

INHALT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	9
3.1	VORLESUNGEN	9
3.2	PRAKTIKA.....	15
3.3	EXKURSIONEN	16
3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN.....	17
4.	PROMOTIONEN.....	42
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	50
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	54
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	86
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	140
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	148
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	155
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	157
9.	LAGEPLÄNE.....	159

1. VORWORT

Liebe Freundinnen und Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

mit dem vorliegenden Jahresbericht 2019 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Das Jahr 2019 war ein Jahr, in dem insbesondere der Klimawandel und die Zukunft unseres Planeten im Zentrum zahlreicher Diskussionen standen. Die weltweiten Aktivitäten der Fridays-for-Future-Bewegung haben wichtige Akzente in der Gesellschaft gesetzt und haben die nationale und internationale Klimapolitik geprägt. Eine zentrale Rolle spielt dabei neben der Neugestaltung des Verkehrssektors die künftige Strom- und Wärmeversorgung, denn ohne konsequente Energiewende macht die Verkehrswende zur Elektromobilität hin keinen Sinn. In diesem Zusammenhang wurden in Deutschland 2019 wichtige Schritte getan, die u.a. die Verabschiedung des Klimaschutzgesetzes und des Klimaschutzprogramms 2030, die Schärfung der Pläne zum Ausstieg aus dem Kohlestrom bis 2038, die Anhebung der Ziele bezüglich des Anteils erneuerbarer Energien am Stromverbrauch auf 65 % bis 2030 sowie die Beschleunigung des Netzausbaus durch die Anpassung des Netzausbaubeschleunigungsgesetzes umfassen. Eine schnellstmögliche Umsetzung der notwendigen Maßnahmen ist einerseits von zentraler Bedeutung für die Reduzierung des Klimawandels, bringt aber andererseits große technische und gesellschaftliche Herausforderungen mit sich. So müssen die Rahmenbedingungen zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland sicherlich deutlich verbessert werden.

Das Jahr 2019 war ein sehr gelungenes Jahr für unser Institut. Zum einen haben wir einige unserer Projekte erfolgreich abgeschlossen, wie z.B. das Europäische Era-Net-Vorhaben "CALLIA" oder das durch das Umweltministerium Baden-Württemberg geförderte Vorhaben "NEOS". Andererseits haben wir zahlreiche neue Projekte sowohl im Netz- als auch Hochspannungsbereich gestartet. Diese umfassen u.a. die durch das Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Vorhaben i-LIME (*intelligentes Ladeinfrastruktur-Management für Elektromobilität*) und ReTrans (*Reduzierung von Transiten im Hochspannungsverteilnetz für eine optimale Integration von erneuerbaren Energien*) sowie die durch das Bundeswirtschaftsministerium geförderten Vorhaben ZÜbReNe (*Steigerung der Zuverlässigkeit und Überlastbarkeit von Betriebsmitteln zur Reduktion von Netzausbau*) und flexQgrid (*Praxisorientierte Umsetzung des quotenbasierten Netzampelkonzeptes zur Flexibilitätsnutzung im und aus dem Verteilnetz*).

Das Interesse an Themen der Energiewende, der Elektromobilität, des Netzausbaus und an Smart Grid Lösungen ist auch bei den Studierenden weiter ungebrochen. Es wurden 97 studentische Arbeiten in 2019 am IEH durchgeführt, wieder ein sehr erfreuliches Ergebnis. Auch dieses Jahr konnten wir unseren Studierenden die Inhalte der Lehrveranstaltungen im Rahmen einiger Exkursionen mit Einblicken in die Praxis

nahebringen. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Gastgebern herzlich bedanken.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir wieder auf ein sehr gelungenes Jahr zurückblicken. Es wurden über 50 wissenschaftliche Publikationen in Konferenzbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht, die unsere Forschungsaktivitäten dokumentieren. Viele unserer Veröffentlichungen können Sie auf unserer Institutshomepage finden: <https://www.ieh.uni-stuttgart.de/forschung/publikationen/index.html>.

Neben allen diesen Publikationen haben Herr Nicolas Schmidt und Frau Farzaneh Vahidi ihre Dissertationen zu den Themen «*Simulation and Experimental Validation of Forced Oil Flow in Power Transformers*» und «*Elektrische Leitfähigkeit von Öl-Papier-isolierten Barrierensystemen für HGÜ-Transformatoren*» erfolgreich abgeschlossen.

Es gab 2019 einige personelle Änderungen am Institut. Zum einen sind unsere erfahrenen Mitarbeiter Pascal Wiest, Daniel Groß, Simon Eberlein und Christian Suttner ausgeschieden. Zum anderen haben neue Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Markus Fischer, Kathrin Walz, Chuxuan He, Deepak Deepak) unser Team verstärkt. Wir wünschen den ausgeschiedenen Personen viel Erfolg in der künftigen Beschäftigung und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit den neuen Personen.

Allen unseren Freundinnen und Freunden möchten wir an dieser Stelle recht herzlich für die Anregungen und Hilfe danken. Unser besonderer Dank gilt jenen Firmen, die uns durch Aufträge und Spenden unterstützt haben, sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Wir hoffen, dass dieser Jahresbericht auch dazu beiträgt, die bestehenden Kooperationen auszubauen und neue Kontakte zu knüpfen. Dazu möchten wir besonders auf das Kapitel „Studentische Arbeiten“ dieses Jahresberichtes hinweisen, in dem wir zu Ihrer Information auch Kurzfassungen der meisten durchgeführten Masterarbeiten anführen.

Für das begonnene Jahr wünschen wir Ihnen Gesundheit, Glück und alles Gute, auch im Namen von Herrn Professor Feser und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts.

Stuttgart, im Februar 2020

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

PREFACE

Dear friends!

The present report summarizes the major developments on teaching and research at our institute and gives you an overview on our activities during the past year.

2019 was a year, where numerous discussions focused on climate change and the future of our planet. The worldwide activities of the Fridays-for-Future movement have caused major changes in awareness in the society and have influenced the national and international climate policy. Besides the restructuring of the transport sector a central role will be played by future electricity and heating supply, because without a consistent energy transition the transformation of transportation doesn't make sense. In this context important steps have been taken in Germany in 2019. These steps include, amongst others, the adoption of the climate protection law and climate protection program 2030, the tightening of the plans regarding the withdrawal from coal-fired power in 2038, the increase of the targets regarding the share of Renewable Energies in the power consumption to 65 % until 2030 as well as adopting the law for the acceleration of the power system expansion. An immediate implementation of the necessary measures is on one hand of central importance for the reduction of the climate change, but on the other hand will create great technical and social challenges. Therefore the general framework for the expansion of Renewable Energies surely requires a significant improvement in Germany.

The year 2019 was a very successful year for our institute. We completed several of our projects successfully, for example the European Era-Net-Project "CALLIA" or the project "NEOS", which was supported by the Ministry of Environment Baden-Württemberg. Furthermore, we have started numerous new projects in the grid area as well as in the field of high voltage. The projects include, amongst others, i-LIME (*intelligent Manegement of a Charging Infrastructure for Electromobility*), ReTrans (*Reduction of Transits in the High-Voltage Distribution Grid for an Optimal Integration of Renewable Energies*), both supported by the Ministry of Environment Baden-Württemberg, as well as ZÜbReNe (*Increasing the Reliability and Overload Capacity of HV Equipment to Reduce Grid Expansion*) and flexQgrid (*Practical Implementation of a Quota-based Network Traffic Light Concept for Flexible Use to and from Distribution Grids*), both supported by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

The students remain highly interested in topics concerning the change of the energy sector, the expansion of the grids and smart grid solutions. In 2019, 97 scientific works have been completed at our institute, again a very positive result. Various excursions offered the students excellent opportunities to gain an insight into everyday practice. Once again we would like to thank all partners for their support.

In the research field we look back on another very successful year. Over 50 scientific publications have been published in conference proceedings and journals, documenting our research activities. You can find many of our publications on our homepage <https://www.ieh.uni-stuttgart.de/forschung/publikationen/index.html>.

Besides the publications, Mr. Nicolas Schmidt and Mrs. Farzaneh Vahidi successfully finished their dissertations in the subjects «*Simulation and Experimental Validation of Forced Oil Flow in Power Transformers*» and «*Electrical Conductivity of Oil-Impregnated Pressboard Barrier Systems for HVDC Transformer Insulation*».

In 2019, we had several personnel changes. On the one hand, our experienced employees Pascal Wiest, Daniel Groß, Simon Eberlein and Christian Suttner left the institute. On the other hand, new employees (Markus Fischer, Kathrin Walz, Chuxuan He, Deepak Deepak) have strengthened our team. We wish the former colleagues all the best in their future employment and look forward to collaborate with the new staff members.

Finally we would like to send our sincere thanks to all our friends 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 government of Baden-Württemberg and to the German Research Foundation (DFG). We hope that our annual report will strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. For this purpose we would like to refer to chapter 3.4 where you find abstracts of our graduate's work.

We are looking forward to continued close contact and co-operation with you also on behalf of Professor Feser and all our members of staff.

Our best wishes accompany you in 2020.

Stuttgart, February 2020

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 <i>Robert Bosch GmbH</i> Dipl.-Ing. Rainer JOSWIG Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH <i>Schneider Electric Energy GmbH</i> Dr.-Ing. Markus PÖLLER <i>Moeller & Poeller Engineering GmbH</i> Prof. Dr. Techn. Dr.-Ing. habil. Konstantin O. PAPAILIOU	-811-20992
Oberingenieure:	Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI Dipl.-Ing. Michael BELTLE (<i>Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern</i>)	-685-67878 -685-68061
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	M. Sc. Benjamin ADAM M. Sc. Manswet BANKA M. Sc. Jonas BERTELMANN M. Sc. Chandra Prakash BEURA M. Sc. Matthias BUCHNER M. Sc. Daniel CONTRERAS M. Sc. Simon EBERLEIN (bis 7.6.2019) M. Sc. Deepak DEEPAK (ab 1.11.2019) M. Sc. Adrian EISENMANN M. Sc. Markus FISCHER (ab 1.2.2019) M. Sc. Heiner FRÜH	-685-69198 -685-67868 -685-69195 -685-69152 -685-67838 -685-69193 -685-67889 -685-67867 -685-61525 -685-69151

M. Sc. Daniel GROß (bis 30.9.2019)	
M. Sc. Stephanie HÄGELE	-685-67858
M. Sc. Manuel HAUG	-685-60832
M. Sc. Chuxuan HE (ab 20.9.2019)	-685-67857
M. Sc. Smitha KARAMBAR	-685-69194
M. Sc. Saeed KHANDAN SIAR	-685-67809
M. Sc. Ouafa LARIBI	-685-69197
M. Sc. Markus MILLER	-685-67869
M. Sc. Denis MÜLLER	-685-69199
M. Sc. Daniel PASSOW	-685-69165
M. Sc. Jan SCHABEL	-685-67874
M. Sc. Michael SCHÜHLE	-685-69142
M. Sc. Tim STREUBEL	-685-69167
M. Sc. Christian SUTTNER (bis 30.9.2019)	
M. Sc. Mehran TAHIR	-685-67855
M. Sc. Farzaneh VAHIDI	
M. Sc. Kathrin WALZ (ab 15.5.2019)	-685-69196
M. Sc. Philipp WENGER	-685-69177
M. Sc. Pascal WIEST (bis 31.1.2019)	

Sekretariat /

Secretary:

Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:

Janja SCHULZ	-685-67870
Annette GUGEL	-685-67880

Hochspannungslabor Ostfildern:

Konstanze LINS	-685-69175 (-3412075)
----------------	--------------------------

Buchhaltung /

Accounting:

Nicole SCHÄRLI	-685-67876
----------------	------------

Technische Angestellte /

Technical Staff:

Muhammed ACAR, <i>Auszubildender</i>	-685-67847
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:

Prof. Dr. Tankut YALCINÖZ

-685-69159

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*
- *Symmetrische Komponenten*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN**DR.-ING. U. SCHÄRLI*****Elektrische Energienetze II***

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

- *Kennwerte von Drehstrom-Freileitungen und Kabeln*
- *Belastbarkeit von Kabeln*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*
- *Lastflussberechnung*
- *Zustandserkennung*
- *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**DIPL.-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**UND ASSISTENTEN*****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 im 2. Semester. Auch Studierende der Technikpädagogik mit Schwerpunkt Elektrotechnik sowie Lehramtsstudierende im Fach Naturwissenschaft und Technik nehmen teil.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

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

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

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 Masterstudierende werden die Fachpraktika in Form kleiner Projekte durchgeführt.

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Praktikum im Studiengang „Erneuerbare Energien“

Das Institut bietet im gleichnamigen Bachelorstudiengang 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

7. Februar 2019, ganztägig:

Fahrt zur SPIE SAG GmbH in Langen mit Fachvorträgen und Vorführungen für Hörerinnen und Hörer der Vorlesung „Hochspannungsfreileitungen“

11. – 14. Juni 2019: Besuch mit den Hörern der Fachvorlesungen bei

- | | |
|--------------------------------|--|
| - DLR Köln | Europäisches Astronautenzentrum
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin |
| - RWE Power AG | Kraftwerk Niederaußem
Braunkohletagebau Garzweiler |
| - GE Grid GmbH Mönchengladbach | Leistungstransformatoren |
| - ABB Calor Emag Ratingen | Mittelspannungsschaltanlagen |

4. Juli 2019, ganztägig

Besuch des Kraftwerks Altbach/Deizisau mit Rundgang im Rahmen der Vorlesung „Elektrische Verbundsysteme“; Besichtigung der 380- und 110-kV-GIS-Schaltanlage und Erläuterung der Besonderheiten; zum Vergleich auch Besichtigung der 380 kV-Freiluftschaltanlage Stuttgart-Mühlhausen

18. September 2019, ganztägig

Besichtigung des Kernkraftwerks Philippsburg mit Infocenter Ultranet im Rahmen der Vorlesung „Elektrische Verbundsysteme“

18. November 2019, ganztägig

Exkursion zu Netze BW am Standort Esslingen mit insgesamt 32 Teilnehmern, organisiert von der VDE Hochschulgruppe Stuttgart. Einführung in die Aufgaben der Netzführung sowie Besichtigung der 110 kV Schaltleitung und der 20 kV Leitstelle.

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 1.11.2018 bis 31.10.2019:

Alsulaimani, Suhayb

Modellierung eines realitätsnahen Wechselrichters nach VDE-AR-N 4105

Die meisten Stromversorgungssysteme unterliegen aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien (RE) erheblichen Veränderungen in der Netzstruktur. Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen wird als eine Lösung angesehen, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern, um umweltfreundliche elektrische Energie bereitzustellen und um die wachsende Nachfrage zu decken. Die Norm (VDE-AR-N 4105) für dezentrale Stromerzeuger im Niederspannungsnetz wurde kürzlich aktualisiert, um die Integrationsprobleme der DG zu lösen. Ziel dieser Studie war es, die Auswirkungen der Umsetzung der neuen Netzcodes auf die Stromqualität zu analysieren. Dazu wurde ein Wechselrichtermodell mit den neuen Vorschriften erstellt und ein praktisches Modellvalidierungsexperiment durchgeführt.

Modelling of a Realistic Inverter According to VDE-AR-N 4105

Most electricity supply systems in the world are undergoing significant changes in the grid structure as a result of the increasing share of renewable energy sources (RE). The use of renewable energy sources is seen as a solution to reduce dependence on fossil fuels and provide environmentally friendly electrical energy to meet growing demand. The standard (VDE-AR-N 4105) for distributed generators in the low voltage grid has recently been updated to address the DGs integration problems. The aim of this study was to analyse the implementation effects of the new grid codes on power quality. Therefore, an inverter model with the new regulations was constructed and a practical model validation experiment was conducted.

Atas, Yasin

**Entstehung und Löschverhalten von DC-Lichtbögen in der Elektromobilität
Formation and Extinction Behavior of DC Arcs in Electric Mobility**

Bodenschatz, Sebastian

Thermische Modellierung einer Kabelmuffe zur Erstellung eines lastabhängigen Temperaturprofils

Für eine prognostische Beurteilung, Bewertung und Überwachung der Temperatur einer Hochspannungskabelstrecke bei Nennstrom gilt es, neben der Temperatur des Kabels ebenso die der Kabelmuffe auftretenden Temperaturen zu berücksichtigen. Vorhersagen zur Kabel- und Muffentemperatur lassen sich auf Basis von Messwerten sowie thermischen Modellen treffen. In dieser Arbeit wird ein thermisches Modell für Kabel und Kabelmuffe innerhalb einer FEM-Umgebung entwickelt und anhand von im Labor akquirierten Messwerten verifiziert. Dabei wird sowohl das stationäre, als auch das transiente Verhalten simuliert und verifiziert. Ebenso werden die Simulationsergebnisse unterschiedlicher physikalischer Solver miteinander verglichen, um die Redundanz und Unabhängigkeit des Modells vom jeweiligen Solver zu zeigen.

Development of a Load Dependent Thermal Model of a Cable Joint

For a predictive evaluation, rating and a monitoring of a high-voltage cable, it is necessary to take also the temperatures occurring in the cable joint into account. A predictive load factor management of cables or joints can be achieved using a combination of actual temperature data and load correlated thermal models. In this an FEM-based thermal model for stationary as well as transient behavior of joint cable is developed and verified by laboratory temperature measurement data. Also, the influence of different physical solvers on the simulation results of the thermal is analyzed and compared to proof the solver independence of the thermal model.

Büyükleyla, Linda

Ermittlung des Flexibilitätspotentials von Verteilnetzen mit wechselnden Netztopologien

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Ermittlung des Flexibilitätspotentials unter Veränderung der Netztopologie. Die realisierte automatisierte Variation an Topologien wiederholt die Lastflussrechnung unter Berücksichtigung von drei Leistungsszenarien und ermöglicht eine Analyse anhand von Flexibilitätspolygonen. Neben dem Ein- und Ausschalten von einzelnen Leitungen, ist der Einsatz eines rONT dokumentiert. Resultierend kann der Flexibilitätsbereich einer Netztopologie durch die Nutzung eines rONT in Richtung der Blindleistung erhöht werden. Bei der Analyse zeigt sich zudem, dass das Abschalten von Leitungen die Flexibilität im Vergleich zur Ursprungstopologie einschränkt. Das Flexibilitätspotential eines elektrischen Netzes unterliegt einer direkten Abhängigkeit zu der Netztopologie und ist folglich der Netzregulierung dienlich.

Determining the Flexibility Potential of distribution Grids considering different Grid Topologies

This work concentrates on determining flexibility potentials while modifying the network topology. The developed automated variation of topologies repeats the load flow calculation under consideration of three scenarios and enables an analysis based on flexibility polygons. In addition to switching individual lines on and off, the use of an OLTC is documented. As a result, the flexibility range of a network topology can be increased by using an OLTC in the direction of reactive power. Analysis shows that disconnecting lines restricts flexibility compared with the original topology. The flexibility potential of power networks is directly dependent on its topology and is therefore useful for network regulation.

Diederich, David

Harmonischer Lastfluss in industriellen Niederspannungsnetzen

Im Rahmen der Arbeit wird das Niederspannungsnetz des Forschungsbaus ARENA2036 auf dem Campus der Universität Stuttgart modelliert. Der Fokus bei der Modellierung, die in Simulink erfolgt, liegt auf der Betrachtung der Oberschwingungen. Im Anschluss an die Modellbildung wird die Ausbreitung der Oberschwingungen diverser Lasten und Erzeuger analysiert. Die Modelle werden anschließend mit realen

Messwerten oder mit Messwerten aus der Literatur verglichen und validiert. Anknüpfend wird unter anderem der Einfluss der Photovoltaik-Anlage auf die Ausbreitung der Oberschwingungen untersucht und ein Blick auf die Frequenzabhängigkeit einiger Lasten wie z.B. die Lüftung oder den Kran geworfen.

Harmonic Load Flow in industrial Low Voltage Grids

In the context of this master thesis an industrial low voltage network is modeled. The focus in modeling (in Simulink) is on the observation of the harmonics. The research building ARENA2036 on the campus of the University of Stuttgart serves as a reference model. The modeling will be followed by an examination of the propagation of harmonics of various loads and generators. The models are then compared and validated with real measured values or with data from literature. Afterwards, the influence of the photovoltaic system on the propagation of harmonics is examined and the frequency dependence of some loads is analyzed.

Dieterich, Lukas

Sensitivitätsanalyse zu Power Quality Prüf- und Messverfahren nach IEC 61000-4-30

Im ersten Teil dieser Masterarbeit erfolgt die Implementierung eines einfachen harmonischen Lastflussverfahrens auf Basis der konventionellen Newton-Raphson Lastflussberechnung. Mit dem Skript können fundamentale harmonische Zusammenhänge, z.B. die Überlagerung harmonischer Ströme bei mehreren Quellen in einem Netzwerk, untersucht werden. Es werden allgemeine Ergebnisse an Hand der Kurvenform der verzerrten Netzspannung erläutert. Der zweite Abschnitt der Arbeit beschreibt die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse zur Messgenauigkeit von PQIs in Abhängigkeit ihrer Spezifikationen und von Einflussgrößen der Netzspannung. Die Ergebnisse der Masterarbeit sind die vollständige simulative Abbildung der Messkette für die Erfassung von harmonischen Spannungen im Netz sowie der Entwurf eines Feldtests für PQIs.

Sensitivity Analysis of Power Quality Testing and Measurement Techniques according to IEC 61000-4-30

In the first part of this master's thesis the implementation of a simple harmonic load flow method on basis of the conventional Newton-Raphson load flow iteration is carried out. Using the script, fundamental harmonic relationships, e.g. the superposition of harmonic currents of several sources in an electrical grid can be investigated. General results are explained by looking at the waveforms of the distorted system voltage. The second element of this work describes the execution of a sensitivity analysis in order to examine the measurement accuracy of a PQI in dependence of its hardware properties and of influence quantities of the power supply voltage. The results of this master's thesis are the simulation of the entire measurement chain for the recording of harmonic voltages in the grid as well as a draft for the field test for PQIs.

Fischer, Markus

Reduzierung transienter Überspannungen in Vakuumschaltern mittels Lichtbogenformung durch axiale Magnetfelder

In dieser Arbeit wird die Lichtbogenformung durch externe, axiale Magnetfelder genauer untersucht. Eine Feldsimulation mit der erforderlichen Spule und der Vakuumschaltkammer analysiert die erreichbaren Flussdichten. Mit einem entsprechend entwickelten Versuchsaufbau werden zu reproduzierbaren Schaltzeitpunkten für verschieden hohe Lastströme die Veränderungen durch das Axialfeld ermittelt. Ein Simulationsmodell des Schalters untersucht abschließend den Einfluss der Phasenlage bei der Kontakttrennung, des Stromabrisswerts und der Speisekabellänge auf die Reduzierung transienter Überspannungen.

Reduction of Transient Disturbances by Arc Shape Control using Axial Magnetic Fields in Vacuum Interrupters

This thesis investigates the arc control using external axial magnetic fields. A field simulation with the required coil and vacuum interrupter analyzes the reachable magnetic flux density. With an adequate experimental setup, the changes, as a result of the axial field, are obtained at constant switching times for different load currents. Finally, a simulation model of the switch investigates the influences of phase position during contact separation, the current chopping values and cable length on the reduction of transient disturbances.

Gerber, Malte

Design und Implementierung eines IoT-Leistungsmessgeräts

Der Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Elektromobilität erfordert auch im Niederspannungsnetz die Kenntnis der aktuellen Netzsituation. Es entstehen größere Spannungsschwankungen im Niederspannungsnetz, wodurch Netzausbau zur Sicherung der Netzstabilität notwendig wird. Der Ausbau sollte so kosteneffizient wie möglich erfolgen. Das in dieser Arbeit entwickelte Grid Monitoring System zeichnet dauerhaft an ausgewählten Punkten im Netz den Strom, die Spannung, die Leistung und weitere Parameter (THD, einige Harmonische) auf und sendet sie über eine Mobilfunkschnittstelle an eine zentrale Datenbank. Anhand der Messdaten wird eine Zustandsschätzung der betrachteten Netzgruppe möglich. Bei Bedarf können ein Transformator, eine Batterie oder ein Wechselrichter gesteuert werden. Durch die dauerhafte Verbindung zum Internet und kontinuierliche Übertragung von Messdaten fällt das Grid Monitoring System in den Bereich des Internet of Things.

Design and Implementation of an IoT Power Measurement Device

Due to the expansion of renewable energies and of electromobility the need for an accurate knowledge of the current grid condition becomes important, especially in the distribution grid. Due to the increasing voltage fluctuations in the distribution network it is necessary to ensure the reliability with an expansion of the distribution grid. In order to optimize the expansion to be as cost efficient as possible it is necessary to obtain a continuous knowledge of the grid status. The Grid Monitoring System, which was developed within this master thesis, continuously records the voltage, the current, the active power and other parameters at selected points in the network and sends them

wirelessly to a central database. These data can be used to calculate a complete state estimation of the local distribution grid. Based on this data the Grid Monitoring System can control a transformer, a battery or an inverter. Due to the continuous connection to the global communication network and the permanent communication of measurement data, the Grid Monitoring System is categorized into the area of the Internet of Things and can be easily controlled centrally via the databaseserver.

Grasenack, Martin

Zeitreihenbasierte Aggregation von Flexibilitätspotentialen in Verteilnetzen

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung und Auswertung von Flexibilitäten in einem elektrischen Verteilnetz über der Zeit. Dafür werden Parametrisierungen der verschiedenen Flexibilitäten, unter Einbeziehung der Leistungsdaten der Verbraucher und Erzeuger, für verschiedene Zeitpunkte erzeugt. Für eine Prognosefehleranalyse wurde zudem eine probabilistische Fehlerabschätzung mithilfe von Verteilungsfunktionen implementiert. Diese werden dann mit einer Aggregationsmethodik ausgewertet. Die ermittelten Flexibilitätsbereiche werden mithilfe von verschiedenen Darstellungsformen, wie z.B. 3D-Darstellungen der Flexibilität, Wahrscheinlichkeitsdarstellungen sowie verschiedenen farblichen Unterscheidungshilfen zur Bewertung der Flexibilität, dargestellt. Hilfsfunktionen wurden implementiert, welche unter anderem die Gleichheit von zwei Grafiken untersuchen oder die Regelleistungen ermitteln.

Time-Series Based Distribution Grids Flexibility Aggregation

This thesis deals with the calculation and evaluation of flexibilities in electrical distribution grids over time. For this purpose, power data of consumers and generators are used to obtain the parametrization of different flexibilities for sequential time steps. In addition, a probabilistic error estimation using distribution functions was implemented by means of corresponding forecast error analysis. These are then evaluated by an aggregation methodology. The flexibility ranges are displayed using various formats, e.g. 3D representations, probability representation and various color differentiation graphs. Auxiliary functions were implemented, which among other things examine the equality of two polygons or determine frequency control power.

Heid, Katharina

Modellierung von Supraharmonischen Emissionen von einphasigen PV-Wechselrichtern

Um die harmonischen Emissionen durch PV-Wechselrichter zu bestimmen, wurden Messungen an einem PV-Wechselrichter durchgeführt. Außerdem wird mittels Simulink ein PV-Wechselrichter modelliert. Bei den Messungen und Simulationen eines einphasigen Wechselrichters wurden neben den primären Emissionen auch die sekundären Emissionen betrachtet. Bei primären Emissionen wurde der Anschluss des PV-Wechselrichters an ein ideales Netz betrachtet. Dabei wurden die supraharmonischen Emissionen im Frequenzbereich von 2-150 kHz berücksichtigt. Es stellt sich heraus, dass vor allem die Taktfrequenz und die Filterresonanzfrequenz des

Wechselrichters die supraharmischen Emissionen beeinflussen. Bei der Betrachtung der primären Emissionen im Vollastbereich sind die harmonischen Amplituden, die durch die Resonanz mit der Taktfrequenz entstehen, deutlich größer als die der Filterresonanzfrequenz. Wird die Photovoltaikanlage geringer bestrahlt, operiert der Wechselrichter im Teillastbereich, und die harmonischen Emissionen des gemessenen Wechselrichters nehmen ab.

Modelling of Supraharmonic Emission of Single-Phase PV inverters

In order to determine the harmonic emissions caused by photovoltaic inverters, measurements were performed on a photovoltaic inverter as a part of this work. In the measurements and simulations of a single-phase inverter, the primary emissions were considered as well as the secondary emissions. For primary emissions the connection of the photovoltaic inverter to an ideal distribution grid was investigated. Especially the Supraharmonic emissions, in the frequency range of 2-150 kHz, were regarded. It turns out that above all the switching frequency and the filter resonance frequency of the inverter influence the Supraharmonic emissions. When considering the primary emissions at full load conditions, the harmonic amplitudes resulting from the resonance at the switching frequency are significantly greater than those of the filter resonance frequency. If the photovoltaic system is less irradiated, the inverter operates in the partial load range and the harmonic emissions of the measured inverter decrease.

Heusel, Svenja

Analyse und EMV-Optimierung von Lademess- und Simulationssystemen für die Elektromobilität zur Verwendung als Referenztestsystem für EMV-Labore

Analysis and EMC Optimization of Charging and Simulation Systems for Electromobility for Use as a Reference System for EMC Laboratories

Hollunder, Valerie

Untersuchung der Elektrifizierung und Gleichzeitigkeit verschiedener Abnehmertypen der Elektromobilität in Mittelspannungsnetzen

Investigation of the Electrification and Simultaneity of Electromobility Loads in Medium Voltage Grids

Holzrichter, Jakob

Bewertung des Koppelverhaltens von in Kabeln und Kabelmuffen integrierten Richtkopplersensoren

Ausfälle in Stromnetzen können Folgen von in Betriebsmitteln auftretenden Isolationsfehlern sein. Die Fehlerursachen sind in Umwelteinflüssen, betriebsbedingte Alterung und mangelhafter Montagequalität der Betriebsmittel, insbesondere bei Kabelgarnituren, zu finden. Das Auftreten von Teilentladungen ist dabei ein Indikator für sich entwickelnde Isolationsfehler. Aufgrund dessen befasst sich diese Arbeit mit der Grundlagenuntersuchung von in Erdkabeln und Kabelmuffen integrierten Richtkopplersensoren, welche als eine Option zur Detektion von in Kabelstrecken auftretenden

Teilentladungen gelten. Das Ziel ist die Identifizierung der auf die Kopplungseigenschaften einflussnehmenden Parameter der Richtkopplersensoren. Hierzu werden die Kopplergeometrie sowie das Betriebsmittel variiert und die Kopplungseigenschaften im Frequenzbereich von 100 kHz bis 1 GHz dokumentiert.

Coupling Behavior Evaluation of integrated directional Coupler Sensors in Cables and Joints

Failures in power grids may occur as consequences of insulation failures. Especially cable joints are often responsible for failures promoted by environmental influences, operationally aging and non-conformal installation. Occurring partial discharges (PD) are an important indicator for emerging insulation failures, which lead to irreversible degrading processes and damage in solid insulation. Therefore, this thesis investigates directional couplers as an option to detect PD in cable routes. By integrating sensors in cable joints and underground cables the influence on coupler properties are determined and recorded by changing directional coupler's geometry and frequency between 100 kHz and 1 GHz.

Khalid, Serkeft

Dämpfung von VFTs in gasisolierten Schaltanlagen

In dieser Arbeit wird die Dämpfung von „Very Fast Transient Overvoltages“ (VFTOs oder VFTs) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) untersucht. Dazu werden Ringe, die eine Legierung aus nanokristallinem Material besitzen, um den hochspannungsführenden Innenleiter montiert. Umfangreiche, in dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass der Dämpfungseffekt sehr stark von der Permeabilität und der Anzahl sowie der frequenzabhängigen Einfügeimpedanz der verwendeten nanokristallinen Ringe abhängt. Für die zuverlässige Dämpfung der VFTs ist der Einbauort der Ringe hinsichtlich der Fehlerstelle und die Anordnung der GIS-Komponenten von entscheidender Bedeutung.

Damping of VFT in gas-insulated Substations

In this thesis the damping of very fast overvoltages in gas insulated substations is investigated. To do this, rings that consist of an alloy of nanocrystalline material are mounted at the inner conductor under high voltage. Extensive experiments executed in this thesis show the damping effect strongly depends on the permeability and the used number as well as the insertion loss of the nanocrystalline rings. For reliable damping of the VFTs, the installation point considering the VFT location and the formation of the GIS parts are of crucial importance.

Lei, Lei

Künstliche Intelligenz im Demand Side Management

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Ermittlung der optimalen Betriebsplanung basierend auf der Theorie des Demand Side Management vorgestellt. Die Zielfunktion besteht aus zwei Teilen. Ein Teil besteht darin, die harmonische Verzerrung zu verringern, wodurch die Stromqualität verbessert und der zusätzliche Verlust verringert wird. Auf der anderen Seite muss bei gleichzeitiger Reduzierung der harmonischen

Verzerrung auch die Produktivität gewährleistet sein, die in dieser Arbeit als Stromverbrauch ausgedrückt wird. Der vorgeschlagene Ansatz wurde als Problem mit hoher Kardinalität und komplexen Randbedingungen implementiert, die mit herkömmlichen Techniken nicht einfach zu lösen sind. Daher wurde zur Lösung des Problems eine Genetische Algorithmus (GA) Struktur verwendet.

Artificial Intelligence in Demand Side Management

This paper presents a methodology for finding the optimal scheduling based on the theory Demand Side Management. The objective function is mainly composed of two parts, one part is to reduce the harmonic distortion, thereby improving the power quality and reducing the extra loss. On the other hand, while reducing the level of harmonic distortion, the productivity also needs to be guaranteed, which is expressed as the power consumption in this paper. The proposed approach was implemented as a high-cardinality problem with complex boundary conditions that is not easily solved by conventional techniques, therefore a Genetic Algorithm (GA) structure was used to solve the problem.

Li, Pengpeng

The day-ahead Electricity Market: Considering the Variability of Renewable Energies

This thesis firstly presents the optimal market model with the economic dispatch (ED) and unit commitment (UC) based approaches in the day-ahead market. The primary solution for the UC and ED problem without network constraints is obtained in this phase. The active power values of the generation buses determined by the UC/ED module are imported into the power flow calculation module using MATPOWER. Then the power flow module is executed, and the network constraints are checked. If one of the restrictions is not fulfilled, the process is continued with the redispatch module. The proposed redispatch algorithm is used for thermal and wind power generators.

Liu, Liangjida

Objective Interpretation of Mechanical Faults in Transformer Windings

This report is focusing on the interpretation of frequency response of transformer, to evaluate the effect of axial displacement (AD) faults on frequency response of transformer. The propose is to define a quantitative AD fault diagnosis method. To achieve this task, the AD displacement is implemented in two transformers, i.e., disc winding transformer and the moulded transformer. Inductive inter-winding and capacitive inter-winding short-circuit tests proved to be more sensitive to detect AD fault. The possibility of quantitative interpretation of AD is also discussed. A 2D FEM model is developed in COMSOL. The impact of each fault level on the electrical parameters of the windings is investigated and the correlation between the fault level and the percentage change in each parameter is provided.

Metzler, Philipp

Entwicklung eines intelligenten Lade- und Lastmanagementsystems für den Parkraum

Development of an intelligent Charge and Load Management System for parking Areas

Nalop, Alexander

GUI für einen Verstärker mit frequenzabhängiger Signalanpassung an Lasten

Bei Simulationen und der Untersuchung elektrischer Geräte bzw. ihrer Reaktion auf unregelmäßige Spannungsverläufe am Eingang ist die Erstellung des Spannungsverlaufes der erste Schritt zu auswertbaren Ergebnissen. Mit dem Leistungsverstärker im IEH Smart Grid Labor können Spannungs- und Stromverläufe mit Signaleinbrüchen, -spitzen oder zeitlichen Verlaufsänderungen bis zu einer Grenzfrequenz von 30 kHz erstellt werden, um beispielsweise die Reaktion eines Wechselrichters aufzuzeichnen. Der Leistungsverstärker kann aber auch höhere Frequenzen bis zu 500 kHz ausgeben, wobei die eingestellte Amplitude bei steigender Frequenz abnimmt. Durch eine in dieser Arbeit entwickelten Methode zur frequenzabhängigen Korrektur der Eingangsdaten ist dies bis zu einem gewissen Grad ausgleichbar.

GUI for an Amplifier with Frequency Dependent Signal Matching to Loads

In simulations and the investigation of electrical devices or their reaction to irregular voltage curves at the input, the generation of the voltage curve is the first step towards evaluable results. With the power amplifier in the Smart Grid laboratory, voltage and current curves with signal dips, peaks or changes over time up to a cut-off frequency of 30 kHz can be created to record the reaction of an inverter, for example. However, the power amplifier can also output higher frequencies up to 500 kHz, with the set amplitude decreasing as the frequency increases. This can be compensated to a certain extent by a method developed in this thesis for frequency-dependent correction of the input data.

