. Watson, and A. R. Wood, *Power system harmonic analysis*. 2013.

■ **Identifikation und Bewertung von Leistungstransiten im Netzbetrieb**

M. Sc. Paul Burkhardt

Durch den fortschreitenden Ausbau von Erneuerbaren Energien stehen die Verteilnetzbetreiber vor neuen Herausforderungen. Dazu zählen beispielsweise ungewollte Leistungstransite, welche bei 110 kV-Netzen auftreten und die Betriebsmittelauslastungen zusätzlich erhöhen können. Ursache für die Leistungstransite sind parallel verlaufende Leitungen in einem vermaschten Netzverbund bestehend aus der 380 kV und 110 kV Ebene. Wird innerhalb der 380 kV Ebene Leistung übertragen, fließt aufgrund der Impedanzverhältnisse ein Teil der übertragenen Leistung durch das 110 kV Netz. Somit übernimmt das 110 kV Netz parasitär einen Teil der Energieübertragung und die Kapazitäten für dessen eigentliche Funktion, der Energieverteilung, werden reduziert.

Um die Transitflüsse im realen Netzbetrieb in Echtzeit bestimmen zu können, wurde am IEH ein Verfahren zur Schätzung der Transitflüsse entwickelt und dieses mit einem PMU-Monitoringsystem verknüpft. Durch das PMU-Monitoringsystem können aufgrund der GPS-Synchronisation der Messgeräte Spannungswinkel verschiedener Stationen gemessen und miteinander verglichen werden. Durch die direkte Messung der Spannungswinkel kann die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse gesteigert werden. Das PMU-Monitoringsystem ist seit Anfang 2021 in einem Netzgebiet der Netze BW in Betrieb und liefert seither zuverlässig Messdaten.

Da die Auswirkungen von Transitflüssen auf den Netzbetrieb maßgeblich von der aufgrund von Lasten oder Erzeugern im 110 kV-Netz bereits vorhandenen Grundauslastung abhängig sind, wurde ein Verfahren zur automatisierten Bewertung von Transitflüssen erarbeitet. Basierend auf den relevanten Eingangsgrößen wird mit Hilfe von Expertenwissen und einem Fuzzy-Algorithmus für jedes Betriebsmittel eine Kenngröße der Transitbelastung ermittelt. Zudem wird auf Basis eines Analytic Hierarchy Process (AHP) die Gesamtbelastung des betrachtenden Netzgebiets bestimmt. Der Kennwert für das Gesamtnetz kann beispielsweise dazu dienen, die Notwendigkeit von Optimierungsmaßnahmen, wie beispielweise Schalthandlungen, zu erkennen.

Im nächsten Schritt soll das entwickelte Verfahren zyklisch auf aktuelle Snapshots aus der Leitwarte des am Forschungsprojekts beteiligten Netzbetreibers angewendet werden. Zudem ist geplant, verschiedene Optimierungsalgorithmen zu implementieren, welche in Quasi-Echtzeit Maßnahmen zur Reduktion der Belastung des 110 kV Netzes identifizieren sollen.

■ **Identification and Evaluation of Transit Power Flows in Grid Operation**

M. Sc. Paul Burkhardt

As a result of the progressive expansion of renewable energies, distribution grid operators are facing new challenges. These include, for example, unwanted transit power flows, which occur in 110 kV grids and can increase loading of transformers and lines additionally. Transit power flows are caused by parallel lines in a meshed grid consisting of 380 kV and 110 kV levels. If power is transmitted within the 380 kV level, part of the transmitted power flows through the 110 kV grid due to the impedance ratios. Thus, the 110 kV grid takes over a part of the power transmission and the capacities for its actual function, the power distribution, are reduced.

In order to be able to estimate the transit power flows in grid operation in real time, a method for estimating the transit flows was developed at the IEH. This method includes close to real time measurements obtained by a PMU monitoring system. Through the PMU monitoring system, voltage angles at different substations can be measured and compared with each other due to the GPS synchronization of the measuring devices. By measuring the voltage angles directly, the accuracy of the obtained results can be increased. The PMU monitoring system has been in operation in a grid zone of Netze BW since the beginning of 2021 and has been reliably supplying measurement data since.

As the effects of transit power flows on grid operation depend significantly on the basic load already present due to loads or generators in the 110 kV grid, a method for the automated evaluation of transit power flows was developed. Based on the relevant input variables, a parameter of the transit load is determined for each line or transformer within the 110 kV grid. Expert knowledge and a fuzzy algorithm are used for this purpose. In addition, the total transit loading of the whole grid zone is determined on the basis of an Analytic Hierarchy Process (AHP). The calculated transit loading for the entire grid can be used, for example, to identify the need for optimization measures such as switching operations.

In the next step, the developed method is to be applied cyclically to current snapshots from the grid operator's control room. In addition, it is planned to implement various optimization algorithms that will identify measures to reduce the transit loading on the 110 kV grid in close to real time.

■ **Flexibilitätsermittlung von Verteilnetzen mit hoher Durchdringung erneuerbarer Energien**

M.Sc. Daniel Contreras

Konventionelle Kraftwerke durch viele dezentrale Energieerzeugungsanlagen (DEA) in den Mittel- und Niederspannungsnetzen zu ersetzen, stellt die Planungs- und Betriebsprozesse in den Verteilnetzen vor große neue Herausforderungen. Die Steuerung von wenigen konventionellen Kraftwerken erfordert deutlich weniger Ressourcen als der Betrieb von unzähligen dezentralen Anlagen, um deren Flexibilität für Systemdienstleistungen optimal zu nutzen. Nichtsdestotrotz werden die meisten Systemdienstleistungen auf der Ebene des Übertragungsnetzes benötigt (z.B. Redispatch, Bilanzierung, Frequenzregelung), was bedeutet, dass ein vertikaler Stromtransport notwendig ist, was neue Methoden erfordert, um zu quantifizieren, wie viel Flexibilität von der Verteilungsebene aus bereitgestellt werden kann.

Die realisierbare Betriebsregion (engl. FOR) ermöglicht die Beschreibung des aggregierten Flexibilitätspotenzials der DEA in den aktiven Verteilnetzen (engl. ADN) unter Berücksichtigung der technischen Beschränkungen sowohl der Anlagen als auch des Netzes. Diese Forschung fokussiert sich auf die Entwicklung einer Methode, mit der die aggregierte Flexibilität, die ein Verteilungsnetz an einer einzigen Kuppelstelle zum Übertragungsnetz bieten kann, ermittelt werden kann. Die vorgeschlagene Methode basiert auf einem linearen OPF mit den Limitierungen der Flexibilitätsbereitstellungseinheiten (engl. FPU) als Input. Jede DEA, jedes Speichersystem oder steuerbare Last, die einem elektrischen Netz Flexibilität bieten kann, kann als FPU betrachtet werden. Eine solche Formulierung des Problems erfordert eine detaillierte Kenntnis der Netztopologie sowie der Netzrestriktionen, was eine zusätzliche Herausforderung darstellt, der man sich stellen muss. Das Konzept kann erweitert werden, um Zeitreihen der Lasterzeugung einzubeziehen, wobei der Prozess für jeden Zeitschritt wiederholt wird. Eine schematische Darstellung des Aggregationskonzepts ist in Abb. 1 dargestellt. Dieser Ansatz bietet im Vergleich zu ähnlichen Methoden, z.B. Monte-Carlo-Simulationen oder nichtlinearen OPF-basierten Methoden, eine erhebliche Verkürzung der Verarbeitungszeit. Die Linearisierung der Leistungsflussgleichungen wirkt sich zwar auf die Genauigkeit der Lösung aus, der Kompromiss mit der Reduzierung der Rechenzeit ist jedoch erheblich.

Das erwartete Ergebnis ist ein PQ-Flexibilitätsdiagramm des Netzes, das die realisierbaren Betriebspunkte zeigt, die das Netz erreichen kann, ohne seine eigenen internen Einschränkungen (Spannungsgrenzen und Überlastung der Leitungen) zu verletzen. Diese Informationen können zwischen den Netzbetreibern ausgetauscht werden (Bottom-up-Ansatz) und ihnen helfen, ihre Entscheidungsmechanismen für den Netzbetrieb zu verbessern.

- **Flexibility estimation of distribution grids with high penetration integration of RES**

M.Sc. Daniel Contreras

Replacing conventional power plants by more than a few distributed energy resources (DER) in the medium and low voltage grids poses great new challenges for planning and operation processes in distribution grids. Controlling a handful of conventional power plants demands significantly less resources than operating a myriad of decentralized plants, in order to make the most of their flexibility for ancillary services. Nevertheless, most ancillary services are required at the transmission system level (e.g. redispatch, balancing, frequency control), meaning that vertical power transport is necessary, requiring new methods to quantify how much flexibility can be provided from the distribution level.

The feasible operation region (FOR) allows for the description of the aggregated flexibility potential of DER in active distribution networks (ADN), while respecting the technical restrictions of both plants and grid. This research focuses in the development of a method that performs the aggregation of the flexibility that a distribution grid can provide at a single interconnection point to the transmission grid. The proposed method is based on a linear OPF with the limits of the flexibility providing units (FPU) as input. Any decentralized generating unit, storage system or controllable load that can provide flexibility to an electrical grid can be considered as a FPU. Such a formulation of the problem requires a detailed knowledge of the grid topology, as well as the grid constraints, adding an additional challenge that needs to be faced. The concept can be extended to incorporate time-series of generation of load, where the process is repeated for each time step. A schematic representation of the aggregation concept is shown in Fig. 1. This approach provides a considerable reduction in processing time compared to similar methods, e.g. Monte-Carlo simulations or non-linear OPF-based methods. The linearization of the power flow equations has an impact in the accuracy of the solution, yet the trade-off with the reduction in computational time is significant.

The expected result is a PQ flexibility chart of the grid, which shows the feasible operation points that the grid can achieve without violating its own internal constraints (voltage limits and overload of branches). This information can be shared between grid operators (bottom-up approach), and help them improve their decision-making mechanisms on how to operate the grid. By linearizing the grid equations, the computation speed of the algorithm can be drastically increased, while maintaining the accuracy. An example of the method applied to the CIGRE 20kV test-bench network is shown in Fig. 2, where a comparison with the random sampling approach using different probability distribution functions (PDF) is provided.

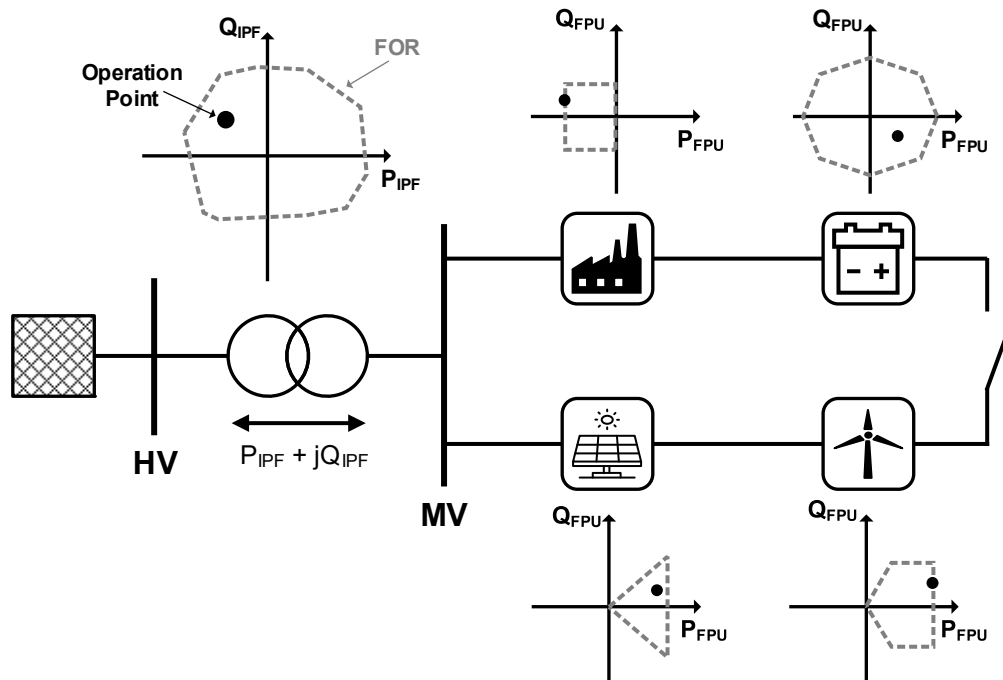


Fig. 1: Schematische Darstellung des Aggregationsalgorithmus.

Schematic representation of the FOR concept applied to an ADN.

Durch die Linearisierung der Netzgleichungen kann die Berechnungsgeschwindigkeit des Algorithmus unter Beibehaltung der Genauigkeit drastisch erhöht werden. Ein Beispiel der Methode, die auf das 20kV-Benchmarknetz der CIGRE angewandt wird, ist in Fig. 2 dargestellt, wo ein Vergleich mit dem Zufallsverfahren unter Verwendung verschiedener Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen (PDF) dargestellt ist.

Die erwartenden Ergebnisse sind PQ-Flexibilitätsdiagramme des Netzes, welche die möglichen Betriebspunkte zeigen, die das gesamte Netz ohne Verletzung von Netzrestriktionen erreichen kann. Diese Informationen können von Netzbetreibern gemeinsam genutzt werden (unter Berücksichtigung eines Bottom-up-Ansatzes) und helfen ihnen, ihre Entscheidungsmechanismen im Netzbetrieb zu verbessern. Durch die Linearisierung der Lastflussrechnungsgleichungen kann die Rechenleistung des Algorithmus drastisch verbessert werden, während die Genauigkeit beibehalten wird. Ein Vergleich zwischen einem linearen Aggregationsverfahren mit einem Stichprobenverfahren ist in Fig. 2 gezeigt. Die Einbindung von Zeitreihen in das Konzept ist in Fig 3. dargestellt, in der die Verteilung der Betriebspunkte des Netzes zu sehen sind.

Die entwickelte Methode hat viele praktische Anwendungen, die bei der Verbesserung einer ÜNB-VNB-Koordination helfen können. Beispielsweise kann die Auswirkung einer Aktivierung von Flexibilitäten durch den ÜNB bewertet werden, welche sich innerhalb des Netzes eines VNB befinden (z.B. durch Frequenzregelung). Die Auswirkungen eines Flexibilitätsmarktes kann beobachtet werden, indem Marktergebnisse als Einschränkungen in das OPF-Modell aufgenommen werden.