Osswald, Dominik

Netzintegration von Elektromobilität in ein städtisches Verteilnetz

In dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, um den Einfluss von Elektromobilität auf spezifische Ortsnetze zu untersuchen. Es wurde die Entwicklung der Elektromobilität in Baden-Württemberg prognostiziert und bis auf ein 100x100m Raster regionalisiert. So lassen sich Ortsnetze mit einer hohen, zu erwartenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen identifizieren. Das in dieser Arbeit beispielhaft generierte Netzmodell erreicht in der Validierung eine sehr hohe simulative Übereinstimmung mit vorliegenden Messwerten. 2030 werden die Auswirkungen der Elektromobilität vor allem in den Szenarien mit gemischten Ladeleistungen und mit einer verstärkten Durchdringung mit 22 kW Ladepunkten relevant. Hierbei sind Mehrfamilienhauseinführungen die kritischsten Netzelemente.

Integration of E-mobility in an Urban Distribution Grid

In this work, a methodology to investigate the influence of electric mobility on specific low-voltage grids was developed. The growth of electromobility in Baden-Württemberg was forecasted and regionalized to 100x100m grids, allowing local LV grids with high-expected penetration of electric vehicles to be identified. The grid model generated in this work achieved a very high simulative agreement with existing measured values. Subsequently, the regionalized run-up was applied to an exemplary suburban LV grid. In 2030, the effects of electromobility will be particularly relevant in mixed charging power scenarios and with increased penetration of 22 kW charging points. Apartment house connections emerge as critical network elements.

Radloff, Marius

Evolutionärer Algorithmus für die Optimierung rechenintensiver Fitnessfunktionen

In dieser Arbeit wird ein evolutionärer Algorithmus konzeptioniert, programmiert und optimiert. Der Algorithmus ist auf die Berechnung rechenintensiver Zielfunktionen ausgelegt. Probleme sollen mit möglichst wenigen Fitnessberechnungen gelöst werden können. Dazu werden für Selektion, Rekombination und Mutation unterschiedliche Verfahren implementiert. Zusätzlich wird die Evaluierung doppelter Individuen verhindert, adaptive Parameter verwendet und die Selektion diversitätsabhängig gestaltet. Der modulare Aufbau des Algorithmus ermöglicht es, anhand von Programmparametern die implementierten Verfahren unterschiedlich zu kombinierten und deren Verhalten anzupassen. Für die Tests werden verschiedene Benchmark-Funktionen ausgewertet. So wird die Optimierung des Algorithmus generischer und liefert für unterschiedliche Problemtypen gute Ergebnisse. Der Algorithmus mit dem optimierten Parametersatz kann die getesteten Optimierungsprobleme mit weniger Evaluationen lösen als der nicht optimierte Algorithmus. Besonders Probleme mit rechenintensiven Fitnessfunktionen können so schneller optimiert werden.

Evolutionary Algorithm for Optimization of computationally intensive Fitness Functions

In this thesis an evolutionary algorithm is conceptualized, programmed and optimized. The algorithm is designed to calculate time-consuming fitness functions. Problems should be solved with as few fitness calculations as possible. For this purpose, different methods are implemented for selection, recombination and mutation. In addition, the evaluation of duplicate individuals is prevented, adaptive parameters are used and the selection is diversity-dependent. The modular structure of the algorithm makes it possible to use program parameters to combine the implemented methods and adapt their behavior. Various benchmark functions are evaluated for the tests. Thus, the optimization of the algorithm becomes more generic and gives good results for different types of problems. The algorithm with the optimized parameter set can solve the tested optimization problems with fewer evaluations than the non-optimized algorithm. Especially problems with time-consuming fitness functions can be optimized faster.

Riegraf, Robert

Numerische Untersuchung der gestrahlten Emissionsbelastungen bei standardisierten WPT-Systemen im Kfz

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist die Erarbeitung eines computergestützten 3D-Simulationsmodells einer resonanten induktiven Ladestation für Elektrofahrzeuge. Mithilfe eines validierten Simulationsmodells können die zu erwartenden Emissionsbelastungen dieser Systeme untersucht werden. Die technischen Spezifikationen sind an die aktuellen Normvorschläge für standardisierte Doppelhelixspulen der SAE angelehnt. Zur Validierung des Simulationsmodells werden das Impedanzverhalten sowie die Übertragungsfunktionen der energieübertragenden Induktionsspulen mit Messergebnissen eines realen Prototyps verglichen. Durch Berücksichtigung von spezifischen Materialparametern im Modell kann eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen erreicht werden. Mit dem entwickelten 3D-Modell können Vorhersagen über gestrahlte sowie leitungsgebundene Emissionswerte im Frequenzbereich 9 kHz - 100 MHz getroffen werden.

Numerical Simulation of radiated Emissions of standardized automotive WPT-Systems

This master thesis develops a 3D simulation model of a resonant inductive charging station for electric vehicles. With a validated simulation model, electromagnetic emissions of these systems can be investigated. The technical specifications are based on current standardization activities for double helix coils from SAE. To validate the simulation model, the impedance and transfer functions of the energy-transmitting coils are compared with measurements of a real prototype. By considering specific material parameters in the model, a high agreement with the measurement results can be achieved. With this model radiated and conducted emission values in the frequency range 9 kHz - 100 MHz can be estimated.

Sanaee, Mohsen

Auswirkungen von Mehrfachfehlern im Übertragungsnetz auf das dynamische Systemverhalten

Impacts of multiple Faults in Transmission Grid on dynamic Behavior of the Power System

Schäffer, Ludwig

Verbraucherdatenanalyse im industriellen Umfeld

Das hohe Aufkommen von nichtlinearen Lasten, sowohl im Alltag als auch bei industriellen Verbrauchern, verursacht Rückwirkungen auf das Netz. Durch das Monitoring-System des IEH in der ARENA 2036 werden die Ströme und Spannungen an den Sammelschienen aufgezeichnet. Um Auswirkungen von einzelnen industriellen Verbrauchern zu ermitteln, müssen diese einzeln vermessen werden. Zunächst muss dafür ein geeignetes Power Quality Messsystem ausgewählt werden, das einen Verbraucher mit ausreichend Daten vermisst. Die großen Datenmengen, die bei den Messungen anfallen, müssen in einer passenden Datenstruktur gespeichert werden. Hierzu wurden unterschiedliche Datenbanken auf diverse Anforderungen untersucht

und implementiert. Danach wurden Verbraucher vermessen und begonnen deren Verhalten mathematisch nachgebildet.

Consumer Data Analysis in an industrial Environment

The high volume of nonlinear loads, both in everyday life and with industrial consumers, causes reactions on the network. The IEH monitoring system in the ARENA 2036 records the currents and voltages at the collecting bus bars. Individual measurement is necessary to determine the effects of individual industrial consumers. A dedicated PQ measurement box must be selected which measures a consumer with sufficient data. These large amounts of generated data must be stored in a suitable data structure. For this purpose, different databases were examined and implemented for various requirements. Afterwards consumers were measured and the mathematical simulation of their behavior started.

Schössler, Torsten

Betrachtung der aktuellen High Voltage Ride Through (HVRT)-Anforderungen an Erzeuger im derzeitigen und zukünftigen Stromnetz

Review of the latest High Voltage Ride Through (HVRT) Requirements for Generators in the current and future Power Grid

Schuler, Marc

Teilentladungsmonitoringsystem für Leistungstransformatoren nach IEC 60270

Durch Teilentladungsmonitoring an Leistungstransformatoren kann deren Zustand überwacht und bewertet werden. In dieser Arbeit soll dazu ein vollständiges Mess-System für elektrische Teilentladungsmessung entwickelt und getestet werden. Die Schnittstelle am Leistungstransformator soll über die Durchführung und den dort vorhandenen Messanschluss erfolgen. Dazu wird ein passendes Gehäuse entwickelt, welches einen für die elektrische Teilentladungsmessung benötigten Ankoppelvierpol enthält. Dieser muss über eine wetterfeste Verkabelung mit einer zu erstellenden Eingangskarte für ein bestehende Monitoringsystem verbunden werden.

Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers according to IEC 60270

Monitoring of partial discharges is a tool to evaluate the condition of power transformers. In this thesis, a complete partial discharge measurement system has to be developed and tested. The power transformers bushing is the socket for the electrical connection. For this, a matching housing has to be designed which has to carry a measuring impedance. Weatherproof cables connect the measuring impedance and the electrical input card. The input card has to fit in an existing monitoring system.

Schuster, Thomas

Untersuchung der Auswertung von Stoßimpulsen gemäß DIN EN 60060-1 / VDE 0432-1

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Auswertung von Blizspannungsstoßmessungen nach IEC 60060-1 2010 und den Grenzwerten der Softwarebewertungsnorm 61083-

2. Ziel dieser Arbeit ist es, ein am Institut bestehendes System zur Messung und automatischen Auswertung von Blitzstößen (TIPAS) bezüglich der Programmierung an die neueste Norm (IEC 60060-1 2010) anzupassen und bestehende Fehler in der Auswertung zu beheben. Dabei wurden die bestehende Auswertung analysiert und die Probleme bei der Auswertung beschrieben. Zudem wurde auf Punkte eingegangen die nicht eindeutig in der Norm definiert wurden, und es wurden mögliche Lösungen analysiert.

Determination of Surge Impulse Evaluation in accordance with DIN EN 60060-1

This thesis concerns the evaluation of full lightning impulse measurements according to IEC 60060-1 2010 and the limits of software evaluation 61083-2 for a TIPAS (test impulse parameter evaluation system) of the IEH. The objective of this thesis is, to update the software of the existing system for the measuring and automatic evaluation of lightning impulses to the latest evaluation standard (IEC 60060-1 2010) and to correct the existing failures of the evaluation. The existing evaluation was analyzed and problems during the evaluation were described. In addition, issues were addressed that were not clearly defined in the standard and possible solutions were analyzed.

Schweitzer, Desirée Nadine

Prädiktives Gegenpulsen zur Reduktion leitungsgebundener Gleichtakt-Störungen für Phase-Shifted-Full-Bridge-DC/DC-Wandler

Potentialgetrennte DC/DC-Wandler, wie beispielsweise ein Bordnetzwannder der Elektromobilität, erreichen inzwischen Schaltfrequenzen von über 100 kHz, wobei sie prinzipbedingt durch die getaktete Betriebsweise mit jedem Schaltvorgang einen hohen elektromagnetischen Störimpuls erzeugen. Zur Entstörung der Komponenten werden konventionell große passive Filter eingesetzt. In dieser Arbeit wird ein aktives Kompensationsverfahren vorgestellt, das mit prädiktiven Gegenpulsen aus leistungselektronischen Stellgliedern gezielt diese Störungen reduziert und eine alternative zu passiven Filtern darstellt. Es wird gezeigt, wie durch die Analyse der Störquelle die Schaltsignale sowie die benötigte Kompensationsspannung modellbasiert ermittelt wird. Hierfür werden ein spezieller Messaufbau und ein gut parametrisiertes Simulationsmodell sowie ein vereinfachtes Gleichtaktmodell eingesetzt.

Predictive Pulsed Compensation for Reduction of Conducted Common Mode Emissions of a Phase-Shifted Full-Bridge DC/DC Converter

Power electronic systems like isolated DC/DC converter for HV/LV conversion in electrical vehicles are using switching frequencies up to 100 kHz and cause electromagnetic disturbances at every switching operation. Conventionally, large passive filters are used to fulfill the EMC requirements. This work introduces an active compensation, which uses predictive pulses of power electronic components to suppress disturbances as an alternative to passive filters. It has shown, that by analyzing the EMI source, the required switching signals and compensation voltage can be calculated. For this purpose, a special measurement setup and an accurate parametrized simulation model as well as a simplified common mode model are used.

Sharba, Botheinah

Short Term Load Forecasting für Smart Grids in der Niederspannung mittels Markow-Ketten

Diese Arbeit untersucht den Markov-Kettenansatz als kurzfristige Prognosemethode für Endverbraucher in der Niederspannung. Diese Methode erfordert einen umfangreichen historischen Datensatz. Der in dieser Arbeit verwendete Datensatz enthält gesammelte Beobachtungen von Smart-Meter-Messungen über drei Jahre für ein ländliches Wohngebiet, mit einem Zeitintervall von 15 Minuten. Eine zuverlässige Prognose ist möglich, wenn das Markov-Modell für jeden Knoten individuell unter Berücksichtigung der saisonalen Effekte entwickelt wird. Das Ergebnis mehrerer durchgeführter Versuche zeigt, dass die Anzahl der gemittelten Realisierungen jedes Profils sorgfältig ausgewählt werden muss. Darüber hinaus wird versucht, die minimale Anzahl von Knoten zu definieren, die für ein verbessertes kumulatives Lastprofil erforderlich sind.

Short Term Load Forecasting for Smart Grids in Low Voltage Grids with Markow Chains

This paper examines the Markov chain approach as a short-term forecasting method for low voltage end users. This method requires an extensive historical data set. The data set used in this paper contains collected observations of smart meter measurements over three years for a rural residential area with a time resolution of 15 minutes. Reliable forecasting is possible if the Markov model is developed individually for each node, taking seasonal effects into account. The results of several experiments show that the number of averaged realizations of each profile must be carefully selected. In addition, attempts are made to define the minimum number of nodes required for an improved cumulative load profile.

Shen, Muzi

Entwurf und Umsetzung einer zentralen PQ-Plattform

In dieser Arbeit werden die Entwicklung und Implementierung einer zentralen PQ-Plattform zur Integration unterschiedlicher Bereiche der Power Quality Untersuchung industrieller elektrischer Netze dargestellt. Diese Bereiche umfassen hauptsächlich die Klassifizierung und Vorhersage der Power Quality unter Verwendung verschiedener Maschine Learning Algorithmus und Simulation der elektronischen Verbraucher. Mit Hilfe einer geeigneten Toolbox wird ein Visualisierungstool (Entwurf eines GUI) implementiert, das eine Anzeige der Ergebnisse der unterschiedlichen Bereiche und eine einfache Darstellung von Messdaten in einer dahinterliegenden Datenbank ermöglicht. Zum Einsatz kommen drei Datenbanken. Die zentrale PQ-Plattform bietet somit eine Basis für den Vergleich und Evaluation unterschiedlicher Machine Learning Verfahren.

Development and Implementation of a Central Power Quality (PQ) Platform

In this thesis the development and implementation of a central PQ platform for the integration of different areas of the power quality investigation of industrial electrical networks is presented. These areas mainly include the classification and prediction of power quality using various machine learning algorithm and simulation of the electronic

consumer. In addition, a visualization tool (design of a GUI) will be implemented with the help of a suitable toolbox, which will enable the results of the different areas to be displayed and a simple display of measurement data in a database. Three databases are used. The central PQ platform allows the comparison and evaluation different machine learning procedure.

Steck, Johannes

Identifizierung der notwendigen Ausbaumaßnahmen in 110 kV Netzen unter Einbeziehung der dynamischen Spitzenkappung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Methodik, nach der es möglich ist, notwendige Netzausbaumaßnahmen unter Berücksichtigung eines Einsatzes der dynamischen Spitzenkappung mit Optimierungsfunktion zu identifizieren. Diese entwickelte Methodik wurde im Rahmen der Arbeit durch einen Vergleich der identifizierten Leitungen mit den möglichen Auswirkungen eines Ausbaus anderer Leitungen validiert. Anschließend wurden die Ergebnisse mit den notwendigen Ausbaumaßnahmen nach einem konventionellen Ausbauansatz verglichen. Dadurch sollen die Vorteile eines Einsatzes der dynamischen Spitzenkappung mit Optimierungsfunktion in der Netzausbauplanung aufgezeigt werden.

Identification of the necessary Expansion Measures in 110 kV Grids including the dynamic Curtailment

This work describes the development of a methodology according to which it is possible to identify necessary network expansion measures considering the use of dynamic curtailment with optimization function. This developed methodology was validated in the course of the work by comparing the identified lines with the possible effects of the expansion of other lines. Subsequently, the results were compared with the necessary expansion measures according to a conventional expansion approach. The aim is to demonstrate the advantages of using dynamic curtailment with optimization function in the grid expansion planning.

Stöckler, Marcel

Lineare Optimierungsverfahren für die Aggregation von Flexibilitäten

In dieser Arbeit wurden Methoden für die Aggregation von Flexibilitäten in Energieübertragungsnetzen weiterentwickelt. Die Aggregation der Flexibilitäten nutzt in den bereits bestehenden Programmen in Matlab und Python die in der jeweiligen Programmiersprache integrierten Funktionen für lineare Optimierungsprobleme. Das Python Programm soll angepasst werden, um die PuLP-Bibliothek zu verwenden. PuLP ermöglicht es, bei der Lösung von linearen Optimierungsproblemen auf unterschiedliche Solver zuzugreifen, ohne, dass eine Umformulierung des Problems in die Sprache des Solvers notwendig ist. Ziel der Implementierung von PuLP ist es, die Berechnungszeit der Aggregation in Python zu verringern und den am besten geeigneten Solver zu ermitteln.

Linear Optimization Methods for the Aggregation of Flexibilities

In this work, methods for flexibility aggregation in power grids were further developed. The aggregation method was already implemented in Matlab and Python making use of proprietary functions for defining and solving linear optimization problems. The python script was adapted to use the PuLP library. This library makes it possible to access different solvers to solve linear optimization problems without having to reformulate the problem into the language of the solver. The goal of the PuLP implementation is to reduce the computation time of the aggregation in Python and to determine the most suitable solver for the proposed problem.

Tahir, Muhammad Ayub

Artificial Intelligence Method to detect Faults in Power Transformers using Frequency Response Analysis (FRA)

Frequency Response Analysis (FRA) is a powerful, non-destructive and nonintrusive technique to detect various mechanical and electrical problems without internal inspections. But the interpretation of FRA is still far from reaching an accepted and definitive methodology. Recently, with the advance of Artificial intelligence (AI) methods, it is possible to classify the changes in the FRA traces and connect them to different fault types and even fault locations. The goal of this thesis to interpret results from FRA using Artificial Intelligence method. The results show that the maximum accuracy is achieved by increasing the number of features. Accurate predictions of a neural network using test data heavily depend on how well the neural network is trained.

Walz, Kathrin

Netzintegration von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität in der Logistikbranche

Ziel dieser Arbeit war, das Laden elektrischer Pkw und Lkw an einem Logistikzentrum zu modellieren und die hieraus entstehenden Auswirkungen auf das Stromnetz zu untersuchen. Für das Laden der Mitarbeiter-Pkw zeigt sich, dass eine langsame Ladung mit 3,7 kW ausreichend ist, um die Mitarbeiterfahrzeuge während der Arbeitszeiten im Zweischichtbetrieb vollständig aufzuladen. Ein Lademanagement kann dabei zu einer starken Reduktion der kumulierten Last durch Mitarbeiterladen führen. Neu entwickelte Ladeprofile elektrischer Lkw aus Modelldaten, Fahrtstrecken und Transportkapazitäten in Kombination mit einer Nachbildung des Wareneingangs eines realen Logistikzentrums ermöglichen eine Abschätzung des zukünftigen Ladebedarfs dieser Fahrzeuge bei einer Variation der Ladeleistung.

Integration of Charging Infrastructure for Electric Vehicles in the Logistics sector

The objective of this work was to model charging profiles of electric cars and trucks at logistics centers and analyzing their impact on electrical grids. For employee cars, charging with 3.7 kW is enough to fulfill the energetic needs during working hours in two shifts. Charging management can help to reduce the cumulative load from

employee vehicles. Newly developed charging profiles of electric trucks were developed, based on vehicle model data, routes, and transport capacities. Combined with a reproduction of the incoming goods of a real logistics center, an estimation of future charging requirements of these vehicles with varying charging capacities was estimated.

Wiedmann, Nicole

Kurzfristige Lastprognose in der Niederspannung mittels Markow-Ketten

In dieser Arbeit wird eine Prognose der Lastspitzen von 74 Häusern durchgeführt. Als Lösungsansatz wurden Markow-Ketten verwendet, da die Lastverläufe durch das Nutzverhalten des Menschen stochastischen Charakter haben. Die Datengrundlage bildet ein freiverfügbarer synthetischer Datensatz. Für die Prognose mittels Markow-Ketten müssen Übergangsmatrizen für jede Minute des Tages mit historischen Lastdaten trainiert werden. Hierbei ist die Qualität der Prognose abhängig von den für das Training verwendeten Daten. Trotz unterschiedlicher Datensätze war es nicht möglich Lastverläufe einzelner Häuser zu prognostizieren. Allerdings konnten Prognosen mehrerer Häuser addiert werden und somit einen Versorgungsbereich darstellen. Für die Bewertung der Prognosen wurde zudem ein individueller Gütemaßmix ausgearbeitet.

Short Term Load Forecasting in the Low Voltage using Markov Chains

In this work a forecast of the peak loads of 74 households is carried out. Markow chains were used as a solution, since the load curves are stochastic in nature due to human usage behavior. The data basis is a freely available synthetic data set. For the forecast using Markow chains, transition matrices for every minute of the day must be trained with historical load data. The quality of the forecast depends on the data used for training. Despite different data sets, it was not possible to predict load curves of individual houses. However, forecasts of several houses could be added together and thus represent a low voltage feeder. In addition, an individual quality measure mix was worked out for the evaluation of the forecasts.

Xia, Lu

Anwendung von Performanceindizes im (n-1)-Fall für einen optimierten Netzausbau

In dieser Arbeit wird ein Verfahren in der zeitreihenbasierten Netzplanung aufgebaut, das anhand von Performanceindizes im (n-1)-Fall einen optimierten Netzausbau durchführt. Das Verfahren zur Bestimmung dieser Indizes basiert auf der schnellen entkoppelten Lastflussrechnung. Die Indizes werden jeweils für die Spannungen an den Sammelschienen in den Umspannwerken und für die Leitungsauslastungen ermittelt. In einer Analyse sind die optimalen Parameter für die Berechnung der Indizes bestimmt worden. Basierend auf den Werten der Indizes aus der Berechnung an einem Testnetz können die einzelnen Betriebsmittelausfälle eingestuft werden. Daraus können geeignete Netzausbaumaßnahmen abgeleitet werden.

Application of Performance Indices in the (n-1)-Case for an optimized Network Expansion

In this thesis, a method in time-series-based grid planning is developed, which carries out an optimized grid expansion on the basis of performance indices in the (n-1) case. The procedure for determining these indices is based on the fast-decoupled load-flow calculation. The indices are determined for the voltages at the busbars in the substations and for the line loadings. In an analysis, the optimal parameters for the calculation of the indices were determined. Based on the values of the indices from the calculation on a test grid, the various line outages can be classified. In this way, suitable grid expansion measures can be derived.

Yuan, Bo

Charakterisierung von TE-Impulsen für die Separation von multiplen TE-Quellen

In dieser Arbeit wurden TE-Impulse im Zeitbereich untersucht, um anhand der Impulsform multiple Teilentladungsquellen zu separieren. Da sich Impulse unterschiedlicher TE-Quellen in ihrer Form unterscheiden, kann von der Form auf die Quelle geschlossen werden. Es wurden 22 Merkmale aus der Impulsform extrahiert, um den Impuls mathematisch beschreiben zu können. Aus diesen Merkmalen wurden durch drei verschiedene Ansätze die jeweils relevantesten ausgewählt. Durch Clusteringverfahren kann dann jeder Impuls einer Gruppe zugewiesen werden. Für das Clustering wurde K-Means und DBSCAN eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass TE-Impulse, welche sich im PRPD überlagern, durch die Separation der Impulsformen getrennt werden können.

Characterization of PD Pulses and Discrimination of multiple PD Sources

In this thesis PD pulses in the time domain were investigated to separate multiple partial discharge sources on the basis of the pulse shape. Since pulses of different PD sources can differ in their shape, the source can be inferred from the shape. 22 characteristics were extracted from the pulse shape to describe the pulse mathematically. From these features the most relevant ones were selected by three different approaches. Using clustering methods, each pulse can then be assigned to a group. For clustering K-Means and DBSCAN were used. It could be shown that PD pulses which overlap in the PRPD can be separated by separating the pulse shapes.

Yuan, Meng

Modellbildung des elektrischen Uni-Campus-Netzes zur Analyse der Ausbreitung von Oberschwingungen

Anhand der vorhandenen Dokumentation wird ein Netzmodell für den Uni-Campus für zwei verbundene Netzwerktopologien (Ruhiges Netz und Sondernetz) entwickelt, um einen realistischen Aufbau der Netze zusammen mit relevanten Szenarien zu gewährleisten. Die Netzwerke werden mithilfe der Simulationssoftware PowerFactory und Matlab implementiert, simuliert und die Ausbreitung der Oberschwingungen analysiert. In den Programmiersprachen Python und Matlab wurden weitere Hilfskripte zu den Simulationen entwickelt. Diese Python-Skripte werden zum Export aus PowerFactory und zur Umwandlung der exportierten Lastflussdaten in Matlab und

Python verwendet, um die Ergebnisse der Lastflussberechnung und die Modelle der Netzwerkkomponenten aus dem Campus-Netz auf den unterschiedlichen Simulationsplattformen zu validieren.

Modeling the electric Grid of the University Campus to analyse the Propagation of Harmonics

Based on the existing documentation, the university campus model for two connected network topologies (quiet network and special network) is being developed in order to assure realistic construction of the networks along with relevant scenarios. The networks are implemented, simulated and the propagation of the harmonic is thoroughly analyzed, utilizing the DlgSILENT PowerFactory and Matlab simulation software. Python and Matlab was used to develop further auxiliary scripts for the simulations. These Python scripts are used for exporting the PowerFactory model and thus converting the exported load flow data to Matlab and Python to validate the load flow calculation from the various software platforms.

Zhou, Yongqiang

Erstellung eines Simulationsmodells für nanokristalline Gleichtaktdrosseln

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden Modelle aus passiven Schaltungselementen für nanokristalline Gleichtaktdrosseln entwickelt und getestet. Die in EMV-Filtern verwendeten, nanokristallinen Gleichtaktdrosseln haben eine komplexe, magnetische Permeabilität (CMP), die mit der Frequenz variiert. Es werden in der Literatur Modelle recherchiert und auf ihre Praxistauglichkeit geprüft. Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, dass die für die Modelle benötigten Parameter einfach zu ermitteln sind. Für die Modellierung wird die Methode der Rationalen-Funktionen-Annäherung (RFA) verwendet. Die Modelle werden anschließend in LTSpice implementiert und ihre Impedanz untersucht. Zur Validierung des neuen Modells wird ein passiver EMV-Filter simuliert und die Simulationsergebnisse mit denen der konventionellen Modellierung verglichen.

Development of a Simulation Model for Nanocrystalline Common Mode Chokes

In the context of this master thesis models of passive circuit elements for nanocrystalline common mode chokes are developed and tested. The nanocrystalline common mode chokes used in EMI filters have a complex permeability (CMP) which varies with the frequency. In order to achieve this, models from current literature are searched and checked for their suitability for our use. Attention is especially turned on the fact that the parameters necessary for the models are easy to obtain. For the modeling a method of Rational-Function Approximation (RFA) is used. The models are then implemented in LTSpice and tested due to their impedance and compared to real measurement data.

Zhu, Lianglong

Machine Learning Algorithmen für die Klassifikation von Spannungsqualitätsproblemen

In dieser Arbeit werden verschiedene statistische Klassifikationsalgorithmen untersucht, welche bezüglich der besten Klassifikationsgenauigkeit auf die Erkennung der

Spannungsqualitätsprobleme in RMS Werten hat. Der erste Schritt, Segmentierung der Daten ist schon vorgegeben, anschließend sollen die wichtigsten Features ausgewählt werden, welche die meisten Informationsinhalte enthalten. Im Anschluss werden 3 Supervised Lernen Algorithmen (KNN, SVM, Neuronales Netzwerk) gesucht, um die Probleme zu erkennen. Zum Schluss, wird noch ein Klassifikator durch neuronales Netzwerk auf reale Messdaten – Expertensystem von Ladesäule angewendet, damit kann die Zustandsänderung und Störungsart in einem Zeitraum erkannt werden. Bei den Untersuchungen hat PCA die Fähigkeit, umfangreiche Features zu reduzieren, inzwischen keine Informationen verloren werden. Die Klassifikationsalgorithmen KNN, SVM und Neuronales Netzwerk können die Störungsarten in synthetischen Daten effektiv erkennen.

Machine Learning Algorithms for Power Quality Disturbance Classification

In this thesis different statistical classification algorithms are investigated, which has the best performance on the recognition of the power quality problems in RMS values. The first step, segmentation of the data is already given, and then the most important features are selected, which contain most information content. Subsequently, 3 supervised learning algorithms (e.g., KNN, SVM, Neural Network) are searched to detect the problems. Finally, a classifier using neural network is applied to real measurement data - expert system of charging station, so that the state change and type of disturbance can be detected. In the investigations, PCA has the ability to reduce extensive features, and no information was lost. The classification algorithms KNN, SVM and neural network can effectively detect the types of disturbances in synthetic data.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 1.11.2018 bis 31.10.2019:

NAME	THEMA
Barreau, Laura(*)	Identifizierung von Potentialen und Handlungsfeldern im Bereich Predictive Maintenance für Verteilnetzbetreiber am Beispiel der Netze BW GmbH. Identification of Potentials and Fields of Action in Predictive Maintenance for Distribution Grid Operators using the Example of Netze BW GmbH.
Baumgartner, Stefan (*)	Entwicklung einer "Plug and Play"-Simulation von PV-Systemen mit Matlab/Simulink. Development of a "plug and play" Simulation of PV Systems using Matlab/Simulink.
Berger, Julian (*)	Strommärkte in Europa: Modellierung des Intraday Strommarktes. Electricity Markets in Europe: Modeling Intraday Electricity Market.

NAME	THEMA
Blakaj, Arben	Untersuchung der Einflussparameter bei Emissionsmessungen nach CISPR 25. Investigation of the Influence Parameters in Emission Measurements according to CISPR 25.
Blank, Joshua	Weiterentwicklung eines Tools mit verschiedenen Bewertungsmethoden für einen automatisierten Netzausbau. Further Development of a Tool with various Assessment Methods for automated Grid Expansion.
Boll, Tobias	Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Power Line Communication und Supraharmonischen Investigation of Interaction between PLC and Supraharmonics
Burkhardt, Paul (*)	Kombination von dynamischen Strombelastbarkeiten für Freileitungen mit einer dynamischen Spitzenkappung. Combination of Dynamic Current Rating for Overhead Lines with a Curtailment Method.
Burrer, Fabian Eugen	Untersuchung des Einflusses von Loadboxen auf die Emissionsmessung nach CISPR 25. Investigation of the Influence of Load Boxes on Radiated Emission Measurements according to CISPR 25.
Chen, Liang	Klassifikation von PQ-Daten durch klassische Machine-Learning-Verfahren. Classification of PQ Data by Classical Machine Learning-Algorithms.
Christ, Michael (*)	Sensitivitätsanalyse für den Speichereinsatz zur Netzentlastung. Sensitivity Analysis of Energy Storage Systems used to reduce the Load of Power Grids.
Christoph, Alexander	Anomalie-Erkennung und nachfolgende Implementierung eines Autolabeling-Algorithmus zur automatischen Erstellung von Trainingsdatensätzen für Machine-Learning für Zeitreihen. Anomaly Detection and Implementation of an Autolabeling Algorithm for Creation of Training Datasets for Time Series Data.
Dahlmann, Benjamin (*)	Konzeptionierung Intraday-Vermarktung bei dezentraler Optimierung. Conceptualization of Intraday Trading with decentralized Optimization.
Diederich, David (*)	Zukünftiges Potenzial, Anforderungen und Randbedingungen der Blindleistungsregelung im luxemburgischen Stromnetz durch die Windkraft. Future Potential, Requirements and Boundary Conditions of Reactive Power Regulation in the Luxembourgish Grid by Wind Power.
Dieterich, Lukas (*)	Prüfung von PQ Messgeräten mit vordefinierten Prüfvorlagen. Testing of PQ Meters with Predefined Test Templates.

NAME	THEMA
Frankenbach, Marc-Aurel (*)	Kombinierter Einsatz von Speichern und Einspeisemanagement zur Netzentlastung. Combined Use of Storage Systems and Power Curtailment for reducing the Grid Loading.
Frey, Marius (*)	Arbeitgeber- und Flottenladen: Einflussfaktoren, Netzanforderungen und Flexibilisierungspotentiale. Employer and Fleet Shop: Influencing Factors, Network Requirements and Flexibility Potentials.
Friedrichs, Nils	Aufbau und Modellierung eines Wechselrichters für WPT-Systeme. Design and Modeling of an Inverter for WPT Systems.
Glaser, Matthias	Entwicklung und Aufbau eines Steuerpults für Stelltransformatoren. Development and Construction of a Control Panel for a Variable Ratio Transformer.
Gille, Katja (*)	Modellierung einer Großbatterie für Power Quality Untersuchungen. Modeling of a large Battery for Power Quality Examination.
Gilsdorf, Johannes (*)	Development of a Battery Energy Storage System Model for Power System Stability Studies.
Graf, Eddy	Netzdienliche Flexibilisierung von Windkraftanlagen. Provision of Ancillary Services through Flexibilization of Wind Power Plants.
Gruber, Michaela (*)	EMV-Simulation von standardisierten Wireless-Power-Transfer-Systemen. EMC Simulation of standardized Wireless Power Transfer Systems.
Himpel, Paul (*)	Einfluss von PV-Fassaden auf Eigennutzungs- und Autarkiegrad von Gebäuden in Abhängigkeit von deren Ausrichtung und Standort. Influence of PV-Facades on Own-Consumption and Self-Sufficiency of Buildings Depending on their Orientation and Location.
Hölz, Jan (*)	Modellierung und Untersuchung von Mittelspannungsnetzen. Modeling and Examination of Middle Voltage Distribution Grids.
Holzrichter, Jakob (*)	Charakterisierung des Verhaltens von in Kabelmuffen integrierten kapazitiven Teilentladungssensoren im Frequenzbereich. Characterization of the Behavior of in Cable Joints integrated capacitive PD Sensors in the Frequency Domain.
Karimani, Tijen (*)	Untersuchung von Teilentladungen in Wicklungen elektrischer Maschinen. Investigation of Partial Discharges in Windings of electrical Machines.

NAME	THEMA
Keiner, Dominik (*)	Analyse der Auswirkung von Betriebsstrategien für PV-Batteriespeicher und Wärmepumpen auf das Niederspannungsnetz. Impact Analysis of Different Control Strategies for PV, Battery Storage Systems and Heat Pumps on LV Grids.
Li, Xinyi (*)	Untersuchung des Einflusses der Windrichtung auf die Strombelastbarkeit von Freileitungen. Investigation of the Influence of the Wind Direction on the Current Rating of Overhead Lines.
Lißner, Nikola (*)	Definition of a Cost-Optimal Approach to Energy Efficiency Measures in New Buildings in Montenegro.
Metzler, Philipp (*)	Entwicklung und Evaluation eines Client-Systems zur Abfrage von Netzzustandsdaten. Development and Evaluation of a Client System for querying Grid State Data.
Müller, Sharon (*)	Bewertung des Blindleistungsbedarfs in Übertragungsnetzen als Konsequenz der Energiewende. Assessment of reactive Power Deficiency in Transmission Grids as a Consequence of the Energy Transition.
Nguyen Mau, Nam Ha	Charakterisierung und Modellbildung von Leistungshalbleitern. Characterization and Modelling of Power Semiconductors.
Otteny, Felix (*)	Modellierung eines Ladeprofilgenerators zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung von Elektrofahrzeugen durch nutzerbasiertes Mobilitätsverhalten. Modeling of a Charging Profile Generator for Economic and Ecological Evaluation of Electric Vehicles by user-based Mobility Behavior.
Palmer, Marc (*)	Entwicklung eines sechsphasigen Wechselrichters für eine elektrische Servolenkung. Development of a six-phase Inverter for an electric-power-Steering.
Pflieger, Michael (*)	Vergleich von EMV-Filtern für unterschiedliche Bordnetz-Konfigurationen in E-Fahrzeugen. Comparison of EMC Filters for different Cable Harness Configurations in electric Vehicle.
Rudolf, Daniel (*)	Aufbau einer Ladungsmessstrecke und Bestimmung der Beschleunigungsspannung in Transformatorisoliertflüssigkeiten. Development of a Charge Measurement System and Determination of Acceleration Voltages in Transformer Insulating Liquids.
Ruf, Robert	Standortspotenzial-Analyse für Speichertechnologien zur Netzentlastung im Ostalbkreis. Examination of Site Potential for different Storage System Technologies in the Region of „Ostalbkreis“ with the Aim to avoid the Overload of Power Lines.
Song, Donghao	Entwicklung einer Störgrößenbewertung. Development of a Disturbance Estimation Circuit.

NAME	THEMA
Sulejmani, Emir	Aufbau und EMV-Charakterisierung eines Doppelhelix-Spulenpaars für induktive KFZ-Ladesysteme. Development and EMC Characterization of DD Coils for inductive Automotive Charging Systems.
Szauskellis, Leon	Dynamische Simulation von Inselnetzen und simulativer Vergleich in Matlab, PowerFactory und PSS® NETOMAC. Dynamic Simulation of Microgrids in islanded Operation using Matlab, PowerFactory and PSS® NETOMAC.
Tavakoli, Navid (*)	Analyse und Optimierung eines Wechselrichters für das Hochspannungsprüfgerät ATS-400. Analysis and Optimization of an Inverter for the high voltage Test Instrument ATS-400.
Tian, Yizhen (*)	Erweiterung des Messbereichs eines Stromwandlers durch Entwicklung einer Kompensationsschaltung. Extension of the Measuring Range of a Current Transformer by Developing a Compensation Circuit.
Tittjung, Tobias	Investigation of Partial Discharge Characteristics of Insulation Materials used in Electric Motors.
Totikos, Nektarios	Parametrisierung eines künstlichen neuronalen Netzes zur Power-Quality-Signalprozessierung. Parametrization of an artificial neural Network for Power Quality Signal Processing.
Tran, Phi Thuong (*)	Clustering von gemessenen Transienten einer Ladestation für Elektrofahrzeuge. Clustering of measured Transients of a Charging Station for electric Vehicles.
Tyroller, Karina (*)	Optimized Frequency Support to the Grid through Wind Turbines.
Wäller, Simon	Untersuchung von Teilentladungen in Hohlräumen durch UHF-Messsysteme. Investigation of partial discharges in voids by use of UHF-measurement systems.
Wang, Jicheng (*)	App-basierte Steuerung einer Smart-Home-Anwendung. App-based Control of a Smart Home Application.
Wörner, Verena (*)	Teilentladungsmuster frei beweglicher Partikel in SF6 unter positiver Gleichspannungsbeanspruchung. Partial Discharge Pattern of free-moving Particles in SF6 under positive DC Stress.
Wolfrum, Sunpreet (*)	Elektromagnetische Störfestigkeitsprüfung von Schutzgeräten mit Rogowskisensoren. Electromagnetic Immunity Testing for MV Protection Equipment utilizing Rogowski sensors
Wurth, Caroline	Entwicklung eines dreischenkelläquivalenten Fünfschenkeltransformator-Simulationsmodells. Development of a three-limb equivalent five limb Transformer Model.
Xia, Lu (*)	Investigation of Influence of Temperature on Aging Behaviour of Silicone Rubber.

NAME	THEMA
Xu, Jizhao	Weiterentwicklung einer Zeitreihenprognose durch Auswahl geeigneter Feature-Sets. Optimization of Time Series Forecasting by Selection of optimal Feature Sets.
Xu, Xiao (*)	Simulation von Vorentladungen in Transformatorisoliertflüssigkeiten. Simulation of Prebreakdown Phenomena in Transformer Insulating Liquids.
Yin, Niancong (*)	Automatisierung von Messinfrastruktur durch einen Raspberry Pi. Automation of Measurement Infrastructure by using a Raspberry Pi.
Yu, Bochao (*)	Aufbau und Analyse eines Modells zur Berechnung der zeitlich variablen Strombelastbarkeit. Construction and Analysis of a Model for the Calculation of the temporally Current Rating.
Zhang, Meng (*)	Untersuchung von Teilentladungen multipler Quellen. Investigation of Partial Discharge of multiple Sources.

4. PROMOTIONEN

■ **Simulation and Experimental Validation of Forced Oil Flow in Power Transformers**

Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Riedelbauch

Tag der mündlichen Prüfung:

24.01.2019

The evolving temperature distribution within the insulation system of power transformers has a defining impact on the life cycle of these key components applied in power stations and transmission and distribution systems. Since higher temperatures cause accelerated material degradation processes, the maximum temperature occurring inside the insulation system effectively limits the transformer performance at a specified product lifetime. In principle, a direct assessment of this maximum temperature occurring during operation of a transformer is possible. However, the application of suitable equipment for this task faces significant challenges and is afflicted with substantial costs. Moreover, such an approach only provides limited insight for an already released product. Consequently, thermal modelling concepts are pursued to benefit the entire development and application process.

This work first of all comprises the development of an experimental model for a disc-type transformer winding with four conductor turns per disc. Each conductor element can be heated individually and is equipped with a temperature sensor. Next to a thermal analysis, the implemented model design allows an optical investigation of the oil flow between discs. The design specifications of the modelled winding are chosen representatively for large power transformers cooled by a directed oil flow (OD cooling). In addition to the experimental approach, corresponding numerical winding models suitable for the investigation by means of computational fluid dynamics (CFD) are prepared during the course of this work. To evaluate potentially occurring impairments resulting from an axially symmetrical winding modelling, a two-dimensional and a three-dimensional domain are derived from the analysed geometry. Prior to their actual application, a mesh sensitivity analysis is carried out for all consulted models. A resolution of 6 cells/mm within the bulk flow region and a boundary layer discretisation with an initial cell height of $h_{\text{init}} = 10 \mu\text{m}$ allow the determination of dependable results.

Concerning the impact of an axially symmetrical winding representation, the conducted thermal analysis reveals significant deviations between 2D CFD simulations and measurements at the majority of considered operating points. Since the 3D CFD calculations display an excellent agreement with the experimental results throughout all considered boundary conditions, the application of 2D models is found to be ill-

suited for sufficiently capturing the heat transfer characteristics in OD cooled transformer windings. As the root cause for the occurring deviations, the impact of the dimensional reduction on the oil flow distribution is identified. In contrary to its 3D counterparts, a far less complex flow field at the entrance region of several horizontal cooling channels is suggested by 2D models, especially at conditions outside a strictly laminar flow regime. As a consequence from this misrepresentation, deviating results regarding the oil flow distribution are determined that also affect the respectively ascertained thermal characteristics.

Since the 3D simulations and measurements are in very good agreement with regard to temperatures and oil flow velocities, both modelling approaches are consulted to identify operating parameters defining the hydraulic and thermal characteristics inside power transformers. The conducted investigations establish that the Reynolds number connected to a certain operating state plays a dominating role for all considered characteristics. In contrary to the oil flow distribution, the temperature distribution is found to be also dependent on the Prandtl number characterising an operating point. With increasing Prandtl numbers, the average temperature differences and hot spot temperatures are decreasing by a comparable amount. An increase of the Reynolds number however results in a stronger decrease of the average temperature differences than of the hot spot temperatures. Consequently, the hot spot factor proposed in IEC 60076-7 is found to be depended on the oil flow rate and temperature level. With regard to the investigated power dissipation level, close to no dependencies on the oil flow distribution and deducted thermal resistances is found.

- **Simulation und experimentelle Validierung von erzwungener Ölströmung in Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Die Temperaturverteilung innerhalb des Isolationssystems von Leistungstransformatoren hat einen entscheidenden Einfluss auf den Lebenszyklus dieser Komponenten, die Schlüsselfunktionen in Kraftwerken sowie in Übertragungs- und Verteilungssystemen übernehmen. Weil höhere Temperaturen zu beschleunigten Materialzersetzungsprozessen führen, begrenzt die im Isolationssystem auftretende Maximaltemperatur effektiv die Transformatorleistung bei einer bestimmten Produktlebensdauer. Grundsätzlich ist eine direkte Bestimmung dieser im Betrieb eines Transformators auftretenden Maximaltemperatur möglich. Jedoch ist der Einsatz geeigneter Messgerätschaften für diesen Zweck sehr aufwändig und daher mit erheblichen Kosten verbunden. Zudem bietet ein solcher Ansatz nur einen begrenzten Einblick in ein bereits gefertigtes Produkt. Aus diesem Grund werden in Industrie und

Forschung für den gesamten Entwicklungs- und Anwendungsbereich von Leistungstransformatoren thermische Modellierungskonzepte entwickelt.

Diese Arbeit umfasst zunächst die Entwicklung eines experimentellen Versuchsmodells für die Scheibenwicklung eines Leistungstransformators mit vier Leiterwindungen pro Scheibe. Jedes Leiterelement kann individuell beheizt werden und ist mit einem Temperatursensor ausgestattet. Neben einer thermischen Analyse erlaubt das experimentelle Modell eine optische Untersuchung des Ölflusses zwischen den Scheiben. Das Design der modellierten Wicklung orientiert sich dabei an typischen Spezifikationen großer Leistungstransformatoren, die durch einen gerichteten Ölstrom gekühlt werden (OD-Kühlung). Zusätzlich zum experimentellen Ansatz wurden im Rahmen dieser Arbeit auch entsprechende numerische Wicklungsmodelle entwickelt, die für die Untersuchung mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) geeignet sind. Um potentielle Unzulänglichkeiten einer achsensymmetrischen Wicklungsmodellierung untersuchen zu können, wurden aus der analysierten Geometrie ein zweidimensionaler und ein dreidimensionaler Bereich abgeleitet. Vor ihrer eigentlichen Verwendung wurden für alle in Betracht gezogenen Modelle Netzsensitivitätsanalysen durchgeführt. Für belastbare Ergebnisse war eine Auflösung von mindestens 6 Zellen/mm innerhalb der Hauptströmung und eine Grenzschichtdiskretisierung mit einer anfänglichen Zellenhöhe von höchstens $h_{\text{init}} = 10 \mu\text{m}$ notwendig.

Hinsichtlich einer axialsymmetrischen Wicklungsmodellierung zeigen die durchgeführten thermischen Untersuchungen signifikante Abweichungen zwischen 2D-CFD-Simulationen und Messungen für praktisch alle betrachteten Betriebspunkte. Gleichwohl weisen die entsprechenden 3D-CFD-Berechnungen eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen über alle betrachteten Randbedingungen hinweg auf. Demzufolge kann der Einsatz von 2D-Modellen für eine hinreichend genaue thermische Auslegung von OD-gekühlten Transformatorwicklungen nicht empfohlen werden. Als Ursache für die auftretenden Abweichungen konnte der Einfluss der Ordnungsreduktion auf die Ölstromverteilung identifiziert werden. Im Gegensatz zu entsprechenden 3D-Modellierungsansätzen wird beim Einsatz von zweidimensionalen Wicklungsmodellen ein weit weniger komplexes Strömungsfeld im Eingangsbereich horizontaler Kühlkanäle prognostiziert. Dies gilt insbesondere bei Betriebspunkten außerhalb eines streng laminaren Strömungsregimes. Als Folge dieser Fehleinschätzung entstehen Abweichungen bei der Ölstromverteilung, die sich entsprechend auf thermischen Wicklungseigenschaften auswirken.

Weil die angestellten 3D-Simulationen in Bezug auf Temperaturen und Ölströmungsgeschwindigkeiten sehr gut mit den durchgeführten Messungen übereinstimmen, werden beide Modellierungsansätze für die Identifikation von Betriebsparameter herangezogen, die die hydraulischen und thermischen Eigenschaften von Leistungstransformatoren maßgeblich bestimmen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die mit einem bestimmten Betriebszustand verbundene Reynolds-Zahl für alle betrachteten thermischen Eigenschaften eine dominierende Rolle spielt. Im Gegensatz zur Ölflussverteilung ist die Temperaturverteilung auch von der zugehöri-

gen Prandtl-Zahl abhängig. Mit steigenden Prandtl-Zahlen sinken die durchschnittlichen Temperaturdifferenzen und Hot-Spot-Temperaturen im vergleichbaren Umfang. Eine Anhebung der Reynolds-Zahl führt dagegen zu einer verstärkten Abnahme der mittleren Temperaturdifferenzen im Vergleich zu den Hot-Spot-Temperaturen. Folglich hängt der in IEC 60076-7 vorgeschlagene Hot-Spot-Faktor von der Durchflussrate und dem Temperaturniveau ab. Hinsichtlich der untersuchten Verlustleistungsniveaus zeigen sich nahezu keine Abhängigkeiten der Ölstromverteilung und der abgeleiteten thermischen Widerständen von der individuell abgeführten Verlustleistung.

■ **Elektrische Leitfähigkeit von Öl-Papier-isolierten Barrierensystemen für HGÜ-Transformatoren**

M. Sc. Farzaneh Vahidi

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. A. Küchler

HAW Würzburg-Schweinfurt

Tag der mündlichen Prüfung:

10.12.2019

Der weltweit steigende Energiebedarf führt zu einem wachsenden Interesse an neuen Technologien zur Energieübertragung vom Kraftwerk zu den lokalen Verteilnetzen. Dabei bietet die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) eine attraktive Alternative und Ergänzung zu konventionellen Energieübertragung und -verteilung. Der Grund hierfür ist, einerseits die effizientere Energieübertragung über lange Strecken und andererseits die mögliche Kupplung von AC-Netzen unterschiedlicher Frequenz. Eine der zentralen Fragestellungen der Hochspannungsgleichstromübertragung ist die Implementierung eines neuartigen Isolationssystems für Hochspannungsbetriebsmittel wie HGÜ-Transformatoren, Durchführungen und Kondensatoren. Um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb sicherzustellen, muss eine detaillierte Berechnung der elektrischen Feldverteilung innerhalb der mehrschichtigen Isolierung bestehend aus Öl und ölprägnierten Pressspanplatten durchgeführt werden.

Eine AC-Spannungsbeanspruchung hat die Ausbildung eines dielektrischen Verschiebungsfeldes zur Folge, während durch eine DC-Spannungsbeanspruchung ein stationäres Strömungsfeld entsteht. Somit muss für das vollständige Verständnis der Vorgänge in einem HGÜ-Isoliersystem, das durch ein Mischfeld beansprucht ist, sowohl die Permittivität, als auch das Verhalten der Leitfähigkeit der Isolierstoffe bekannt sein. Hier stellt sich heraus, dass die elektrische Leitfähigkeit im Vergleich zur Permittivität häufig von vielen Parametern, wie z.B. der Temperatur, Zeit oder Feldstärke, abhängt und somit nur schwer bestimmt werden kann.

Ausgehend von dieser Problematik befasst sich die vorlegende Arbeit zum einen mit der Bestimmung der Abhängigkeiten der elektrischen Leitfähigkeit von Isolieröl und öl-imprägnierten Pressspanplatten, und zum anderen mit der Charakterisierung und Beschreibung der dahinterstehenden Leitungsmechanismen. Eine Analyse der Leitfähigkeit von Isoliermaterialien wird mittels einer Sprungantwortmessung im Zeitbereich und der Berechnung der Leitfähigkeit realisiert. Dabei werden die verschiedenen Einflussfaktoren berücksichtigt, nämlich die Temperatur, elektrische Feldstärke und der Feuchtegehalt der Proben. Zusätzlich wird die Rolle des Elektrodenmaterials und der Oberflächenrauheit bei der Ölleitfähigkeitsmessung diskutiert. Anschließend zeigt eine Vergleichsstudie die vorhandene Variationsbreite unterschiedlicher Isolieröle. Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der Ölleitfähigkeit von der Temperatur und elektrischen Beanspruchung, während ein niedriger Feuchtegehalt ($RS < 20 \%$) und Zellulosepartikelgehalt ($zp < 0,001 \%$) die Ölleitfähigkeit kaum verändern. Im Gegensatz dazu steigt die Leitfähigkeit des öl-imprägnierten Pressspans überproportional mit der Zunahme der Feuchte und Temperatur der Proben. Ein Temperaturanstieg von 30 auf 70 °C führt zu etwa 100-mal höheren Leitfähigkeitswerten.

Weiter stellt die Arbeit die Unterschiede zwischen elektrischer AC- und DC-Feldverteilung innerhalb eines mehrschichtigen Isolationssystems dar und beschäftigt sich mit der Simulation der Ladungsträgertransfers in der Isolierflüssigkeit. Die Modellierung in COMSOL Multiphysics® basiert auf ein Ionen-Drift-Diffusionsmodell und berücksichtigt zusätzlich den Einfluss von Ionen-injektion aus einer elektrischen Doppelschicht auf die elektrische Feldverzerrung.

Schließlich zeigen die Simulationsergebnisse die Einflüsse der unterschiedlichen Leitungsmechanismen auf die elektrische Feldverzerrung innerhalb einer Ölstrecke. Letztendlich kann ein Vergleich der von der Simulation gelieferten Ergebnisse, mit der gemessenen elektrischen Feldverteilung mehr über die Hauptquelle der Restladungsträger im Öl aussagen. Somit ist eine Quantifizierung der Ladungsträgerdiffusion und der Ioneninjektionsdichte der erste Schritt, um die Dynamik der Raumladung durch Anlegen einer Gleichspannung an das Isolationssystem zu verstehen. Dies führt zu einem besseren Verständnis des dielektrischen Verhaltens von HGÜ-Isolationssystem basierend auf Öl-Papier Dielektrika.

■ **Electrical Conductivity of Oil-Impregnated Pressboard Barrier Systems for HVDC Transformer Insulation**

M. Sc. Farzaneh Vahidi

Increased demand on global electricity prompts increased interest in new technologies to transmit the electrical power from power plants to local distribution networks. High-voltage direct current (HVDC) power transmission is an attractive alternative and

complement to conventional alternating current (AC) power transmission. Furthermore, it is the only efficient solution for energy transmission over long distances and asynchronous coupling between two AC networks. One of the major concerns of HVDC transmission is the implementation of insulation systems for high-voltage equipment such as converter transformers, bushings and capacitors. In order to ensure the safe and reliable operation of an insulation system in these cases, the electric field distribution within the multi-layered insulation systems has to be determined. Insulation systems in power transformers normally consist of oil and oil-impregnated pressboards.

The insulation materials in HVDC insulation systems are exposed to composite AC, DC and mixed stresses. In contrast to the displacement electric field distribution, the steady-state conduction field distribution is affected by electrical conductivities of the insulation materials. The electrical conductivity of the aforementioned insulation materials is not a constant property and it alters depending on different factors, e.g. temperature, electrification time, electric field strength, etc. This thesis aims to investigate existing parameter dependencies of insulating oil and oil-impregnated pressboard. The related analysis is achieved by step response measurements in the time domain following a calculation of electrical conductivity. For this purpose, three main factors affecting the conductivity of insulating oil are discussed in detail, namely the temperature, electric field strength and moisture content of oil samples. Additionally, the influence of electrodes material and their surface roughness on oil conductivity are analyzed. Afterwards, a comparative conductivity measurement on different insulating liquids indicates the extent of electrical conductivity dependency on oil type.

The results illustrate a strong dependency of oil conductivity on measurement temperature and electrical stress applied to the insulating liquid. A low level of moisture (relative saturation (RS) < 20 %) and cellulose contamination in oil (particle in volume < 0.001 %) do not lead to wide variation of electrical oil conductivity. However, the electrical conductivity of oil-impregnated pressboard increases rapidly with a minor increase of the moisture content in the sample. The next critical dependency of the board conductivity is the temperature. A temperature increase from 30 to 70 °C causes a considerable increase of oil-immersed board conductivity up to more than two orders of magnitude.

The second part of this thesis focuses on the electric field distribution within a multi-layered insulation system applying AC and DC voltage stresses. Due to the non-linearity of insulating oil, it is essentially important to gain in-depth knowledge about charge carriers transport in oil. Accordingly, the conduction mechanisms and electrical field distribution in liquid are thoroughly investigated.

A simulation model is provided using finite element method (FEM) in COMSOL Multiphysics®. This FEM simulation demonstrates the charge carriers transport in insulating liquid. The simulation model describes the ion drift and diffusion, as well as the symmetrical and asymmetrical ion injection from the oil/electrode double layer. The simulation results indicate the impact of ions diffusion and injection on electric field

distortion. This can be directly compared with the results of the electric field measurements in the oil gap. The comparative analysis of simulated and experimentally achieved data reflects that the source of charge carriers in the oil gap is dependent on the applied electrical stress. Finally, a quantification of charge carriers diffusion and ion injection density comprehends the space charge dynamics, which leads to a better understanding of the dielectric behavior of HVDC insulation systems.

- **Echzeitfähige Parameterschätzung von
Netzpendelungen im kontinentaleuropäischen
Verbundnetz**

Dipl.-Ing. Markus Maurer

Hauptberichter:

Prof. Dr. techn. G. Scheffknecht

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Tag der mündlichen Prüfung:

23.07.2019

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 projizierte 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 mainly 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 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 analysed.

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

Mustererkennungsverfahren für kontinuierliche Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren

M. Sc. Benjamin Adam

Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten und einen Ausfall zu verhindern, muss der Zustand des Isolationssystems von hochspannungstechnischen Betriebsmitteln überwacht werden können. Die Messung von Teilentladungen (TE) ist dabei eine wichtige vor-Ort Messmethode zur Zustandsbewertung der Isolation. Teilentladungen in Hochspannungsbetriebsmitteln können die elektrische Isolierung schädigen und somit zu erhöhtem Wartungsaufwand oder zu Ausfällen führen. IEC 60270 definiert einen Messkreis, mit dem TE gemessen werden können. Neben der elektrischen Messung existieren weitere Messverfahren, wie die UHF Messtechnik, mit der TE erfolgreich gemessen werden können.

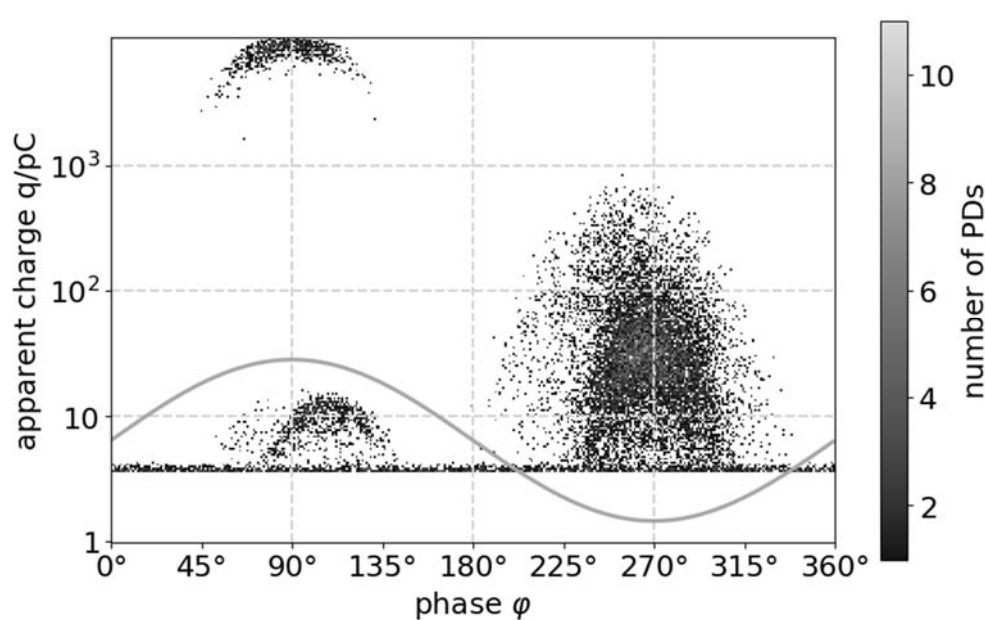


Fig. 1: Beispiel eines Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Musters.
Example of a Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pattern.

Die objektive Interpretation der Messdaten ist ein bis heute nicht gelöstes Problem. Neben klassischen Grenzwerten für maximale TE-Pegel gibt es keine allgemein anerkannten Kriterien, wie die Kritikalität einer TE bewertet werden sollen. Mit Hilfe der PRPD Muster (s. Fig. 1) ist zwar eine Interpretation durch Experten möglich, jedoch existiert dafür keine allgemeingültige Vorgehensweise. Jedes PRPD Muster muss in seinen Kontext eingeordnet und separat bewertet werden. Damit sind die Muster oft nicht eindeutig einer Fehlerklasse zuzuordnen.

Um die Auswertung der umfangreichen TE-Messdaten und die Zustandsbewertung zu ermöglichen, wurden Methoden der Mustererkennung und des maschinellen Lernens untersucht.

■ Classification of Partial Discharge Sources by their PRPD Patterns

M. Sc. Benjamin Adam

To ensure safe operation and prevent failure, it must be possible to monitor the condition of the insulation system of high-voltage equipment. The measurement of partial discharges (PD) is an important on-site measurement method for assessing the condition of the insulation. Partial discharges in high-voltage equipment can damage the electrical insulation and thus lead to increased maintenance or failures. IEC 60270 defines a measuring circuit with which PD can be measured. In addition to electrical measurement, there are other measurement methods, such as UHF measurement technology, with which PD can be successfully measured.

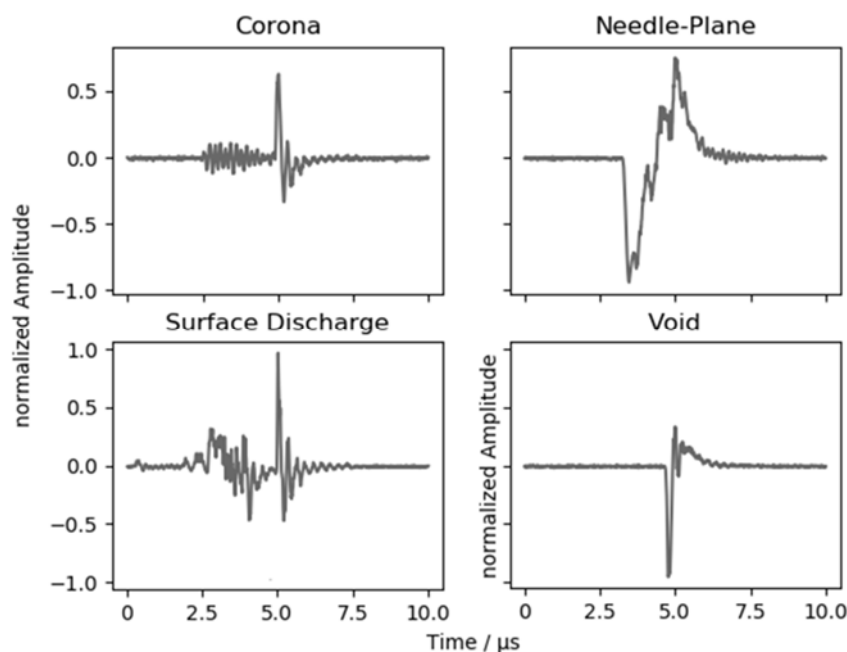


Fig. 2: TE Impulse im Zeitbereich.
PD pulses in time domain.

The objective interpretation of the measured data is a problem that has not been solved to date. Apart from classic thresholds for maximum PD levels, there are no generally accepted criteria for evaluating the criticality of a PD. With the help of the PRPD patterns (see Fig. 1), an interpretation by experts is possible, but there is no generally accepted procedure for this. Each PRPD pattern must be placed in its context and evaluated separately. This often means that the patterns cannot be clearly assigned to a defect class.

In order to enable the evaluation of the extensive PD measurement data and condition assessment, methods of pattern recognition and machine learning were investigated.

Dabei wurden Verfahren auf der Basis von LSTM Netzwerken entwickelt, um Labor-daten erfolgreich zu klassifizieren. Die Klassifikation funktioniert sowohl bei PRPD Daten als auch bei einzelnen TE-Impulsen, welche im Zeitbereich aufgenommen wurden.

Die Klassifikation von Teilentladungen zeigte allerdings ein grundsätzliches Problem: Labordaten und Daten von Betriebsmitteln sind nicht äquivalent einsetzbar. Klassifikatoren, welche mit Labordaten trainiert wurden, können keine Fehler von Betriebsmitteln klassifizieren. Für Betriebsmittel stehen keine Daten zum Training des Klassifikators zur Verfügung, da die Fehler i. a. nicht bekannt sind. Das führt dazu, dass LSTM Netzwerke zwar sehr gute Klassifikationsgenauigkeiten bei Labordaten liefern, aber in der Praxis nicht einsetzbar sind.

Da die Klassifikation von Teilentladungen nur mittels Labordaten validiert werden kann, wurden Möglichkeiten gesucht, um die Diagnose von realen Messdaten zu verbessern. Da bei diesen Messdaten die zugrundeliegenden Fehlerarten nicht bekannt sind, also keine Label verfügbar sind, kann keine Klassifikation eingesetzt werden. Deshalb wurden Methoden aus dem unüberwachten Lernen auf ihre Anwendbarkeit bei TE-Messdaten untersucht. Dabei handelt es sich um Clusterverfahren, die die Daten in mehrere Gruppen (Cluster) einteilen. Damit kann detektiert werden, ob mehrere TE-Fehler gleichzeitig in einem Betriebsmittel aktiv sind. Eine Fehlertypbestimmung ist damit allerdings Prinzip bedingt nicht möglich. Clusterverfahren bei PRPD Mustern und daraus abgeleiteten Merkmalsvektoren lieferten keine verwertbaren Ergebnisse.

Durch Impulsformanalyse im Zeitbereich und deren Merkmalsvektoren konnten hingegen erfolgreich verschiedene TE-Quellen durch Clusterverfahren separiert werden. Da sich Impulse unterschiedlicher TE-Quellen in ihrer Form unterscheiden, können diese voneinander getrennt werden (s. Fig. 2). Dazu wurde eine Vielzahl an möglichen Merkmalen aus den TE-Zeitsignalen extrahiert. Merkmale, welche keine Abhängigkeit von der TE-Quelle aufweisen, verschlechtern allerdings das Clustering. Es muss also eine Vorauswahl aller möglichen Merkmale getroffen werden. Durch Sequential Forward Search wird eine Untermenge an relevanten Merkmalen ausgewählt. Diese können dann mit Clusteringverfahren wie K-Means oder DBSCAN in Cluster eingeteilt werden.

Es konnten Zeitsignale multipler TE Quellen erfolgreich voneinander separiert werden. Werden im Anschluss danach PDPD Muster dieser Signale erstellt, so enthält jedes PRPD nur noch eine TE-Quelle und kann somit einfacher interpretiert werden.

Methods based on LSTM networks were developed to successfully classify laboratory data. The classification works for PRPD data as well as for single PD pulses recorded in the time domain.

However, the classification of partial discharges revealed a fundamental problem: laboratory data and data of operating equipment cannot be used equivalently. Classifiers trained with laboratory data cannot classify equipment faults. There is no data available for the training of the classifier, because the faults are generally not known. As a result, LSTM networks provide very good classification accuracy for laboratory data, but cannot be used in practice.

Since the classification of partial discharges can only be validated using laboratory data, possibilities were sought to improve the diagnosis of real measurement data. Since the underlying defect types are not known for these measurement data, i.e. no labels are available, no classification can be used. Therefore, methods from unsupervised learning were examined for their applicability to PD measurement data. These are cluster methods that divide the data into several groups (clusters). This makes it possible to detect whether several PD faults are active simultaneously in a piece of equipment. It is however not possible to determine the fault type. Cluster procedures for PRPD patterns and the feature vectors derived from them do not provide any usable results.

By means of pulse shape analysis in the time domain and their feature vectors, however, it was possible to successfully separate different PD sources using cluster methods. Since pulses of different PD sources differ in their shape, they can be separated from each other (see Fig. 2). For this purpose, a large number of possible features were extracted from the PD time signals. However, features which are not dependent on the PD source worsen the clustering. Therefore, a preselection of all possible characteristics must be made. A subset of relevant characteristics is selected using Sequential Forward Search. These can then be divided into clusters using clustering procedures such as K-Means or DBSCAN.

Time signals of multiple TE sources were successfully separated from each other. If PDPD samples of these signals are subsequently created, each PRPD contains only one PD source and can therefore be interpreted more easily.

■ **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 Fig. 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).

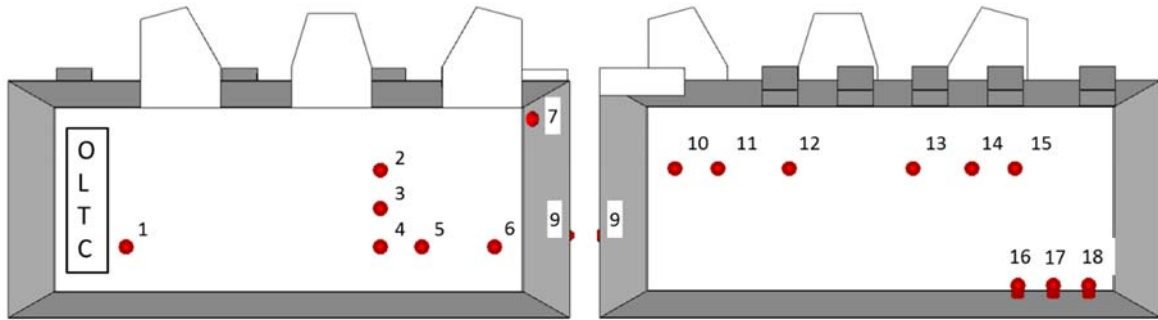


Fig. 1: Sensor distribution over tank surface for HV side (left) and MV/LV side (right)

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 Fig. 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 Fig. 2 (right).

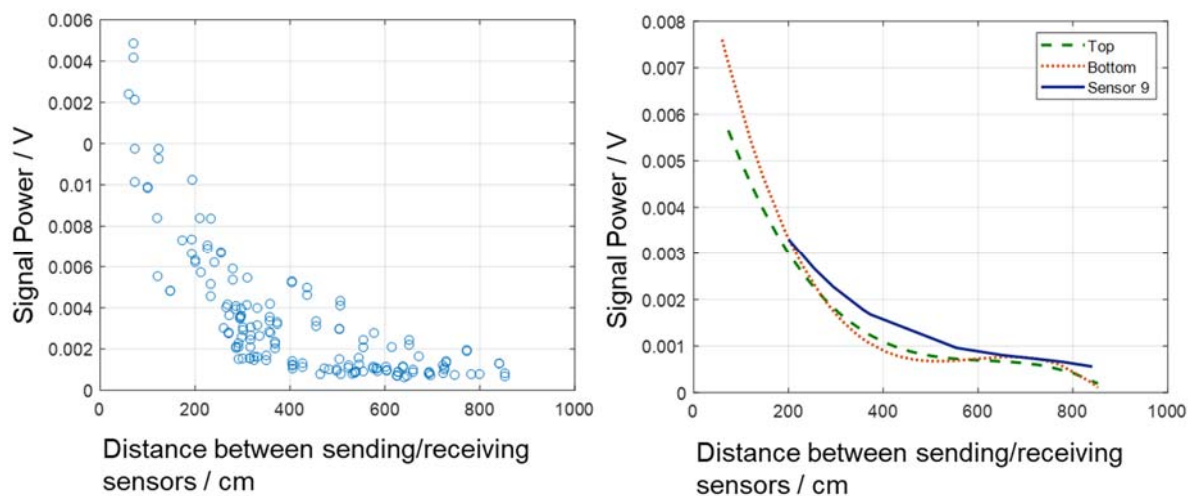


Fig. 2: Signal power of sending-receiving antenna pairs vs distance (left) and fitted curves for different groups of antennas (right)

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.

■ **Abrissverhalten von Vakuum-Schaltlichtbögen**

M. Sc. Markus Fischer

Im Mittelspannungsbereich werden für Schaltaufgaben hauptsächlich Vakuumschalter eingesetzt. Der große Vorteil von Vakuum als Schaltmedium liegt darin, dass bereits bei kleinen Kontaktabständen eine hohe dielektrische Festigkeit erreicht werden kann. Während eines Ausschaltvorgangs entsteht in der Schaltkammer im Moment der mechanischen Trennung der Schaltkontakte ein Lichtbogen. Dieser verlischt im natürlichen Nulldurchgang des zu trennenden Stroms. Im Vakuum besteht dieser Lichtbogen aus verdampftem Material der Schaltkontakte. Bereits kurz vor dem Nulldurchgang kommt es aufgrund zu geringer Energie zum abrupten Abriss des Lichtbogens. Der Stromgradient ist dabei so hoch, dass es besonders bei induktiven Verbrauchern wie Motoren durch Resonanzanregung zu transienten Überspannungen kommt. Die Folge können irreparable Schäden an der Isolation oder den Wicklungen sein.

Mittels verschiedener Strategien können die durch Schalthandlungen ausgelösten Überspannungen reduziert werden. Ein Konzept ist das kontrollierte Schalten. Durch die kontinuierliche Messung des Laststroms wird der Schaltvorgang auf den Strom-nulldurchgang synchronisiert. Ein Nachteil hierbei ist, dass bei einem dreiphasigen System die Schaltkammer jeder Phase einen eigenen Antrieb benötigt. In der Regel werden die Schaltkammern jedoch mit einem einzigen Antrieb angesteuert. Die andere Möglichkeit besteht darin, das Abrissverhalten des Lichtbogens zu beeinflussen. Mithilfe extern erzeugter Magnetfelder soll ein schonender Lichtbogenabriss erzielt werden. In Fig. 1 ist der Wert des Stromabrisses, bei dem der Schaltlichtbogen vorzeitig verlischt, in Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte eines externen Magnetfelds prinzipiell dargestellt. Bei relativ niedrigen Flussdichten ergibt sich ein Minimum dieses Wertes. Für höhere Flussdichten liegt der Wert über denen ohne Feldeinfluss ($B = 0$ mT).

Ein weiterer Ansatz ist die Untersuchung des Einflusses der in der Schaltkammer verwendeten Kontaktwerkstoffe. Hierzu soll das Abrissverhalten verschiedener Materialien genauer analysiert werden. Die Auswirkungen externer Magnetfelder sollen dabei ebenfalls in die Schaltversuche mit einfließen.

■ Chopping Behavior of Vacuum Arcs

M. Sc. Markus Fischer

In medium voltage applications, vacuum switches are mainly used for switching tasks. The great advantage of vacuum as a switching medium is that a high dielectric strength can be achieved even with small contact distances. During a switch-off process, an arc is generated in the switching chamber at the moment of mechanical separation of the switching contacts. This arc extinguishes in the natural zero crossing of the current to be disconnected. In vacuum this arc consists of evaporated material of the switching contacts. Shortly before the zero crossing, the arc abruptly chops due to insufficient energy. The current gradient is so high that transient disturbances occur due to resonance excitation, especially with inductive loads such as motors. This can result in irreparable damages to the insulation or the windings.