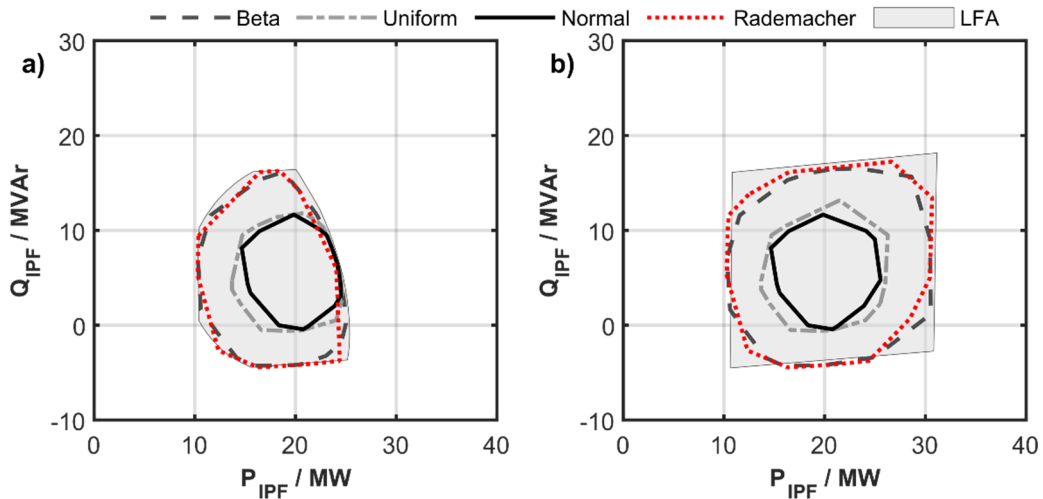


Fig. 2: Vergleich des linearen Aggregationsverfahrens mit Monte-Carlo Simulationen. Comparison of LFA method with random sampling approach using different PDF.

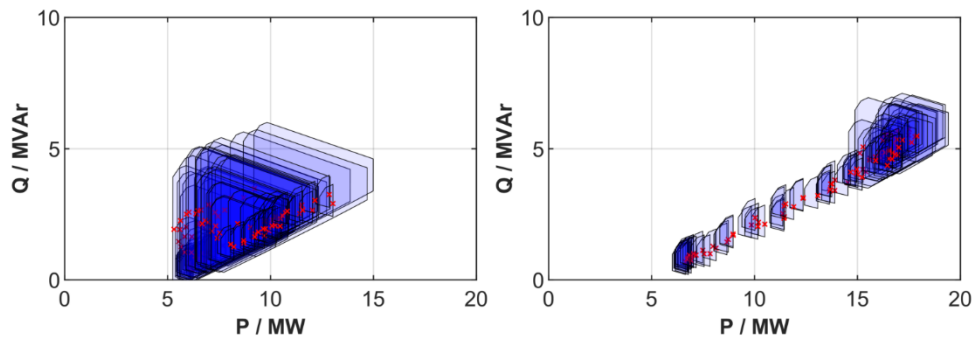


Fig. 3: Aggregiertes Diagramm der Flexibilität des CIGRE 20kV-Netzes über verschiedene Zeitrahmen. Aggregated flexibility chart of CIGRE 20kV test-bench over different time-frames.

In Fig. 3, the resulting aggregation over time is provided, showing how the flexibility charts move among the PQ plane due to the influence of the time-series and the reactive power absorption. The probability distribution of the charts show how the operation points of the grid are distributed. This information could be used to define specific schedules at the TSO-DSO interconnection point.

The developed method can have many practical applications, which can help to improve the TSO-DSO coordination. It can help to evaluate the effect of the activation of flexibilities by TSOs located within the distribution grids (e.g. for frequency control purposes). The impact of a flexibility market can be observed by incorporating market results as constraints in the OPF model. Distribution grids operating at more than a one high voltage level can be represented by the aggregation of the results acquired from the single feeders, therefore reducing the need to declare sensitive grid information.

■ Characterization of Future Converter-based Power System based on Short-Circuit Power

M. Sc. Deepak Deepak

Power system is transitioning from synchronous generators (SG) to power electronics based generating units. This is because of integration of more and more renewable sources of energies (RES). As a result of this transition, there are fundamental changes happening in the way power system is characterized. Short-circuit power (SCP) is one such parameter used for characterization. This parameter is also changing which has resulted into re-evaluation of definitions derived from SCP. Therefore, in order to characterize the future power-electronics based power system, the short-circuit characteristics for these generating units is being analyzed.

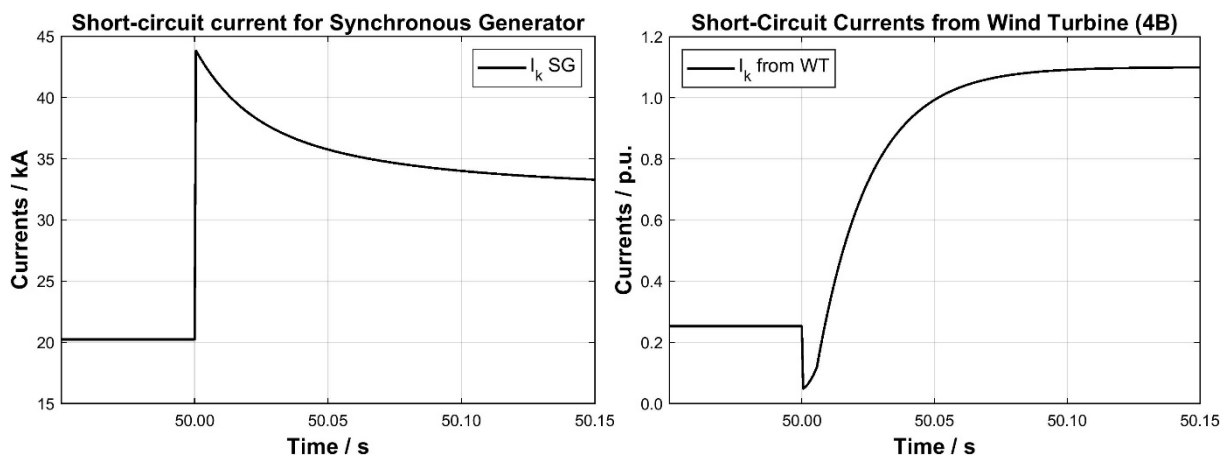


Fig. 1: Short-circuit current response from Synchronous generator (SG) and Wind Turbine (WT) Type 4B

The figure above shows the short-circuit current (SC) response to three-phase SC. The difference between the response to short-circuit is quite clear. It can be seen that unlike SG, there is no instantaneous response from WT at the instant of SC. Also, the SC current from WT increases during the fault because of a delay in controller action. Whereas in case of SC current from SG, it decreases during the SC due to increase in the synchronous impedance. In a classical power system, based on the response of SG to SC, important parameters, like Short-circuit ratio, protection settings, stability indices, are calculated. The definition of these parameters is to be re-evaluated to see if these will be relevant from future power system planning and operation.

The work is currently being done towards further evaluation of definitions from SCP for the future converter-based power system.

■ **Künstliche Intelligenz in der Power Quality Analyse**

M. Sc. Adrian Eisenmann

Eine ganzheitliche Betrachtung der Spannungs- und Stromqualität ermöglicht es, Interdependenzen der messtechnischen Erfassung, der simulativen Abbildung, der datenbasierten Analyse und der präventiven Vorhersagbarkeit von Ereignissen der Spannungsqualität zu identifizieren. Die evaluierten Zusammenhänge ermöglichen eine tiefgehende Analyse von Phänomenen der Spannungsqualität.

Verschiedene industrielle Verbraucher in der Forschungsfabrik ARENA2036 wurden deshalb zur Abbildung eines virtuellen Zwillings vermessen und charakterisiert. Damit wurde für jede Maschine ein virtuelles Abbild der elektrischen Betriebszustände erstellt. Die virtuellen Abbildungen der Maschinen wurden anschließend zu einem Abbild eines virtuellen Maschinenparks zusammengefügt. Als Messmittel wurde hierbei ein hochauflösendes Messgerät mit einer maximalen Auflösung von 409,6 kHz verwendet. Zusätzlich wurde die auf dem Dach der Forschungsfabrik befindliche Photovoltaikanlage mit einer installierten Leistung von 77,8 kW_p erfasst und in die Simulation mit aufgenommen. Fokus lag hierbei auf der Beeinflussung des Netzzustandes und damit des Maschinenparks durch die Netzzurückwirkungen der Photovoltaikanlage. Weitere Messdaten konnten durch das integrierte, kontinuierlich aufzeichnende Messsystem der Forschungsfabrik erhoben werden.

Diese Datengrundlage diente als Basis für eine zeitreihenbasierte Zustandsschätzung der Spannungsqualität, für die Ansätze aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz gewählt wurden. Zusätzlich wurde eine Strategie zur Vermeidung von Spannungsqualitätsproblemen auf Basis eines evolutionären Algorithmus und Ansätzen aus dem Bereich des bestärkenden Lernens entwickelt. Durch die Strategien können konventionelle Ansätze zur Vermeidung von Netzstörungen ergänzt oder substituiert werden. Zur Klassifikation von Spannungsqualitätsproblemen wurden darüber hinaus Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens sowie des tiefen Lernens wie der k-Nächste-Nachbarn-Algorithmus, entscheidungsbaumbasierte Verfahren, Stützvektormethoden und langes Kurzzeitgedächtnis implementiert.

Durch die umgesetzten Methoden können in modernen, kommunikationsfähigen elektrischen Netzen zusätzliche Verluste in Transformatoren, Leitungen und Maschinen sowie Fehlfunktionen in Netzbetriebsmitteln vermieden werden. Dadurch ermöglichen die Ansätze eine erweiterte Integration verteilter, erneuerbarer Energiequellen sowie die Implementierung einer Industrie 4.0 Schnittstelle zur Berücksichtigung von Spannungsqualität als neuer Prozessvariable für einen störungsfreien Netzbetrieb.

■ **Artificial Intelligence in Power Quality Analysis**

M. Sc. Adrian Eisenmann

A comprehensive analysis of the voltage and current quality allows to work out interdependencies of the metrological recording, the simulative mapping, the data-based analysis and the preventive predictability of power quality events. The evaluated interdependencies enable an in-depth analysis of power quality events.

Various industrial consumers could be measured and characterised in the factory of the future ARENA2036 for power quality model development. This created a virtual twin of the electrical operating states for each machine. The virtual twins of the machines were combined to form an image of a virtual machine pool. A high-resolution measuring device with a maximum resolution of 409.6 kHz was used for the recording. In addition, the photovoltaic system on the roof of the research factory with an installed output of 77.8 kW_p was recorded and included in the simulation. The focus was set on the influence of the grid condition and the machine pool on the grid perturbations from the photovoltaic system. Further measurement data was collected by the integrated, continuously recording measurement system of the research factory.

This data served as basis for a time series-based state estimation of the power quality, for which approaches from the field of artificial intelligence were chosen. In addition, a strategy for avoiding power quality problems was developed based on an evolutionary algorithm and approaches from the field of reinforcement learning. The strategies can be used to supplement or even substitute conventional approaches for avoiding grid disturbances. For the classification of power quality problems, methods from the areas of machine learning as well as deep learning, such as the k-nearest neighbour, decision tree-based methods, support vector methods and long short-term memory were also implemented.

The implemented methods can avoid additional losses in transformers, lines, distortion reactive power and malfunctions in grid equipment in modern, communication-capable electrical grids. In this way, the approaches enable an extended integration of distributed, renewable energy sources as well as the implementation of an Industry 4.0 interface for the consideration of power quality as a new process variable for fault-free grid operation.

■ **Coordinated Vertical Provision of Flexibility from Distribution Systems**

M. Sc. Heiner Früh

The large dispersion of the flexibility providing units (FPU) among all voltage levels of the power system requires large, comprehensive grid models to assess the impact of flexibility usage during system operation. A centralized approach would require the different system operators to exchange their respective grid states constantly. In 2020 there were 874 DSOs in Germany alone, who would need to share their grid models and measurements in close-to-real-time with each other and the four German TSOs. For this reason, aggregation methods that allow distributing the problem and reducing the complexity of the models can be helpful. One possible solution is to use the concept of the feasible operating region (FOR) as an information interface for a distributed concept. To overcome the described issues of centralized, superimposed models for flexibility provision, a cascading approach is proposed. In this concept the flexibility of FPU is aggregated stepwise among the different voltage levels from the bottom-up. Similarly, the usage of flexibility is coordinated stepwise across the voltage levels as well, from the top-down (disaggregation), as schematically depicted in Fig. 1 a). Each grid can be seen as a semi-independent grid cell with the ability to change its operation point within its FOR, thus making it a flexibility providing grid (FPG). The FOR is used as an interface for the necessary information exchange between the system operators, eliminating the need to exchange grid models and grid states, reducing the amount of information that needs to be shared in general.

In order to access flexibility provided by an active distribution network (ADN), the higher-level system operator requests a change of the ADNs current operating point at the interconnection point between the ADN and the overlaying grid. This request must then be distributed among the underlying FPU, considering technical aspects such as grid constraints, as well as monetary aspects. For this purpose, a top-down disaggregation method is developed. This method is based on the linearized optimal power flow (OPF) defined in [1] and follows a distributed and hierarchical approach. The OPF aims at finding an optimal usage of the individual FPU for a given interconnection power flow (IPF) to the overlayed grid, which is a single point in the FOR of the ADN. The term optimal depends on the defined objective function which can vary between voltage levels and system operators, who might have individual preferences. Hence the objective function needs to be constructed based on these preferences.