The surges, caused by switching operations, can be reduced by means of various strategies. One concept is controlled switching. By continuously measuring the load current, the switching process is synchronized to the current zero crossing. A disadvantage here is that in a three-phase system, the switching chamber of each phase requires its own drive. Usually, however, the switching chambers are controlled by a single drive. The other possibility is to influence the chopping behavior of the arc. Using externally generated magnetic fields, a gentle arc break is to be achieved. Fig. 1 shows in principle the value of the current chopping at which the switching arc extinguishes prematurely as a function of the magnetic flux density of an external magnetic field. At relatively low flux densities a minimum of this value follows. For higher flux densities, the value is higher than that without field influence ($B = 0$ mT).

A further approach is the investigation of the influence of the contact materials used in the switching chamber. For this purpose, the chopping behavior of different materials is to be analyzed in more detail. The effects of external magnetic fields should also be included in the switching tests.

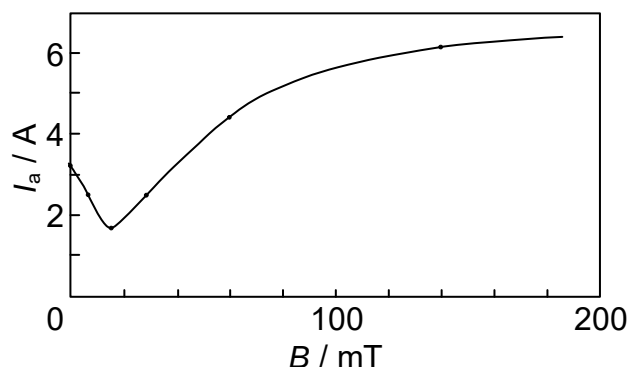


Fig. 1: Stromabrissswert I_a in Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B .
Chopping current I_a depending on the magnetic flux density B .

■ Investigation of Insulation Behavior of Motors for Electric Vehicle

M. Sc. Chuxuan He

The fast rise time and the high frequency of the waveforms generated by the converter increase the failure rate of the winding insulation. The malfunction of the winding insulation is the major cause of the motor failures for the EVs in practical operation. In particular, when the electric field magnitude is high enough, partial discharge (PD) may appear, which is a threat to electrical insulation in all electrical apparatus. To increase insulation reliability, qualification tests should be carried out according to IEC 60034-18-42. There are two types of sensors used for partial discharge detection, sensors connected in the measurement circuits and sensors based on electromagnetic theory. Both of the sensors have their own advantages and disadvantages. The former has a high sensitivity but is easily disturbed by noise. The later processes strong anti-interference ability but cannot detect the discharge quantities of PD. So, the detection method for PD in the electric motor should be further studied.

According to IEC 60034-18-42, there are 3 kinds of insulation components of the windings, turn to turn insulation, main wall insulation and stress control systems insulation. The fundamental frequency f_N , impulse voltage repetition rate f , peak to peak voltage at the fundamental frequency $U_{pk/pk}$, jump voltage U_j , peak to peak impulse voltage $U'_{pk/pk}$, at voltage repetition rate and impulse voltage rise time t_r are the influence factors of the PD in the motor.

Because the impulse voltage repetition rate has an effect on the insulation of the motor, qualification tests under 50 or 60 Hz can't get enough information about the PD and the aging process of the insulation material. So, the experimental setup for the PD detection usually consists of four parts: sensor, filter, high frequency power supply and high-speed acquisition. The diagram of the experiment setup is shown in Fig. 1.

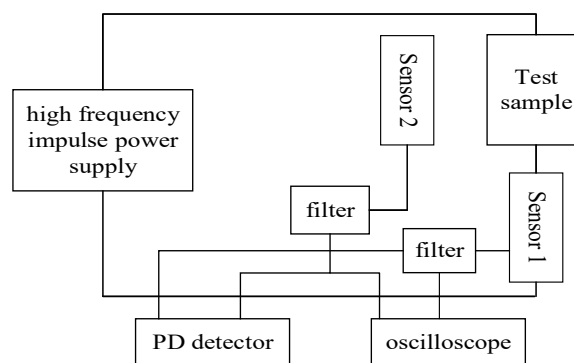


Fig. 1: Test setup of the PD measurement

In Fig. 1, the high frequency impulse power supply model can generate impulses similar to the one generated by commercial converters. Sensor 1 is the sensor connected in the circuit such as the current transformer. Sensor 2 is the non-contact sensor, such as UHF, whose measurement is related to the installation position. We want to study the detection method for the PD in the motor, so both of the sensors are used in the experiment. Both of the sensors are affected by the noise. Therefore, the design of the filter is another problem to be solved in order to filter out the background noise and extract the PD signal.

According to the standard IEC 60034-18-42, there are circuits to simulate the waveform of the converter and we choose one to do the turn to turn PD experiment, shown in Fig. 2. The repetition rate and the rise time of the output impulse voltage U_o can be adjusted through the parameters R_1 , R_2 and C . The fall time can be adjusted through R_3 .

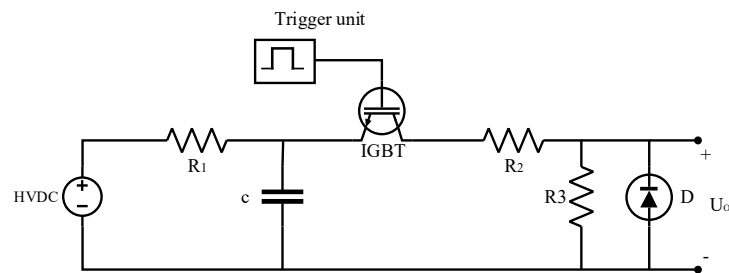


Fig. 2: Converter voltage simulation circuit

Fig. 3 shows the simulation of a stream of voltage impulses generated from the circuit in Fig. 2. With the setup, PD measurements can be carried out in motors fed by the convertor. Further, the filter and the detection method can be improved with the data collected.

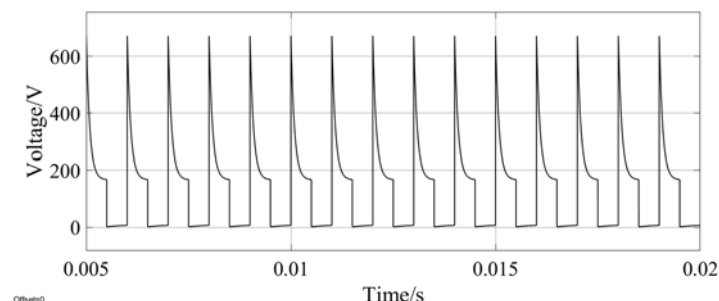


Fig. 3: Output voltage waveform generated from the simulation circuit

■ **Design of High Voltage Lead Exit with Silicone Rubber Insulation System**

M. Sc. Smitha Karambar

High voltage (HV) lead exits are special insulation systems used in HV power transformers to lead the conductor from the winding to the bushing. Conventionally, HV lead exits are composed of kraft paper and pressboard materials. The dielectric constants of pressboard and mineral oil are 4.4 and 2.2 respectively. When an AC field is applied, the electric field is displaced from pressboard into the mineral oil and thereby the mineral oil is stressed twice as much as pressboard material.

However, from previous research, it has been established that the dielectric strength of mineral oil is inversely proportional to the oil gap distance. Therefore, in conventional HV lead exits, wider oil gaps are divided into narrower sub-gaps with pressboard barriers. Furthermore, barriers are also helpful in preventing the formation of long particles and fibre bridges particularly in high stressed regions.

Though addition of barriers increases the dielectric strength of the oil gap, designing of HV lead exits with barriers is quite complicated. Also, cellulose based materials are low temperature materials. When transformers are subjected to overloads, it results in thermal degradation of the insulation materials, which in turn can lead to the early failure of the equipment. Silicone rubber is widely used as outdoor insulators due to its excellent thermal, electrical and mechanical properties. Hence, in this research, silicone rubber is investigated for its usage as insulation material in HV lead exits. The dielectric constant of silicone rubber is 2.8. The dielectric stress in mineral oil in an insulation system made up of silicone rubber-mineral oil is lower when compared with the pressboard-mineral oil insulation system. Hence, the possibility of elimination of barriers in HV lead exit with the usage of silicone rubbers as insulation materials is investigated.

In order to design the HV lead exit with silicone rubber insulation, a 400 kV two barrier system lead exit from Weidmann GmbH is chosen as the reference product. The cumulative average electrical strength ($E_{av}(z)$) at various intervals along the oil gap in the reference lead exit is determined using (1).

$$E_{av}(z) = \frac{1}{z} \cdot \int_0^z E(z') \cdot dz' \quad (1)$$

where $z = 0$ to d and d is the oil duct width. The cumulative average strength is compared to the allowable strength in oil gap obtained from design curve. The design curve was obtained experimentally by determining the 1% probability of partial discharge inception under 1 min AC test for various oil gaps. The design curve is as shown in Fig 1. The empirical formula for the curve is given as in (2)

$$E_{bd} = E_0 \cdot \left(\frac{d}{mm} \right)^{-a} \quad (2)$$

where, E_{bd} is the allowable field strength, d is the oil duct width, a is the exponent corresponding to the slope of the allowable field strength line and E_0 is the oil gap strength at $d = 1$. To ensure a reliable functioning of insulation, the value of safety factor Q should always be ≥ 1 . The safety factor (Q) is obtained by determining the ratio of E_{bd} to E_{av} .

The cumulative average stress along the oil gap, the safety factor curve and the design curve of reference lead exit are depicted in Fig 2. The critical safety factor for the reference lead exit is obtained as 1.143. The critical safety factor obtained from reference lead exit is considered as the design reference for lead exit with silicone rubber insulation. The thickness of silicone rubber insulation on the conductor is varied until the critical safety factor of the silicone rubber lead exit is above 1.143. The cumulative electrical stress along the oil gap, the Q curve and design curve for silicone rubber lead exit is as shown in Fig 3. The minimum thickness of silicone rubber to ensure reliable functioning of lead exit without barriers was obtained as 23 mm.

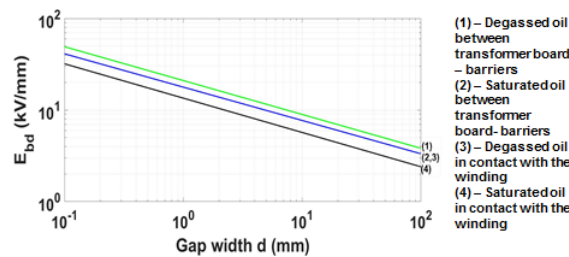


Fig 1: The allowable dielectric strength at different oil widths

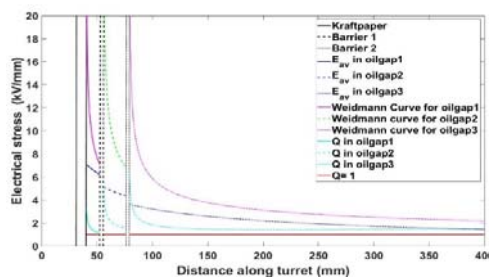


Fig 2: The cumulative stress and safety factor curve for the reference lead exit

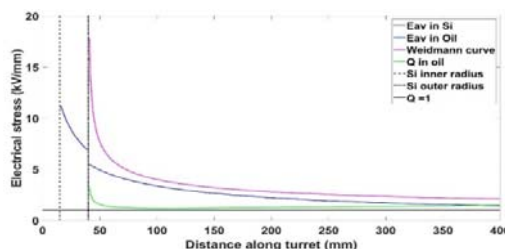


Fig 3: The cumulative stress and Q curve for silicone rubber insulated lead exit

■ **Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren mittels CFD**

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Leistungstransformatoren gelten als besonders wichtige Betriebsmittel in der elektrischen Energieversorgung. Die Lebensdauer eines Transformators ist maßgeblich abhängig von der thermischen Belastung der Wicklungsisolation während der gesamten Betriebsdauer. Eine übermäßige Wärmeerzeugung ist der Hauptgrund für die Verschlechterung der Isolationseigenschaften und für die Verringerung der Lebensdauer. Ein optimiertes Design der Kühlung ist ein wichtiges Kriterium in der Entwicklung, um Betriebsstörungen und Materialalterung aufgrund von thermischen Schäden zu vermeiden.

Im Folgenden werden Simulationen, repräsentiert durch numerische Strömungsmechanik und experimentelle Untersuchungen, zur Kühlleistung eines Zick-Zack-Wicklungsmodells mit pumpenbetriebenem Ölumlaufl im Transformator vorgestellt. Das thermische Verhalten der Wicklung und die Kühlleistung werden durch die Verwendung verschiedener Parameter bewertet, um signifikante Einflüsse auf die Heißpunkttemperatur und den Heißpunkt in der Wicklung zu prognostizieren.

Zu den Konstruktionsparametern einer Wicklung zählen die horizontale Kühlkanalhöhe, die vertikale Kühlkanalbreite sowie die Anzahl der Scheiben pro Passage. Darüber hinaus haben die Betriebsparameter Einlassströmungsrate und Einlasstemperatur der Wicklung einen beträchtlichen Einfluss auf das thermische Verhalten. In diesem Bericht werden die Auswirkungen der Hauptparameter und die Kühlungsbedingungen bei unterschiedlichen Konstruktionsrandbedingungen verglichen. Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zeigen, dass die Prognose und die Evaluierung der Wicklungskühlleistung angewendet werden kann, um die Kühlung eines ölgefüllten Leistungstransformators zu optimieren.

Um diese Konstruktionsgeometrie zu visualisieren, zeigen Fig. 1a und Fig. 1b eine Ansicht der Passage und die Abmessungen des Wicklungsmodells. Das gesamte Modell besteht aus drei Passagen, welche aus jeweils 6 Scheiben, 4 Leitern und 6 Kühlkanälen aufgebaut sind. Die Distanzstücke werden verwendet, um die Breite der horizontalen Kanäle an die inneren und äußeren Wicklungsdurchmesser anzupassen.

Für die Untersuchung der Einflüsse von wichtigen geometrischen Größen einer Wicklung und deren Randbedingungen auf die Temperaturverteilung sowie der Strömungsverteilung wird eine Parameterstudie mittels CFD durchgeführt. Die Anzahl der Scheiben zwischen zwei Barrieren wird zwischen sechs und zehn Scheiben variiert. Die Höhe der Horizontalkanäle beträgt 4 mm und 6 mm. Die Vertikalkanäle haben die Breite 6 mm und 10 mm.

■ Thermal Modelling of Power Transformers with CFD

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Power transformers are famous as very important equipment in the electrical power supply. The service life of a transformer is significantly dependent on the thermal load of the winding insulation over the service life. The excessive heat generation is the major cause of deteriorating insulation performance and aging. Therefore, optimal cooling design is necessary to avoid operating faults and materials degradation due to thermal damage. Simulations present numerical Computational Fluid Dynamics (CFD) investigations and experimental studies on the cooling performance of a zig-zag winding model used direct-oil-forced flow (OD). Winding thermal behavior and cooling performance are assessed by using different parameters to predict significant influences on Hot-Spot Temperature (HST) and Hot-Spot Location (HSL).

Design parameters can be divided into the geometrical structures including horizontal cooling channel height, vertical cooling channel width and number of discs per pass. Furthermore, operating parameters consisting of inlet flow rate and inlet temperature of the winding have considerable influence on thermal behavior. The effects of the main parameters are investigated and the cooling conditions are compared using different design structures. These results confirm that prediction and the evaluation of winding cooling performance can be applied to optimize the cooling of oil-filled power transformer.

To visualize this construction, Fig. 1a and Fig. 1b show a view of the passage and the dimensions of the winding model. The entire model consists of three passages, each pass consists of 6 discs, 4 conductors and 6 channels. In order to investigate influences of important geometric variables of a winding, a parameter study is carried out by CFD. The number of discs between two barriers is set 6 and 10 discs. The height of the horizontal channels (H) is set 4 mm and 6 mm. The vertical channels have widths (D) of 6 mm and 10 mm.

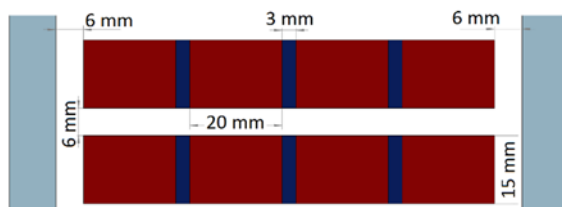


Fig. 1: Abmessungen des Wicklungsmodells.
Dimensions of winding model.

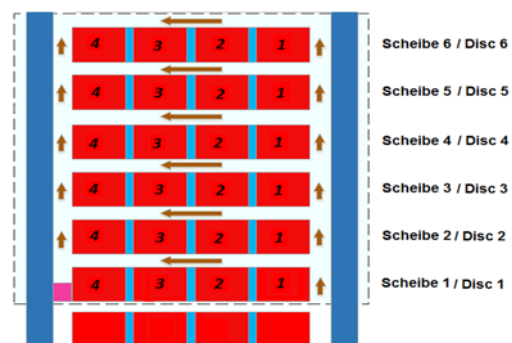


Fig. 2: Scheibenwicklung mit axialen Kühlkanälen.
Disc-type winding with axial cooling channels.

Zum besseren Vergleich der thermischen Verhältnisse bei unterschiedlichen Konfigurationen sind in Tabelle 1 die Ergebnisse der Parameterstudie aufgeführt. Es werden die gemittelten Temperaturen sowie der HTL und die Heißpunkttemperatur bei verschiedenen geometrischen Parametern für die Scheibenzahlen von sechs und zehn pro Passage angegeben. Weitere Untersuchungen verdeutlichen, dass eine kleine Kanalhöhe bei gegebenem Massenstrom zwar eine bessere Kühlung ergibt, jedoch die Werte der HST dementsprechend abnehmen. Zudem hat eine geringe Höhe der Horizontalkanäle einen positiven Einfluss auf das thermische Verhältnis. Bei zu klein gewählten Werten besteht allerdings die Gefahr, dass wegen Fertigungstoleranzen die Horizontalkanäle kleiner werden als vorgesehen. Deshalb ist von zu kleinen Kanalhöhen abzuraten. Es ist wichtig zu beachten, dass sich der HSL im mittleren Bereich der Passage befindet, weil weniger Öl im Bereich der mittleren Horizontalkanäle durchfließt und die Kühlung dort geringer ist.

Darüber hinaus haben die außenseitigen Wicklungen große Oberflächen zur Kühlung. Für eine effektive Wärmeübertragung ist es erforderlich, dass die Passagen durch möglichst zahlreiche Barrieren unterteilt sind. Im Gegensatz dazu haben die innenseitigen Wicklungen kleine Oberflächen, wodurch dort eine erhöhte Temperatur zu erwarten ist. So ist festzustellen, dass die beste Kühlleistung mit größeren Vertikalkanälen in Verbindung mit kleineren Horizontalkanälen erreicht wird.

Tab.1: Übersicht der Ergebnisse des Wickelmodells mit den verschiedenen Betriebs- und Geometrieparametern (Massenstrom: 18 kg/s).

Overview of the numerical thermal condition of the winding model with the different operating and geometrical parameters (mass flow rate: 18 kg/s).

Geometrical Parameters of Winding model/ Geometrische Parameter des Wickelmodells			Hot-Spot Temperature (°C) / Heißpunkt Temperatur (°C)	Averaged Temperature (°C) / Mittlere Temperatur (°C)	HSL (Conductor- Nr.)/ Leiter No.
6 Discs per pass/ 6 Scheiben pro Passage	D= 6 mm	H= 4 mm	88	83.2	D14L4
		H= 6 mm	91.1	84.9	D16L3
	D= 10 mm	H= 4 mm	90.7	84.0	D14L3
		H= 6 mm	94.4	85.5	D14L3
10 Discs per pass/ 10 Scheiben pro Passage	D= 6 mm	H= 4 mm	91.7	88.6	D17L3
		H= 6 mm	96.4	91.5	D17L3
	D= 10 mm	H= 4 mm	94.5	89.2	D12L3
		H= 6 mm	97.5	92.9	D15L3

In order to have a better comparison of the thermal conditions for different configurations, the results of the parameter study are listed in Tab. 1. The average temperatures, the hot-spot locations and hot-spot temperatures are given for 6 and 10 discs per pass. Further investigations show that a lower height of horizontal channels at a same mass flow leads to a better cooling condition and decreasing the hot-spot temperature.

Apart from improving cooling, reducing the height of the horizontal channels also makes winding smaller. Furthermore, at the lower height of horizontal channels, a reduction of non-homogenous flow distribution emerged. However, if the selected values for the height of the horizontal channels are too small, then, the risk of unexpected manufacturing tolerances cannot be neglected. Therefore, it is not recommended to use narrow lengths a low height of the horizontal channels. It should be noted that the HSL is located at different operating conditions in the middle of the pass while the lower rate of oil flows through the middle of the horizontal channels.

It can be inferred that the optimized cooling condition can be achieved with the height of horizontal channels of 4 mm and the width of vertical channels of 6 mm by six discs per pass. It should be noted the lowest average temperature (AT) and sufficient heat transfer represent the optimized winding designs. In addition, the external turns have large surfaces for cooling. In contrast, the inner turns have small surfaces, which means that an increased temperature can be expected there.

The results of the CFD simulations indicate an uneven flow distribution in the horizontal oil channels between the winding discs which leads to an increasingly unequal temperature distribution within the winding. The magnitude of the geometrical parameters have a significant influence on the oil distribution in the channels. For the low oil flow rates, the maximum share of the oil occurs in the lower part of the pass, whereas for increasing oil flow rate the maximum velocity moves to the upper region of the passes. For a given disc heat loss distribution, the temperature of the oil exiting the horizontal channels is inversely proportional to the oil velocity and the geometrical configurations have a direct influence on it.

Additionally, the more numbers of subsections within the horizontal oil channels divided by washers in zig-zag type leads to the more share of oil inside the channels in comparison to the higher number of channels in a pass. Therefore, the oil passes can be subdivided with washers representing zig-zag cooling conditions, as the heat transfer coefficient is the highest. However, a larger number of washers leads to higher manufacturing costs and requires a higher power supply for oil flow. It can then be concluded that the best cooling performance is achieved with optimizing the geometrical parameters by the constant operating conditions. Transformer designers can utilize the presented results in order to optimize the cooling within winding blocks.

■ **TE-Monitoring von Kabelmuffen zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Kabelstrecken**

M. Sc. Daniel Passow

Neben externen mechanischen Fehlern stellen interne Isolationsfehler eine weitere wichtige Ursache für den Ausfall einer Kabelstrecke dar. Insbesondere die Kabelmuffen sind als Verbindungsstück zweier Kabelabschnitte ein besonders neuralgisches und fehleranfälliges Element, da sie typischerweise unter schwierigen Bedingungen vor Ort montiert werden müssen. Der Großteil der heute eingesetzten Kabelmuffen ist feststoffisoliert, dabei werden unter anderem Materialien wie Silikon eingesetzt. Die Feststoffisolierung bietet den Vorteil, dass der Isolierkörper bereits vorher unter hohen Qualitäts- und Fertigungsstandards fehlerfrei produziert werden kann. Für die Montage vor Ort bedeutet dies, dass der Isolierkörper nur noch auf das zuvor präparierte Kabel aufgezogen und in einem um den Isolierkörper liegenden Gehäuse eingegossen werden muss. Die in Kabelmuffen auftretenden Isolationsfehler sind meist auf eine fehlerhafte Montage zurückzuführen. Eine fehlerhafte Montage führt zu einer lokal veränderten Feldverteilung innerhalb der Kabelmuffe, was zur Folge hat, dass in einigen Bereichen die Durchschlagfestigkeit des Isoliermaterials überschritten und die Isolation in diesem Bereich degradiert wird. Beim Überschreiten der Isolierfestigkeit treten in der Regel messbare Teilentladungen auf, welche als Indikator für einen in Feststoffen irreversiblen Degradationsprozess gelten. Um sich abzeichnende Isolationsfehler frühzeitig zu erkennen, ist es sinnvoll, den Zustand der einzelnen Kabelmuffen dauerhaft zu überwachen, Fig. 1 zeigt das Schema eines permanenten TE-Kabelmuffenmonitoringsystems.

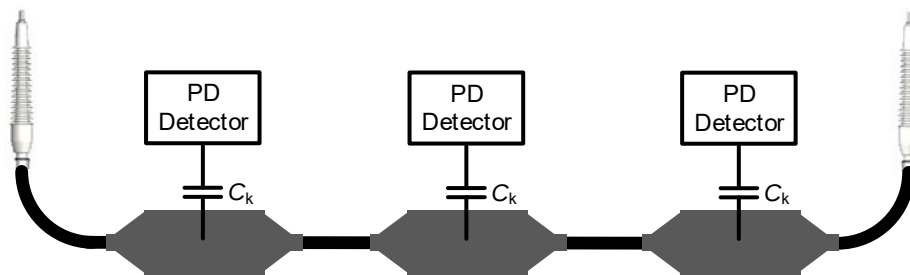


Fig. 1: Schema eines TE-Kabelmuffenmonitoringssystems.

Principle of an online PD monitoring system for joints.

Bei den in Fig. 1 schematisch dargestellten Koppelkapazitäten C_k handelt es sich um in der Kabelmuffe integrierte kapazitive Beläge. Das Schema der kapazitiven Beläge ist in Fig. 2 detailliert dargestellt. Dabei ist der kapazitive Sensorbelag koaxialsymmetrisch auf den leitfähigen Schichten des Isolierkörpers aufgetragen. Aufgrund der Parallelschaltung aus R_1 und C_2 ergibt sich eine frequenzabhängige

■ Classification of Partial Discharge Sources by their PRPD Patterns

M. Sc. Daniel Passow

In addition to external mechanical faults, internal insulation failures are another important cause for the occurrence of cable faults. Especially cable joints, which are used to connect to cable sections, are a critical and error-prone element, since they typically will be mounted in difficult conditions on-site. The majority of newly installed joints consists of solid insulation materials, e.g. silicone-rubber joints. As a result, the insulating body of the joint can be already produced under factory conditions which leads to high quality and less error-prone products. This leads to a simplified on-site assembly, the insulating body only has to be slipped on to the previously prepared cable. After the fitting/slip on process the insulating body will be housed, and the housing will be filled with compound. Insulation failures occurring in joints are usually a result of an incorrect assembly. Such an incorrect assembly leads to a locally enhanced electrical field distribution, which can result in an electric field strength, that exceeds the dielectric strength of the insulating material consequently degrading and deteriorating the insulating material in these areas. During the process of exceeding the dielectric strength partial discharges (PD) occur, thus PDs are regarded as an indicator of a degradation process, which is irreversible in solid insulating materials. In order to detect emerging insulation failures at an early stage, online condition monitoring of cable joints should be used permanently. Fig. 1 shows the principle of an online PD-monitoring system for joints.

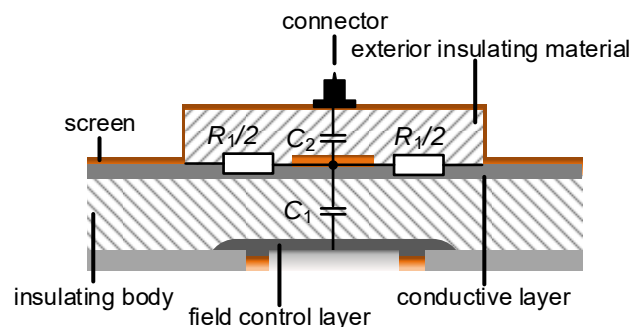


Fig 2: Schnittbild durch eine Kabelmuffe mit kapazitivem Sensorbelag.
Sectional view of a joint with integrated capacitive sensor.

The coupling capacities C_k in Fig. 1 represent an inside the joint integrated capacitive PD sensor. Fig. 2 shows the detailed view of the integrated capacitive sensor, the sensor itself is fitted on top of the insulating body. The capacitive sensor consists of a coaxial arranged construction, which is placed on top of the insulating body's semiconductive layer. Due to the parallel connection of R_1 and C_2 a frequency dependent impedance is formed.

Impedanz. Dies bedeutet, dass das elektrische Feld bei den Betriebsfrequenzen über die leitfähige Schicht, also den Widerstand R_1 , terminiert wird. Hochfrequente Signalimpulse wie Teilentladungen können jedoch über die Kapazität C_2 effektiv ausgekoppelt werden. Fig. 3 zeigt das äquivalente Ersatzschaltbild für Kabelmuffe und Sensor.

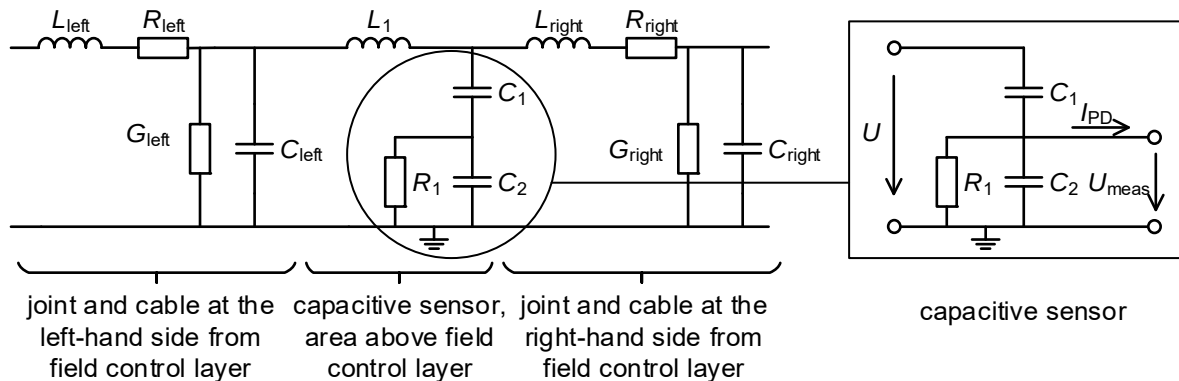


Fig. 3: Ersatzschaltbild der Kabelmuffe mit einem integrierten kapazitiven Sensor.
Equivalent circuit diagram of a joint with an integrated capacitive sensor.

Prinzipiell ergibt sich somit für den in die Kabelmuffe integrierten kapazitiven Sensor im Fall hoher Frequenzen ein kapazitiver Teiler aus C_1 und C_2 . Der exakte Frequenzgang des kapazitiven Sensors hängt jedoch ebenso vom Widerstand R_1 ab, da dieser den Übergang vom niederfrequenten ohmsch dominierten Verhalten zum hochfrequenten kapazitiv dominierten Verhalten bestimmt. Fig. 4 zeigt die gemessenen Spannungsübertragungsfunktionen zweier kapazitiver Sensoren, deren Aufbau bis auf unterschiedliche leitfähige Schichten und damit unterschiedlicher Widerstände R_1 identisch ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich für den Fall einer niedrigen Leitfähigkeit, d.h. für einen hohen Widerstandswert R_1 , ein deutlich breitbandigeres Sensorverhalten als für den Fall einer hohen Leitfähigkeit und damit einem niedrigen Widerstandswert R_1 ergibt. Ein breitbandiges Sensorverhalten ermöglicht die Messung von Teilentladungen sowohl im nach IEC 60270 spezifiziert Frequenzbereich als auch im Bereich höherer Frequenzen. Je nach Anwendungsschwerpunkt ist breitbandiges Frequenzverhalten des Sensors von Nöten. Um Teilentladungen lediglich innerhalb einer Kabelmuffe detektieren zu können, empfiehlt es sich, Frequenzen jenseits der in Fig. 4 dargestellten 30 MHz zu betrachten, da so das Tiefpassverhalten einer Kabelstrecke und die dort auftretenden Dämpfungseffekte effektiv ausgenutzt werden können. Somit kann das TE-Signal bei geeigneter Sensorauslegung einem Fehlerort in der Nähe der Kabelmuffe bzw. der Kabelmuffe selbst zugeordnet werden. Betrachtungen im Frequenzbereich von über 30 MHz werden zukünftiger Schwerpunkt weiterer Untersuchungen sein.

This causes the termination of the electric field distribution at semiconductive for the operating frequencies, using the resistance R_1 as current path. Signals, which include high frequency components, e.g. partial discharges, will couple across the capacity C_2 , thus they can be measured with this setup. Fig. 3 shows the equivalent circuit diagram of a joint with an integrated capacitive sensor.

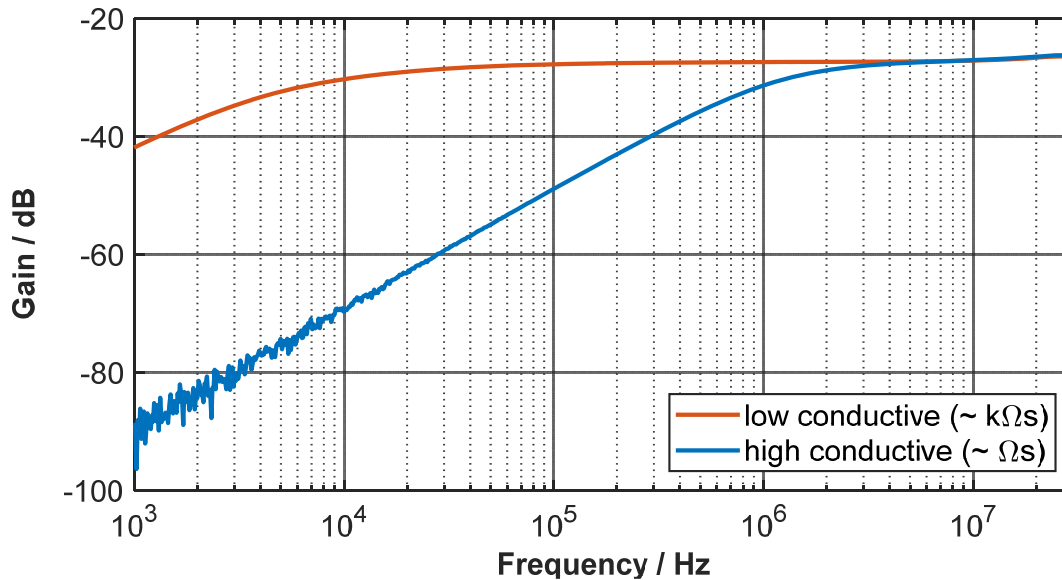


Fig. 4: Vergleich zweier gemessener Spannungsübertragungsfunktionen für unterschiedliche leitfähige Schichten.

Comparison between two measured voltage transfer functions with different semiconductive layers.

In general, the integrated capacitive sensor forms a capacitive divider for high frequencies consisting of C_1 and C_2 . In addition the complete frequency behavior of the voltage transfer function of the capacitive sensor is also depending of the resistance R_1 , which defines the transition from low frequency to high frequency behavior. Fig. 4 shows the influence of the conductivity of the semiconductive layer for two measured transfer function of two capacitive sensors with different semiconductive layers but other than that the same sensor setup. As it is shown, a high conductive semiconductive layer, low resistance R_1 , will result in a narrowband transfer function, whereas a low conductive semiconductive layer, high resistance R_1 , will result in a wideband transfer function. A wideband sensor behavior allows the measurement of PD using the frequency band specified in IEC 60270 as well as higher frequency bands. Depending on the use case a wideband sensor behavior is desirable. If PD should only be detected inside the joints or near the joints, higher frequencies than 30 MHz in Fig. 4 should be considered. Since in this case the lowpass behavior as well as the frequency dependent attenuation of the cable can be used to limit the location of the PD source to a point near the joint or the joint itself. This use case will be a focus of future work.

■ Berechnung von geomagnetisch induzierten Strömen in Deutschland

M. Sc. Michael Schühle

Geomagnetisch induzierte Ströme (GIC) entstehen in Freileitungen, an deren Enden sich jeweils ein Transformator mit geerdetem Sternpunkt befindet. Die Frequenzen von GIC-Strömen sind in einem Spektrum zwischen $100 \mu\text{Hz}$ und 8mHz . Durch diese, im Vergleich zur Netzspannung, sehr niedrigen Frequenzen werden GIC-Ströme auch als DC-Ströme in Übertragungsnetzen und Transformatoren betrachtet. Damit einher gehen auch die durch DC hervorgerufenen Effekte wie Anstieg der Leerlaufverluste, Vibrationen und Geräusche eines Transformators.

Während GIC-Strömen bisher hauptsächlich in polaren Regionen betrachtet wurden, da diese dort um ein vielfaches stärker sind ($I_{GIC} > 100 \text{A}$), werden durch den Einsatz moderner Transformatoren die Effekte durch DC bereits bei kleineren Strömen relevant, was eine Betrachtung von GIC-Strömen auch in Deutschland relevant macht.

Die Berechnung von GIC-Strömen wird in Fig. 1 veranschaulicht. Dabei existiert ein geoelektrisches Feld zwischen zwei geerdeten Transformatoren. Die sich zwischen den Transformatoren bildende Spannung U_{GIC} erzeugt abhängig vom ohmschen Widerstand der Freileitung den GIC-Strom.