The IPF is defined as the active and reactive power flow at the interconnection point to the overlaying grid ($P_{IPF}|Q_{IPF}$). The requested IPF is set as a constraint in the OPF, considering a small tolerance ε for numerical stability:

(1)

$$Q_{IPF} \geq Q_{IPF_{requested}} - \varepsilon$$

The consideration of grid constraints for voltage magnitudes and utility loadings remains unchanged to the OPF model in [1]. The objective function of the disaggregation method is defined from a technical point of view, minimizing the biggest difference between the current and the new operating points of the available FPU's. Because the size and shape of the FPU's can vary, the operation point changes are considered in respect to their individual flexibility potential. Consequently, an even distribution of the flexibility request amongst all FPU's can be achieved. A weighted objective function is chosen to prioritize the minimization of either active or reactive power changes for the set of available FPU's F :

$$\min \lambda = w_1 \max\{\Delta P_f\} + w_2 \max\{\Delta Q_f\}, \quad \forall f \in F \quad (2)$$

$$\Delta P_f = \left| \frac{P_{f,current} - P_f}{P_{f,max} - P_{f,min}} \right|, \quad \forall f \in F$$

$$\Delta Q_f = \left| \frac{Q_{f,current} - Q_f}{Q_{f,max} - Q_{f,min}} \right|, \quad \forall f \in F \quad (3)$$

The objective function (2) contains absolute values; however, a linear optimization model is preferred, due to the improved performance. Therefore, the objective function is reformulated using two auxiliary variables P_{max} and Q_{max} and a set of additional linear constraints:

$$\min \lambda = w_1 \Delta P_{max} + w_2 \Delta Q_{max} \quad (4)$$

$$\Delta P_{max} \geq \frac{P_{f,current} - P_f}{P_{f,max} - P_{f,min}}$$

$$\Delta P_{max} \geq -\left(\frac{P_{f,current} - P_f}{P_{f,max} - P_{f,min}} \right), \quad \forall f \in F$$

$$\Delta Q_{max} \geq \frac{Q_{f,current} - Q_f}{Q_{f,max} - Q_{f,min}}$$

$$\Delta Q_{max} \geq -\left(\frac{Q_{f,current} - Q_f}{Q_{f,max} - Q_{f,min}} \right) \quad (5)$$

The curtailment of RES needs to be treated with special care, as they have legal feed-in priority in Germany. Therefore, the optimization needs to aim at maximizing the feed-in limit of RES, by preferring the usage of other types of FPU's. Additionally, the implemented feed-in curtailment aims to be fair towards the individual FPU's by applying the same feed-in limit for all RES of the same primary energy source, i.e. solar and wind. This is done on a per optimization basis, which means the feed-in limits can still be different between grids or even feeders, depending on the decoupling of the whole distribution system into flexibility providing grids (FPGs) and therefore individual optimizations. In order to achieve such behavior, additional auxiliary variables are

introduced, which represent the lowest feed-in limit of active power in reference to the nominal installed power of every PV and wind generator (WG):

$$\begin{aligned} P_{limit,PV} &= \min \left\{ \frac{P_f}{P_{f,nominal}} \right\}, & \forall f \in \{PV\} \\ P_{limit,WG} &= \min \left\{ \frac{P_f}{P_{f,nominal}} \right\}, & \forall f \in \{WG\} \end{aligned} \quad (6)$$

These auxiliary-variables, which are to be maximized, are defined through a set of linear constraints:

$$\begin{aligned} P_{limit,PV} &\leq \frac{P_f}{P_{f,nominal}}, & \forall f \in \{PV\} \\ P_{limit,WG} &\leq \frac{P_f}{P_{f,nominal}}, & \forall f \in \{WG\} \end{aligned} \quad (7)$$

The previously defined objective function (4) needs to be adjusted, in order to achieve a preferred usage of non-RES units and therefore avoid curtailment of RES. The operation point changes need to be minimized separately for the different kind of RES as well as the group of other kinds of FPU, e.g. BESS. The new objective function is extended further, to maximize the new auxiliary-variables as well as the overall power generated by RES:

$$\begin{aligned} \min \lambda &= w_1 (\Delta P_{max,PV} + \Delta P_{max,WG} + \Delta P_{max,nonRES}) \\ &+ w_2 (\Delta Q_{max,PV} + \Delta Q_{max,WG} + \Delta Q_{max,nonRES}) \\ &- w_3 (P_{limit,PV} + P_{limit,WG}) - w_4 \sum P_f, & \forall f \in \{PV, WG\} \end{aligned} \quad (8)$$

The weight factors can be adjusted according to the individual preferences of each DSO. Hereby, the ratio between w_1 and w_2 affects the prioritization of the largest deviation of either active or reactive power. The factors w_3 and w_4 need to be chosen according to the number of renewable FPU $n_{FPU,RES}$:

$$w_3 \geq n_{FPU,RES} w_4 \quad (9)$$

The maximization of generated power by RES (w_3, w_4) conflicts with the minimization of the operating point changes (w_1). Therefore, the factors need to be adjusted to each other, in order to avoid curtailment of RES:

$$w_1 < w_3 \quad (10)$$

An example for the use of the described disaggregation method is shown in Fig. 1 b). The FPU of a real low voltage grid, including 3 controllable PV plants and 1 battery energy storage system (BESS), are used to change the operating point of the grid, according to a request from the medium voltage grid operator. It can be seen that the feed-in priority for RES is working, because the PV plants are set to maximum generation, while the BESS handles the requested change of the IPF.

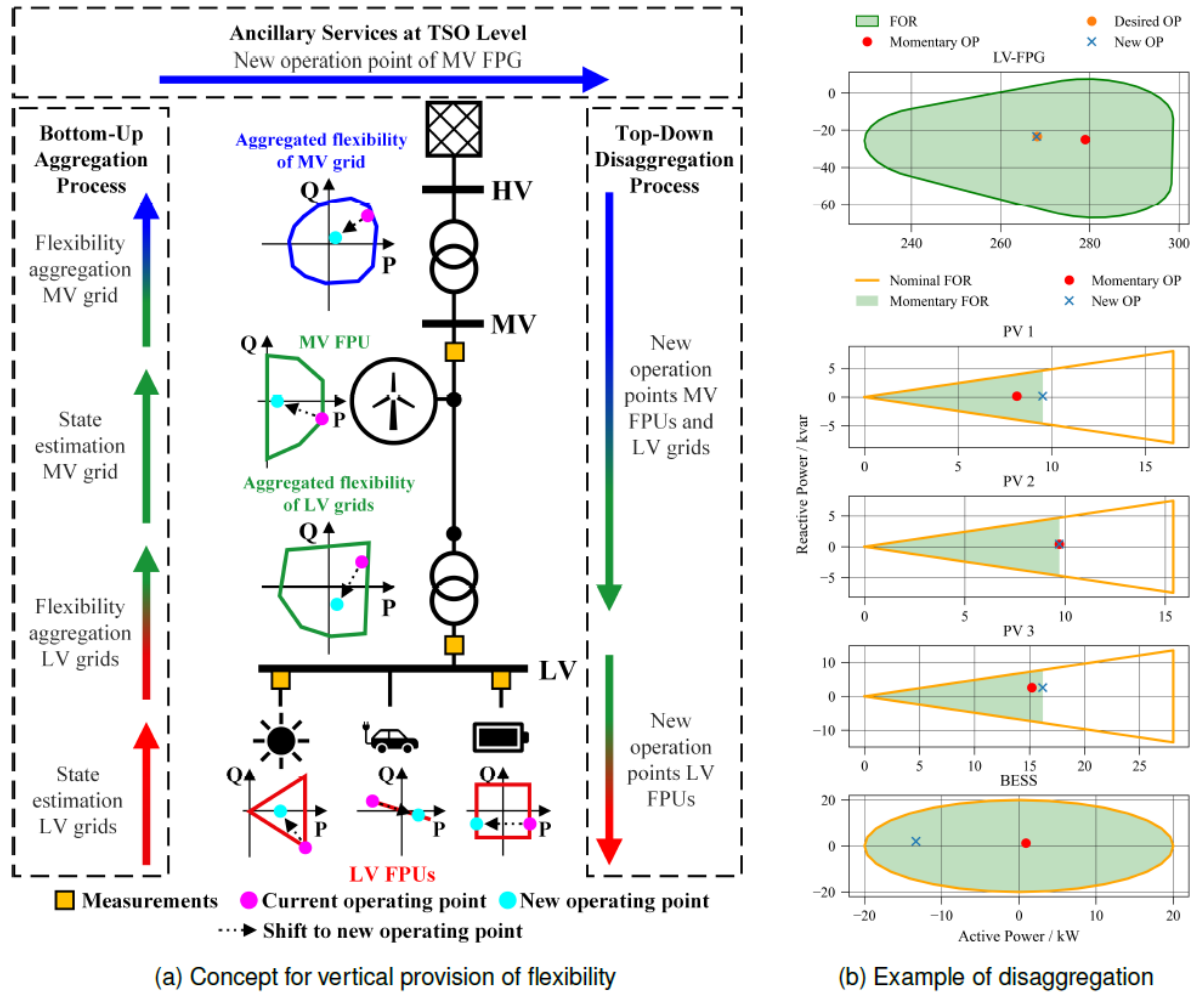


Fig. 1: (a) Decentralized and hierarchical concept for vertical provision of flexibility including bottom-up aggregation and top-down disaggregation.
(b) Example of setting a new operating point for a flexibility providing grid within its FOR by using the disaggregation method to find the optimal setpoints for the individual FPGs.

References

- [1] D.A. Contreras and K. Rudion, "Improved Assessment of the Flexibility Range of Distribution Grids Using Linear Optimization", in 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC) Dublin, Ireland, Jun. 2018, doi: 10.23919/PSCC.2018.8442858.

- **(n-2)-Betrachtung und der Einsatz von wetterabhängigen Strombelastbarkeiten**

M. Sc. Markus Miller

Die Netzbetreiber stehen aufgrund der Integration der stetig zunehmenden und bereits heute sehr hohen installierten Leistung von erneuerbaren Energien (EE) vor neuen Herausforderungen. Um zukünftige Überlastungen zu vermeiden und um ein Gelingen der Energiewende sicherzustellen, ist der Ausbau des Stromnetzes von größter Bedeutung. Durch die erforderlichen Verstärkungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sind regelmäßig Freischaltungen von Betriebsmitteln im Stromnetz erforderlich. Diese Freischaltungen können während des Netzausbaus jedoch einige Wochen dauern. In dieser Zeit muss nach den gültigen Planungsrichtlinien für Hochspannungsnetze die die (n-1)-Sicherheit des Netzes erfüllt sein. Durch die geplante Abschaltung eines Betriebsmittels und ein zusätzlicher Ausfall eines weiteren Betriebsmittels ergibt sich ein (n-2)-Fall, womit eine (n-2)-Betrachtung notwendig ist. Zudem kann die Schaffung von betrieblichen Freiheiten durch eine optimierte Ausnutzung der vorhandenen Betriebsmittel die Zeiträume für Freischaltungen vergrößern und zur Sicherung der Energieversorgung beitragen.

Hierfür wird am IEH eine Methodik für die (n-2)-Berechnung aufgebaut, die auf einer am IEH entwickelten linearisierten (n-1)-Berechnung basiert und eine vollständige Berechnung aller (n-2)-Fälle ermöglicht. Aus den Ergebnissen der vollständigen (n-2)-Berechnung können dann die (n-2)-Fälle bestimmt werden, die zu Überlastungen auf anderen Betriebsmitteln führen und durch geeignete Maßnahmen des Netzbetreibers vermieden werden müssen. Zudem können geeignete Zeiträume für Freischaltungen identifiziert werden, bei denen Verstärkungs- und Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden können, ohne dabei das Netz durch einen möglichen Betriebsmittelausfall zu überlasten. Die Zeiträume für Freischaltungen können zudem erhöht werden, indem die (n-2)-Methode wetterabhängige Strombelastbarkeiten für Freileitungen zur Steigerung der Übertragungskapazität berücksichtigt.

Die Auslegung der Freileitungen erfolgt in den Hochspannungsnetzen nach einem definierten Szenario für die Umgebungseinflüsse. Da die für diesen statischen Auslegungsfall verwendeten Umgebungseinflüsse in der Realität nur selten auftreten, ist eine Methodik zur Steigerung der Übertragungsleistung unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Wettereinflüsse aufgebaut worden. Die Grundlage bildet ein Modell für die Wärmebilanz der Freileitungen, bei dem die Erwärmung des Leiters durch den Stromfluss und die Sonneneinstrahlung der Kühlung durch die Konvektion und der Wärmeabstrahlung entspricht. Für jede Freileitung kann dann mit dem thermischen Modell und den 15-minütigen Zeitreihen für die Umgebungseinflüsse eine dynamische, wetterabhängige Strombelastbarkeit berechnet werden.

- **(n-2)-Analysis and the Use of Weather-Dependent Current Ratings**

M. Sc. Markus Miller

The grid operators are facing new challenges due to the integration of the steadily increasing and already high installed capacity of renewable energies (RES) in distributed locations. This has resulted in change in power flows and in order to avoid future overloadings and to ensure the success of the energy system transformation, the expansion of the grid is of utmost importance. The necessary reinforcement and maintenance measures require regular disconnections of equipment from the power grid. Furthermore, these disconnections can take a few weeks during grid expansion. According to the valid planning guidelines for high-voltage networks, the (n-1)-criterion of the network must be fulfilled during this time. The planned disconnection of an HV equipment and an additional failure of another HV equipment results in a (n-2) case, which means that a (n-2) consideration becomes necessary. In addition, the creation of operational flexibility through optimized utilization of the existing HV equipment can increase the time periods for planned disconnection and contribute to securing the energy supply.

For this purpose, a method for the (n-2)-calculation is being developed at the IEH, which is based on a linearized (n-1)-calculation developed at IEH and which enables a complete calculation of all (n-2)-cases. The results of the complete (n-2) calculation can then be used to determine the (n-2)-cases that lead to overloadings on other HV equipment and must be avoided by taking suitable measures by the grid operator. In addition, suitable periods for disconnections can be identified, during which reinforcement and maintenance measures can be carried out without overloading the grid due to a possible equipment failure. The time periods for planned disconnection can also be increased by considering weather-dependent current ratings for overhead lines to increase the transmission capacity in the (n-2)-method.

The design of overhead lines in high-voltage grids is based on a defined scenario for the ambient influences. Since the ambient influences used for this static design case rarely occur in reality, a method for increasing the transmission capacity has been developed considering the environmental and weather influences. The method is based on a model for the heat balance of the overhead lines, in which the heating of the conductor by current flow and the solar radiation is equal to the cooling by convection and radiation. For each overhead line, a dynamic, weather-dependent current rating can then be calculated using the thermal model and the 15-minute time series for the environmental influences.

In Fig. 1 sind die Leitungsauslastungen für einen bestimmten (n-1)-Fall eines Hochspannungsnetzes dargestellt. Dabei zeigt der linke Boxplot die Leitungsauslastung ohne Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten für jede Freileitung. Die Boxplots auf der rechten Seite zeigen die Ergebnisse mit Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten. Hierfür würden die Strombelastbarkeiten des statischen Auslegungsfalles bei der Ausfallanalyse durch die Zeitreihen für die dynamischen Strombelastbarkeiten ersetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Übertragungskapazität durch den Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten gesteigert werden kann.

Neben der Freischaltung eines Betriebsmittels aus Fig. 1 sind in Fig. 2 die Leitungsauslastungen für einen zusätzlichen Ausfalls eines Betriebsmittels zu sehen. Der linke Boxplot zeigt die Leitungsauslastung ohne und der rechte Boxplot mit Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten für jede Freileitung. Die Ergebnisse zeigen, dass einige Leitungen wie die Leitung 28 und 30 nicht durch den (n-2)-Fall beeinflusst werden, da die Auslastungen im (n-1) und (n-2)-Fall konstant bleiben. Jedoch steigt die Auslastung auf den Leitungen 26, 27, 29 und 31 stark an und überlastet die Leitungen zu bestimmten Zeitpunkten im Jahr. Der Einsatz von dynamischen Strombelastbarkeiten kann in diesem (n-2)-Fall die Auslastungen unter die technische Grenze von 100 % begrenzen. Für den Ausbau des Stromnetzes bedeutet dies, dass im Netzbetrieb zu mehr Zeitpunkten Freischaltungen für Ausbaumaßnahmen umsetzbar sind, ohne die Netzsicherheit zu gefährden.

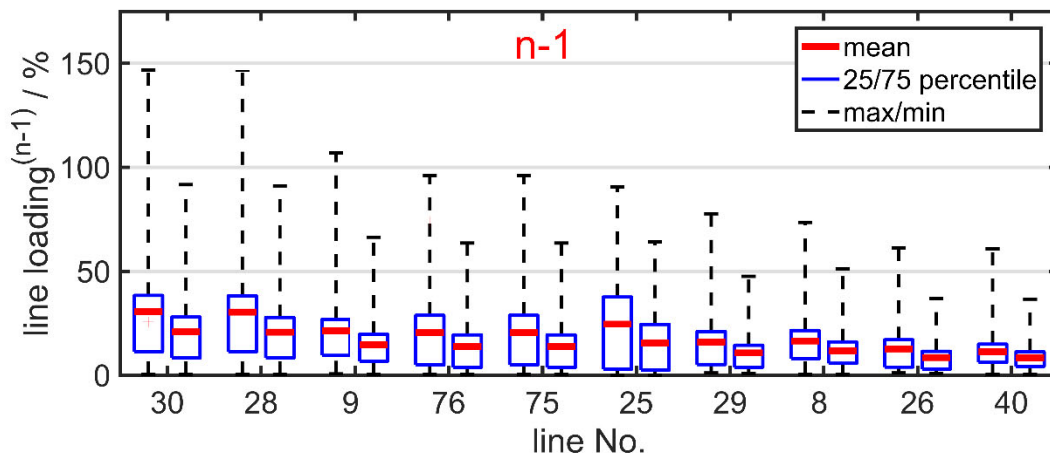


Fig. 1: Vergleich der Leitungsauslastung für einen (n-1)-Fall bei Einsatz der Nennstrombelastbarkeiten (linke Box) und der dynamischen Strombelastbarkeiten (rechte Box).
Comparison of the line loading for one (n-1)-case using the nominal current ratings (left box) and the dynamic current ratings (right box).

Fig. 1 shows the line loadings for a particular (n-1)-case of a high voltage grid. The left box plots show the line loadings of the system without using the dynamic current ratings for each line. The box plots on the right show the results after using the dynamic current ratings. For this purpose, the current ratings of the static design case in the contingency analysis would be replaced by the time series for the dynamic current ratings. The results show that the transmission capacity can be increased by using the dynamic current ratings.

In addition to the disconnection of an HV equipment from Fig. 1, Fig. 2 shows the line loadings for an additional outage of an HV equipment. The left boxplot shows the line loadings without and the boxplot on the right with the dynamic current rating for each line. The results show that some lines, such the lines 28 and 30, are not affected by the (n-2)-case because the line loadings remain constant in the (n-1) and (n-2)-cases. However, the load on the lines 26, 27, 29 and 31 increases sharply and overloads the lines at certain times of the year. In this (n-2)-case, the use of dynamic current ratings can limit the line loading to below the technical limit of 100 %. For the expansion of the power grid, this means that the grid operator can disconnect these lines for expansion measures at more times without endangering grid security.

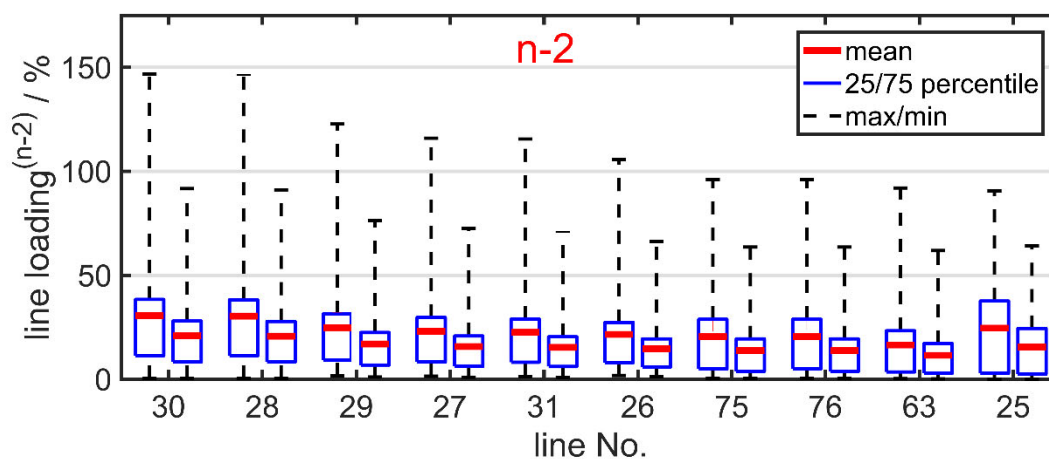


Fig. 2: Vergleich der Leitungsauslastung für einen (n-2)-Fall bei Einsatz der Nennstrombelastbarkeiten (linke Box) und der dynamischen Strombelastbarkeiten (rechte Box).
Comparison of the line loading for one (n-2)-case using the nominal current ratings (left box) and the dynamic current ratings (right box).

■ **Aggregation und Disaggregation von Flexibilitäten in Verteilnetzen**

M. Sc. Sharon Müller

Die voranschreitende Energiewende führt zu einem grundlegenden Wandel des Energieversorgungssystems. Die zunehmende Installation einer Vielzahl kleiner, dezentraler Erzeugungsanlagen in den Verteilnetzen einhergehend mit der Abschaltung von großen Kraftwerken im Übertragungsnetz erfordert eine neue, aktive Rolle der Verteilnetzbetreiber. Im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben zur Umsetzung von Redispatch 2.0 müssen schon jetzt Erzeugungsanlagen mit Leistungen von über 100 kW einen Beitrag zur sicheren Betriebsführung leisten können. Entscheidend für die Erbringung von Systemdienstleistungen aus dem Verteilnetz sind flexibel steuerbare Anlagen, die in der Lage sind, ihren Betriebspunkt netzdienlich anzupassen.

Durch die Aggregation des Flexibilitätpotentials vieler kleiner Anlagen kann die Flexibilität des gesamten Netzes bestimmt werden. Hierbei ist wichtig, dass ein tatsächlicher Abruf von Flexibilität nicht zu unzulässigen Netzzuständen wie Spannungsbandverletzungen oder erhöhten Betriebsmittelauslastungen führt. Um diese Netzrestriktionen berücksichtigen zu können, muss der Zustand des Netzes anhand einer begrenzten Anzahl von Messwerten aus dem Netz sowie einem rechenfähigen Netzmodell kontinuierlich abgeschätzt werden. Darauf aufbauend kann dann das Flexibilitätpotential des gesamten Netzes aggregiert, und so ein Bereich definiert werden, indem das Verteilnetz seinen Betriebspunkt bei Bedarf ändern kann.

Soll diese Flexibilität netzdienlich genutzt werden, muss die gewünschte Betriebspunktänderung des Netzes auf die einzelnen flexiblen Anlagen aufgeteilt werden. In der Regel gibt es eine Vielzahl an möglichen Kombinationen, sodass auch der Disaggregationsprozess optimiert werden kann. Beispielsweise können die Abregelung von Erneuerbaren Energien oder die Netzverluste minimiert werden.

Wird die Aggregation und Disaggregation von Flexibilitäten auf reale Verteilnetze angewandt, ergeben sich verschiedene Herausforderungen. Jede flexible Anlage muss zu jeder Zeit messtechnisch erfasst und ansteuerbar sein, woraus sich ein hoher Kommunikationsaufwand ergibt. Des Weiteren führen die fluktuierenden Erneuerbaren Energien sowie stochastische Laständerungen zu stark schwankenden Netzzuständen und auch Flexibilitätpotentialen. Die bereitstellbare Flexibilität kann demnach nicht durchgehend als konstant angenommen werden. Vielmehr ist notwendig, die Berechnung der Flexibilität in einer hohen Zeitauflösung durchzuführen, um auf sich ändernde Netzzustände reagieren zu können.

■ **Aggregation and Disaggregation of Flexibilities in Distribution Grids**

M. Sc. Sharon Müller

The ongoing transition of the energy supply system is leading to a fundamental change in the distribution system operation. The increasing number of small decentralized generation plants installed in the distribution grids together with the shutdown of large power plants in the transmission grid requires a new, active role of the distribution grid operators. As part of the legal requirements for the implementation of Redispatch 2.0, generation plants with an installed power of more than 100 kW must already be able to contribute in securing the operational grid management. Flexible controllable plants that are able to adjust their operating point to serve the grid are crucial for the provision of ancillary services from the distribution grid.

By aggregating the flexibility potential of many small power units, the flexibility of the entire distribution grid can be determined. Here, it is important that an actual access of the flexibility does not lead to inadmissible network conditions such as violations of the voltage limits or the thermal limit of lines and transformers. In order to be able to take these network restrictions into account, the system state has to be estimated continuously on the basis of a limited number of real grid measurements from the network as well as a network model. Based on this state estimation, the flexibility potential of the entire grid can be aggregated, and thus a range can be defined in which the active distribution network can change its operating point if required.

If this flexibility potential is to be used to serve the overlaid grid, the desired change in the operating point of the grid must be distributed among the individual flexibility providing units. There are usually a variety of possible combinations, so the disaggregation process can be optimized as well. As an example, renewable curtailment or grid losses can be minimized.

Applying the aggregation and disaggregation of flexibilities to real distribution grids, several challenges arise. Each flexible unit has to be measured and be controllable at any time, which results in a high communication effort. Furthermore, the fluctuating renewable energies as well as stochastic load changes lead to strongly fluctuating grid conditions and also flexibility potentials. Accordingly, the flexibility that can be provided cannot be assumed to be constant throughout. Hence, it is necessary to calculate flexibility with a high time resolution in order to be able to react to changing grid conditions.

■ **Implementierung eines mehrstufigen intelligenten Lademanagementsystems**

M. Sc. Tim Streubel

Der Anstieg der Zahl an Elektrofahrzeugen und die damit verbundene Nachfrage an Ladeinfrastruktur stellt Netz - und Parkhausbetreiber vor neue Herausforderungen. Insbesondere in urbanen Gebieten ist die Nachfrage stark konzentriert und erfordert zeit- und kostenintensive Netzverstärkungsmaßnahmen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes am IEH wurde ein intelligentes, mehrstufiges Lademanagement als Alternative zum Netzausbau implementiert und praktisch erprobt.

Das System wurde in einem Stuttgarter Parkhaus mit einer zentralisierten Ladeinfrastruktur umgesetzt. Dabei wurde die bestehende Ladeinfrastruktur um 10 Ladepunkte auf insgesamt 20 erweitert. Als Konsequenz wurde der bereits weitgehend ausgelastete Transformator am Netzanschluss noch stärker durch die Ladeleistung der Elektrofahrzeuge belastet. Um möglichen Überlastungen des Betriebsmittels entgegenzuwirken, wurde die Last der 20 Ladepunkte aktiv geregelt. Die Regelung der Last erfolgte dabei über zwei Lademanagementsysteme. Das lokale Lademanagement steuert dabei dynamisch die Ladevorgänge der einzelnen Fahrzeuge. Das übergeordnete Lademanagement überwacht den aktuellen Netzzustand und vermeidet Überlastungen durch die Ansteuerung eines Pufferspeichers und durch die Vorgabe einer Leistungsquote an das lokale Lademanagement.

Die Auslastung der Ladeinfrastruktur sowie der Zustand des Pufferspeichers und des Netzes wurden über ein zentrales Monitoringsystem erfasst. Die Messgeräte erfassten dabei neben der Auslastung auch die Spannungsqualität an den jeweiligen installierten Punkten. Außerdem konnten über die Kundenprofile des Parkhausbetreibers Informationen über den Verlauf der Ladevorgänge abgeleitet werden. Das mehrstufige Lademanagementsystem und die dazugehörigen Komponenten wurden im Rahmen eines mehrtägigen Feldtestes praktisch erprobt und validiert. Dazu wurden mehrere Elektrofahrzeuge zeitgleich angeschlossen, um eine Überlastung des Transformators zu bewirken. Diese Überlastung wurde vom Messsystem detektiert und das überlagerte Lademanagementsystem aktiviert. Im Folgenden wurde durch Regulierung der Ladeleistung der Trafo entlastet und das implementierte System als Alternative zum Netzausbau validiert. Abbildung 1 illustriert schematisch die Topologie des mehrstufigen Lademanagementsystems und die damit verbundenen Komponenten.

■ **Implementation of a multi-level intelligent Charge Management System**

M. Sc. Tim Streubel

The increase in numbers of electric vehicles and the associated demand for charging infrastructure poses new challenges for network and parking garage operators. Especially in urban areas the demand is highly concentrated and requires time-consuming and cost-intensive grid reinforcement measures. As part of a research project at IEH an intelligent multi-stage charging management system (CMS) was implemented and tested in practice as an alternative to grid expansion.

The system was implemented in a parking garage in Stuttgart with a centralized charging infrastructure. The existing charging infrastructure was expanded by 10 charging points to a total of 20. As a consequence, the already largely utilized transformer at the grid connection was even more heavily loaded by the charging power of the electric vehicles. To counteract possible overloads of the equipment, the load of the 20 charging points was actively controlled. The local charging management system dynamically controls the charging processes of the individual vehicles. The superordinate charging management monitors the current network status and avoids overloads by controlling a buffer storage and by specifying a power quota to the local charging management.

The utilization of the charging infrastructure, the condition of the buffer storage and the network were recorded via a central monitoring system. In addition to the utilization, the measuring devices also recorded the voltage quality at the respective installed points. In addition, information about the course of the charging processes could be derived from the customer profiles of the parking garage operator. The multi-stage charging management system and the associated components were tested and validated in practice during a field test lasting several days. For this purpose, several electric vehicles were connected simultaneously to cause an overload of the transformer. This overload was detected by the measurement system and the superimposed charging management system was activated. Subsequently, the transformer was relieved by regulating the charging power and the implemented system was validated as an alternative to grid expansion. Figure 1 schematically illustrates the topology of the multi-level charging system and its components.