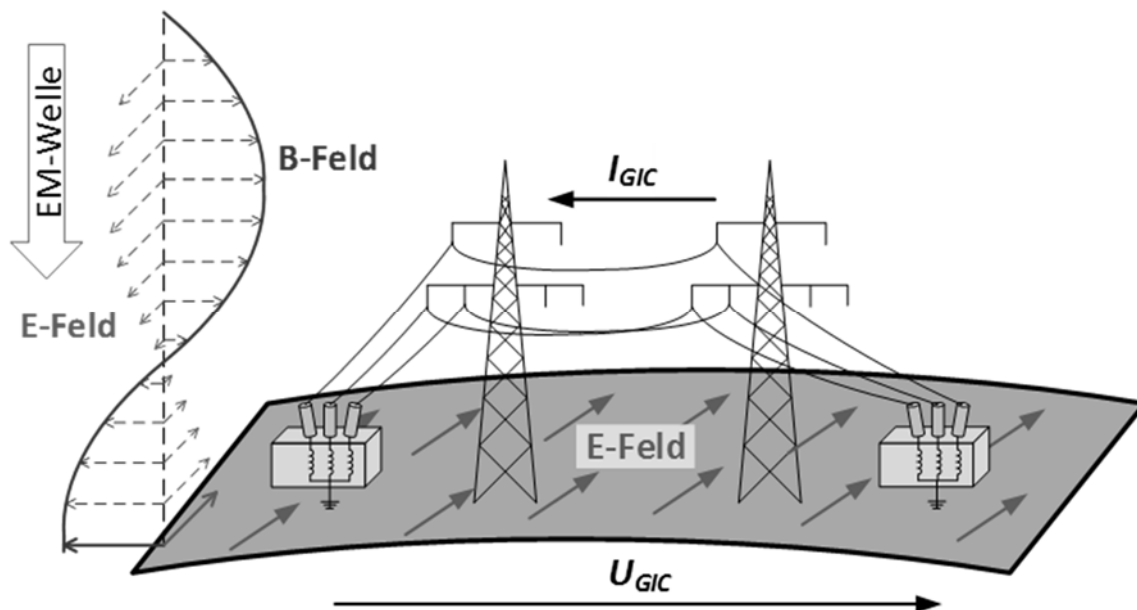


Fig. 1: Geoelektrisches Feld zwischen geerdeten Transformatoren als Ursache für GIC.

Geoelectric field between grounded transformers as a GIC source.

■ Calculation of Geomagnetic Induced Currents in Germany

M. Sc. Michael Schühle

Geomagnetically induced currents (GIC) are generated in overhead power lines, at the ends of which there is a transformer with an earthed star point. The frequencies of GIC currents are in a spectrum between $100 \mu\text{Hz}$ and 8mHz . Due to these very low frequencies, compared to the mains voltage, GIC currents are also considered as DC currents in transmission networks and transformers. This is accompanied by the effects caused by DC, such as an increase in no-load losses, vibrations and transformer noise.

While GIC currents have so far mainly been considered in polar regions, as they are much stronger there ($I_{\text{GIC}} > 100 \text{ A}$), the use of modern transformers makes the effects of DC already relevant at lower currents, which makes a consideration of GIC currents relevant in Germany as well.

The calculation of GIC currents is illustrated in Fig. 1. A geoelectric field exists between two grounded transformers. The voltage U_{GIC} that forms between the transformers generates the GIC current depending on the ohmic resistance of the overhead line.

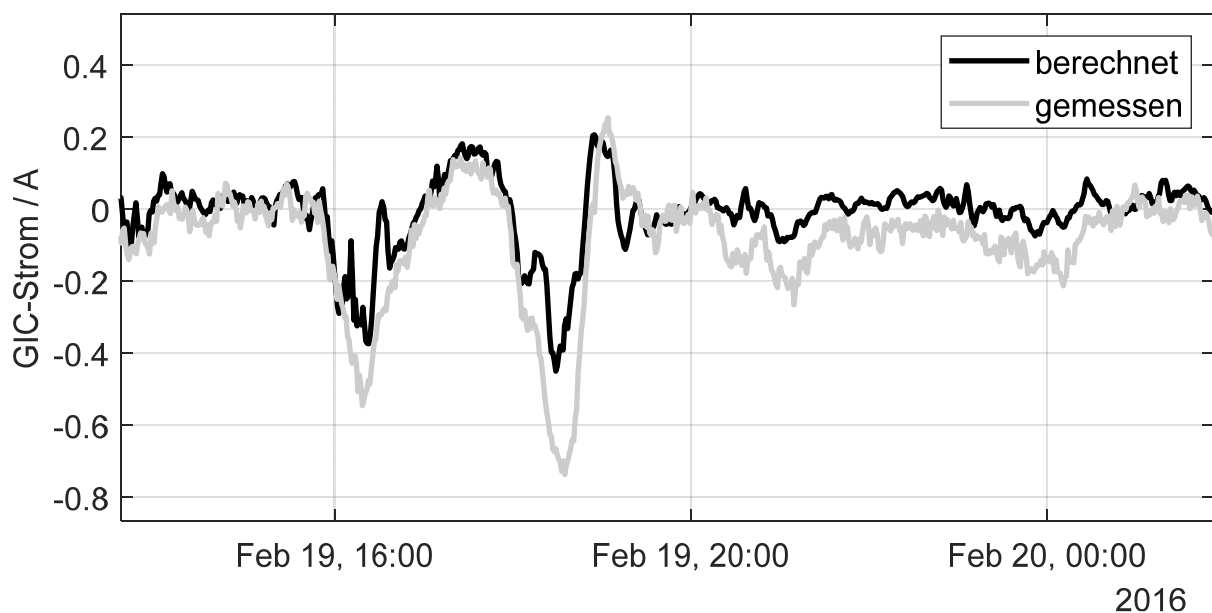


Fig. 2: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem GIC-Strom.
Comparison between measured and calculated GIC current.

The geoelectric field on the earth's surface can be calculated from the variation of the earth's magnetic field. The relation between E and B or H field is established by the wave impedance of the earth. The wave impedance is a frequency-dependent quantity and is calculated from the conductivity of the earth.

Das geoelektrische Feld auf der Erdoberfläche lässt sich aus der Variation des Erdmagnetfelds berechnen. Der Zusammenhang zwischen E- und B- bzw. H-Feld wird durch die Wellenimpedanz der Erde hergestellt. Die Wellenimpedanz ist eine Frequenzabhängige Größe und wird aus der Leitfähigkeit der Erde berechnet.

Die Variation des Erdmagnetfeldes kann als senkrecht auf die Erdoberfläche auftretende Elektromagnetische Welle betrachtet werden. Durch die niedrige Frequenz der Welle dringt diese sehr tief (mehrere Kilometer) in die Erde ein (Skin-Effekt). Um diese Eindringtiefe und die dadurch sich ändernde Leitfähigkeit der einzelnen Erdschichten zu berücksichtigen, wird ein Mehrschichtiges Leitfähigkeitsmodell der Erde verwendet. Mithilfe der Leitungstheorie und der allgemeinen Leitungsgleichungen kann für jede Erdschicht eine Wellenimpedanz berechnet werden. Iterativ wird von der untersten Erdschicht (100 km Tiefe) bis zur Erdoberfläche eine effektive Wellenimpedanz berechnet.

Das Erdmagnetfeld der Erde ist zeitweise lokal sehr unterschiedlich. Um das vektorielle Magnetfeld unter der jeweiligen Freileitung zu erhalten, werden die Magnetfelddaten umliegender Observatorien interpoliert. In und um Deutschland sind 5-6 solcher Observatorien welche das Erdmagnetfeld in einer 1 min Auflösung und als 3-dimensionaler Vektor bereitstellen. Fig. 3 zeigt Deutschland mit dem betrachteten Netzausschnitt und den nächstgelegenen Observatorien für Magnetfelddaten.

Nach der Berechnung des geoelektrischen Feldes wird dieses zwischen den geerdeten Transformatoren integriert um die Spannung U_{GIC} zu erhalten. Hierfür wird die direkte Luftlinie zwischen den Transformatoren verwendet. Der konkrete Verlauf der Freileitung spielt hierbei keine Rolle.

Um abschließend für einen Transformator den GIC-Strom zu ermitteln, müssen alle GIC-Ströme aller an den Transformator angeschlossenen Freileitungen überlagert werden. Zusätzliche DC-Quellen die auf den Transformator einwirken können dessen Gleichstrombelastung zusätzlich erhöhen oder reduzieren.

Aus der ermittelten DC-Belastung eines Transformators kann anschließend die zusätzlich benötigte Scheinleistung berechnet werden, welche vom Fall eines GIC-Events bereitgestellt werden muss.

The variation of the Earth's magnetic field can be considered as an electromagnetic wave perpendicular to the Earth's surface. Due to the low frequency of the wave, it penetrates very deeply (several kilometers) into the earth (skin effect). In order to take this penetration depth and the resulting changing conductivity of the individual layers of the earth into account, a multilayer conductivity model of the earth is used. With the help of the conduction theory and the general conduction equations, a wave impedance can be calculated for each layer of the earth. Iteratively, an effective wave impedance is calculated from the lowest layer of the earth (100 km depth) to the surface of the earth.

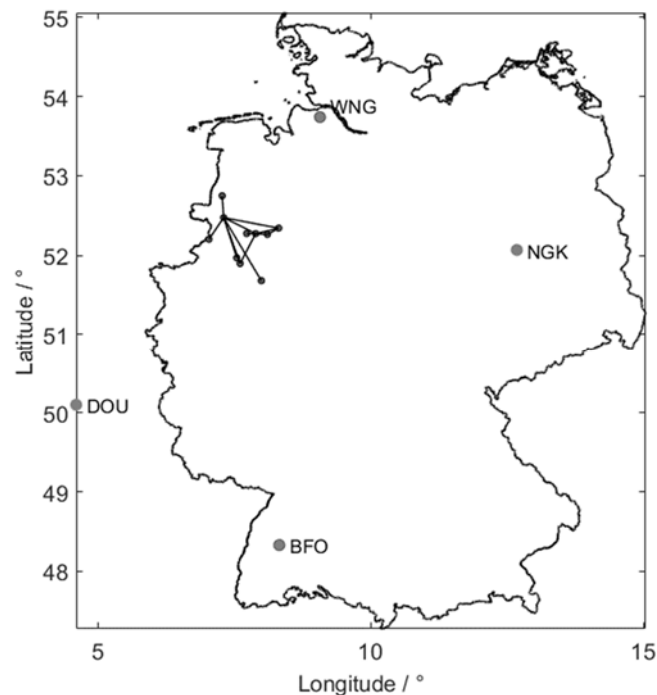


Fig. 3: Deutschland mit dem betrachteten Netzausschnitt und Observatorien.
Germany with analyzed grid part and nearest observatories.

The earth's magnetic field is locally very different at times. To obtain the vectorial magnetic field under the respective overhead line, the magnetic field data of surrounding observatories are interpolated. In and around Germany there are 5-6 such observatories which provide the earth magnetic field in a 1 min resolution and as a 3-dimensional vector. Fig. 3 shows Germany with the considered network section and the nearest observatories for magnetic field data.

After the calculation of the geoelectric field it is integrated between the grounded transformers to get the voltage U_{GIC} . For this purpose the direct linear distance between the transformers is used. The actual course of the overhead line is not important.

To finally determine the GIC current for a transformer, all GIC currents of all overhead lines connected to the transformer must be superimposed. Additional DC sources acting on the transformer can additionally increase or reduce its DC load.

From the determined DC load of a transformer, the additionally required apparent power can then be calculated, which must be provided in the case of a GIC event.

■ **Classification of Windings Electrical and Mechanical Faults using High-Frequency Model of a Three-Phase Transformer**

M. Sc. Mehran Tahir

The measurement procedures for Frequency Response Analysis (FRA) of power transformers are well documented in IEC and IEEE standards. However, the interpretation of FRA results is still a challenge. The dilemma is that there are limited case studies available. Additionally, due to the destructive nature, it is not possible to apply the real mechanical faults in the transformer windings to obtain the data.

To solve these issues, in this contribution, a turn-based 3D high-frequency model of a three-phase, 3 MVA transformer is developed using finite integration technique. The Transformer model consists of HV and LV windings including the insulation papers as well as core and surrounding tank, as shown in Fig. 1a (tank: hidden). The 3D electromagnetic (EM) simulations are performed in high-frequency solver of CST MW STUDIO. It solves the discrete Maxwell equations in frequency-domain and calculates the electric and magnetic field distributions at different frequencies, hence, it considers the frequency-dependent effects in the core and volume of the conductors. Fig. 1b explains the flowchart of the algorithm for FRA simulation. The novelty of this model is that FRA traces are directly obtained from the 3D high-frequency model (HF-model) without estimating and solving lumped parameter circuit models. The frequency response of HV winding of HF-model for open-circuit configuration in healthy state of the windings is shown in Fig. 2. The method is previously validated with a simple experimental setup. Mainly, two fault classes are investigated, i.e. mechanical faults and electrical faults. In the category of mechanical failure modes, four common failure modes are simulated, i.e. axial displacement, axial disk buckling, conductor tilting, radial buckling. While in the class of electrical failure modes, two common failure modes including short-circuit between turns and core ground loss. The effects of these faults are analysed in four configurations, i.e. open circuit (OC), short-circuit (SC), capacitive inter-winding (CIW) and inductive inter-winding (IIW).

Fig. 3 summarises the characteristic impact of individual faults on the TFs of four connection schemes, i.e., OC, SC, CIW, and IIW. These deviation patterns are based on the minimum value of SDD (SDD: is a winding assessment factor) in different frequency sub-bands for each fault type. It can be observed that different patterns of deviations can be characterized for different faults according to the frequency sub-bands. Consequently, it is possible to classify different faults based on their deviation patterns in various frequency sub-bands. These deviation patterns can be served as features to train and develop an intelligent fault detection and classification algorithm.

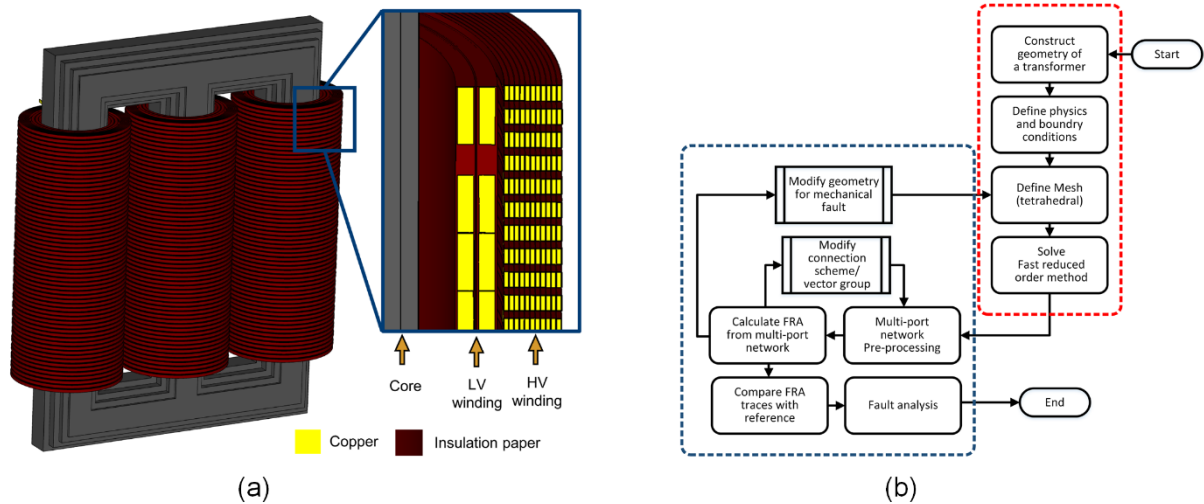


Fig. 1: High-frequency modeling in CST (a) 3D geometry of 3-phase transformer (b) FRA simulation algorithm with design module and schematic module tasks

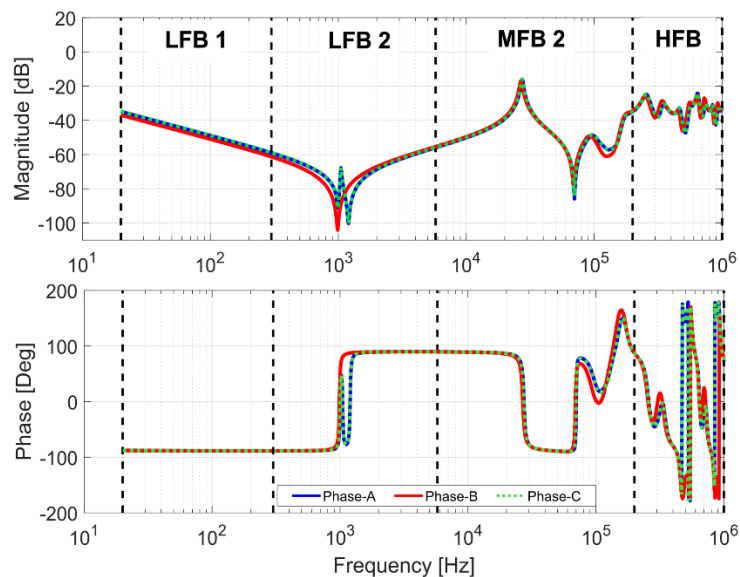


Fig. 2: Simulated TF of HF model with illustration of frequency sub-bands: LFB: low frequency band, MFB: medium frequency band, HFB: high frequency band

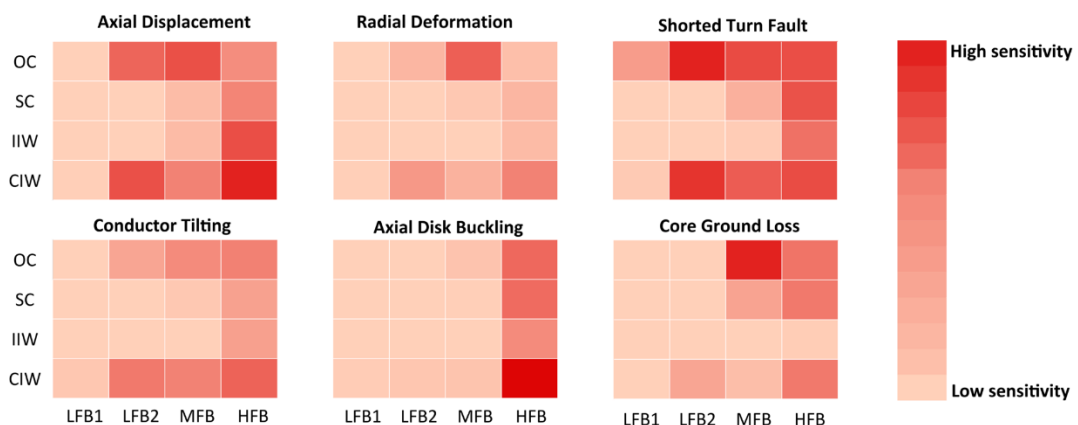


Fig. 3: Deviation patterns based on the minimum value of SDD for fault classification

■ UHF-TE-Messung freibeweglicher Partikel in HGÜ-GIS

M. Sc. Philipp Wenger

Die hohe Verfügbarkeit von elektrischen Betriebsmitteln wie gasisolierten Schaltanlagen und Leitungen (GIS / GIL) erfordert ein fehlerfreies Isolationssystem. Defekte an der HV-Isolierung führen häufig zu Teilentladungen (TE), die zu einer Minderung der Isolationsfestigkeit führen und einen Ausfall des gesamten Isolationssystems auslösen können. In GIS und GIL sind hüpfende Metallpartikel eine Hauptursache für TE. Diese können bei der Fertigung und Montage in die Gaskompartments gelangen, aber auch im laufenden Betrieb entstehen (z. B. durch mechanischen Abrieb bei Schaltvorgängen).

Die Bewegung von Partikeln kann hinsichtlich ihrer Sprungamplitude und Bewegungsmuster in zwei Arten unterschieden werden: Oszillation zwischen den Elektroden und Firefly. Firefly ist typischerweise durch eine schnelle, gleichmäßige Oszillationsbewegung des Partikels in der Nähe einer Elektrode gekennzeichnet, die von Entladungserscheinungen an der Spitze des Partikels begleitet wird. Wenn die elektrische Feldstärke hoch genug ist, können kurz vor Erreichen der Elektroden mehrere Entladungen auftreten. Bei TE an den Partikelspitzen entstehen Elektronen, die durch das lokale elektrische Feld beschleunigt werden und durch Anlagerung verschiedene SF₆-Ionen generieren. Die freien Elektronen bewegen sich schnell zur positiv geladenen Elektrode und hinterlassen einen Bereich positiver Raumladung, der langsam zur Kathode driftet. Das an der Kathode negativ aufgeladene Partikel beginnt sich zur Anode zu bewegen. Sobald es den Bereich mit positiver Raumladung erreicht, wird es erneut positiv umgeladen und bewegt sich zurück zur Kathode.

Während der stabilen Firefly-Bewegung ist die Durchschlagsspannung höher als bei der oszillierenden Bewegung zwischen beiden Elektroden, da keine Ladungsträger von dem Partikel zur entgegengesetzt geladenen Elektrode transportiert werden. Das eindeutige Detektieren und Identifizieren der verschiedenen Arten der Partikelbewegung ist deshalb von entscheidender Bedeutung, um das Risiko von partikelverursachten Ausfällen von GIS abschätzen zu können. Bestimmte Ausprägungen der Partikelbewegung können aus den UHF-TE-Signale abgeschätzt und so zwischen geringfügige Unterschiede im Teilchenbewegungsmuster differenziert werden.

Abb. 1 zeigt das UHF-Signal eines zylinderförmigen Partikels, das eine Firefly-Bewegung mit Sprungamplituden von bis zu mehreren Millimetern ausführt. Diese Bewegung ist im UHF-Zeitsignal an den signifikanten V-förmigen Pulsmustern zu erkennen (vgl. Abb. 1). Je näher das Partikel sich an der Elektrode befindet, desto kleiner ist die Amplitude der einzelnen TE-Impulse und desto höher ist die Impulswiederholrate. Während das Partikel die Elektrode berührt, werden keine TE-

■ **UHF-PD Measurement on Free-Moving Particles in HVDC-GIS**

M. Sc. Philipp Wenger

The reliable, long-term availability of high-voltage electrical equipment such as gas insulated switchgears and lines (GIS/GIL) requires a defect-free insulation system. Defects in HV insulation often result in partial discharges (PD) which can lead to deterioration of the insulation withstand strength and which may trigger a breakdown and overall failure of the entire insulation system. In GIS and GIL, hopping metal particles are a major source of PD. These get into the GIS during manufacturing and assembly, but may also be generated during operation (for example, from mechanical abrasion during switching operations).

The motion of free moving particles can be differentiated into two principal patterns regarding their bouncing amplitude: Oscillation between the electrodes and firefly motion. Firefly motion is typically characterized by a rapid uniform oscillation motion of the particle(s) near one electrode, accompanied by PD and light emitted at the particle's tip. If the electric field strength is high enough, multiple discharges can occur shortly before reaching the electrodes. PD at the particle's tips is caused by photoemission of electron, which are accelerated by the local electric field, leading to an electron avalanche. The free electrons rapidly move to the positively charged electrode, leaving a region of positive space charge, which drifts slowly towards the cathode. The negatively charged particle begins to move towards the anode. By reaching the region of positive space charge, it is recharged positively as if it were reaching the positive electrode.

However, in SF₆ breakdown of the gas gap is likely to occur, when particles oscillate between the electrodes and are at or close to the inner conductor. Under stable firefly conditions, breakdown voltage is much higher, because no charges are conveyed to the oppositely charged electrode by the particle. Therefore, understanding, identifying, and separation of the different modes of particle motion is crucial for determining the risk of particles on the insulation reliability of GIS. Specific modes of particle motion can be directly correlated with observable characteristics of the UHF-PD signals they produce and diminutive differences in the particle motion pattern can be discriminated.

Fig. 1 shows the UHF signal of a wire-shaped particle performing firefly motion with bouncing amplitudes up to several Millimetres. This mode of motion results in the bursts of UHF pulses with a particular V-shaped envelope as shown in the figure. The closer the particle is to the electrode, the smaller the amplitude of the individual PD pulses and the higher the pulse repetition rate. By the time the particle touches the electrode, no further PD pulses are measured. As soon as the particle leaves the electrode, PD pulses re-occur with gradually increasing amplitudes and decreasing

Impulse gemessen. Sobald sich das Partikel von der Elektrode entfernt, treten wieder TE-Impulse mit allmählich ansteigenden Amplituden und abnehmender Impulsrate auf. Diese setzen aus, sobald ein Abstand erreicht ist, bei dem das lokale elektrische Feld nicht mehr ausreicht, um TE zu erzeugen. Basierend auf den mit den UHF-Messungen zeitsynchron aufgenommenen Kamerabildern wird angenommen, dass bereits bei Abständen von mehr als 0,5 mm zur Elektrode bei zylinderförmigen Partikeln mit einer Länge von 4 mm keine TE-Impulse auftreten.

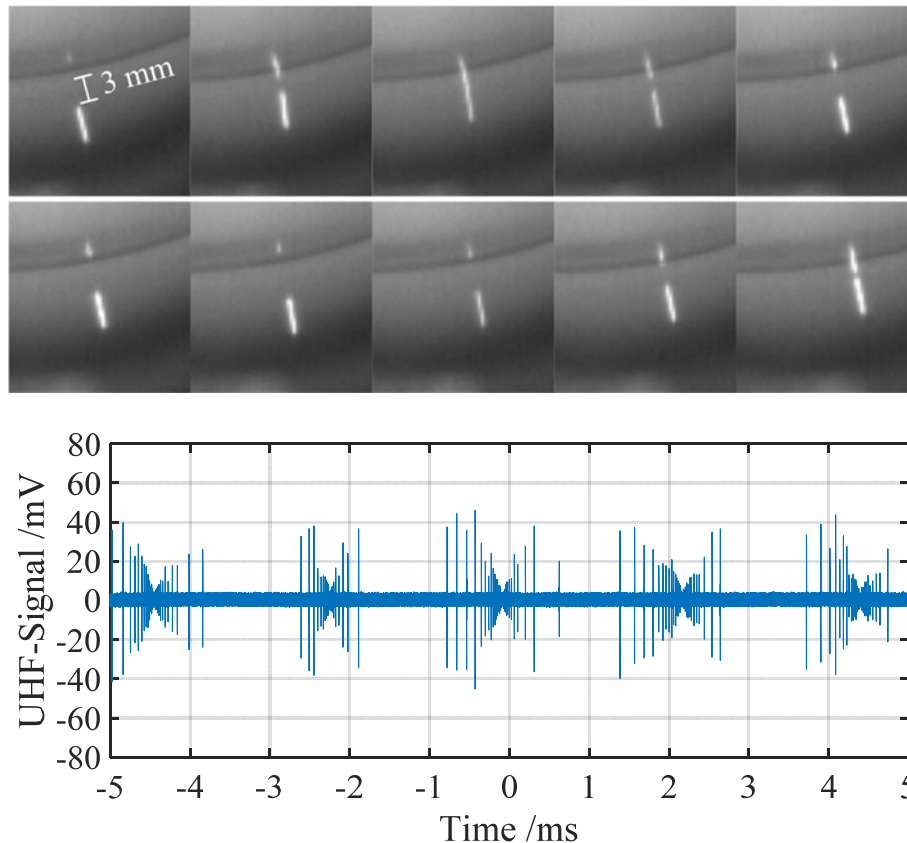


Fig. 1: Oben: Firefly-Bewegung eines Zylinderpartikels mit großen Sprungamplituden;
Unten: UHF-TE-Signal bei $U_{DC} = -190$ kV.
Top: Firefly with large bouncing amplitudes of a cylindrically shaped particle;
Bottom: UHF-PD signal at $V_{DC} = -190$ kV.

Bei Partikeln mit geringerem Gewicht kommt es häufiger zu stabilen Fireflybewegungen. Aufgrund der geringeren Trägheitsmasse wirkt die elektrostatische Kraft F_e bereits bei Erreichen des oberen Teils der positiven Raumladungzone überproportional auf das noch nicht vollständig umgeladene Partikel. Infolgedessen entfernt sich das Partikel zwischen den Elektrodenberührungen nur geringfügig. Das Phänomen kann durch eine hohe TE-Pulswiederholungsrate zwischen aufeinanderfolgenden V-förmigen Pulsmustern im UHF-Signal erkannt werden (vgl. Abb. 2).

pulse rate, ceasing once a distance is reached at which the local electric field is no longer sufficient to produce PD. Based on the camera images combined with the UHF measurements, it is considered that no PD pulses occur at distances greater than 0.5 mm for wire-shaped particles of 4 mm length undergoing firefly motion.

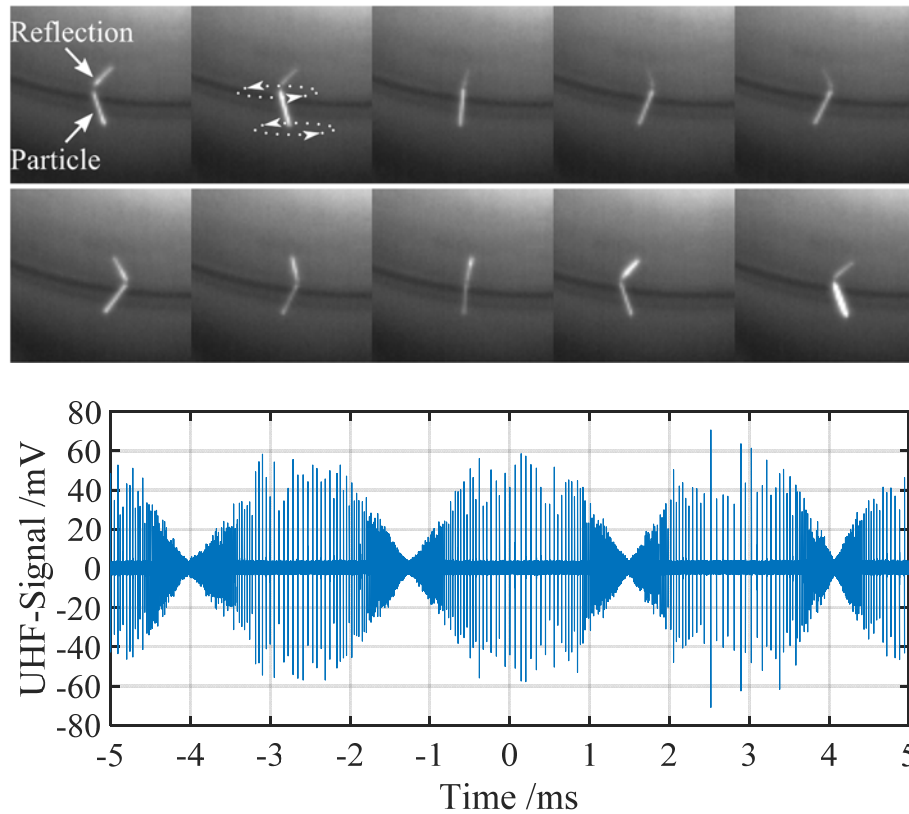


Fig. 2: Oben: Firefly-Bewegung eines Zylinderpartikels mit kleinen Sprungamplituden;
 Unten: UHF-TE-Signal bei $U_{DC} = -170$ kV.
 Top: Firefly with large bouncing amplitudes of a cylindrically shaped particle;
 Bottom: UHF-PD signal at $V_{DC} = -170$ kV.

Lighter weight particles are seen to reach stable firefly conditions more often. Because of their smaller inertial mass, the electrostatic force F_e already exerts a significant influence when the particle reaches the upper part of the positive space charge region and is not yet completely recharged. The phenomenon can be detected by high PD pulse repetition rate between successive V-shaped clusters of the UHF signal (see figure 2).

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

■ Forschungsprojekt „CALLIA“

Laufzeit: Juli 2016 – März 2019

CALLIA zielt darauf ab, Erkenntnisse über Technologien und Konzepte zu gewinnen, welche die Kompatibilität von Erneuerbaren Energien im Verteilnetz unterstützen. Das Konsortium besteht aus 13 internationalen Partnern aus Industrie und Wissenschaft. CALLIAs Ziele leiten sich aus den Aufgaben der europäischen “Energy 2020 strategy: towards a low carbon economy” ab, indem die Integration von Erneuerbaren Energien durch eine flexiblere, direkte Abstimmung zwischen den Verteilnetzen verbessert wird. Lösungen (Modelle, Kommunikationsmöglichkeiten und Werkzeuge) für eine vertikale intra-VNB-Energiehandels-Wertschöpfungskette „Prosument – Aggregator – Verteilnetzbetreiber (VNB)“ werden für den inter-VNB-Leistungshandel ausgearbeitet.



Die Hauptinteressen des IEH im Rahmen des Projektes liegen auf der Untersuchung des Einsatzes flexibler Ressourcen in Verteilnetzen für die EE-Integration sowie auf der Echtzeit-Simulation einer agentenbasierten Steuerungsarchitektur mit Hilfe eines Hardware-in-the-Loop-Konzepts (HiL). Die Untersuchung konzentriert sich auf die Bewertung des Einsatzes von Flexibilitäten (EE, Speichersysteme und steuerbare Lasten) zur Aufrechterhaltung der lokalen Bilanzierung eines Netzgebietes. Bei einem Ungleichgewicht soll auch der Inter-VNB- oder Intra-VNB-Energieaustausch ermöglicht werden.

Im Rahmen dieses Projekts wurden am IEH Methoden zur Aggregation von Flexibilitäten in Verteilnetzen untersucht. Ziel dieser Methoden ist die Potenzialanalyse der Nutzung von Flexibilitäten als Systemdienstleistungen, wie z. B. Engpassmanagement oder Spannungshaltung. In der HiL-basierten Simulationsumgebung werden Netzmodelle der beteiligten Verteilnetzbetreiber mit lokalen Flexibilitäten modelliert. Das Netzmodell wird mit einer multiagentenbasierten Steuerarchitektur gekoppelt, um zu untersuchen, wie die entwickelten Marktkonzepte die elektrischen Netze beeinflussen können.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Konsortialtreffen in Heidelberg

■ Research Project “CALLIA“

Period: July 2016 – March 2019

CALLIA is an international project which aims to provide insight into technologies and concepts to support the integration of RES. Thirteen industrial and academic partners from Germany, Belgium, Austria and Turkey compose the consortium. The objectives of CALLIA are derived from the goals of the European “Energy 2020 strategy: towards a low carbon economy” by improving the potentials of RES integration by using inter-DSO flexibility potentials. Solutions (models, communications methods and tools) for vertical intra-DSO energy trading chain (prosumer – aggregator – DSO) will be enhanced for the inter-DSO power trading.

The main interests of IEH in the project are the study of the potential use of flexible resources within distribution grids for RES integration and the real-time simulation of an agent-based control architecture through Hardware-in-the-Loop (HiL) concept. The study focuses on the evaluation of the use of flexibilities (RES, storage systems and controllable loads) to maintain local balance within a grid region and the inter-DSO or intra-DSO power exchange in case of imbalances.

During the project, a method to aggregate the flexibility provision of a distribution grid at the TSO-DSO interconnection point was developed, by means of a linear OPF problem. This algorithm allows to assess the flexibility provision of radial grids with large amounts of nodes in reduced time. The method is used to analyze the potential use of flexibilities as non-frequency ancillary services, i.e. congestion management or voltage control. Additionally, using a HiL-based simulation environment, network models of the involved DSOs have been modeled and coupled with corresponding flexibility providing units (FPU). Using this setup, the CALLIA market framework and its multiagent-based architecture is tested. This framework was designed among the project partners to control physical FPUs, in order to investigate how the concept of a flexibility market interacts with the power grid in real-time.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag



Visiting the field test location within the premises of the Stadtwerke Heidelberg

- **Forschungsprojekt „NEOS“:
Netzausbaureduzierung durch Speichereinsatz im
Verteilnetz am Beispiel Netzverstärkung Ostalbkreis**

Laufzeit: September 2016 – Juni 2019

Die Auslastung des Stromnetzes wird heute nicht mehr allein durch die angeschlossene Last bestimmt, sondern zunehmend durch die Einspeisungen aus erneuerbaren Energien, die vorwiegend im Verteil- und Hochspannungsnetz stattfinden.



Da der Bezug und die Einspeisung der elektrischen Leistung im Netz von vielen Parametern wie z. B. dem Wetter, der installierten Leistung, dem Anlagentyp usw. abhängt, ist die Auslastung des Netzes zeitvariabel und schlecht vorhersehbar. Es kommen deshalb immer häufiger Auslastungsspitzen vor, die schon heute kritisch für den Netzbetrieb sind. Eine Lösung zur Entlastung des Netzes bzw. der betroffenen Leitungen ist der Netzausbau. Dadurch wird die Netzimpedanz reduziert und die Belastbarkeit des Netzes erhöht. Diese Alternative ist allerdings kostenintensiv und genehmigungsrechtlich aufwändig. Im Projekt NEOS wird der Einsatz von Speichertechnologien als Alternative zum konventionellen Netzausbau untersucht.

Dazu wird das Modell einer Großspeichereinrichtung entwickelt und in einer Simulationsumgebung für das bestehende 110 kV-Netz des Ostalbkreises implementiert. Anschließend werden Optimierungsalgorithmen zur Dimensionierung, zur Positionierung sowie zum Betrieb der Speicher entwickelt. Anhand von zeitreihenbasierten Lastflussberechnungen kann somit der Beitrag von Speichertechnologien zur Netzentlastung zunächst technisch ausgewertet werden.

In einem nächsten Schritt wird der Einsatz von Speichertechnologien im unterlagerten Mittelspannungsnetz untersucht und daraus mögliche Synergieeffekte zwischen Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz abgeleitet. Darüber hinaus wird die Wirtschaftlichkeit der bereits untersuchten Einsätze von Speichertechnologien in einem weiteren Schritt überprüft werden. Abschließend werden eine Planungsgrundlage für den Speichereinsatz zur Netzentlastung entwickelt sowie die Anforderungen für einen wirtschaftlichen Betrieb mittels Sensitivitätsanalyse untersucht.

Das Vorhaben wird im Rahmen des Förderprogramms „Förderung von Demonstrationsprojekten Smart Grids und Speicher Baden-Württemberg“ beim Projektträger Karlsruhe Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) am Karlsruher Institut für Technologie mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

- **Research Project „NEOS”:
Reduction of Grid Expansion in the Distribution
Network with Storage Systems using the Example of
the Ostalbkreis Region Network**

Period: September 2016 – June 2019

The power utilization limit of electric grids is no longer defined by the power consumption only, but the power supply into the grid as well, fed by renewable suppliers mainly into the distribution and high voltage networks.

The consumption and supply of power depend on many parameters such as the weather, the installed capacity, the generating unit type etc. Therefore the network utilization is rather variable in time and is error-prone which results in overloading peaks and critical states for the operation of the grid.

A possible solution is to expand the power grid. This alternative is yet both cost-intensive and complicated from a regulatory point of view. In this context, the aim of the NEOS project is to examine the contribution of big storage system technologies to reduce the load on power grids as an alternative to the grid expansion.

In this research project a model of a big storage system will be developed and implemented in a simulation environment of the 110 kV network of the region “Ostalbkreis”. Following this, optimization algorithms will be generated for the dimensioning, positioning and operation of the storage systems. By means of time series based load flow calculations the contribution of the storage systems to reducing the power grid load could be hence technically evaluated.

In a further step it is intended to adapt and scale the developed storage system model to the distribution grid in order to analyze its operation and to evaluate possible synergy effects between distribution and high voltage networks.

Furthermore, it is envisaged to analyze the economic efficiency of the considered different applications of the storage systems. Based on the examinations, a planning guide for a technically and economically efficient usage of storage systems shall be derived. Also the conditions for an economic operation shall be investigated by sensitivity analysis.



Support by the Research Program “Support of Demonstration Projects Smart grids and Storage Systems Baden-Württemberg” at the Project Management Agency Karlsruhe Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) at the Karlsruhe Institute of Technology with funds of the State of Baden-Württemberg is gratefully acknowledged.

■ **Forschungsprojekt „C/sells“**

Laufzeit: Januar 2017 – Dezember 2020

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 geplanten 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 – December 2020

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 criterions 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 planned 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 „VIPEEER“:
Versorgungsqualität und –sicherheit in der
industriellen Produktion bei Einspeisung aus
Erneuerbaren Energien**

Laufzeit: April 2017 – März 2020

In diesem Forschungsprojekt wird die Spannungs- und Versorgungsqualität in einem industriell genutzten Gebäude detailliert untersucht, und es werden Wege zur Optimierung der Produktion unter Berücksichtigung der Spannungsqualität aufgezeigt.

Dafür wird u.a. das in der Forschungsfabrik ARENA2036 installierte Monitoringsystem mitverwendet.

Folgende Arbeiten und Schwerpunkte sind im Projekt vorgesehen:

- Entwicklung detaillierter mathematischer Modelle zur Analyse von Power Quality (PQ)-Aspekten
- Engmaschige Vermessung eines lokalen Verteilnetzes mit einer PV-gespeisten Industrieanlage
- Entwicklung einer PQ-Zustandsschätzung, mit der im Rahmen der dynamischen und selbstoptimierenden Fertigung eine weitere Führungsgröße für die optimale Produktionssicherheit und –qualität bereit gestellt wird.
- PQ-Monitoring-System für ein Industriegebäude mit Ampelkonzept
- Untersuchung der PQ-Aspekte bei Speisung mit einer Großbatterie im Inselbetrieb



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 „VIPEEER”:
Quality of Service and Security of Electric Power
Supply for an Industrial Production with Volatile
Renewable Energy Sources**

Period: April 2017 – March 2020

In the research factory ARENA2036 of the University of Stuttgart a PQ monitoring system has been installed whose measurement data will be used in the project.

The main tasks are as follows:

- Development of detailed mathematical models that will be used to analyze PQ aspects.
- The PQ parameters of a local distribution grid with PV generation will be measured at many points.
- A PQ state estimator will be developed. This will establish an additional set point for a dynamic and self-optimizing quality of the production.
- Implementation of a PQ monitoring system for an industrial building with a “traffic light concept”.
- Supported by a large battery energy storage the PQ aspects of an islanded industrial network will be investigated.



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 Programme (PTKA-BWP) at the Karlsruhe Institute of Technology with funds of the State of Baden-Württemberg is gratefully acknowledged.

■ **Forschungsprojekt „Interaktiver Smart Grid Demonstrator für das Netzlabor Sonderbuch“**

Laufzeit: Juni 2017 – November 2020

In Spitzenzeiten wird im „Netzlabor Sonderbuch“ bis zu sieben Mal mehr Strom aus PV eingespeist als verbraucht. Diese starken Erzeugungsspitzen können das örtliche Verteilnetz lokal an seine technischen Grenzen bringen. Eine ähnlich hohe Durchdringung an PV ist zukünftig auch in anderen ländlichen Gemeinden zu erwarten, weshalb bereits heute mögliche Lösungen für intelligente Stromnetze der Zukunft untersucht werden.

Ziel des kooperativen Forschungsprojekts zwischen der Netze BW GmbH und dem IEH ist die Entwicklung eines interaktiven Demonstrators zur Überwachung des Netzzustands und zur Optimierung der Integration erneuerbarer Energien. Dabei soll anhand von gemessenen sowie geschätzten Werten der aktuelle Netzzustand transparent dargestellt werden. Darüber hinaus sollen die Potenziale von betrieblichen Flexibilitäten charakterisiert und deren Beitrag zur Netzstabilisierung in der Praxis erprobt werden. Fig. 1 veranschaulicht die Schwerpunkte des Forschungsprojekts.

Zusätzlich soll eine Day-Ahead-Vorhersage der Netzzustände realisiert werden, woraus die Fahrpläne der Flexibilitäten sowie deren optimale Einsatzreihenfolge abgeleitet werden. In Fig. 2 sind die einzelnen Bausteine des Forschungsprojekts sowie deren Verknüpfungen dargestellt.

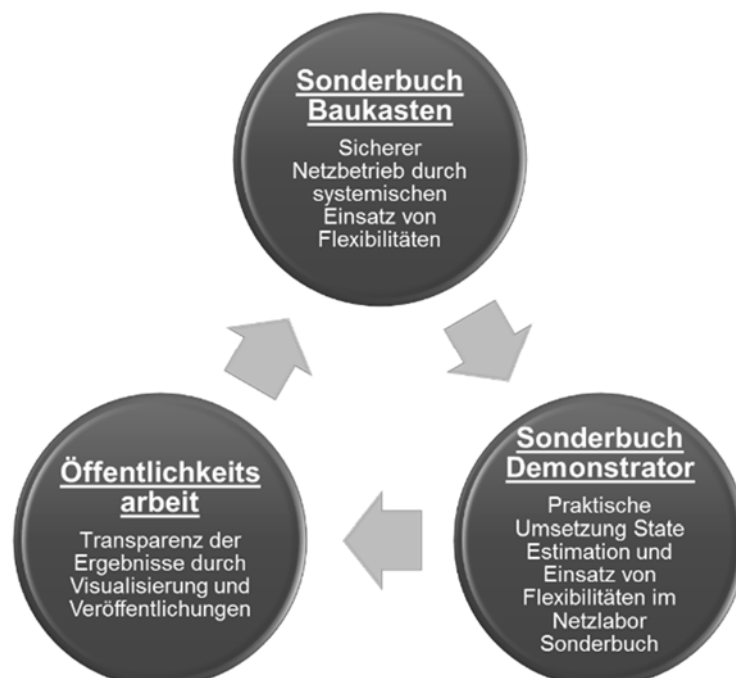


Fig. 1: Schwerpunkte des Forschungsprojekts.
Main focuses of the research project.

■ Research Project „Interactive Smart Grid Demonstrator for the Grid-Lab Sonderbuch“

Period: June 2017 – November 2020

During peak times, up to seven times more power from PV units is fed into the “Netzlabor Sonderbuch” than is being consumed. These significant production peaks can cause local overloading in the distribution network. A similar high penetration of PV can be expected in other rural communities in the future as well. This is the reason why possible solutions for future Smart Grids are being researched today.

The aim of the cooperative research project between the Netze BW GmbH and the IEH is the development of an interactive demonstrator, to monitor the power systems current state and to optimize the integration of renewable energies. The current state of the system has to be displayed transparently, based on measured and estimated values. In addition, the potential of operational flexibilities should be characterized and the contribution to the stabilization of the system has to be evaluated in this field test. Fig. 1 illustrates the key aspects of the research project.

In addition, a day-ahead prediction of the system states should be realized, from which the schedules of the flexibilities and the order of their optimal usage may be derived. Fig. 2 shows the blocks of the research project and the interconnection.

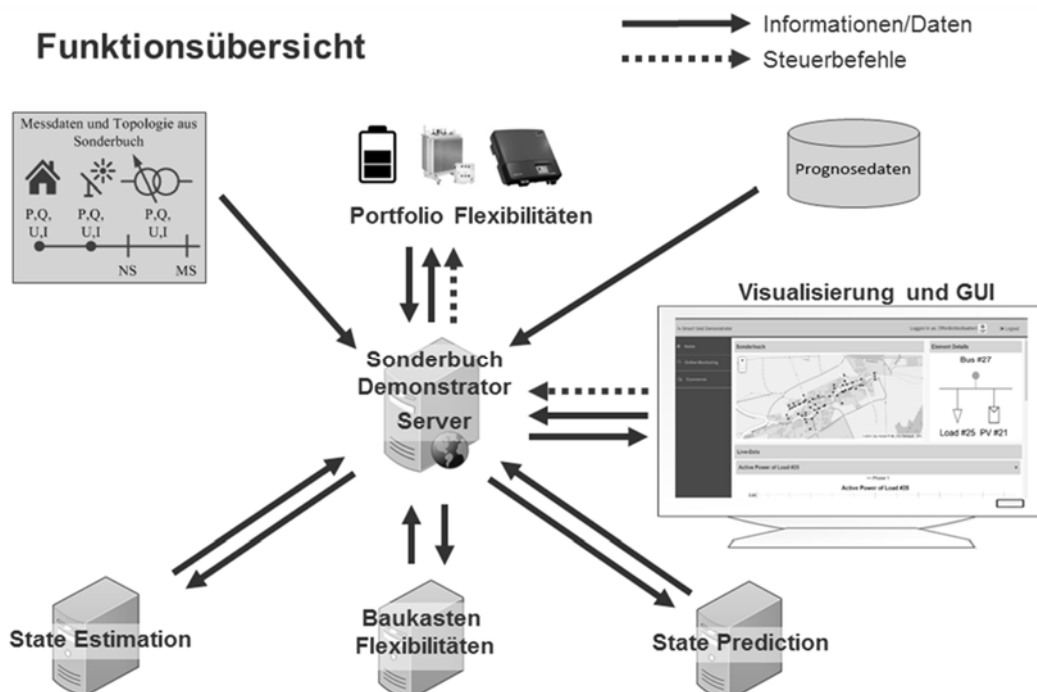


Fig. 2: Projektbausteine und deren Kopplung.
Project blocks and their coupling.

- **Forschungsprojekt „FELSeN“:
Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur
Erbringung von Systemdienstleistungen in
elektrischen Netzen**

Laufzeit: Juli 2018 – Dezember 2020

Bei Logistikzentren kann man davon ausgehen, dass einzelne Prozesse, wie z.B. das Laden elektrischer Gabelstapler, zeitlich verschoben werden können und somit ein Potential zur Flexibilisierung vorhanden ist. Um das Potential zu quantifizieren sind jedoch detaillierte

Messungen der elektrischen Verbräuche der einzelnen Prozesse, wie sie im Projekt FELSeN vorgesehen sind, notwendig. Ziel des Projektes ist, die Flexibilitätspotenziale von Logistikzentren zu erschließen und einen netzdienlichen Einsatz dieser Flexibilität zu ermöglichen. FELSeN ist eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart (IFT), dem IEH, dem Verteilnetzbetreiber Netze BW GmbH und der Häfele GmbH & Co KG.



Im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie wird der Einfluss einer Elektrifizierung der Personen- und Lastkraftfahrzeuge auf das Flexibilitätspotenzial eines Logistikzentrums untersucht. Diese Untersuchung wird zwar am Beispiel des Logistikzentrums der Firma Häfele GmbH & Co KG durchgeführt, jedoch sind insbesondere die Ergebnisse der Pkw übertragbar auf sämtliche Produktionsstandorte, an denen die Mitarbeiter die Arbeitsstelle mit dem Auto erreichen. Besonders das Ableiten von Anschlussrichtlinien für die Einbindung einer Ladeinfrastruktur in einem intelligenten Energiemanagementsystem stellt einen großen Mehrwert für viele Firmen in Baden-



Württemberg dar. Daher fand in diesem Jahr bereits ein Workshop zur Vorstellung der Zwischenergebnisse des Projekts statt. FELSeN hilft, die Netzintegration der Elektromobilität in Baden-Württemberg zu verbessern und damit die Akzeptanz dieser Technologie zu erhöhen.

Logistikzentrum der Firma Häfele in Naaold



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 “FELSeN”:
Flexibility Potential of Logistics Centers to provide
Ancillary Services in Power Grids**

Period: July 2018 – December 2020

Nowadays, in the case of logistics centers, it can be assumed that individual processes, e.g. the charging of electric forklifts, can be postponed and thus a potential for flexibility can be opened. However, in order to quantify this potential, detailed measurements of the electrical

consumption of the individual processes are necessary. Obtaining these measurements of the individual consumptions within the logistic center are a key component within the FELSeN project. One aim of the project is to tap into the flexibility potential of logistics centers and to enable the use of these flexibilities to provide ancillary services to the distribution grid. FELSeN is a cooperation between the Institute for Materials Handling and Logistics of the University of Stuttgart (IFT), the IEH, the distribution system operator Netze BW GmbH and the Häfele GmbH & Co KG.



As part of this feasibility study, the impact of the electrification of passenger cars and heavy goods vehicles on the flexibility potential of a logistics center will be examined. Although this study is based on the example of the logistics center of Häfele GmbH & Co KG located in the city of Nagold, the results should be transferable to other types of production sites. This applies particularly to the results of passenger cars, when employees reach their workplace by car. In particular, the derivation of interconnection guidelines for the integration of charging infrastructure to an intelligent energy management system represents a great benefit for many companies in Baden-Württemberg. Therefore, a workshop to present the interim results of the project has already taken place this year. The project FELSeN helps to improve the grid integration of electric vehicles in Baden-Württemberg and should help increase the acceptance of this technology.



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:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **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

■ **Multiagenten basierter Betrieb eines Verteilnetzes bei einer Störung im Verbundsystem**

M. Sc. Manswet Banka

Die herkömmlichen Netzwiederaufbaustrategien, welche heutzutage zur Verfügung stehen, nutzen das Potential der dezentralen Erzeugungsanlagen kaum. Grund hierfür ist, dass ihre Primärenergie nicht voll vorsehbar ist und zusätzlich der dezentrale Charakter Schwierigkeiten bei der Koordination verursacht. Nach den herkömmlichen Strategien werden die Verteilnetze als Lasten an Knoten mit vorhandener Spannung, die von einem großen Kraftwerk kommt, angeschlossen. Eine solche Annahme ist gültig, wenn die niedrigeren Spannungsebenen stark lastausgeprägt sind. Hiervon kann jedoch in Zukunft nicht immer ausgegangen werden, weswegen neue Strategien ausgearbeitet werden müssen, um Verteilnetze als aktive Netze in die Strategien miteinzubeziehen. Die Strategien werden als „build-together“ bezeichnet.

Die „build-together“-Strategien basieren auf der Aufteilung des Systems in Teilnetze, von denen manche weiterhin im stabilen Betrieb bleiben können. Diese aktiven Teilnetze können die Verbraucher weiterhin versorgen. Sobald der Fehler im übergeordneten System beseitigt ist, können die Teilnetze den Prozess des Netzwiederaufbaus aktiv unterstützen und dadurch auch die Nichtversorgungsdauer verkürzen. Allerdings ist eine geeignete Struktur des Netzes eine zwingende Voraussetzung hierfür.

Einerseits muss das Netz autark fähig sein, andererseits muss entsprechend gesteuert werden können. Die Autarkie kommt schon heute zeitweise vor. Sie kann durch dezentrale Anlagen, wie Windkraft-, Photovoltaik-, Biogasanlagen oder durch Batteriespeicher umgesetzt werden. Vor allem die zwei ersten Technologien sind verbreitet, wobei in Norddeutschland die Windkraftanlagen und im Süden die PV-Anlagen dominieren. Die PV-Anlagen sind zum großen Teil auf Niederspannungsebene installiert, was praktisch die direkte Ansteuerung verhindert, dennoch lässt sich der Einfluss der Anlagen auf das dynamische Verhalten des Systems nicht vernachlässigen.

Aufgrund der hohen Anzahl zu steuernder Anlagen in einem solchen Netz ist die manuelle Koordination in Echtzeit nicht möglich. Deshalb wurden für solche Anwendungen die multiagenten-basierte Lösungen vorgeschlagen, die für eine Steuerung von dezentralen Systemen sehr gut geeignet sind. Die Agenten können ihre Ziele je nach Netzzustand ändern und so bei ungestörtem Betrieb eigene Ziele verarbeiten, z.B. die Optimierung des eigenen Profits. Im Netzstörfall können sie kooperieren, um ein stabiles aktives Teilnetz zu bilden und zu betreiben (siehe Fig. 1).

■ **Multi-agent based Operation of a Distribution Grid during Disturbances in the Bulk System**

M. Sc. Manswet Banka

The traditional strategies for the restoration of electrical power system which are applied nowadays do not use renewable energy sources almost at all because the primary energy is not fully reliable and additionally their dispersed character is challenging for the centralized coordination. During the restoration in accordance with these strategies the parts of distribution grids are treated as loads and are coupled to the nodes which are already energized by big power plants.

Such an assumption is valid only if the lower voltage levels are load dominated, which will not always be the case in the future. Therefore new strategies, which are able to take advantage of the active distributed grids, are being developed.

The strategies, called “build-together”, are based on the division of the system into smaller grids, from which at least some can operate as a stable island. These active islands can supply the customers and when the cause of the division is removed they can actively support the system restoration so that the duration of this process will be shortened. To do this the grid must be able to cover own demand and the control system needs to be capable of handling island mode.

Already today there are more and more periods, when the local generation exceeds the local consumption and it is mostly thanks to wind turbines, photovoltaic panels, biogas plants or storage systems.

A considerable share of the photovoltaic capacity is installed at the lowest voltage level, which makes it practically impossible for direct control but nevertheless its influence on the grid dynamic cannot be neglected.

Due to the multitude of the devices which are to be controlled a manual control in real-time is not feasible and therefore the multi-agent based systems are proposed. The agents can change their goals according to the current circumstances in the grid, so that they can approach their individual goals during the normal operation and change the mode in case of a fault in the higher level grid in order to build and operate a stable island (see Fig. 1).

In such a case the coordinator-agent informs the other agents about this fact and from that moment they cooperate in order to achieve a common goal which is the stable operation of the island despite the volatility coming from the lower grid levels.

Wenn eine Störung im übergeordneten Netz auftritt, informiert der Koordinator-Agent die anderen Agenten, und ab diesem Moment arbeiten die Anlagen zusammen, um den Betrieb durch das Abfangen der Volatilitäten der einzelnen Niederspannungsabgänge zu stabilisieren, damit die Endverbraucher nicht abgeschaltet werden müssen. Der Koordinator führt den Prozess der Synchronisierung mit den anderen Netzen durch, sobald der Fehler behoben wurde. Je nach Befehl des Systembetreibers und den verfügbaren Flexibilitäten im Netz passt er den Lastfluss über die Kupplungsschalter an.

Die Verbindung multi-agenten basierter Steuerungsarchitekturen mit flexiblen DEA, wie Biogas-, Windkraftanlagen, usw. ermöglicht die automatisierte Funktionsweise und Synchronisation mit höheren Spannungsebenen während des Netzwiederaufbaus. Somit wird die Dauer des Prozesses verkürzt und die Zuverlässigkeit der Versorgung erhöht.

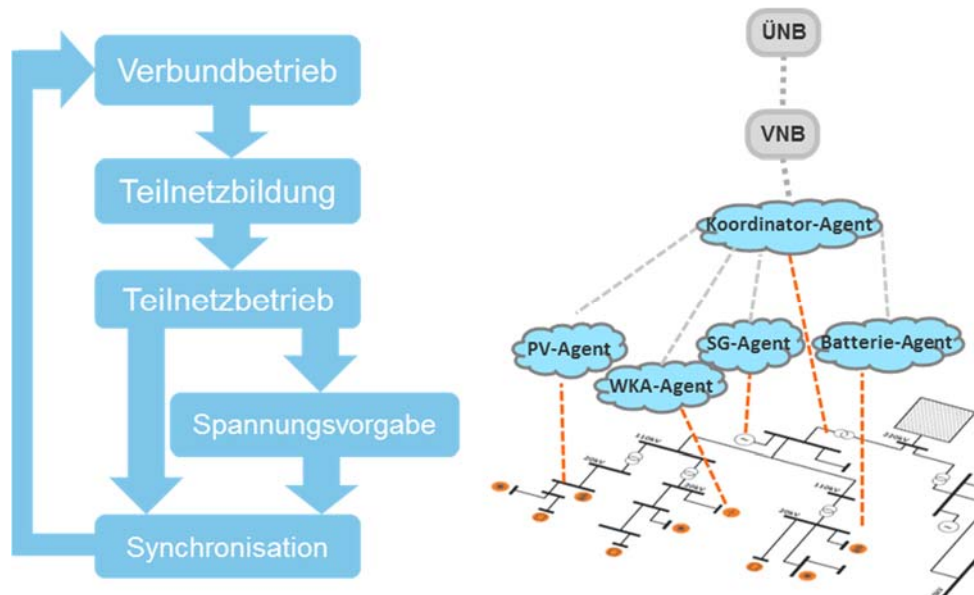


Fig. 1: Das allgemeine Zustandsdiagramm des Mittelspannungsnetzes (links) und die Struktur des analysierten Systems (rechts).
The state diagram of the medium voltage power grid (left) and the structure of the analyzed system (right).

If the fault is cleared the coordinator is responsible for the process of the synchronization with other islands or higher level grids and for delivering required amount of power through the HV/MV transformer according to the system operator's requirements and available flexibilities.

The combination of the multi-agent control architecture and the flexible DERs, like biogas plant, wind turbine, etc., allows an automated operation of islanded grids and the synchronization with higher voltage grids during the system restoration. It shortens the process and enhances the reliability of the supply.

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

M. Sc. Matthias Buchner

In den letzten Jahren sahen sich die Verteilersysteme mit einer zunehmenden Durchdringung von wechselrichterbasierten, dezentralen Erzeugern und Speichern konfrontiert, was den Betrieb von Teilen des Systems als inselnetzfähige Microgrids (siehe Fig. 1 links) ermöglicht hat. Durch die zum großen Teil auf Erneuerbaren Energien basierte, verbrauchsnahe Erzeugung in Microgrids und die intelligente Integration von Flexibilitäten durch ein Energiemanagement-System werden aktiv die CO₂-Emissionen reduziert und die Betriebskosten gesenkt. Durch den Betrieb von Microgrids als eigenständige Einheiten kann die Versorgungsqualität für die Verbraucher verbessert und die Versorgungszuverlässigkeit, durch die Fähigkeit des Inselnetzbetriebs im Fehlerfall, erhöht werden [1]. Dieser Übergang vom Verbund in den Inselbetrieb und umgekehrt ist ein kritischer Punkt beim Betrieb von Microgrids [2]. Das Verhalten von Wechselrichter sollte zur Untersuchung dieser Prozesse möglichst realitätsgetreu nachgebildet werden, damit alle wichtigen Aspekte abgebildet werden können [3]. Um dies zu erreichen, werden nach dem Grid Code modellierte Komponenten [4] und ein realer PV-Wechselrichter im Power-Hardware-in-the-Loop-Betrieb (PHiL) verwendet [5].

Im Allgemeinen sollten bei Simulationen die Zeitschritte kleiner als 5–10% der kleinsten Zeitkonstante des Systems sein [6]. Dies führt dazu, dass Microgrids auf Grund der wechselrichterbasierten Erzeuger und sehr kurzen Leitungen mit Zeitschritten von $\leq 10\mu\text{s}$ simuliert werden müssen, um einen stabilen Betrieb gewährleisten zu können. Um dies zu erreichen, wurde eine Methode entwickelt, welche die Erzeuger und Verbraucher des Microgrid-Modells aggregiert und die Berechnungen auf mehrere Rechenkerne aufteilt (siehe Fig. 1).

- **Islanding and Resynchronization of Inverter-Based Microgrids in Power Hardware-in-the-Loop Operation**

M. Sc. Matthias Buchner

In recent years distribution systems have been confronted with an increasing penetration of inverter-based, distributed generators and storage which has enabled the operation of parts of the system as islanding-capable microgrids (see Fig. 1, left). The generation of electricity in Microgrids which is largely based on renewable energies and close to consumption and the intelligent integration of flexibilities through an energy management system actively reduces CO₂ emissions as well as operating costs. By operating Microgrids as stand-alone units, the supply quality for the consumers can be improved and the supply reliability can be increased through the ability of stand-alone operation in the event of a fault [1]. This transition from interconnected to isolated operation and vice versa is a critical point in the operation of Microgrids [2]. To investigate these processes, the behaviour of inverters should be reproduced as realistically as possible so that all important aspects can be covered [3]. To achieve this, components modeled according to the grid code [4] and a real PV inverter in power hardware-in-the-loop operation (PHIL) are used [5].

In general, time steps in simulations should be smaller than 5-10% of the smallest time constant of the system [6]. This means that due to the inverter-based generators and very short lines, Microgrids must be simulated by time steps $\leq 10\mu\text{s}$ to ensure stable operation. In order to achieve this, a method was developed which aggregates the generators and consumers of the Microgrid model and divides the calculations among several calculation cores (see Fig. 1).

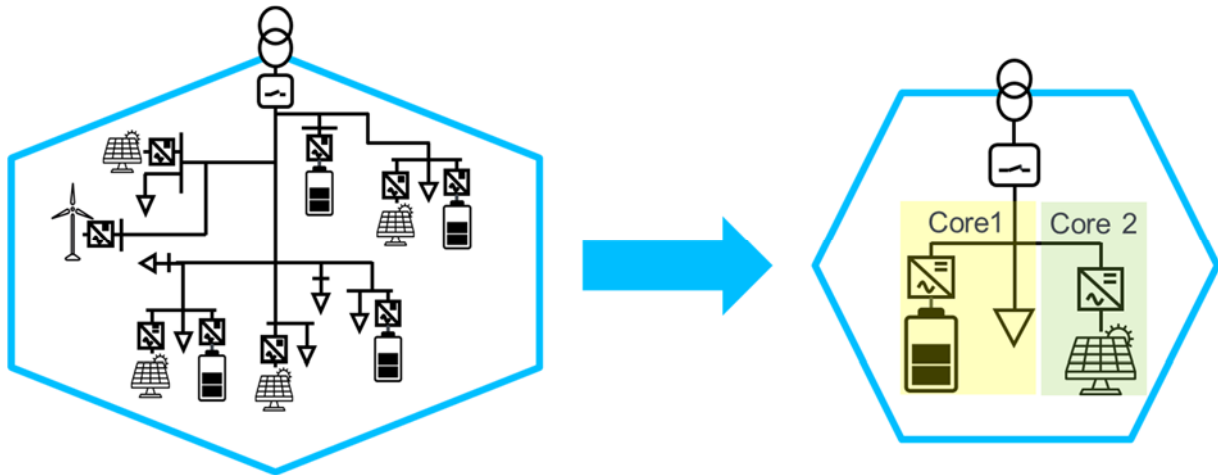


Fig. 1: Aggregation des Microgrid Modells und Aufteilung der Rechenleistung auf mehrere Rechenkerne.
Aggregation of the microgrid model and distribution of the computing power among several computing cores.

Zur Sicherstellung eines stabilen Betriebs des Microgrids im Verbund- und Inselbetrieb sowie der Regelung eines reibungslosen Übergangs vom Verbundbetrieb in den Inselnetzbetrieb und einer sanften Resynchronisation des Microgrids mit dem Verbundnetz wurde eine mehrstufige Microgrid-Regelung (siehe Fig. 2) umgesetzt.

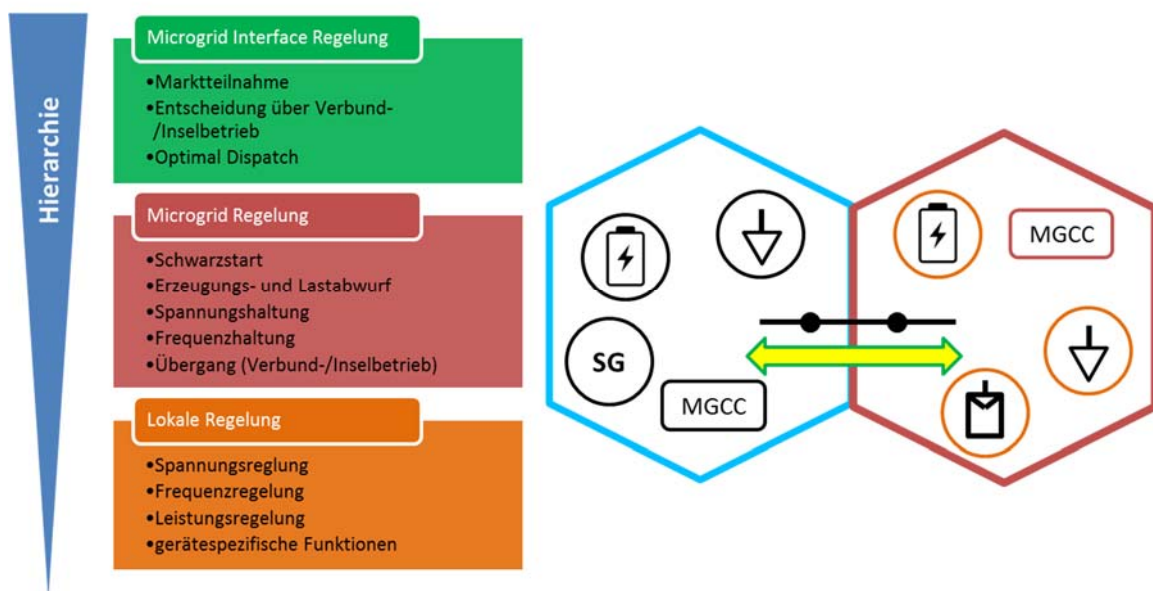


Fig. 2: Hierarchie der mehrstufigen Microgrid-Regelung.
Hierarchy of multi-level microgrid control.

In order to ensure stable operation of the microgrid in grid-connected and island operation, to regulate a smooth transition from grid-connected operation to island operation and to ensure smooth resynchronization of the microgrid with the grid, a multi-stage microgrid control system (see Fig. 2) was implemented.

The functionality of the developed control concept was tested and simulated on a real-time simulator.

In order to create simulation conditions as realistic as possible, real components were integrated into the simulation scenario with the help of an amplifier. PHIL simulation confirmed the functional capability of the control concept not only simulatively but also in combination with real components (see Fig. 3).

Fig. 4 shows the controlled islanding and resynchronization process of a microgrid. To ensure smooth islanding, the exchange power with the interconnected system must be reduced before the coupling switch is opened. If this process was successful, the Microgrid Central Controller (MGCC) would open the coupling switch and would maintain the frequency and voltage. The MGCC also takes care of frequency, phase and voltage matching between Microgrid and the grid prior to resynchronization.

- [1] M. A. Hossain, H. R. Pota, M. J. Hossain, and F. Blaabjerg, "Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 109, October 2019, pp. 160–186.
- [2] T. L. Vandoorn, B. Meersman, De Kooning, and L. Vandevelde, "Transition From Islanded to Grid-Connected Mode of Microgrids With Voltage-Based Droop Control," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, No. 3, pp. 2545–2553, Aug. 2013.
- [3] J. C. Martins, *Generation for Power System Dynamic Studies Joint Working Group May 2018 Modelling of Inverter- Based Generation for Power System Dynamic Studies*, May. 2018.
- [4] M. Buchner, S. Eberlein, and K. Rudion, "Design of an inverter model according to the network code requirements for low-voltage grids," September 2019.
- [5] J. Belanger, P. Venne, and J.-N. Paquin, *The what, where and why of real-time simulation*. January 2010.
- [6] J. A. Martinez-Velasco, *Transient Analysis of Power Systems: Solution Techniques, Tools and Applications*. January 2015.

Um die Funktionsfähigkeit des entwickelten Regelungskonzeptes überprüfen zu können, wurde es auf einem Echtzeitsimulator simuliert.

Zur Schaffung möglichst realitätsgetreuer Simulationsbedingungen wurde mit Hilfe eines Verstärkers reale Komponenten in das Simulationsszenario integriert. Durch die PHIL-Simulation konnte die Funktionstauglichkeit des Regelungskonzeptes nicht nur simulativ, sondern auch in Kombination mit realen Komponenten (siehe Fig. 3) bestätigt werden.

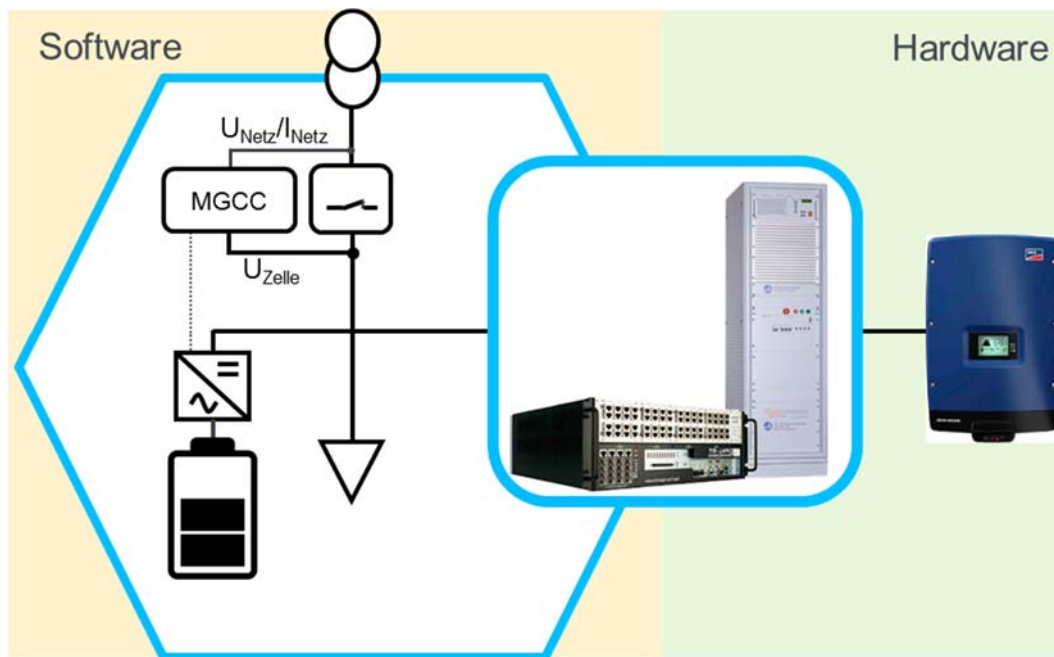


Fig. 3: Schema des PHIL-Setups zur Funktionsprüfung des Regelungskonzeptes.
Schematic of the PHIL setup for functional testing of the control concept.

In Fig. 4 wird der kontrollierte Inselnetzbildungs- und Resynchronisierungsprozess eines Microgrids dargestellt. Zur Sicherstellung einer reibungslosen Inselnetzbildung muss vor der Öffnung des Kuppelschalters die Austauschleistung mit dem Verbundnetz reduziert werden. War dieser Vorgang erfolgreich, öffnet der Microgrid Central Controller (MGCC) den Kuppelschalter und übernimmt die Frequenz- und Spannungshaltung. Der MGCC übernimmt auch die Angleichung von Frequenz, Phase und Spannung zwischen Microgrid und Verbundnetz vor der Resynchronisation.