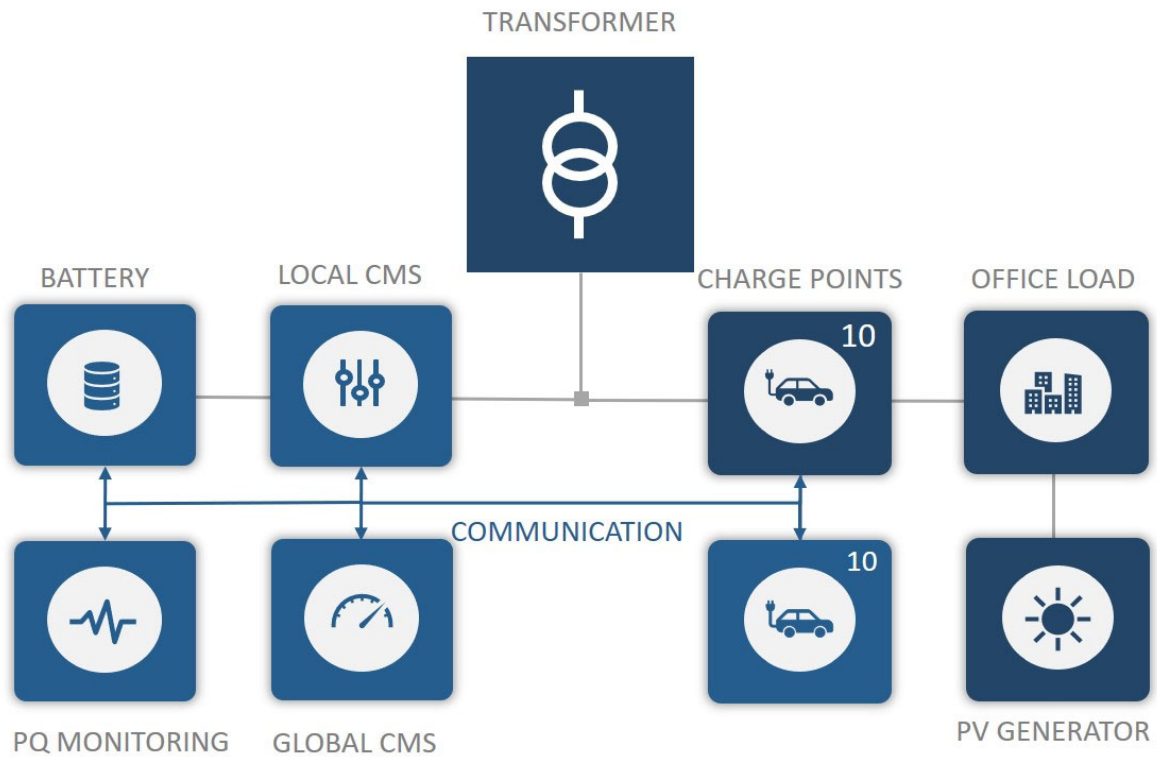


Fig. 1: Implementiertes mehrstufiges Lademanagementsystem.
Implemented multi-level charge management system.

■ Netzintegration von Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr

M. Sc. Kathrin Walz

Der Hochlauf der Elektromobilität sorgt für neue Herausforderungen im Stromnetz. Gerade im Bereich des Wirtschaftsverkehrs, der trotz eines verhältnismäßig geringen Anteils am Fahrzeugbestand in Deutschland aufgrund hoher Fahrleistungen und Kraftstoffverbräuche einen großen Teil der Verkehrsemissionen verursacht, ist ein Wandel in der Antriebstechnologie nötig. So bringen immer mehr Fahrzeughersteller elektrische Lkw auf den Markt. Die Netzauswirkungen von deren Ladevorgängen sind aber noch Großteils unbekannt, zumal kaum Messdaten vorhanden sind. Daher wurde am IEH ein dreiteiliges Verfahren entwickelt, mit welchem die Berücksichtigung elektrischer Lkw in der Netzplanung ermöglicht werden kann. Dieses besteht aus der Erzeugung synthetischer Ladeprofile, der Regionalisierung des Ladebedarfs sowie der Aggregation der Ladezeitreihen am Netzanschlusspunkt.

Die Generation synthetischer Ladeprofile basierend auf realen Mobilitätsdaten konventioneller Lkw bietet die Möglichkeit, bei einer fehlenden Messdatenbasis das Laden batterieelektrischer Lkw realitätsnah in zeitreihenbasierten Untersuchungen zu berücksichtigen. Fig. 1 zeigt den Ablauf des Modellierungsansatzes. Zunächst wird eine sogenannte Trip Chain aus historischen Fahrten erzeugt. Dazu werden abhängig vom gewählten Fahrzeugtyp zufallsbasiert Fahrten aus einem Mobilitätsdatensatz unter Berücksichtigung regulatorischer Pausenvorschriften verkettet. Im zweiten Schritt kann aus der Trip Chain dann unter Berücksichtigung der festgelegten Ladeorte sowie der Fahrzeugparameter, wie Reichweite und Batteriekapazität, ein Ladeprofil für das Fahrzeug erzeugt werden.

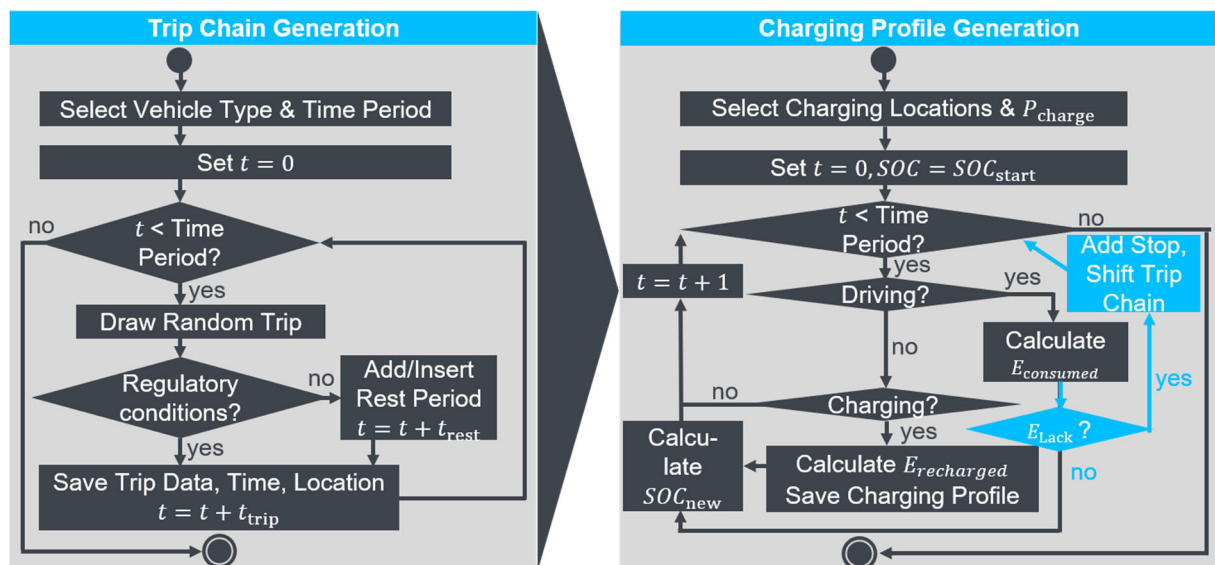


Fig. 1: Ablauf zur Generation synthetischer Ladeprofile batterieelektrischer Lkw.
Synthetic charging profile generation procedure for battery-electric trucks.

■ **Grid Integration of Electric Mobility in Commercial Transport**

M. Sc. Kathrin Walz

The ramp-up of electric mobility causes new challenges for the power grid. Particularly in the area of commercial transport, which despite a relatively small share of the vehicle population in Germany is responsible for a large proportion of traffic emissions due to high mileage and fuel consumption, a change in drive technology is necessary. Therefore, more and more vehicle manufacturers are announcing new electric truck models. However, the effects of their charging processes on the power grid are still largely unknown, especially since hardly any measurement data are available. Therefore, a three-part procedure was developed at IEH to enable the consideration of electric trucks in grid planning. It consists of the generation of synthetic charging profiles, the regionalization of the charging demand and the aggregation of the charging time-series at the grid connection point.

The generation of synthetic charging profiles based on real mobility data of conventional trucks offers a possibility to realistically consider the charging of battery-electric trucks in time-series based investigations in case of a missing measurement data basis. Fig. 1 shows the flow of the modeling approach. First, a so-called trip chain is generated from historical trip data. Depending on the selected vehicle type, trips from a mobility data set are randomly concatenated, considering regulatory break regulations. In the second step, a charging profile for the vehicle can be generated from the trip chain, taking into account the specified charging locations and the vehicle parameters, such as range and battery capacity.

Although the synthetic profile generation allows energy demand and charging profiles to be determined specifically for each truck, it must also be possible to regionalize the charging demand in the next step in order to take a grid connection into account. For the application case of electric trucks in German long-distance traffic, an initial approach was therefore created in the form of a freeway traffic model. This is shown in Fig. 2.

In the first step, the German freeway network is modeled using two matrices: a node matrix and a section matrix. The node matrix contains all relevant nodes of the freeway network, such as intersections between freeways, automatic traffic counting stations, as well as the position of service areas. The section matrix, in turn, contains all sections between two nodes as well as the section lengths and the counting point responsible for counting the traffic on this section. In order to be able to determine the charging demand for electric trucks on freeways that occurs in a selected region, the parts of the node and section matrix that are relevant for the region are extracted.

Die synthetische Profilgeneration erlaubt zwar eine für jeden Lkw spezifische Bestimmung von Energiebedarf und Ladeprofilen, um einen Anschluss im Netz zu berücksichtigen, muss der Ladebedarf im nächsten Schritt jedoch auch regionalisiert werden können. Für den Anwendungsfall elektrischer Lkw im deutschen Fernverkehr wurde daher ein erster Ansatz in Form eines Autobahnverkehrsmodells geschaffen. Dieses ist in Fig. 2 dargestellt.

Im ersten Schritt wird dabei das deutsche Autobahnnetz in Form von zwei Matrizen modelliert: einer Knoten- und einer Streckenmatrix. Die Knotenmatrix enthält alle relevanten Knoten des Autobahnnetzes, wie Schnittpunkte zwischen Autobahnen, Punkte an denen automatische Zählstellen den Verkehr erfassen, sowie die Position von Raststätten und Autohöfen. Die Streckenmatrix wiederum enthält alle Strecken zwischen zwei Knoten sowie die Streckenlängen und die Zählstelle, die für die Zählung des Verkehrs auf dieser Strecke verantwortlich ist. Um nun den in einer ausgewählten Region anfallenden Ladebedarf für elektrische Lkw auf Autobahnen bestimmen zu können, werden zunächst die für die Region relevanten Teile der Knoten- und Streckenmatrix extrahiert. Aus der Länge des jeweiligen Autobahnstreckenabschnitts, der zugehörigen stündlichen Verkehrsstärke an Lkw sowie dem Verbrauch der Lkw je 100 km wird der stündliche Energiebedarf je Abschnitt bestimmt. In Summe über alle Streckenabschnitte ergibt sich der zeitlich aufgelöste Energiebedarf für die Gesamtregion. Dieses Verfahren kann direkt genutzt werden, um das Lastprofil von Oberleitungs-Lkw auf deutschen Autobahnen zu bestimmen. Für eine Anwendung für batterieelektrische Lkw bedarf es einer Entkopplung von Energieverbrauch und Nachladen, was aktuell Gegenstand weiterer Untersuchungen ist.

Neben der allgemeinen Regionalisierung des Energiebedarfs elektrischer Lkw ist die Aggregation des Ladebedarfs an spezifischen Netzanschlusspunkten von Interesse. Im Rahmen des Ende 2020 abgeschlossenen Forschungsprojekts FELSeN wurde unter anderem untersucht, wie sich das Laden elektrischer Lkw auf den realen Netzanschlusspunkt eines Logistikzentrums auswirken kann. Dazu wurden die im ersten Schritt generierten synthetischen Profile auf die lokalen Gegebenheiten wie Öffnungszeiten, Fahrzeuggrößen und Beladungszeiten am Logistikzentrum angepasst. Im Projekt hat sich gezeigt, dass Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr das Potential hat, die Last von Logistikzentren in Zukunft deutlich zu erhöhen. Dies ist jedoch stark abhängig vom Hochlauf der Elektromobilität im Lkw-Bereich und damit auch von den politischen Rahmenbedingungen. Am im Projekt betrachteten Logistikzentrum ist eine Verdopplung der Last durch Ladevorgänge von elektrischen Lkw denkbar. Durch enge logistische Zeitpläne konnte dabei das kabelgebundene Laden von Lkw nur geringfügig flexibilisiert werden, da die Ladevorgänge aus Wirtschaftlichkeitsgründen nicht beliebig verschoben oder verzögert werden können.

The hourly energy demand per section is determined from the length of the section, the hourly truck traffic volume for each timestep and the consumption of the trucks per 100 km. By summing all section results the profile of the energy demand for the entire region is obtained. This method can be used directly to determine the load profile of overhead line trucks on German freeways. An application for battery-electric trucks requires a decoupling of energy consumption and recharging, which is currently the subject of further investigations.

In addition to the general regionalization of the energy demand of electric trucks, the aggregation of the charging demand at specific grid connection points is of interest. The FELSeN research project, which was completed at the end of 2020, investigated, among other things, how the charging of electric trucks can affect the real grid connection point of a logistics center. To this end, the synthetic profiles generated in the first step were adapted to local conditions such as opening hours, truck size classes and loading times at the logistics center. The project showed that electric mobility in commercial transport has the potential to significantly increase the peak load of logistics centers in the future. However, this is strongly dependent on the ramp-up of electric mobility in the truck sector and thus also on the political framework conditions. At the logistics center considered in the project, the peak load could be doubled by charging electric trucks. Due to tight logistical schedules, the conductive charging of trucks could only be made slightly more flexible, as the charging processes cannot be arbitrarily postponed or delayed for economic reasons.

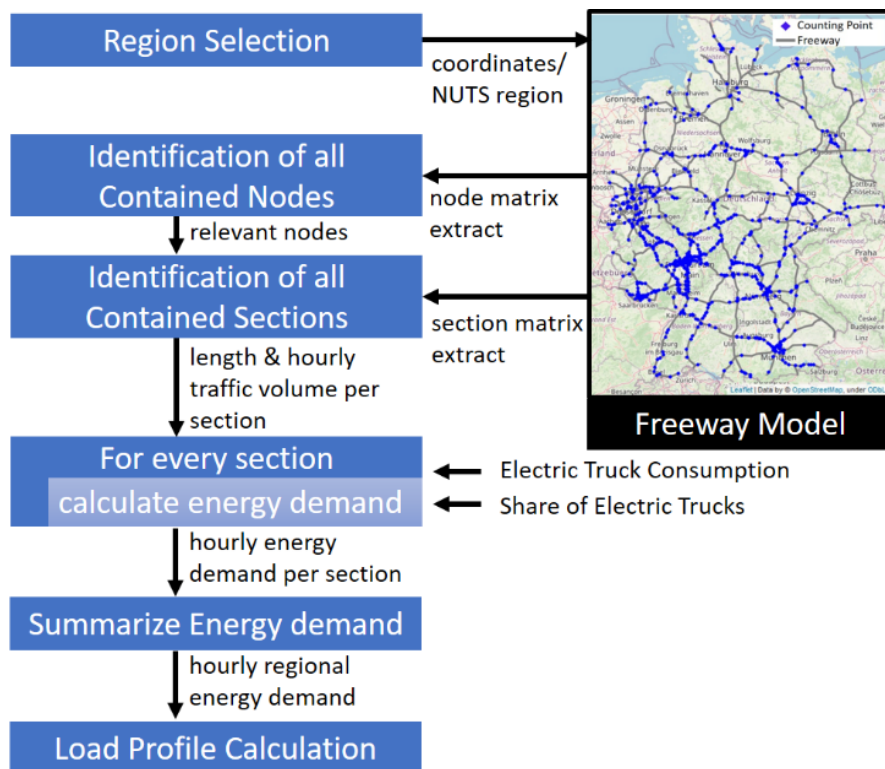


Fig. 2: Verfahren zur Bestimmung des Ladebedarfs elektrischer Lkw auf Autobahnen. Charging demand regionalization of electric trucks on freeways.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

■ Gleichtaktauslöschung zur Reduzierung der Störaussendung von elektrischen Lenkungssystemen

M. Sc. Jonas Bertelmann

Um internationale Normen, wie z.B. CISPR 25, oder kundenspezifische OEM-Grenzwerte einzuhalten, müssen Störungen von elektronischen Komponenten in Fahrzeugen entweder durch passive oder aktive Filter reduziert werden. Insbesondere schaltende Halbleiter, wie beispielsweise in Wechselrichtern, können breitbandige Störungen im Spektrum von Kommunikationssystemen, Komfortfunktionen oder Steuergeräten verursachen. Daher ist die EMI-Filterung in jeder automobilen Anwendung unverzichtbar. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird eine Methode vorgestellt, wie eine Gleichtaktunterdrückung in mehrphasigen, redundant ausgelegten Wechselrichtern erreicht werden kann. Das Gleichtaktspektrum kann über einen weiten Frequenzbereich um mehr als 40 dB reduziert werden, wenn symmetrische Verhältnisse herrschen. Um mögliche Asymmetrien in der Ansteuerung der Schalter zu kompensieren, muss eine zeitliche Anpassung bzw. Verzögerung der Schaltzeiten vorgenommen werden. Dafür können Optimierungstopologien verwendet werden, um diesen Prozess zu automatisieren. Die beiden näher untersuchten Verfahren zeigen in Fig. 2 das Potenzial für weitere Reduzierung des Emissionsspektrums. Während die Zeitbereichsvariante zusätzliche Komponenten im Wechselrichter benötigt, um auf Spannungsflanken triggern zu können, ist dies bei der zweiten Methode nicht notwendig. Stattdessen wird die Messung am Wechselrichter (Fig. 1) im Frequenzbereich mittels eines Messempfängers zur Anpassung der Schaltzeiten genutzt.