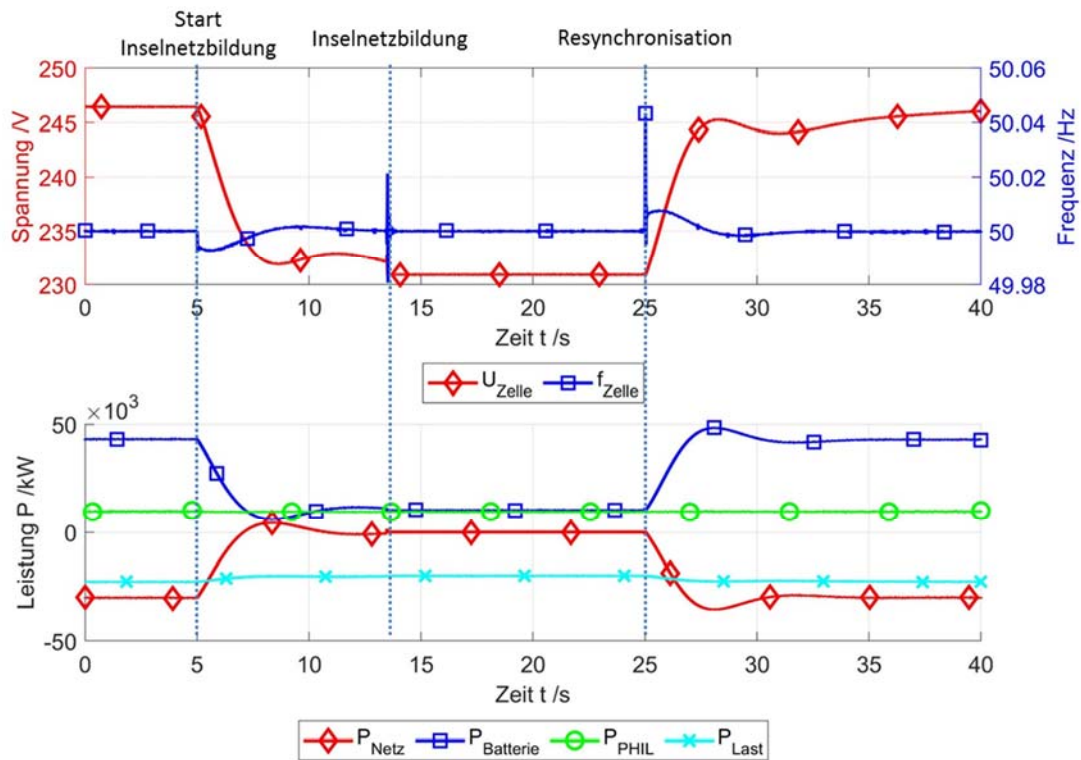


Fig. 4: Kontrollierter Inselnetzbildungs- und Resynchronisierungsprozess eines Microgrids.
Controlled Islanding and Resynchronization Process of a Microgrid.

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

M.Sc. Daniel Contreras

Verteilnetze entwickeln sich aufgrund eines enormen Zuwachses an erneuerbarer Energieerzeugung von ihrem traditionellen passiven Charakter hin zu einem aktiven. Der traditionelle "Fit-and-Forget"-Ansatz wird durch eine aktive Rolle der Netzbetreiber ersetzt, bei dem eine genauere Kenntnis über den Zustand des Netzes notwendig ist. Folglich wird erwartet, dass die Anforderungen an die Bereitstellung von Flexibilitäten zunehmen, um bei betrieblichen Aufgaben im Netz, wie z. B. Engpassmanagement oder Spannungshaltung, helfen zu können. Um diese Flexibilitäten optimal nutzen zu können, muss die Kommunikation und Koordination zwischen Netzbetreibern (insbesondere zwischen Verteilnetzbetreiber (VNB) und Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)) verbessert werden. Jeder der vier ÜNB in Deutschland muss mit mehr als hundert unterschiedlichen VNB zusammenarbeiten, die innerhalb ihrer Regelzonen verbunden sind. Ein solches Szenario erschwert es den Akteuren, ein angemessenes Koordinationsniveau zu erreichen. Unterschiedliche ÜNB-VNB Koordinationsschemas wurden bereits untersucht sowie klare Vorschläge zu Rollen und Zuständigkeiten gemacht. Die Netzbetreiber sind in manchen Fällen nicht bereit oder nicht willig, Details ihres Netzes mit anderen Akteuren zu teilen. Solch eine Situation macht diese Koordinationsschemata meist wenig praktikabel, und neue Alternativen sind erforderlich.

Die Forschung fokussiert sich auf die Weiterentwicklung von Methoden, die es den Netzbetreibern ermöglichen, den Zustand des Netzes zu kommunizieren, ohne ihre Netzwerktopologie veröffentlichen zu müssen. Der betrachtete Ansatz beinhaltet die Aggregation der globalen Flexibilität eines Verteilnetzes an einem einzigen Verknüpfungspunkt zum ÜNB. Es wurde ein lineares Optimierungsproblem definiert, bei dem alle Netzrestriktionen eingehen. Diese Aggregationsmethode berücksichtigt jede einzelne Flexibilität in dem betrachteten Verteilnetz, wie z.B. dezentrale Erzeugungseinheiten, Speichersysteme oder steuerbare Lasten. Während des Aggregationsprozesses werden die Auswirkungen der Flexibilisierung des Netzes über die Netzrestriktionen berücksichtigt. Eine solche Formulierung des Problems erfordert detaillierte Kenntnisse der Netztopologie, was eine zusätzliche Herausforderung darstellt. Eine schematische Darstellung des Aggregationskonzepts ist in Fig. 1 dargestellt.

■ **Flexibility Estimation of Distribution Grids with High Penetration of RES**

M. Sc. Daniel Contreras

The vast increase in the installation of distributed energy resources (DER) in the middle and low voltage power grids, is forcing distribution grid operators (DSO) to adjust the way they operate their grids. The traditional “fit-and-forget” approach is being replaced by a more active role, where grid operators are required to increase the observability of their grids. Most DER is capable of providing certain levels of flexibility towards the grid, either through local control loops or through centralized control. This provision of flexibility is expected to help DSOs to maintain the operation of their grids stable. An optimal allocation of these flexibilities requires improving the communication and coordination between grid operators (especially between DSOs and TSOs). In Germany, each TSO (there are four of them) needs to work together with over a hundred different DSOs within their control zone. Such a scenario increases the difficulty for the participants to achieve legitimate levels of coordination. Different frameworks for TSO-DSO coordination, defining roles and responsibilities, have been proposed, but the fact that grid operators are in many cases reluctant to share details of their grid makes most of these schemes impractical.

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.

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 helps 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. The method was applied to the CIGRE 20kV test-bench network, and the results are shown in Fig. 2, where a comparison with a random sampling approach is provided.

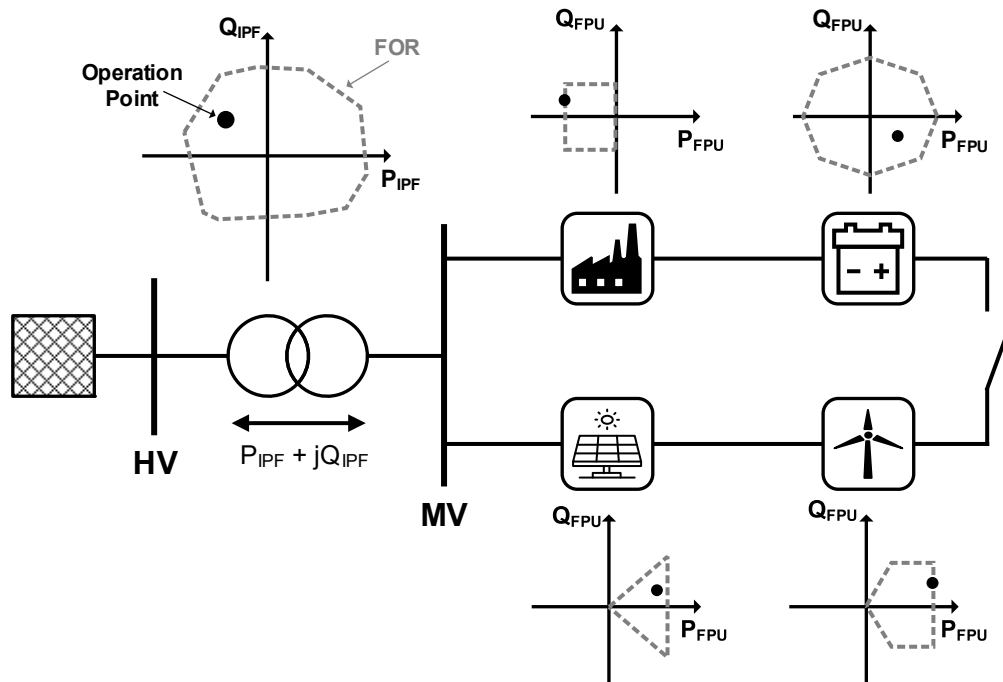


Fig. 1: Schematische Darstellung des Aggregationsalgorithmus.
Schematic representation of the aggregation algorithm.

Die zu erwartenden Ergebnisse sind PQ-Flexibilitätsdiagramme des Netzes, die mögliche Betriebspunkte zeigen, welche 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 des Netzbetriebes 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 zeigt Fig. 2. Die Einbindung von Zeitreihen in das Konzept ist in Fig. 3. dargestellt, in dem 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.

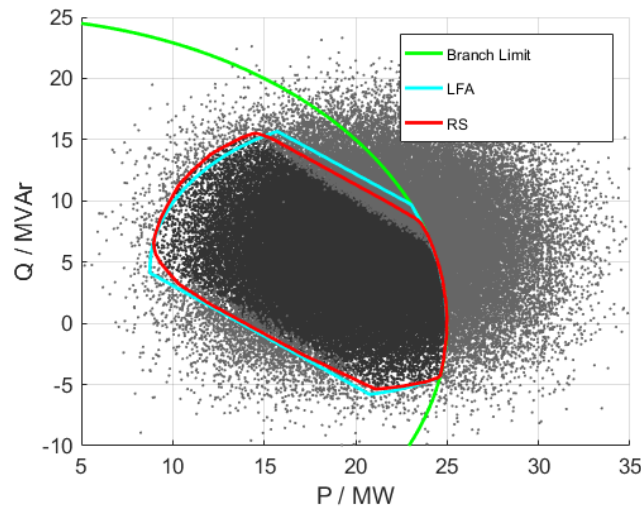


Fig. 2: Vergleich des linearen Aggregationsverfahrens mit dem Stichprobenverfahren.
Comparison of the linear aggregation method with random sampling approach.

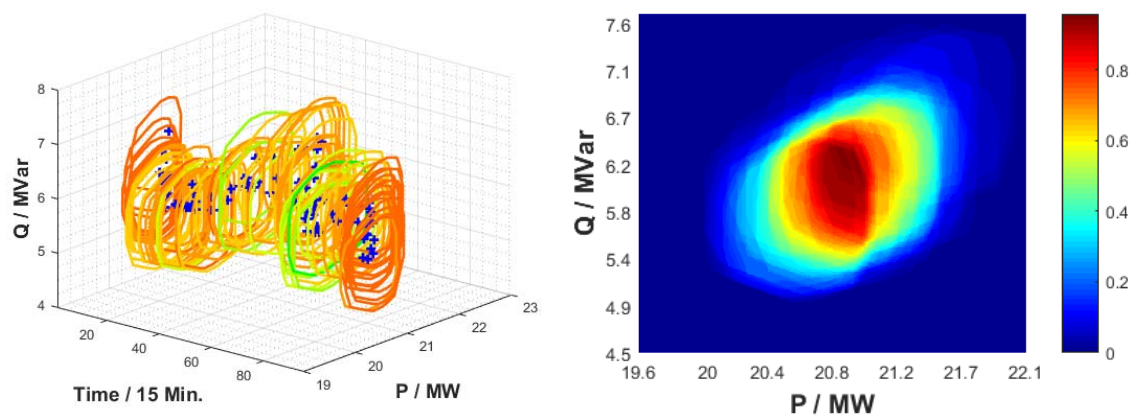


Fig. 3: Aggregierte Flexibilitätsbereiche eines 20 kV Verteilnetzes über einen Tag.
Aggregated flexibility chart of a 20 kV distribution grid over one day.

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.

■ **Innovative Power Quality Algorithmen für erneuerbare und volatile Stromnetze**

M. Sc. Adrian Eisenmann

Das kontinuierliche Wachstum der dezentralen erneuerbaren Energien auf der Verbraucherseite einerseits und im Industriesektor andererseits führt zu einer zunehmenden Abweichung des Netzzustands vom Sollwert, der einen stabilen Netzbetrieb gewährleistet. Darüber hinaus spielt die zunehmende Automatisierung in industriellen Prozessketten sowie der steigende Anteil an Frequenzumrichter basierten Antrieben eine große Rolle für die Power Quality (PQ, deutsch Spannungs- und Stromstabilität) in industriellen Netzen. Um die Auswirkungen auf die PQ an einem Standort zu bewerten, ist ein grundlegendes Verständnis der beobachteten PQ-Probleme erforderlich. Neben der Erkennung und Zuordnung sind neue Ansätze zur Vorhersage anstehender PQ-Ereignisse erforderlich, um die Zukunftsfragen im Zusammenhang mit den Eigenschaften moderner (industrieller) Netzarchitektur zu bewältigen. Eine große Herausforderung bei der PQ-Vorhersage und der Identifizierung von netzgebundenen Problemen besteht in erster Linie darin, einen geeigneten und anwendbaren Algorithmus für die jeweilige Aufgabe zu identifizieren und zweitens einen geeigneten Zeitrahmen für die Verarbeitungszeit und den Vorhersagezeitraum zu definieren.

Daher werden am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) verschiedene maschinelle Lernmethoden untersucht, um PQ-Probleme in industriellen Niederspannungsnetzen zu klassifizieren und vorherzusagen. Dabei werden Messungen von verschiedenen Standorten, wie z.B. einer hochinnovativen Forschungsfabrik auf dem Uni Campus (ARENA2036), einer Industrieanlage im klassischen Bereich der Umformtechnik sowie von Ladestationen für Elektrofahrzeuge berücksichtigt.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen ist die Identifizierung der Korrelation der bestimmenden Parameter der Algorithmen. Sogenannte Hyperparameter, die an die Topologie des Verfahrens geknüpft sind, und ein Feature-Satz, der mit den Eingangsdaten verknüpft ist, bestimmen die Randbedingungen des maschinellen Lernens. Diese Randbedingungen haben einen hohen Einfluss auf das Ergebnis und die Übertragbarkeit der Algorithmen. Gerade die Übertragbarkeit einzelner Algorithmen, die oft problemspezifisch entwickelt und eingesetzt werden, stellt eine Herausforderung zukünftiger Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz dar.

Das grundlegende Verständnis der Abhängigkeiten und der Funktionalität ausgefeilter Algorithmen wird deshalb die unverzichtbare Grundlage sein, um neue Methoden und Wege zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen in einem volatilen und erneuerbaren Energiesektor zu schaffen.

■ **Innovative Power Quality Algorithms for Renewable and Volatile Electricity Grids**

M. Sc. Adrian Eisenmann

The continuous growth of decentralized renewable energies on the consumer side on the one hand and in the industrial sector on the other is leading to an increasing deviation of the grid condition from the target state, which ensures a stable grid operation. In addition, increasing automation in industrial process chains and the increasing share of frequency inverter-based drives play a major role in power quality (PQ) in industrial networks. A fundamental understanding of the observed PQ problems is required to assess their impact on the PQ. In addition to detection and mapping, new approaches for predicting upcoming PQ events are needed to address future issues related to the properties of modern (industrial) network architecture. A major challenge in predicting PQ and identifying network-related problems is in the first place to identify an appropriate and applicable algorithm for the specified task and secondly to define an appropriate time interval for processing time and the prediction window.

Therefore, the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) is investigating different machine learning methods to classify and predict PQ problems in industrial low-voltage networks. Measurements from different locations, e.g. a highly innovative research factory on the university campus (ARENA2036), an industrial plant in the classical field of mechanical engineering and charging stations for electric vehicles will be considered.

One focus of the investigations is the identification of the correlation for the determining parameters of the algorithms. So-called hyperparameters, which are linked to the topology of the process and a feature set, linked to the input data, determine the boundary conditions of machine learning. These boundary conditions have a high influence on the result and the transferability of the algorithms. Especially the transferability of individual algorithms, which are often developed and used problem-specifically, is a challenge for future developments in the field of artificial intelligence.

The basic understanding of the dependencies and functionality of sophisticated algorithms will, therefore, be the indispensable basis to find new methods and ways to cope with future challenges in a volatile and renewable energy sector.

■ **Kurzzeitlastprognose für einzelne Verbraucher auf Basis von Markov-Ketten**

M. Sc. Heiner Früh

Neuartige Smart-Grid-Anwendungen in Niederspannungsnetzen erfordern es, nicht nur aggregierte Lastprofile, sondern auch individuelle, verbraucherspezifische Profile in hoher zeitlicher Auflösung zu prognostizieren. Diese Lastprofile sind viel verrauschter und auch volatiler als die hoch aggregierten Lastkurven, die in Übertragungssystemen für Lastflussberechnungen und Vorhersagen verwendet werden. Prognosemodelle, die typischerweise in Hoch- und Höchstspannungsnetzen eingesetzt werden, sind daher nicht geeignet, um individuelle Verbraucherprofile genau vorherzusagen. Lastprofile einzelner Verbraucher zeigen für kurze Zeiträume große Leistungsspitzen, in der restlichen Zeit aber einen niedrigen Verbrauch. Aufgrund des stochastischen Charakters dieser Leistungsspitzen ist die kurzfristige Lastprognose (STLF) für einzelne Haushalte eine Herausforderung. Wiederkehrende Ereignisse und Lastmuster können jedoch durch die Analyse historischer Daten vorhergesagt werden.

Ziel von STLF ist es in diesem Zusammenhang, repräsentative, hochaufgelöste Lastprofile für jeden Haushalt in einem Niederspannungsnetz zu prognostizieren, um (probabilistische) Systemanalysen, wie z.B. Zustandsvorhersagen, durchführen zu können. Die vorhergesagten Profile sollten die gleichen Eigenschaften wie die realen Daten aufweisen, vor allem die Anzahl der Leistungsspitzen und der Zeitpunkt ihres Auftretens sollten innerhalb einer angemessenen Fehlerspanne übereinstimmen. Darüber hinaus sollten die kumulierten Vorhersagen aller Haushalte innerhalb desselben Niederspannungsnetzes mindestens der Vorhersagegenauigkeit einer naiven Vorhersage entsprechen, die hier durch ein skaliertes Standardlastprofil beschrieben wird.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde ein Prognosemodell auf Basis von Markov-Ketten entwickelt. Es verwendet hochaufgelöste Smart-Meter-Messungen als Trainingsdaten. Das Modell ist für ein kontinuierliches Training mit individuellen Smart-Meter-Daten konzipiert. Der Hauptvorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass sich ein mit synthetischen Daten vortrainiertes Modell im Laufe der Zeit an das verbraucherspezifische Verhalten eines Haushalts oder einer Gruppe ähnlicher Haushalte anpasst und somit seine Vorhersagegenauigkeit erhöht. Es kann ohne Messungen aus dem Feld angewendet werden, jedoch auf Kosten einer stark reduzierten Genauigkeit.

Zur Beurteilung der Prognosegenauigkeit wird der absolute prozentuale Fehler (MAPE) verwendet. Dieser wird in Gleichung (1) beschrieben, wobei R_t die aufgezeichnete und P_t die vorhergesagte Leistungsaufnahme zum Zeitpunkt t ist.

■ Short Term Load Forecasting for Individual Consumers based on Markov Chains

M. Sc. Heiner Früh

The continuing increase of distributed generation as well as emerging smart-grid applications in low-voltage systems generate a need to forecast not only aggregated load profiles, but individual and consumer specific profiles in a high temporal resolution. These load profiles are a lot noisier and also more volatile than the highly aggregated load curves used in transmission systems for load flow calculations and predictions. Forecasting models typically used in high-voltage and extra-high-voltage systems are therefore ill suited to predict individual consumer profiles accurately. Load profiles of individual consumers show large power spikes for short periods of time with a low base consumption during the rest of the time. Due to the stochastic nature of these power spikes short-term load forecasting (STLF) for individual households is challenging. However, reoccurring events and load patterns can be predicted by analyzing historical data.

The goal of STLF in this context is to forecast representative, high resolution load profiles for each household in a low-voltage network in order to perform (probabilistic) system analysis - e.g. state prediction. The forecasted profiles should have the same characteristics as the real data, mainly the amount of power spikes and the time of their occurrence should match within a reasonable error margin. Furthermore, the accumulated predictions of all households within the same low-voltage network should at least match the predictive accuracy of a naive prediction, described here by a scaled standard load profile.

In order to achieve these goals, a forecasting model based on Markov chains was developed. It utilizes high resolution smart-meter measurements as training data. The model is designed for continuous training with individual smart-meter data. The major benefit of this approach is that over time a model pre-trained with synthetic data will adjust to the consumer specific behavior of one household or a cluster of similar households and ,therefore, increase its predictive accuracy. The model is of limited complexity and thus easy to use. At the same time the model is universally applicable because of its pre-training. It can be applied without any measurements from the field but at the cost of severely reduced accuracy.

In order to evaluate the forecasting accuracy, the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is used. It is described in equation (1), where R_t is the recorded and P_t the predicted power consumption at the time t .

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{R_t - P_t}{Z_t} \right| \quad \text{with} \quad Z_t = \begin{cases} P_t, & \text{if } R_t = 0 \\ R_t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Um das STLF-Modell mit einer naiven Vorhersage zu vergleichen, wird der Ungleichheitskoeffizient U_2 von Theil verwendet. Dieser ist in Gleichung (2) definiert, wobei R_t der aufgezeichnete, P_t der vorhergesagte und N_t der naiv angenommene Lastwert zum Zeitpunkt t ist.

$$U_2 = \sqrt{\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (R_t - P_t)^2}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (R_t - N_t)^2}} \quad (2)$$

Im Falle einer perfekten Vorhersage ist R_t gleich P_t , also $U_2 = 0$. Wenn die Prognose so gut ist wie die naive Vorhersage ist $\sum_{t=1}^T (R_t - P_t)^2$ gleich $\sum_{t=1}^T (R_t - N_t)^2$, was zu $U_2 = 1$ führt. Für $U_2 > 1$ ist die Vorhersagegenauigkeit nicht so gut wie die der naiven Prognose. $U_2 < 1$ zeigt eine bessere Genauigkeit als der naive Ansatz. Um die Verwendung eines STLF-Modells zu rechtfertigen, sollte die Vorhersagegenauigkeit höher sein als die der naiven Prognose. Es hat sich gezeigt, dass sich die Prognosegenauigkeit bei der Vorhersage eines aggregierten Lastprofils mehrerer Haushalte erhöht. Die zeitliche Auflösung der Prognose hat auch einen großen Einfluss auf die Genauigkeit. Höhere zeitliche Auflösungen führen zu deutlich besseren Ergebnissen, da die einzelnen Lastprofile sehr volatil sind. Fig. 1 zeigt die Ergebnisse einer aggregierten Prognose von 20 einzelnen Lastprofilen, die den Leistungsbedarf eines Transformatorabgangs darstellen, mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute. Im Gegensatz zur naiven Vorhersage entspricht die Kurvenform gut den Messwerten. In Fig. 2 sind die zugehörigen Bewertungskriterien aufgeführt. Der Ungleichheitskoeffizient von Theil zeigt eine Verbesserung gegenüber der naiven Prognose, mit $U_2 < 1$ für alle fünf Methoden.

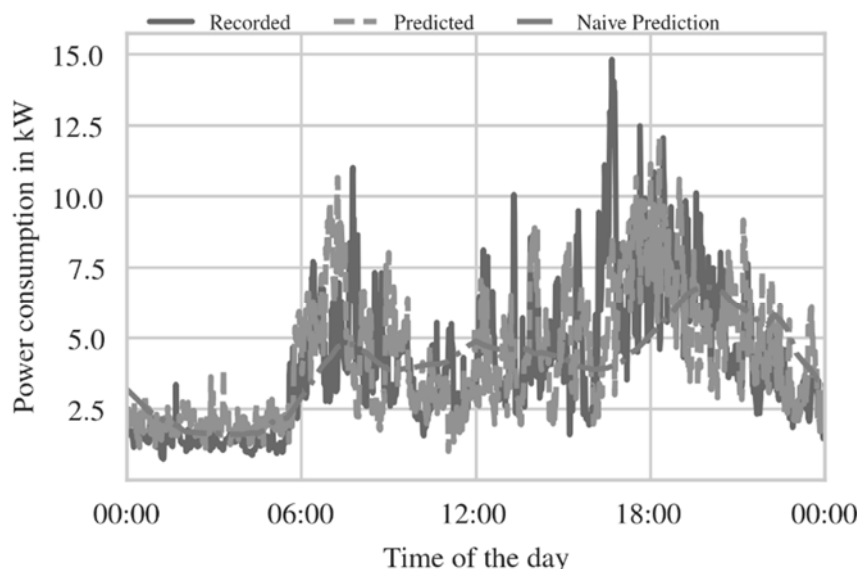


Fig. 1: Vorhersage eines aggregierten Lastprofils für 20 Haushalte mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute.

Forecast of an aggregated load profile for 20 households with a temporal resolution of one minute.

In order to compare the STLF model with a naive prediction Theil's inequality coefficient U_2 is used. It is defined in equation (2), where R_t is the recorded, P_t the predicted and N_t the naively assumed power consumption at the time t .

In case of a perfect prediction R_t is equal to P_t , thus $U_2 = 0$. If the forecast is as good as the naive prediction $\sum_{t=1}^T (R_t - P_t)^2$ is equal to $\sum_{t=1}^T (R_t - N_t)^2$, resulting in $U_2 = 1$. For $U_2 > 1$ the forecast accuracy is not as good as that of the naive prediction. $U_2 < 1$ indicates a better accuracy than the naive approach. In order to justify the use of any STLF model its forecasting accuracy should be higher than that of the naive prediction.

The results have shown that the forecasting accuracy gets higher when predicting an aggregated load profile of multiple households. The temporal resolution of the forecast has a big influence on the accuracy as well. Higher temporal resolutions yield much better results because of the volatile characteristic of individual load profiles. Fig. 1 shows the results for an aggregated forecast of 20 individual load profiles, which represent the power consumption of a whole feeder for a temporal resolution of one minute. In contrast to the naive prediction, the waveform corresponds well with the measured values. In Fig. 2 the corresponding evaluation criteria are listed. Theil's inequality coefficient indicates a better performance than the naive prediction, with $U_2 < 1$ for all five methods.

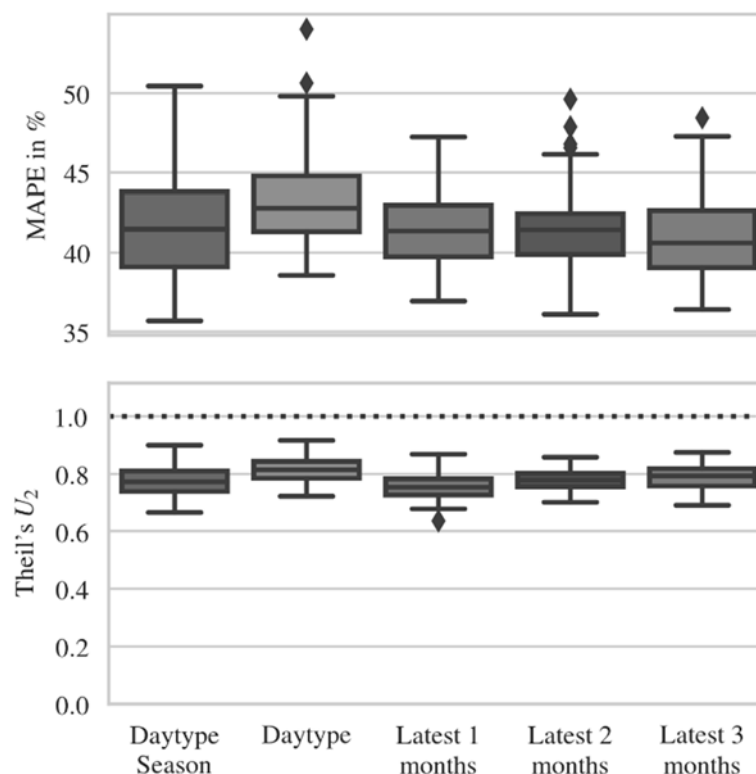


Fig. 2: Bewertungskriterien für die Vorhersage eines aggregierten Lastprofils für 20 Haushalte mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute.

Evaluation criteria for the forecast of an aggregated load profile for 20 households with a temporal resolution of one minute.

■ **Netzausbaureduzierung durch Speichereinsatz im Verteilnetz am Beispiel Netzverstärkung Ostalbkreis**

M. Sc. Ouafa Laribi

Im Zuge der Energiewende werden zunehmend mehr erneuerbare Energien in das Stromnetz integriert. Um die erwarteten hohen installierten Leistungen aufnehmen und damit zukünftige Netzüberlastungen verhindern zu können, werden mehr Übertragungskapazitäten benötigt. Eine Maßnahme zur Erweiterung der Übertragungskapazität ist der klassische Netzausbau. Diese Lösung ist allerdings in manchen Regionen in Deutschland aufgrund genehmigungsrechtlicher Aspekte sowie gesellschaftlicher Akzeptanz schwer umsetzbar. Im Rahmen des Projektes NEOS wurde der Beitrag von Speichersystemen ohne und in Kombination mit dynamischer Spitzenkappung zur Vermeidung von Netzengpässen als Alternative zum konventionellen Netzausbau untersucht. Das Projekt ist unterteilt in Teilprojekt A, bei dem es um die technische und wirtschaftliche Untersuchung des Speichereinsatzes im Verteilnetz geht, und in Teilprojekt B, welches sich mit den Kommunikationsaspekten und der Interaktion mit Bürgern befasst.

Das Teilprojekt A umfasst die technischen sowie die wirtschaftlichen Untersuchungen des Projektes NEOS. Im Rahmen der technischen Untersuchung wurde zunächst ein Planungsalgorithmus für den Einsatz von Speichern in Kombination mit der dynamischen Spitzenkappung als zusätzlichen Freiheitsgrad entwickelt. Der Betrieb der Speicher und die Abregelung der erneuerbaren Energien wurden hierbei optimiert, damit eine Überdimensionierung der Speicher vermieden und ein (n-1) sicherer Betrieb der Leitungen gewährleistet werden kann.

Die Ergebnisse der technischen Untersuchung haben ergeben, dass die Nutzung von Speichern als Alternative zum Netzausbau zur Verhinderung von Engpässen und zur Sicherstellung des (n-1)-Kriteriums technisch möglich ist. Dies ist allerdings mit sehr großen Speicherabmessungen und dementsprechend hohem Platzbedarf für die Errichtung der Speichersysteme verbunden.

In einem weiteren Schritt wurden die Gesamtkosten des kombinierten Einsatzes von Speichern und dynamischer Spitzenkappung kalkuliert. Die Gesamtkosten enthalten die erste Investition in das Batteriekraftwerk, die Ersatzinvestitionen für Batteriezellen und Wechselrichter nach ihrem jeweiligen Lebensdauerende.

- **Reduction of the Grid Expansion in the Distribution Network through Application of Storage Systems using the Example of the Ostalbkreis Region Network**

M. Sc. Ouafa Laribi

Due to the energy transition, renewable energy systems (RES) are being increasingly integrated into the electricity grid. Therefore, more transmission capacities are needed, in order to host the expected high installed capacity and thus prevent future grid congestion. As part of the research project NEOS, the grid supporting contribution of battery storage systems (BSS) in combination with dynamic power curtailment of RES in order to avoid grid congestion has been technically and economically examined as an alternative to conventional grid expansion. Beside the technical and economical examinations, as part of the project NEOS, a regulatory and communication based analysis has been realized supporting the technical and economical examinations.

The technical examinations are performed based on the real grid of the region Ostalbkreis. Hereby, the grid as well as the storage systems have been modeled in a time series based simulation environment. Following this, a new method combining the use of storage systems as a grid component and the power curtailment as a further degree of freedom in the grid planning has been adopted. A dimensioning algorithm has been developed to determine the optimal dimensioning and placement of BSS by a combined application of the storages with a time series based dynamic curtailment of renewable energy systems (RES). Hereby, the storage capacity and power as well as the curtailed power of RES have been optimized, in order to avoid an oversizing of the BSS. Due to the optimized operation of the BSS and of the power curtailment, line congestion could be hence prevented for all (n-1) outages in the grid.

The results of the dimensioning algorithm have proven that the use of BSS in combination with dynamic power curtailment in the grid planning process could prevent line overloading and ensure a safe (n-1) operation of the power lines. This entails, however, high required storage capacity and power, and thus large space requirement for the placement of the BSS.

Based on dimensioning results, the total costs due to the installation and operation of the BSS and due to the compensation for the power curtailment over an economic life of 40 years have been calculated and compared to the costs of the grid expansion alternative.

Es wurde angenommen, dass die Lebensdauer von Batterien 20 Jahre und die von Wechselrichtern 15 Jahre beträgt. Da die Lebensdauer eines Leiterseils für eine Freileitung mindestens 40 Jahre beträgt, wurde für die gesamte Nutzungsdauer der Speicher und der Spitzenkappung mit 40 Jahren gerechnet. Somit wird innerhalb der angenommenen Nutzungsdauer eine Ersatzinvestition für die Batteriezellen nach 20 Jahren Nutzung und für die Wechselrichter jeweils zwei Ersatzinvestitionen nach 15 und nach 30 Jahren Nutzung getätigt. Des Weiteren enthalten die Gesamtkosten die Betriebskosten des Batteriekraftwerkes sowie die Entschädigungszahlungen für die Anlagenabregelung über eine Nutzungsdauer von 40 Jahren.

Auf Grundlage dieser Annahmen wurden die Kosten für die erste Investition, die gesamten Ersatzzahlungen für Batteriezellen und Wechselrichter, die Betriebskosten sowie die Abregelungskosten berechnet. Alle Kosten wurden auf das erste Investitionsjahr abgezinst. Somit würden die Gesamtkosten für den vorgeschlagenen Ansatz zwischen 102 und 218 Mio. € liegen. Dabei wurde die Kalkulation der Kosten beruhend auf Daten aus bestehenden Batterieprojekten sowie auf Studienprognosen durchgeführt. Auf der anderen Seite umfassen die Gesamtkosten für die geplanten Netzausbaumaßnahmen in der Gegend der Region Ostalbkreis die Kosten der ersten Investition sowie die Betriebskosten. Hierfür hat der zuständige Netzbetreiber Netze BW mit Grobkostendaten kalkuliert. Insgesamt ergeben sich für die geplanten Netzausbaumaßnahmen Kosten von ca. 25,8 Mio. €.

Somit ist aus der Gesamtkostenberechnung ersichtlich, dass die geplanten Netzausbaumaßnahmen um das 4- bis 8-fache kostengünstiger als der kombinierte Einsatz von Speichern und Spitzenkappung sind.

Im Laufe des Projektes NEOS wurde zusätzlich die Teilnahme der dimensionierten Speicher am EPEX Spotmarkt für den Day-Ahead-Handel simuliert, um die Speicher neben der Netzdienlichkeit zur Gewinnerbringung einzusetzen. Die mögliche Reduzierung der Gesamtkosten durch die Gewinne aus diesem Geschäftsmodell wurde hierbei evaluiert und den Netzausbaukosten gegenübergestellt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden anschließend die relevanten Parameter für die Berechnung der gesamten Kosten und der gesamten Gewinne definiert und deren zukünftige Entwicklung untersucht.

The total costs of the BSS and the dynamic power curtailment comprise the initial investment in the battery plant, the replacement investments for battery cells and converters at the end of their service life, the operational costs and the compensation costs for the power curtailment of RES. The calculation has been considered for an economic life of 40 years, which corresponds to the expected service life of an overhead line conductor. This yields one replacement investment for battery cells after a 20 years' use and two replacement investments in converters after 15 and 30 years of use. The resulting total costs range between 102 and 218 Millions €.

On the other side, the costs of the originally planned grid expansion by the responsible DSO amount to 25,8 Millions €. The grid expansion alternative proved hence to be 4 to 8 times more economical than the alternative with BSS and power curtailment.

In the course of the project NEOS, a market based use of the BSS has been considered in order to improve their economic efficiency. For that, a participation in the EPEX spot market is considered at times, when the storages are not required for grid congestion purposes. The resulting reduction of the total costs due to the gains from the electricity trade has been evaluated and compared to the total costs of the planned grid expansions. Following that, the relevant parameters for the calculation of the total costs and the total gains have been identified. In the scope of a sensitivity analysis, the prospective variation of these parameters and their effect on the trend of the total costs and total gains has been examined.

■ **Einsatz von wetterabhängigen Strombelastbarkeiten in der zeitreihenbasierten Verteilnetzplanung**

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. So müssen die Netzbetreiber aufgrund der langen Planungs- und Genehmigungszeiten für neue Leitungen bereits heutzutage die Erhöhung der Übertragungskapazitäten planen, um zukünftige Überlastungen zu vermeiden. Die hierfür erforderlichen Maßnahmen zur Erweiterung des Verteilnetzes stoßen aber in der Bevölkerung auf eine geringe Akzeptanz. Deswegen werden am IEH neue Planungsmethoden entwickelt und in die zeitreihenbasierte Verteilnetzplanung integriert, um das bestehende Netz effizienter ausnutzen zu können und um einen sinnvollen Netzausbau zu gewährleisten.