Die Robustheit des Optimierungsprozesses im Zeitbereich ist höher als die im Frequenzbereich. Dies konnte durch Wiederholung der Optimierungsprozesse festgestellt werden. Dennoch haben beide Optimierungsverfahren ihre Vorteile, denn mit der Variante im Frequenzbereich können z.B. auch lokale Minima im höheren Frequenzbereich erreicht werden, die durch die Synchronisation der Flanken im Zeitbereich nicht erreicht werden können.

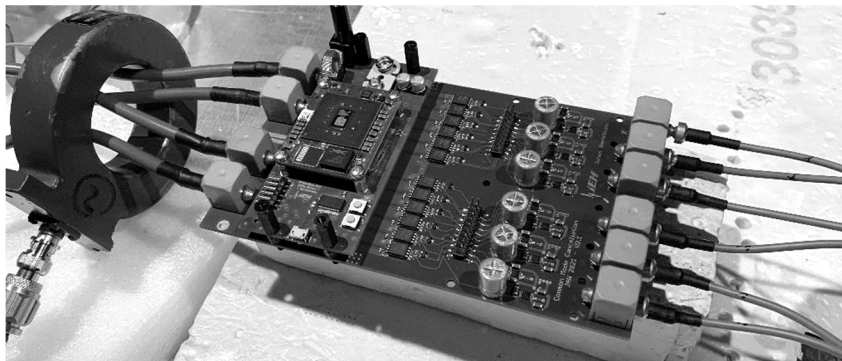


Fig. 1: Am Institut entwickelter sechsphasiger Wechselrichter.
Six phase inverter developed at the institute.

Common Mode Cancellation Techniques to minimize EMI of Automotive Steering

M. Sc. Jonas Bertelmann

To comply with international standards, for example CISPR 25 or custom OEM limits, interferences of vehicles' electronic components has to be reduced either by passive or active filters. Especially switched semiconductor electronic devices like inverters can cause broadband disturbances in the spectrum of communication systems, comfort functions like radio or control units. Therefore, EMI filtering is indispensable in any automotive application. Within the scope of this research project, a method is presented how common-mode (CM) cancellation can be achieved in multi-phase, redundantly designed inverters. The CM spectrum can be reduced by more than 40 dB over a wide frequency range if symmetrical conditions prevail. In order to compensate possible asymmetries in the control of the switches, a temporal adjustment, or delay, of the switching times must be carried out. Therefore, two optimization topologies are introduced. Both demonstrate good results in the further reduction of the emission spectrum (fig. 2). Whereas the time domain variant requires additional components in the inverter to be able to trigger on voltage edges, this is not necessary in the second method. Instead, the measurement of resulting CM disturbances of the test inverter (fig. 1) in the frequency domain using an EMI is used to adjust the switching times.

The robustness of the optimization process in time domain is higher than that in the frequency domain. This could be determined by repeating the optimization processes. Nevertheless, both optimization methods have their advantages, because with the variant in the frequency domain, for example, local minima can also be achieved in the higher frequency range, which cannot be achieved by the synchronization of the edges in the time domain.

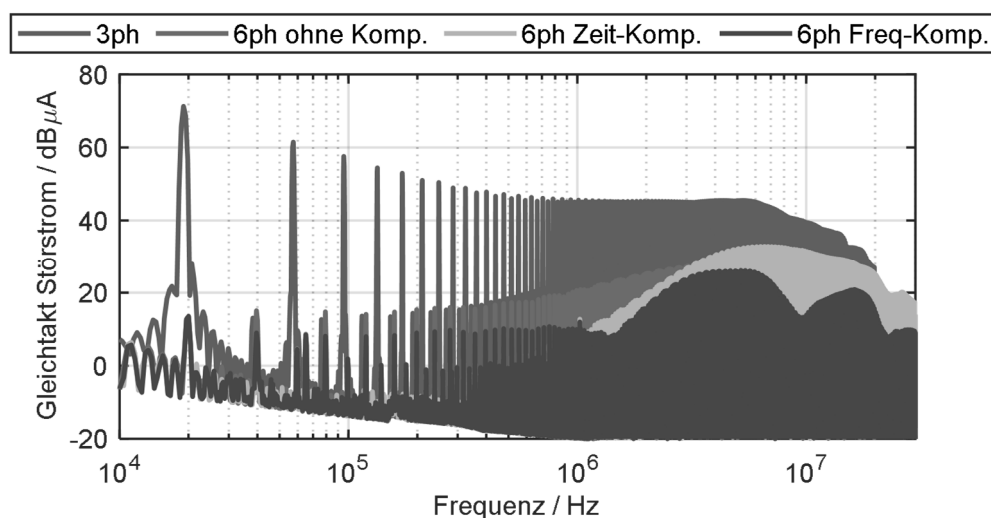


Fig. 2: Störspektrum des Wechselrichters mit und ohne Kompensation.
Disturbance spectrum of the test inverter with and without compensation.

■ EMV-konforme elektrische Maschinenemulation

M. Sc. Michaela Gruber

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

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

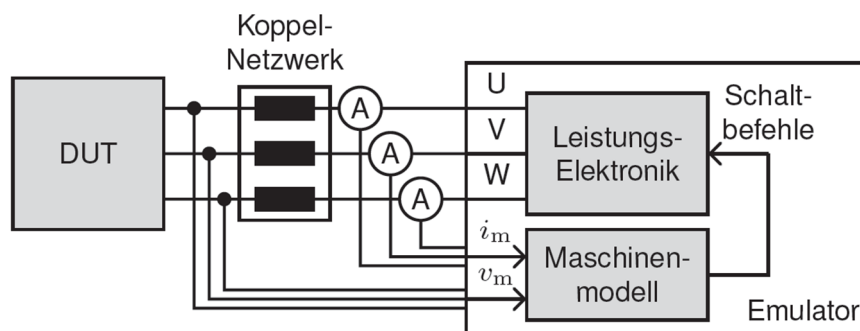


Fig. 1: Blockschaubild der elektrischen Maschinenemulation.

Block diagram of the electrical machine emulation.

Die HF-Impedanz kann entweder simulativ mithilfe einer FEM-Analyse oder durch Messung bestimmt werden. Fig. 2 zeigt beispielhaft die Messmethodik zur Bestimmung der Gleichtaktimpedanz im aktiven Betrieb. Die Impedanz wird mithilfe von zwei Stromzangen und einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) gemessen. Dabei wird an Port 1 über die erste Stromzange ein Sinussignal injiziert und die Systemantwort an Port 2 mithilfe der zweiten Stromzange gemessen. Durch die Messung im aktiven Betrieb kann die HF-Impedanz in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment bzw. Phasenstrom bestimmt werden. Die Ergebnisse können anschließend zur Nachbildung des HF-Verhaltens verwendet werden.

■ EMC compliant Electrical Machine Emulation

M. Sc. Michaela Gruber

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

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

The RF impedance can be determined either by simulation using an FEM analysis or by measurement. Fig. 2 shows an example of the measurement methodology for determining the common mode impedance in active operation.

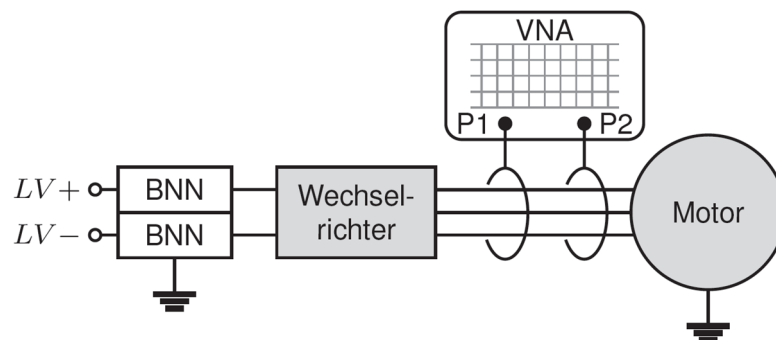


Fig. 2: Messmethodik zur Bestimmung der Gleichtaktimpedanz im aktiven Betrieb.
Block diagram of the common mode impedance measurement in active operation.

The impedance is measured using two current clamps and a vector network analyzer (VNA). A sinusoidal signal is injected at port 1 via the first current clamp and the response is measured at port 2 using the second current clamp. By measuring in active mode, the RF impedance can be determined as a function of speed and torque or rather phase current. The results can then be used to emulate the RF behavior.

■ EMV von induktiven KfZ-Ladesystemen

M. Sc. Manuel Haug

Eine neuartige, kabellose Ladetechnologie für Elektrofahrzeuge ermöglicht dem Anwender ein hohes Maß an Komfort bei gleichzeitig guter Effizienz der Energieübertragung. Um die Kompatibilität der kontaktlosen Ladeschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation herstellerübergreifend zu gewährleisten, sollen WPT-Systeme (Wireless Power Transfer) standardisiert werden. Dabei sind auch Messverfahren und Grenzwerte für EMV Komponententests zu berücksichtigen.

In dieser Forschungsarbeit wurden repräsentative WPT-Prototypen nach den Vorschlägen des zuständigen Normungsgremiums aufgebaut. Die magnetisch schwach gekoppelten Spulen der Primär- & Sekundärseite werden in Kombination mit Kompensationsschaltungen betrieben um dennoch einen hohen Wirkungsgrad der Leistungsübertragung zu erzielen. Die Kompensation wird auf eine Resonanzfrequenz im Bereich 80 – 90 kHz abgestimmt, die Blindleistungsaufnahme des Systems wird dabei minimiert. Der Prototyp erreicht im Resonanzpunkt über 90 % Wirkungsgrad bei 3,6 kW Übertragungsleistung und Kopplungsfaktoren im Bereich 0,1 - 0,3.

Auch zur Reduzierung der hochfrequenten Störemissionen ist eine geeignete Auslegung der Kompensationstopologie erforderlich. Diese hat neben Auswirkungen auf das generelle Systemverhalten auch Einfluss auf das Störspektrum bei unterschiedlichen Arbeitspunkten, z.B. bei Variation des Lastwiderstands oder der Offset-Positionierungen der Ladespulen.

Fig. 1 zeigt das Ersatzschaltbild eines sog. LCC-SP kompensierten WPT-Systems. Die magnetisch gekoppelten Ladespulen sind hierbei durch ihre resultierende Hauptinduktivität L_h und deren Streuinduktivitäten $L_{\sigma 1,2}$ berücksichtigt. Die Fahrzeugbatterie auf der Sekundärseite wird durch den ohmschen Lastwiderstand R_L beschrieben. In Fig. 2 sind die entsprechenden, orthogonalen Magnetfeldmagnituden des Systems in 3 m Abstand bei zentrierter Spulenausrichtung gezeigt.

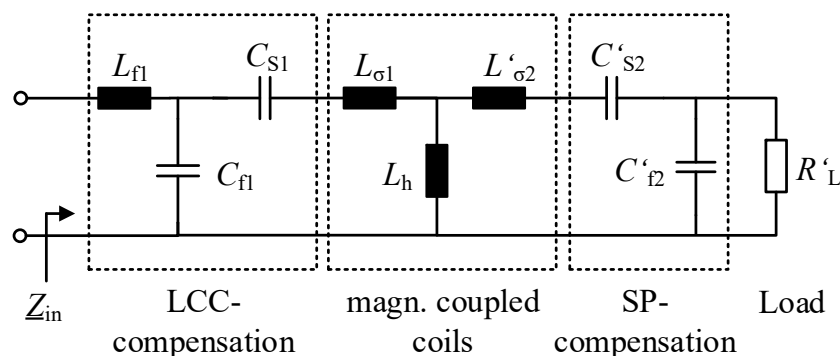


Fig. 1: Ersatzschaltbild eines LCC-SP kompensierten WPT-Systems.
Equivalent circuit of LCC-SP compensated WPT system.

■ EMC of Automotive Inductive Charging Systems

M. Sc. Manuel Haug

A new type of wireless charging technology for electric vehicles provides the user with a high degree of comfort and at the same time a good efficiency of energy transmission. In order to ensure the compatibility of the contactless charging interface between vehicle and charging station independently of manufacturers, the so-called WPT systems (Wireless Power Transfer) are to be standardized internationally. Therefore, measurement methods and limit values for EMC component testing have to be considered.

In this work, representative prototypes have already been built according to the proposals of the responsible standardization committee. The magnetically weakly coupled coils of the primary & secondary sides are operated together with compensation networks to achieve high power transfer efficiency. The compensation network is tuned to a resonant frequency in the range of 80 - 90 kHz, minimizing the systems reactive power consumption. The realized prototype achieves more than 90 % efficiency at 3.6 kW transmission power and coupling factors between 0.1 - 0.3.

A suitable design of the compensation topology is also required to reduce high-frequency interference emissions. These effects the general system behavior, but also the interference spectrum at different operating points, e.g. when varying the load resistance or the offset positioning of the charging coils.

Fig. 1 shows the equivalent circuit of a LCC-SP compensated WPT system. The magnetically coupled coils are considered here by their resulting main inductance L_h and their leakage inductances $L_{\sigma 1,2}$. The vehicle battery on the secondary side is described by an ohmic resistance R_L . Fig. 2 shows the corresponding orthogonal magnetic field magnitudes at a distance of 3 m with centered coil alignment.

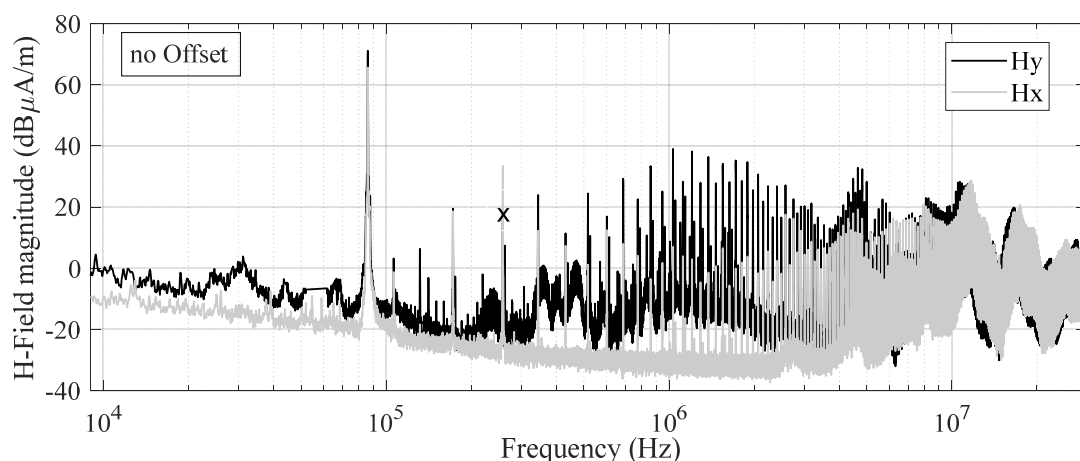


Fig. 2: H-Feldstärke in 3m bei zentrierter Spulenausrichtung, 3,6 kW Ladeleistung.
H-field in 3m distance, centered coil alignment, 3.6 kW power transmission.

■ CISPR 25 Komponententests mit komplexen Kabelbäumen

M. Sc. Jan Schabel

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

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



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

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

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

■ CISPR 25 Component Level Test with complex Wiring Harnesses

M. Sc. Jan Schabel

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

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

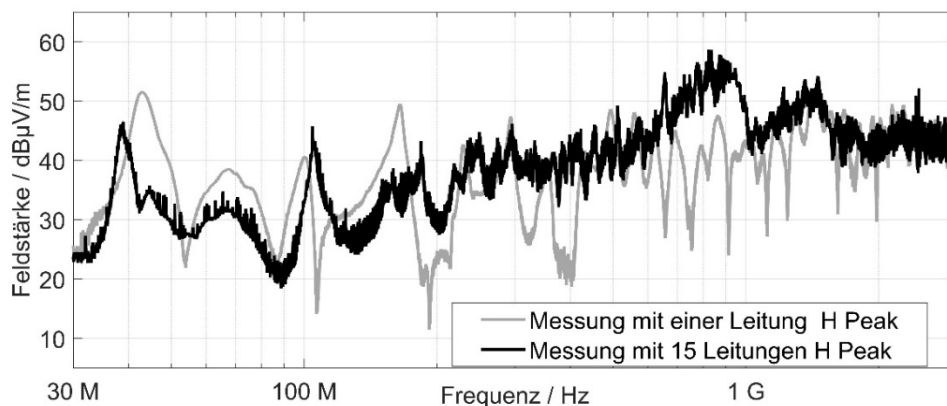


Fig. 2: Gestrahlte Emissionen des Messaufbaus mit einer Leitung im Vergleich zu 15 Leitungen.

Radiated emissions of the measurement setup with one line compared to 15 lines.

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

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

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

M. Buchner, K. Rudion

Inselnetzbildung und Resynchronisation von inverterbasierten Microgrids im Power-Hardware-in-the-Loop-Betrieb.

Tagung Zukünftige Stromnetze, Berlin, 27.-28. Januar 2021

M. Buchner, K. Rudion

Investigation of the Effect of Different Boundary Conditions on the Islanding of Microgrids.

The 9th International Conference on Renewable Power Generation - IET RPG, Dublin, Online, March 1 – 2, 2021, DOI: 10.1049/icp.2021.1403

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

An Investigation on feature extraction and feature selection for power quality classification with high resolution and RMS data.

The 9th International Conference on Renewable Power Generation - IET RPG, Dublin, Online, March 1 – 2, 2021, Paper No. 0130.

H. Früh, K. Rudion, A. von Haken, D. Groß, B. Wasowicz

Evaluation of a Three-Phase Distribution System State Estimation for Operational Use in a Real Low Voltage Grid.

The 9th International Conference on Renewable Power Generation - IET RPG, Dublin, Online, March 1 – 2, 2021, pp. 125-130, Doi: 10.1049/icp.2021.1396.

M. Miller, K. Rudion, F. Fischer, H. Nägele

Probabilistic Approach for Distribution Grid Planning under Consideration of Line Loading Indicators.

The 9th International Conference on Renewable Power Generation - IET RPG, Dublin, Online, March 1 - 2, 2021, Paper No. 49

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

Transient Clustering Approach for PQ Monitoring.

The 9th International Conference on Renewable Power Generation - IET RPG, Dublin, Online, March 1 – 2, 2021, Paper No. 0090. DOI: 10.1049/icp.2021.1358

C. Kattmann, R. Haug, A. Eisenmann, K. Rudion, S. Tenbohlen

Hochfrequente Spannungsqualitäts- und Transientenmessungen an Leistungstransformatoren.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2021, Online, Stuttgart, 2. – 3. März 2021.

T. Fahmy, J. Hohloch, R. Grund, D. Passow

Funktionsintegration bei Muffen und Freiluftendverschlüssen.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2021, Online, Stuttgart, 2. – 3. März 2021.

P. Wenger, M. Beltle, S. Tenbohlen, U. Riechert

Dielektrische Prüfung von HGÜ-GIS.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2021, Online, Stuttgart, 2. – 3. März 2021.

J. Bertelmann, M. Beltle, S. Tenbohlen

Influence of MOSFET scattering on common mode cancellation in phase shifted inverter operation.

PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nürnberg, Online, May 03 – 07, 2021, pp. 1881-1885.

M. Gruber, M. Fischer, M. Beltle, S. Tenbohlen

Investigation of the Suitability of an Electrical Machine Emulation for EMC Component Tests of Drive Inverters.

PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nürnberg, Online, May 03 – 07, 2021, pp. 1777- 1783.

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

Probabilistischer Ansatz für einen optimierten Netzausbau von Hochspannungsnetzen anhand von Leitungsauslastungsindikatoren.

Internationaler ETG Kongress 2021, Wuppertal, 18.-19. Mai 2021, S. 285-290

D. Contreras, K. Rudion

Computing the feasible operating region of active distribution networks: Comparison and validation of random sampling and optimal power flow based methods.

IET Generation, Transmission & Distribution, May 2021, Vol. 15, Issue 10, pp. 1600-1612. DOI: 10.1049/gtd2.12120

D. A. Contreras, S. Müller, K. Rudion

Congestion Management Using Aggregated Flexibility at the TSO-DSO Interface.

14th IEEE PES PowerTech Conference, Madrid, Online, June 28 – July 2, 2021, DOI: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494793.

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

Manual Configuration and Best Setup of Support Vector Machines for Power Quality Classification.

14th IEEE PES PowerTech Conference, Madrid, Online, June 28 – July 2, 2021, Paper No. 521, Doi:10.1109/PowerTech46648.2021.9495006

Y. Fu, K. Walz, K. Rudion

Analysis of Driving Patterns in Car Traffic and their Potential for Vehicle-to-Grid Applications.

14th IEEE PES PowerTech Conference, Madrid, Online, June 28 – July 2, 2021, DOI: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494995

K. Walz, K. Rudion, et al.

Load Modelling and Distribution Planning in the Era of Electric Mobility.

CIREN Technical Report 2018-1, July 2021.

J. Schabel, M. Zerrer, M. Kull, M. Beltle, S. Tenbohlen

Methods for Investigating Influence Parameters in the Measurement Setup for Radiated Emissions according to CISPR 25.

2021 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity, and EMC Europe Symposium, July 26 – August 20, 2021, online, pp. 110-114, Doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559320

J. Schabel, M. Beltle, M. Kull, S. Tenbohlen, M. Zerrer

Calibration of a non-null test interferometer for the measurement of aspheres and free-form surfaces.

2021 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity, and EMC Europe Symposium, July 26 – August 20, 2021, online

K. Walz, K. Rudion

Electric Truck Energy Demand Modeling and Load Profile Regionalization for Electric Grid Planning.

NEIS 2021 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, Online, September 13-14, 2021.

M. Buchner, K. Rudion

New Method for Evaluating the Stable Operation of Inverters in the Planning Phase using Impedance-Based Stability Criterion.

26th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution - CIGRE, Genf, Online, September 20 - 23, 2021.

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

General Framework for Simulating Power Quality Data Processing.

26th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution - CIGRE, Genf, Online, September 20 - 23, 2021, Paper No. 945.

M. Fischer, D. Christl, M. Beltle, S. Tenbohlen, D. Gentsch, W. Ebbinghaus
Influences of Axial Magnetic Fields and Different Contact Materials in Vacuum Interrupters on the Chopping Behaviour of Switching Arcs.

26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – CIRED, Genf, Online, September 20-23, 2021, Paper No. 0755

M. Miller, K. Rudion, H. Nägele, J. Schnaars
Weather-dependent Current Ratings of Overhead Lines in the probabilistic Distribution Grid Planning.

26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Genf, Online, September 20-23, 2021, Paper No. 952

S. Müller, D. Contreras, H. Früh, K. Rudion, C. Exner, A. von Haken
Online aggregation of the flexibility potential in distribution grids using state estimation.

26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Genf, Online, September 20-23, 2021, Paper No. 0388

T. Streubel, A. Eisenmann, C. Kattmann, K. Rudion
Site Indices for High Frequency Harmonics for Long Term Power Quality Monitoring.

26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Genf, Online, September 20-23, 2021, Paper No. 1132

J. Bertelmann, M. Beltle, S. Tenbohlen
Optimization Methods for Common Mode Cancellation in Phase Shifted Inverter Operation.

2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Nusa Dua - Bali, Indonesia, Online, September 27-30, 2021, pp. 330-333

M. Haug, M. Beltle, S. Tenbohlen,
Magnetic Field Emission of Automotive Inductive Charging Systems in the 9 kHz – 30 MHz Range.

2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Nusa Dua - Bali, Indonesia, Online, September 27-30, 2021

M. Buchner, K. Rudion
Influence of Harmonics on Broadband AC Grid Impedance Identification for Stability Studies.

2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Espoo, Finland, Online, October 18-21, 2021,

DOI: 10.1109/ISGTEurope52324.2021.9640172

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

Grid Reinforcement Method for High-Voltage Distribution Grids under Consideration of Performance Indices.

2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Espoo, Finland, Online, October 18-21, 2021, Paper No. 333,

DOI: 10.1109/ISGTEurope52324.2021.9640210

K. Walz, F. Otteny, K. Rudion

A Charging Profile Modeling Approach for Battery-Electric Trucks based on Trip Chain Generation.

2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Espoo, Finland, Online, October 18-21, 2021,

DOI: 10.1109/ISGTEurope52324.2021.9640136

S. Eberlein, K. Rudion

Small-signal stability modelling, sensitivity analysis and optimization of droop controlled inverters in LV microgrids.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems 125 (2021): 106404.

S. Eberlein, K. Rudion

Optimisation, benchmark testing and comparison of droop control variants in microgrids.

IET Smart Grid 4.5 (2021): S. 536-548.

O. Laribi, K. Rudion

Optimized Planning of Distribution Grids Considering Grid Expansion, Battery Systems and Dynamic Curtailment.

Energies 2021, Vol. 14, 5242, Doi: 10.3390/en14175242.

M. Buchner, K. Rudion

Identification of Grid Impedance by Broadband Signals in Power Systems with High Harmonics.

Energies 2021, Vol. 14, 7398, DOI: 10.3390/en14217398

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

Experimental Analysis of Electromagnetic Wave Propagation in a Distribution Transformer.

CMDM CIGRE International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance (6th edition), Bucharest, Romania, Online, October 11 – 13 2021. Paper no. 80.

M. Gerber, M. Beltle, S. Tenbohlen

Performance assessment of top-oil temperature models for overload capability estimation in online monitoring purposes.

CMDM CIGRE International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance (6th edition), Bucharest, Romania, Online, October 11 – 13 2021, Paper no. 83

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

Increase of Reliability of Power Transformers by Calibrated UHF PD Measurements in FAT and SAT. CMDM CIGRE International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance (6th edition), Bucharest, Romania, October 11 – 13 2021, Paper no. 98

H. Tarimoradi, H. Karami, G.B. Gharehpetian, S. Tenbohlen

Sensitivity analysis of different components of transfer function for detection and classification of type, location and extent of transformer faults. Measurement, Volume 187, 2022, 110292, ISSN 0263-2241, DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110292.

B. Adam, S. Tenbohlen

Classification of Superimposed Partial Discharge Patterns. Energies 2021, 14, 2144. DOI: 10.3390/en14082144.

A.K. Pradhan, S. Tenbohlen

Estimation of Moisture Content in Oil-impregnated Pressboard through Analyzing Dielectric Response Current under Switching Impulse. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 3, pp. 938-945, June 2021, Doi: 10.1109/TDEI.2020.009367.

A.K. Pradhan, S. Tenbohlen

A New Approach to Estimate Activation Energy of Oil-impregnated Pressboard Stressed under Switching Impulse at Different Temperatures. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 4, pp. 1162-1170, August 2021, Doi: 10.1109/TDEI.2021.009514.

S. Karambar, S. Tenbohlen

Compatibility Study of Silicone Rubber and Mineral Oil. Energies 2021, 14, 5899. DOI: 10.3390/en14185899.

M. Tahir, S. Tenbohlen

Transformer Winding Condition Assessment Using Feedforward Artificial Neural Network and Frequency Response Measurements. Energies 2021, 14, 3227. DOI: 10.3390/en14113227.

D. Müller, M. Beltle, S. Tenbohlen

EMI Suppression of a DC–DC Converter Using Predictive Pulsed Compensation.

IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no. 6, pp. 2134-2142, Dec. 2021, Doi: 10.1109/TEM.2021.3084896.

Z.D. Wang, S.Y. Matharage, Q. Liu, S. Tenbohlen, C. Ekanayake, T. K. Saha, H. Ma, Y. XU

Research and development of ester filled power transformers.

Transformers Magazin, Vol. 8, Issue 4, pp. 24-33, 2021.

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

28.01.21	ETG Online-Fachtagung „Hochautomatisierter Netzbetrieb“ Teilnehmer: Prof. K. Rudion
08.02.21	SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online Teilnehmer: K. Rudion
18.02.21	Webseminar „Netze und Infrastruktur für die Energiewende“ Teilnehmer: Prof. K. Rudion
23.02.21	VDE Online Fachforum „Planung zellularer Energiesysteme“ Teilnehmer: Prof. K. Rudion
26.02.21	CIGRE WG A2.57 Online meeting Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
01.-02.03.21	The 9th International Conference on Renewable Power Generation, Dublin, Irland, online Teilnehmer: M. Buchner, A. Eisenmann, H. Früh, M. Miller, T. Streubel
02.-03.03.21	Stuttgarter Hochspannungssymposium 2021 – Neue Technologien für die Netze von morgen Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
04.03.21	CIGRE WG A2.60, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
11.03.21	ETG Fachtagung V2 „Übertragung und Verteilung“ Teilnehmer: M. Buchner, A. Eisenmann, H. Früh, M. Miller
19.03.21	IEC and Cigre Meeting, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
22.-23.03.21	TAE Hochspannungstechnik Technische Akademie Esslingen Ostfildern Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
24.03.21	CIGRE D1.70 TF 3 Meeting, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
24.03.21	SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online Teilnehmer: K. Rudion
29.03.21	CIGRE A2.60 TF1 Meeting, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
31.03.21	UTRA Annual Meeting - 20/21, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
09.04.21	CIGRE D1.74 Electronics Subgroup Meeting, online Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
15.04.21	Abschlussveranstaltung des NETZlabors E-Mobility-Carré Teilnehmer: K. Rudion
20.04.21	Arbeitskreistreffen DAK CIGRE A2 Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

- 03.-07.05.21 PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, online
Teilnehmer/Beiträge: J. Bertelmann, M. Gruber
- 12.05.21 CIGRE-CIRED-Info 2021 + ETG High Voltage Goes Green
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Dr. S. Golletz
- 17.05.21 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: K. Rudion
- 18.-19.05.21 ETG-Kongress, online
Teilnehmer: K. Rudion, M. Miller
- 18.-19.05.21 Sitzung des DKE/K 124 Hochspannungs- und Hochstrom-Prüftechnik
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 26.05.21 CIGRE WG A2.57 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 01.06.21 HV goes Green, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 01.06.21 D1.74 Rotating machines subgroup meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 03.06.21 CIGRE WG A2.60 TF use cases, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 08.06.21 Runder Tisch Klima, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.06.21 Treffen des deutschen Arbeitskreises DAK CIGRE SC D1, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 18.06.21 Sitzung der Lenkungsgruppe Energie im Strategiedialog
Automobilwirtschaft BW
Teilnehmer: K. Rudion
- 28.06.21 D1.74 Electronics subgroup meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 29.06.21 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: K. Rudion
- 30.06.21 Network²-Kolloquium, online
Teilnehmer: K. Rudion, S. Tenbohlen, M. Miller
- 06.07.21 Kolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg
Teilnehmer: K. Rudion
- 06.07.21 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: K. Rudion
- 07.07.21 Energiewendekongress Baden-Württemberg 2021
Teilnehmer: K. Rudion
- 13.07.21 CIGRE D1.01 Advisory Group Preparation Meeting – 1, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

- 15.07.21 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: K. Rudion
- 21.07.21 Smart Grids-Gespräche E-Mobilität: Gesamtwertschöpfung bei der
Integration von Ladeinfrastruktur in die Verteilnetze
Teilnehmer: K. Rudion
- 20.08.21 CIGRE A2 Session, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 23.-25.08.21 CIGRE Centennial Session 2021, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 07.09.21 CIGRE-Konferenz T&D Advisory@MR, Regensburg
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 08.09.21 CIGRE D1.01 AG Meeting - Day 2, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 13.-14.09.21 NEIS 2021. Hamburg, online
Teilnehmerin: K. Walz
- 15.09.21 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: K. Rudion
- 16.09.21 CIGRE Annual Study Committee Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 20.-23.09.21 CIRED, online
Teilnehmer: M. Buchner, A. Eisenmann, M. Fischer, M. Miller, S.
Müller, T. Streubel
- 23.09.21 CIGRE D1.70 TF3 Meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 23.09.21 Workshop „Effiziente Netznutzung – langsames Laden vs gesteuertes
Laden“
Teilnehmer: K. Rudion
- 27.-30.09.21 APEMC 2021, Asia-Pacific International Symposium on
Electromagnetic Compatibility, online,
Teilnehmer/Beiträge: J. Bertelmann
- 29.09.21 ETG/GMA Online-Tagung: Netzregelung und Systemführung
Teilnehmer: K. Rudion
- 05.10.21 Deutscher Arbeitskreis Cigre A2, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.-14.10.21 International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and
Maintenance CMDM 2021, Bukarest
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Ch. Beura, M. Gerber, S. Khandan
- 12.10.21 19. CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung: Die Netze werden
grüner
Teilnehmer: K. Rudion
- 13.10.21 CIGRE A2.60 Plenary Meeting October 2021, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

- 14.10.21 CIGRE D1.70 TF3 Meeting Final Version Approval, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 18.-21.10.21 IEEE PES ISGT Europe, online
Teilnehmer: M. Buchner, M. Miller, K. Walz
- 19.10.21 eSTE 2021 – Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH)
Teilnehmer: K. Rudion
- 29.10.21 Smart Grids-Gespräche „Flexibilitätsplattformen“
Teilnehmer: K. Rudion
- 29.10.21 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: K. Rudion
- 9.-10.11.21 Technischer Beirat Omexom, Wesel
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 17.11.21 Deutscher Arbeitskreis CIGRE SC 4, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 18.11.21 4. Workshop “Integration der Elektromobilität in die Verteilnetze“ des
Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW
Teilnehmer: K. Rudion
- 21.-25.11.21 22nd International Symposium on High Voltage Engineering, Xi’an,
China, Keynote Speech “High Voltage Goes Green”, S. Tenbohlen
- 23.-24.11.21 TE-Seminar an der TAE Hochspannungstechnik Technische
Akademie Esslingen Ostfildern
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 24.11.21 ISC-ISH2021 International Steering Committee, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 01.12.21 10. Smart Grids-Kongress Baden-Württemberg
Teilnehmer: K. Rudion
- 02.12.21 Workshop Planungs- und Betriebsgrundsätze für städtische
Verteilnetze
Teilnehmer: K. Rudion
- 3.-5.12.21. 3.-5.12.21 IEEE CATCON, IEEE 5th International Conference on
Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, online
Tutorial Prof. S. Tenbohlen: Improvement of Partial Discharge
Measurements for Factory and Site Acceptance Tests of Power
Transformers
- 03.12.21 D1.74 Rotating machines subgroup meeting, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 07.12.21 VDE ETG Q2 Online-Sitzung
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

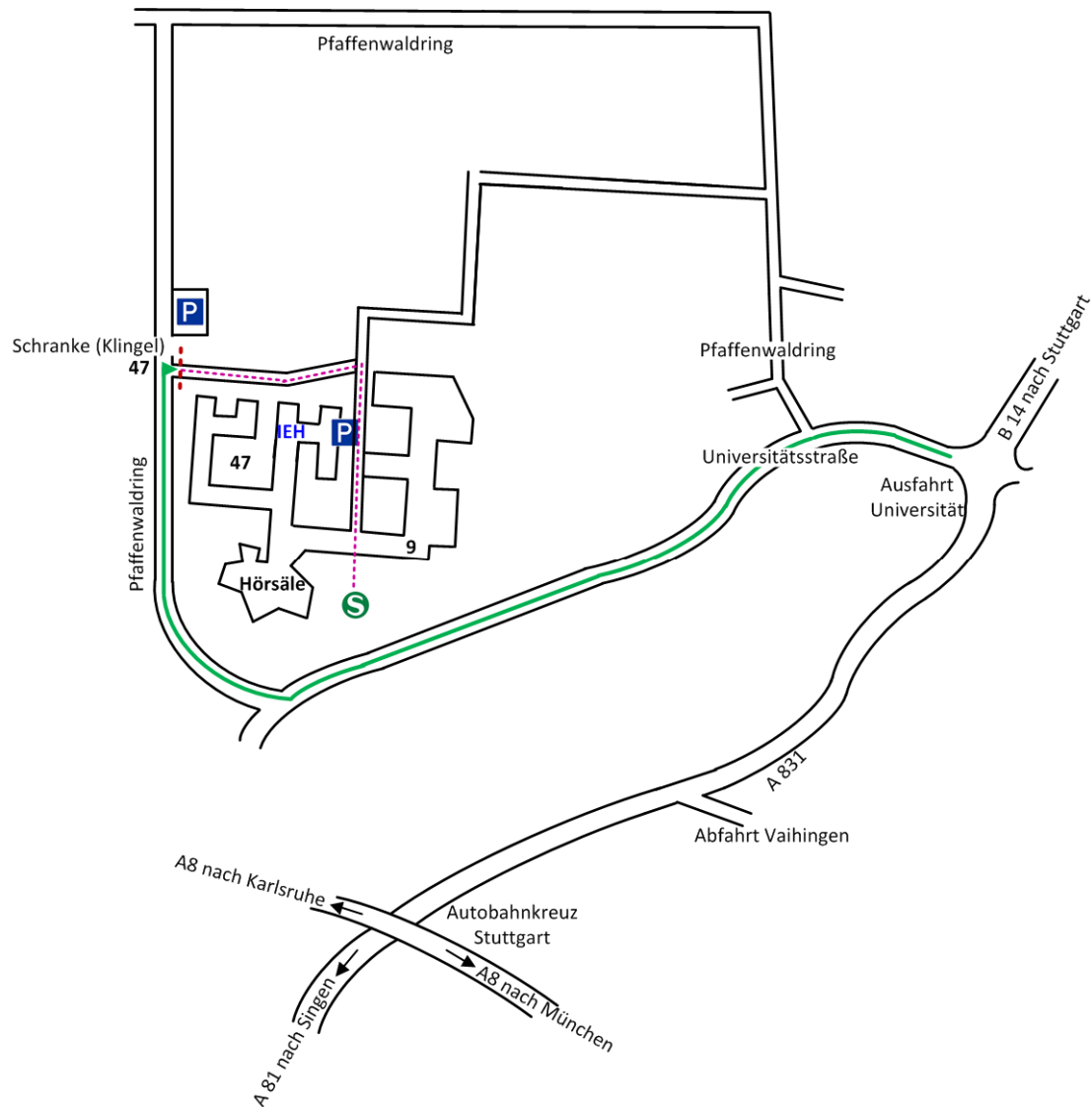
8. PRÜFEINRICHTUNGEN

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

Power Quality Analyzer	dreiphasige Strom- und Spannungsmessung bis zur 3000. Harmonischen (150 kHz), kontinuierliche Transientenerkennung mit 500 kS/s, Visualisierung auf Webseite
HiL-Simulator:	Hardware-in-the-Loop-Simulationen von elektrischen Energienetzen mit Einbindung von digitaler Kommunikation und Schutztechnik

9. LAGEPLÄNE

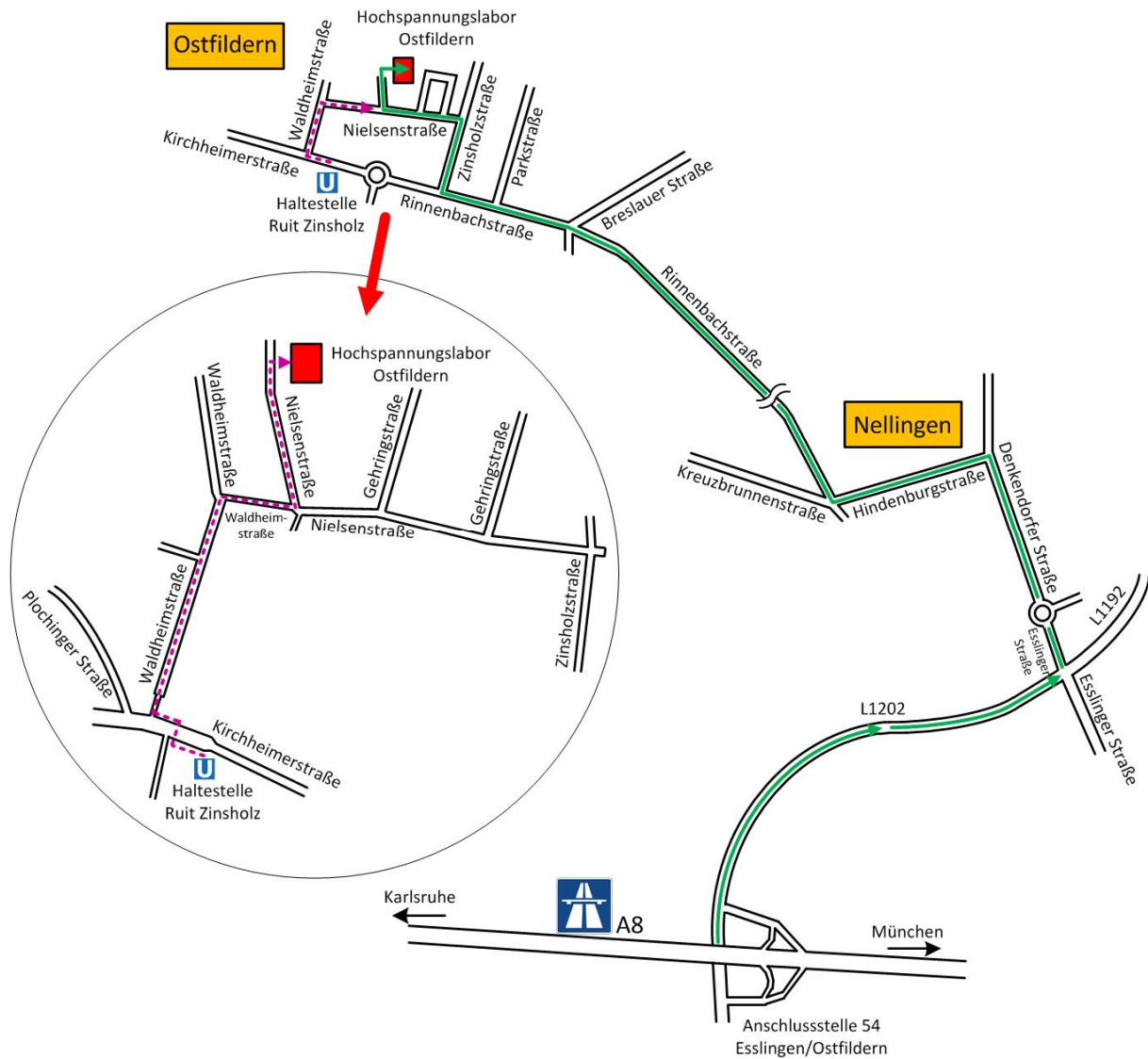
Lageplan
des Institutsteils Stuttgart-Vaihingen
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Telefon: +49 (0)711 685-67870



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

S-Bahnen der Linien S1, S2 und S3
Haltestelle „Universität“, Ausgang „Universitätszentrum“

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



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

Stadtbahnlinien U7 und U8

Haltestelle „Ruit Zinsholz“

(ab Stuttgart Hbf 20 Minuten Fahrzeit)