Die Auslegung der Freileitungen erfolgt in den Hochspannungsnetzen nach den Errichtungsvorschriften der DIN EN 30341. Hiernach wird mit einem definierten Szenario für die Umgebungseinflüsse der thermische Grenzstrom der Leitungen bestimmt. Da die für diesen statischen Auslegungsfall verwendeten Umgebungseinflüsse in der Realität nur selten auftreten, wird eine Methodik zur Steigerung der Übertragungsleistung unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Wettereinflüsse aufgebaut. 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. Aus den dynamischen Strombelastbarkeiten können dann statische Strombelastbarkeiten für die Jahreszeiten Winter, Sommer und Übergangszeit berechnet werden. Hierfür wird die Zeitreihe der dynamischen Strombelastbarkeit auf die Jahreszeiten aufgeteilt und von jeder Zeitreihe der minimale Wert bestimmt. Dieser minimale Wert beträgt in den nachfolgenden Untersuchungen immer mindestens die Nennstrombelastbarkeit, da die Freileitungen mit dieser Strombelastbarkeit betrieben werden. Die statischen und dynamischen Strombelastbarkeiten können dann mit der am IEH entwickelten linearisierten Ausfallanalyse untersucht werden, um deren Einfluss auf die Steigerung der Übertragungskapazität bewerten zu können.

In Fig. 1 sind die Leitungsauslastungen im (n-1)-Zustand eines realen Hochspannungsnetzes dargestellt. Dabei zeigt der linke Boxplot die Leitungsauslastung bei einem Einsatz der Nennstrombelastbarkeiten für jede Freileitung, die durch den starken Zubau an installierter Leistung der EE überlastet sind.

■ **Use of Weather-Dependent Current Ratings in the Time-Series-Based Distribution Grid Planning**

M. Sc. Markus Miller

The grid operators are facing new challenges due to the integration of the steadily increasing and already very high installed capacity of renewable energies (RES). Due to the long planning and approval times for new lines, grid operators have to plan the enhancement of the transmission capacities today already in order to avoid future overloadings. However, the necessary measures to expand the distribution grid are met with low acceptance from the population. For this reason, new planning methods are being developed at the IEH and integrated into the time-series-based distribution grid planning efficiently in order to use of the existing grid and to ensure a useful grid expansion.

The design of overhead lines in high-voltage networks is realized in accordance with the installation regulations of DIN EN 50182. Accordingly, the thermal limit current of the lines is determined with a defined scenario for the ambient influences. Since the ambient influences used for this static design case rarely occur in reality, a methodology for increasing the transmission capacity is being developed taking into account 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. From the dynamic current ratings, static current ratings for the seasons winter, summer and transition period can be calculated. For this purpose, the time series of the dynamic current rating is divided into the seasons and the minimum value of each time series is determined. This minimum value is always at least equal to the nominal current rating, because the overhead lines are operated with this current rating. The static and dynamic current rating can then be investigated with the linearized contingency analysis developed at IEH in order to evaluate their influence on the increase of the line transmission capacity.

Fig. 1 shows the line loadings in the (n-1)-state of a real high-voltage grid. The left box plots show the line loadings of the system using the nominal current ratings for each line, which is overloaded due to the high increase of the installed RES.

Die mittleren Boxplots zeigen die Ergebnisse bei einem Einsatz der statischen Strombelastbarkeiten und die Boxplots auf der rechten Seite bei einem Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten. Hierfür würden die Strombelastbarkeiten des statischen Auslegungsfalles bei der Ausfallanalyse durch die berechneten statischen und dynamischen Strombelastbarkeiten ersetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Übertragungskapazität durch den Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten um bis zu 75 % gesteigert werden kann. Da die statischen Strombelastbarkeiten nur im Winter größer als die Nennstrombelastbarkeit sind, kann hier die Übertragungskapazität nur minimal erhöht werden.

Damit die Leitungsauslastungen aus Fig. 1 unter die technische Grenze von 100 % begrenzt werden können, bietet sich als weitere Planungsmethode der Einsatz der dynamischen Spitzenkappung an. Bei dieser Methode darf der Netzbetreiber nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in der Netzplanung die prognostizierte jährliche Energie von EE-Anlagen um 3 % reduzieren. So werden bei der am IEH entwickelten optimierten dynamischen Spitzenkappung die zu drosselnde Leistung zum jeweiligen Zeitpunkt an jeder Erzeugungsanlage individuell bestimmt.

In Fig. 2 ist der kombinierte Einsatz mit der dynamischen Spitzenkappung und den unterschiedlichen Strombelastbarkeiten dargestellt. Hierbei reduziert das Optimierungsproblem die Einspeiseleistung der Erzeugungsanlagen soweit, dass keine Leitungsüberlastungen auftreten. So führt die Anwendung der statischen Strombelastbarkeiten zu einer geringen Reduzierung der abgeregelten Energie. Bei Anwendung der dynamischen Strombelastbarkeiten liegt die abgeregelte Energie jeder Erzeugungsanlage unter dem gesetzlichen Wert. Somit wäre ein gesetzeskonformer Betrieb dieses Netzes möglich.

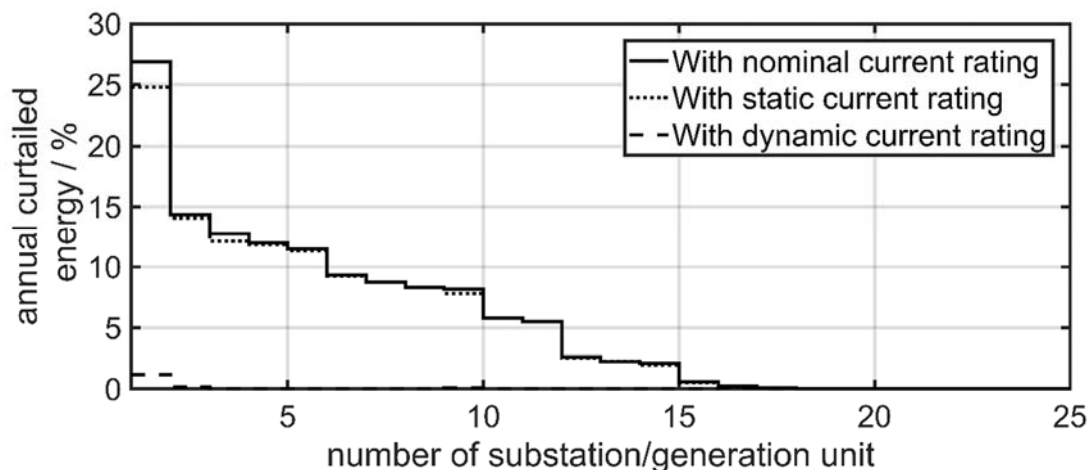


Fig. 2: Vergleich der abgeregelten Energien für die Erzeuger und Umspannwerke im Netz bei einem Einsatz von unterschiedlichen Strombelastbarkeiten.
Comparison of the curtailed energy of generation units and substations in the grid using different current ratings.

The middle box plots show the results when using the static current ratings and the box plots on the right side show the results when 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 calculated static and dynamic current ratings. The results show that the transmission capacity can be increased by up to 75 % by using the dynamic current ratings. Since the static current ratings are only in winter higher than the nominal current ratings, the transmission capacity here can only be increased to a limited extent.

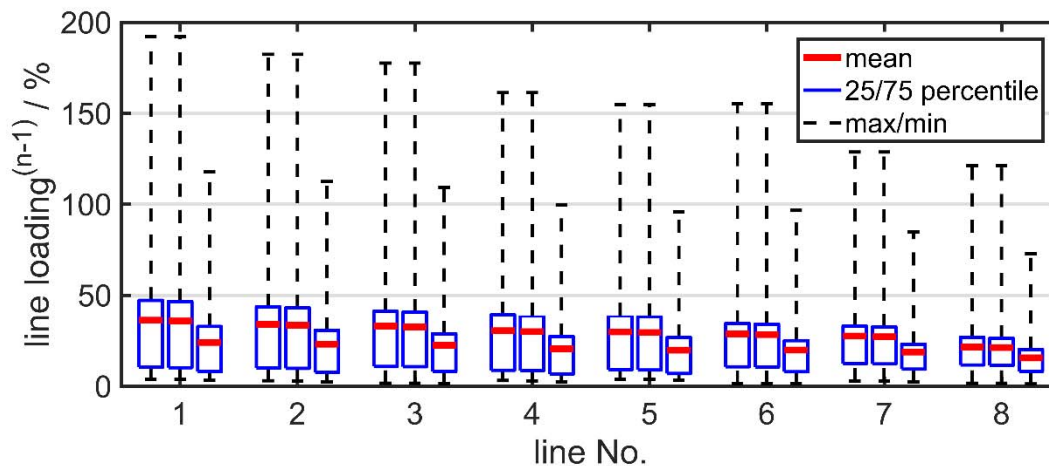


Fig. 1: Vergleich der Leitungsauslastung im (n-1)-Zustand bei Einsatz der Nennstrombelastbarkeiten (linke Box), der statischen Strombelastbarkeiten (mittlere Box) und der dynamischen Strombelastbarkeiten (rechte Box). Comparison of the line loading in (n-1)-state using the nominal current ratings (left box), the static current ratings (middle box) and the dynamic current ratings (right box).

In order to be able to limit the line loadings from Fig. 1 below the technical limit of 100 %, dynamic power curtailment of renewable energy plants could be used as a further planning method. According to the German regulatory framework, this method allows the grid operator to reduce the predicted annual energy of renewable energy plants by 3 % in the grid planning. With the optimized dynamic curtailment developed at the IEH, the power to be throttled is determined individually at each generation unit at the relevant time.

Fig. 2 shows the combined use with the dynamic curtailment and the different current ratings. In this case, the optimization problem reduces the feed-in power of the generation plants to such an extent that no line overloading occurs. The application of static current ratings leads to a limited reduction of the curtailed energy. If dynamic current ratings are used, the curtailed energy of each generation plant is below the legal value. This enables the operation of the grid in compliance with the law.

■ **Intelligente Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge als Alternative zu Netzausbaumaßnahmen**

M. Sc. Tim Streubel

Der politisch und gesellschaftlich gewollte Umstieg im Verkehrssektor von konventionellen Verbrennungsmotoren auf elektrische Fahrzeugantriebe stellt deutsche Energienetzbetreiber vor große Herausforderungen. Um die entstehenden hohen Ladeleistungen durch den Wandel im Verkehrssektor abzudecken, sind großflächige Netzausbau- und verstärkungsmaßnahmen erforderlich. Insbesondere in den städtischen Regionen, wo eine hohe Durchdringung an Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren erwartet wird, sind die Anforderungen an die Netze besonders kritisch zu betrachten. Dabei sind für die resultierende Netzbelastung die Anzahl der Elektrofahrzeuge, deren Ladeverhalten (Gleichzeitigkeit) sowie die jeweilige lokale Situation im entsprechenden Verteilnetz die zentralen Kenngrößen.

Die Ausbaumaßnahmen können jedoch durch intelligente Lademanagementsysteme und Steuerkonzepte reduziert werden. Die Herausforderungen an die Verteilnetzbetreiber beschränken sich jedoch nicht nur auf die Verbraucherseite, sondern auch in der Erzeugung durch die Folgen der Energiewende. Um eine zuverlässige Versorgung bei hoher volatiler Erzeugung und hoher Durchdringung von Elektrofahrzeugen zu garantieren, kann die intelligente Anbindung von Parkhäusern und weiterer Parkinfrastruktur als steuerbare Last einen maßgeblichen Baustein bilden. Dabei gilt es, den Synergieeffekt zwischen der hohen Ladeleistung der Elektromobilität und schwankende Einspeisung durch die Integration von Speichern auszunutzen. Die Integration von Speichern als flexible Pufferelemente können hierbei eine stabilisierende Wirkung auf den Netzzustand haben und ansonsten erforderliche Netzausbaumaßnahmen verringern. Jedoch fehlen in der Praxis die technischen und wirtschaftlichen Erfahrungen sowohl bei den Energieversorgungsunternehmen als auch bei den Betreibern der Parkhäuser, um konkret innovative Lösungen umzusetzen.

- **Intelligent Charging Infrastructure for Electric Vehicles as an Alternative to Grid Expansion Measures**

M. Sc. Tim Streubel

The politically and socially desired change in the transport sector from conventional combustion engines to electric vehicle drives poses major challenges for German energy network operators. Large-scale grid expansion and reinforcement measures are required to cover the high charging power that is caused by the change in the transport sector. Especially in urban areas, where a high penetration of electric vehicles is expected in the coming years, the requirements of the grids should be considered particularly critical. In this case, the number of electric vehicles, their charging behavior and the respective local situation in the corresponding distribution network are the key parameters for the resulting network load.

Especially in urban areas, where a high penetration of electric vehicles is expected in the coming years, the requirements of the grids have to be considered particularly critically. However, the expansion measures can be reduced by intelligent charging management systems and control concepts. However, the challenges to distribution system operators are not limited to the consumer side but also to generation due to the consequences of the energy transition. In order to guarantee a reliable supply with high volatile generation and high penetration of electric vehicles, the intelligent connection of multiple car parks and further parking infrastructure as a controllable load can be an important building block. It is important to exploit the synergy effect between the high charging power of e-mobility and fluctuating feed-in through the integration of storage. The integration of batteries, as flexible buffer elements here, can have a stabilizing effect on the network state and reduce otherwise required network expansion measures. However, in practice, the technical and economic experience of both the energy supply companies and the operators of parking garages is missing in order to implement concrete innovative solutions.

The politically and socially desired change in the transport sector from conventional combustion engines to electric vehicle drives poses major challenges for German energy network operators. Large-scale grid expansion and reinforcement measures are required to cover the high charging power that is caused by the change in the transport sector.

Das IEH forscht im Rahmen des Forschungsprojektes i-LIME (intelligentes Lade-Infrastruktur-Management für Elektromobilität) an der Umsetzung einer intelligenten Lademanagementlösung in einer realen Umgebung. Ein Parkhaus in Stuttgart mit einer zentralisierten Ladeinfrastruktur stellt die Ausgangssituation dar. Im Ausgangszustand wurden bereits kurzzeitig Überlastungen des Transformators gemessen. Im Projekt wird ein lokales Lademanagementsystem entwickelt, was mit Maßnahmen wie dynamisches Laden und zeitversetztes Laden einer Überlastung entgegenwirken kann. Außerdem wird ein übergeordnetes Lademanagementsystem verwendet, um einen im Parkhaus integrierten Speicher als dynamische Pufferkomponente anzusteuern. So werden kurzfristige Leistungsspitzen durch hohen Ladebedarf kompensiert.

Durch das System soll demonstriert werden, dass ladende Elektrofahrzeuge als aggregierte, steuerbare und netzdienliche Last eingesetzt werden können, aber dennoch eine störungsfreie Versorgungsqualität gewährleistet ist. Dabei wird ein offener und transparenter Lösungsansatz verfolgt, der sich auf weitere Parkinfrastruktur übertragen lässt.

Especially in urban areas, where a high penetration of electric vehicles is expected in the coming years, the requirements of the grids have to be considered particularly critically. In this case, the number of electric vehicles, their charging behavior and the respective local situation in the corresponding distribution network are the key parameters for the resulting network load. However, the expansion measures can be reduced by intelligent charging management systems and control concepts. But the challenges to distribution system operators are not limited to the consumer side but also to generation due to the consequences of the energy transition. In order to guarantee a reliable supply with high volatile generation and high penetration of electric vehicles, the intelligent connection of multiple car parks and further parking infrastructure as a controllable load can be an important building block. It is important to exploit the synergy effect between the high charging power of e-mobility and fluctuating feed-in through the integration of storage. The integration of batteries as flexible buffer elements can have a stabilizing effect on the network state and reduces required network expansion measures. However, in practice, the technical and economic experience of both the energy supply companies and the operators of parking garages are missing in order to implement concrete innovative solutions.

As part of the research project iLIME (intelligent charging infrastructure management for electromobility), the IEH is conducting research on the implementation of an intelligent charging management solution in a realistic environment. An existing parking garage in Stuttgart with a centralized charging infrastructure constitutes the initial situation. In the initial state overloads of the transformer were already measured for short time periods. In the project, a local charging management system is developed, with the ability to counteract overload with measures such as dynamic charging and time-delayed charging. In addition, a higher-level charge management system is utilized to control a battery integrated in the parking garage as a dynamic buffer component. Thus, short-term performance peaks are compensated by high charging requirements.

The system is supposed to demonstrate that charging electric vehicles can be used as an aggregated, controllable and intelligent load, while still ensuring trouble-free supply quality. An open and transparent solution is pursued, which can be transferred to other parking infrastructure.

■ **Netzintegration von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in der Logistikbranche**

M. Sc. Kathrin Walz

Die Elektromobilität sorgt für neue Herausforderungen im Stromnetz. Gerade im Bereich des Wirtschaftsverkehrs ist ein Wandel in der Antriebstechnologie nötig. Er hat in Deutschland zwar nur einen geringen Teil des Fahrzeugbestandes, erzeugt jedoch aufgrund von hohen Fahrleistungen einen großen Teil der Verkehrsemissionen. So bringen immer mehr Fahrzeughersteller batterieelektrische Lkw auf den Markt. Die Netzauswirkungen von deren Ladevorgängen sind aber noch größtenteils unbekannt, zumal kaum Messdaten vorhanden sind. Da sich das Ladeverhalten der Lkw durch unterschiedliche Mobilitätsverhalten unter Umständen deutlich von dem der Pkw unterscheiden kann, ist es notwendig, dieses durch eine synthetische Profilgeneration nachzubilden. Dies ermöglicht die Berücksichtigung batterieelektrischer Lkw in der Netzplanung.

Zur Nachbildung des Ladebedarfs elektrischer Lkw wird der Ansatz der Fahrtenkettenmodellierung genutzt. Unter Verwendung eines Datensatzes von Fahrtbüchern realer konventioneller Lkw werden neue Mobilitätsprofile durch Zufallsziehung und Aneinanderreihung von Fahrten und deren Strecken erzeugt. Aus einer Marktanalyse können reale Fahrzeugparameter wie Verbrauch, Reichweite und Batteriekapazität elektrischer Lkw-Modelle gewonnen werden. Eine Kombination von Fahrverhalten und Fahrzeugparametern erlaubt die Bestimmung des Ladezustandes eines Fahrzeugs in Form einer Zeitreihe in Abhängigkeit der aktuellen Fahrzeugposition. Daraus können dann unter Vorgabe von vorhandener Ladeinfrastruktur und Ladebedingungen (Entscheidung zur Ladung abhängig von Ort oder Ladezustand) individuelle Ladeprofile erzeugt werden. Ein exemplarisches Ladeprofil und die berücksichtigten Parameter bei der Ladeprofilergenerierung sind in Fig. 1 dargestellt.

Die vorgestellte Methodik erlaubt die Betrachtung eines veränderten Mobilitätsverhaltens aufgrund begrenzter Reichweiten durch elektrische Antriebskonzepte im Vergleich zu konventionellen und eine daraus folgende Änderung der Rentabilität. Durch die Bewegungsprofile der Fahrzeuge können unterschiedliche Orte der Ladung wie Autobahnraststätten oder Logistikzentren hinsichtlich Ladeinfrastrukturbedarf, notwendiger Anzahl an Stellflächen und Netzauswirkungen untersucht werden. Durch Hinterlegung alternativer Fahrzeugparameter ist neben dem Laden batterieelektrischer Fahrzeuge die Betrachtung von Oberleitungs-Lkw möglich. Denkbar ist auch eine Erweiterung auf weitere Fahrzeugtechnologien.

■ **Integration of Charging Infrastructure for Electric Vehicles in the Logistics Sector**

M. Sc. Kathrin Walz

Increasing penetration of electric mobility leads to new challenges for power grids. One special field is commercial transport. Although it corresponds to just a small share of the total vehicle pool in Germany, it is responsible for a large share of emissions due to large travelled distances. This means that a change in transportation technology is necessary. The amount of vehicle manufacturers that are launching battery-electric trucks is radically increasing. However, the effects of the charging processes of these trucks on the power grid are still largely unknown, especially since hardly any measurement data is publicly available. Since the charging behavior of trucks may differ significantly from that of passenger cars due to different mobility behavior, the development of synthetic charging profiles seems necessary. This allows considering electric truck charging in grid planning.

Trip chain generation is one approach in modeling synthetic electrical vehicle charging profiles. Based on the adaptation of these methods, the charging requirements of electric trucks can be simulated. The mobility behavior of an electric truck is modeled using historical journey data of real conventional trucks. Sequencing of trips and their distances are randomly drawn to generate the trip chains of the simulated truck. Real vehicle parameters of existing electric truck models (e.g. consumption, range and battery capacity) were obtained from a market analysis. A combination of driving behavior and vehicle parameters allows the determination of the state of charge of the battery as a time-series depending on the current vehicle position. Based on this, individual charging profiles can be generated by specifying the existing charging infrastructure and charging conditions (decision for charging depending on location or battery state of charge). An exemplary charging profile and the parameters considered in the synthetic charging profile generation are shown in Fig. 1.

The presented methodology allows the consideration of a changed mobility behavior due to limited ranges of battery-electric drive concepts in comparison to conventional drive concepts and a resulting change in profitability. The modeled mobility profiles allow different charging locations, such as motorway service stations or logistics centers, to be examined with regard to charging infrastructure requirements, necessary number of parking spaces and effects on the power grid. By using alternative vehicle parameters, it is possible to examine e-highway trucks in addition to charging battery-electric vehicles. An extension to other vehicle technologies is also conceivable.

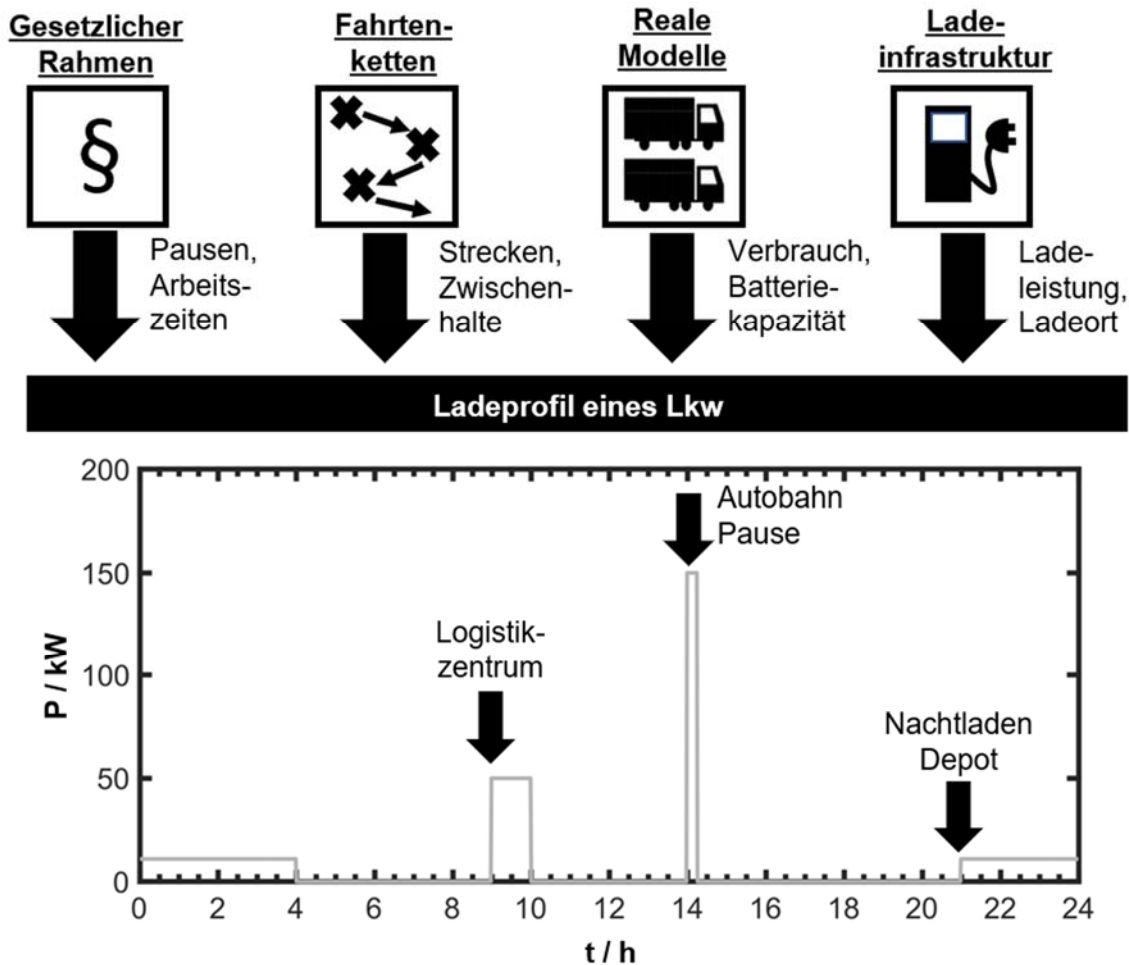


Fig. 1: Berücksichtigte Parameter bei der Lkw-Ladeprofilgeneration und beispielhaftes tägliches Ladeprofil.
 Considered parameters for electric truck charging profile modeling and exemplary daily charging profile.

Eine Anwendung der synthetischen Ladeprofilgeneration erfolgt beispielsweise anhand eines realen Logistikzentrums, für das an- und abfahrende Lkw aus historischen Daten simuliert werden. Es zeigt sich, dass der Ladebedarf der Elektrofahrzeuge nur mit sehr hohen Ladeleistungen gedeckt werden kann, sollte deren begrenzten Parkzeit zur Beladung mit Waren nicht verlängert werden. Eine Ladeleistung von 350 kW ermöglicht dabei eine Deckung des Energiebedarfs zu 75 % in diesem Fall. Die daraus berechneten Auswirkungen auf ein industrielles Mittelspannungsnetz erweisen sich als gering, wobei eine Betrachtung mehrerer Unternehmen an einem Strang, beziehungsweise eine Kombination mit dem Laden elektrischer Pkw auf Firmenparkplätzen, zu stärkeren Auswirkungen führen kann.

In zukünftigen Entwicklungen soll die Methodik zur Erzeugung der synthetischen Ladeprofile mit einem geografischen Verkehrsmodell kombiniert werden, um den regionalen Ladebedarf auf Grundlage real gemessener Verkehrsaufkommen ermitteln zu können.

One application of the synthetic charging profile modeling approach, for example, is based on a real logistics center for which arriving and departing trucks are simulated based on historical data. Preliminary results reveal that the charging requirements of electric vehicles can only be met with very high charging powers, in order not to extend their limited parking time for loading and unloading of goods. A charging power of 350 kW would enable to cover up to 75% of the energy requirements in this case. The resulting effects on an industrial medium-voltage grid prove to be small, whereby a consideration of several companies in one feeder or a combination with charging electric cars in company car parks can lead to stronger effects.

In future developments, the methodology for the synthetic charging profile generation is to be combined with a geographical traffic model in order to determine the regional charging demand on the basis of real measured traffic volumes.

■ **Multi-objective Environmental Economic Load Dispatch using Improved Multi-Objective Particle Swarm Optimization**

Prof. Dr. Tankut Yalcinöz

Optimization has always been used for solving power system problems to achieve maximum benefit at minimum cost. One of the most crucial optimization problems in power systems is the economic load dispatch (ED) problem, which aims to determine the optimum outputs of the generating units in order to reduce the total generation cost while meeting several equality and inequality constraints.

Various metaheuristic optimization techniques have been suggested in the literature for solving nonlinear ED problems. Particle swarm optimization has been successfully implemented for power optimization problems. In this work, an improved multi-objective particle swarm optimization algorithm (IMOPSO), which utilizes a functional inertia weight and a functional constriction factor, is proposed for solving multi-objective environmental economic load dispatch (MEED) problem. A mutation strategy is used in IMOPSO, and a mutation operator applied to each particle in the swarm is used to find optimum Pareto fronts. In this work, the proposed IMOPSO is applied to the MEED problem under consideration of emission pollution, wind energy, valve point effects, ramp limits, prohibited operating zone, and transmission losses. The proposed method is tested on the IEEE 30-bus, the IEEE 118-bus test system and the modified IEEE 118-bus test system with emission coefficients, ramp rate limits, wind power, and prohibited operating zone. The IMOPSOs are compared with the results of various multi-objective algorithms to solve the MEED problem. Fig. 1 demonstrates the Pareto front produced by IMOPSO for the IEEE 30-bus system. The simulation results show that the IMOPSO produces better results than the compared multi-objective optimization algorithms for various test systems.

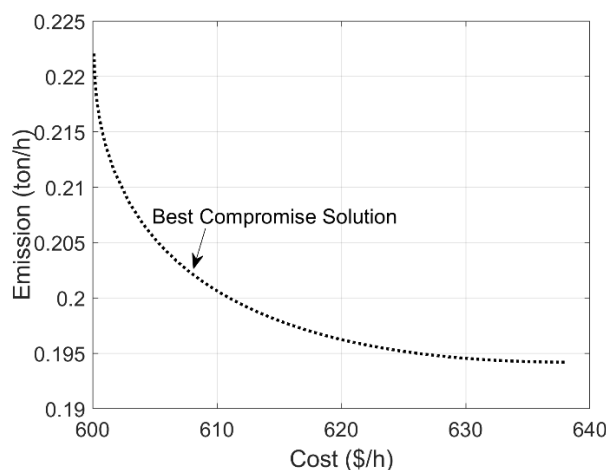


Fig. 1: Pareto front produced by IMOPSO for IEEE 30-bus system

■ A Mixed Integer Linear Programming for the Day-ahead Electricity Market with Wind Power Generators

Prof. Dr. Tankut Yalcinöz

Currently, with the rapid growth of renewable energies on the electricity market, the integration of renewable energies into the electricity grid has become an important issue. Massive quantities of electricity are traded on day-ahead markets, where market participants can transparently exchange electricity for every hour of the following day. In the day-ahead electricity market problem, the market model integrated with the wind power generators attempts to find the optimum power sharing of the power plants. Generally, the solution of the market model is obtained by solving the economic dispatch problem combined unit commitment approach. In this paper, a mixed integer linear programming (MILP) algorithm is applied for the optimal market model with the economic dispatch (ED) and unit commitment (UC) based approaches in the day-ahead market. The primary solution for the UC and ED problem without network constraints is obtained in this phase. The active powers of the generation buses determined by the UC/ED module are then imported into the power flow calculation module. Then the grid model is applied to solve the load flow problem with the time series and transmission data to obtain the loading data of each line. After solving the proposed problem, in case the result cannot satisfy the constraints, the redispatch approach is required to modify the distribution of generating units in order to achieve a feasible and safe operational condition of power systems with thermal and wind power generators. The proposed method is verified on the IEEE 30-bus system with six conventional power plants and three wind power generators. Fig. 1 shows generation allocations for the IEEE 30-bus system.

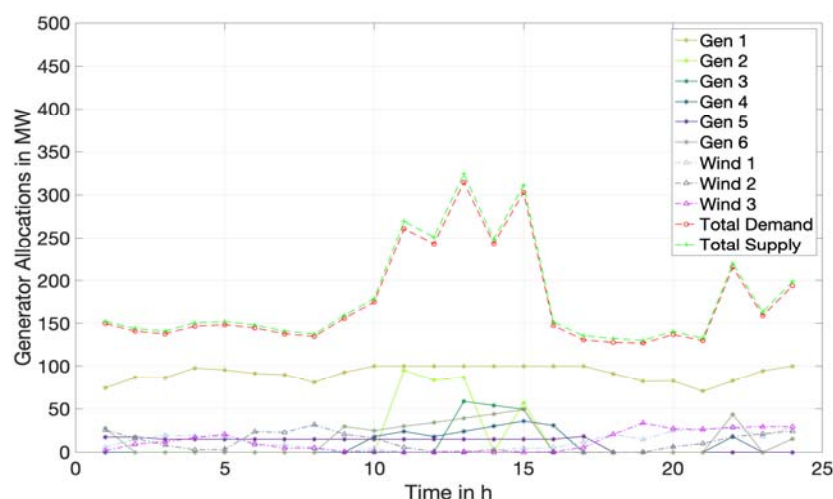


Fig. 1: Generation allocations

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

■ Gleichtaktauslöschung zur Reduzierung der Störaussendung von elektrischen Lenkungssystemen

M. Sc. Jonas Bertelmann

Im Rahmen dieser Forschung wird eine Methode zur Reduzierung der Störausstrahlung (EMI) von Invertern für elektrische Lenksysteme untersucht, um eine Verringerung des Filteraufwandes zu erreichen. Durch die Schaltvorgänge der eingesetzten Halbleiter werden Emissionen im Frequenzspektrum von Übertragungssystemen und Komfortfunktionen erzeugt. Um Grenzwerte einzuhalten, müssen aktuell passive Filter eingesetzt werden, die mithilfe dieser Methode teilweise entfallen können. Dazu werden zeitgleich zwei Halbleiter so geschaltet, dass es zu einer destruktiven Überlagerung der Störemission kommt. Mit Hinblick auf die Servolenkung im Kfz ergibt sich beim Einsatz eines redundanten Systems eine Besonderheit: Die Hardware für die Methode ist bereits vorhanden und macht sie somit interessant für den breiten Einsatz. Erste Laborversuche an einem sechsphasigen Demonstrator zeigen bis zu 40 dB Dämpfung im Bereich der eigentlichen Taktfrequenz der Halbleiter bei 20 kHz bis hin zu 10 MHz. Um Grenzwerte oberhalb von 10 MHz einhalten zu können, müssen weiterhin passive Filter eingesetzt werden: Jedoch ist der Filteraufwand für den höheren Frequenzbereich deutlich geringer und hat ein kleineres Bauvolumen.

In Fig. 1 ist der eigens entwickelte sechsphasige Inverter als Prüfling zwischen den Netznachbildungen und einem Motor einer elektrischen Servolenkung zu sehen. An diesem können verschiedene Tests bzgl. der synchronen und phasenverschobenen Ansteuerung der Halbleiter vorgenommen werden. Erste Ergebnisse sind daraufhin in Fig. 2 zu sehen. Die hellgraue Kurve beschreibt die Emission eines klassischen Inverters, woraufhin die dunkelgraue die Emission des Inverters unter Einsatz der entwickelten Methode zeigt. Es ist zu erkennen, dass ohne passiven Filtereinsatz der Grenzwert im Mittelwellenbereich eingehalten werden kann.

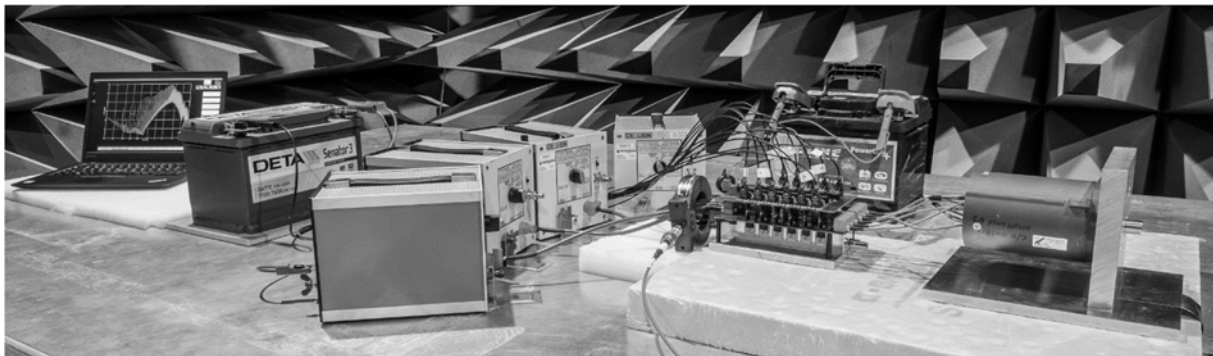


Fig. 1: Aufbau des Lenkungssystems im CISPR 25 Komponententest.
Structure of the steering system in the CISPR 25 component test.

■ Common Mode Cancellation Techniques to minimize EMI of Automotive Steering

M. Sc. Jonas Bertelmann

Within the context of this research a method to decrease Electromagnetic Interference (EMI) caused by semiconductor switching in inverters for electric power steering is investigated. This can have negative effects on transfer systems and comfort functions. In order to comply with the emission limits, currently passive filters must be implemented. They can be dispensed by means of this method. For this, two semiconductors are switching at the same time so that the EMI is destructively superimposed. With regard to power steering in motor vehicles, the use of a redundant system results in a unique advantage: The required hardware to apply this concept is already available and thus makes it interesting for a wide range of applications. First laboratory tests on a six-phase demonstrator show up to 40 dB attenuation in the range of 20 kHz to 10 MHz, while the clock frequency is 20 kHz. Passive filters are necessary in order to maintain limit values above 10 MHz further on, but the filter effort for higher frequencies is significantly lower and can be solved with less volume of construction.

In Fig. 1, the newly developed six-phase inverter can be seen as device under test between the line impedance stabilization network and a machine of an electric power steering system. Various tests can be performed on this inverter with regard to the synchronous and phase-shifted control of the semiconductors. First results can be seen in Fig. 2. The light grey curve describes the emission of a traditional inverter and the dark grey curve shows the emission of the inverter using the developed method. It can be seen that the limit value in the medium frequency range can be achieved without passive filter.

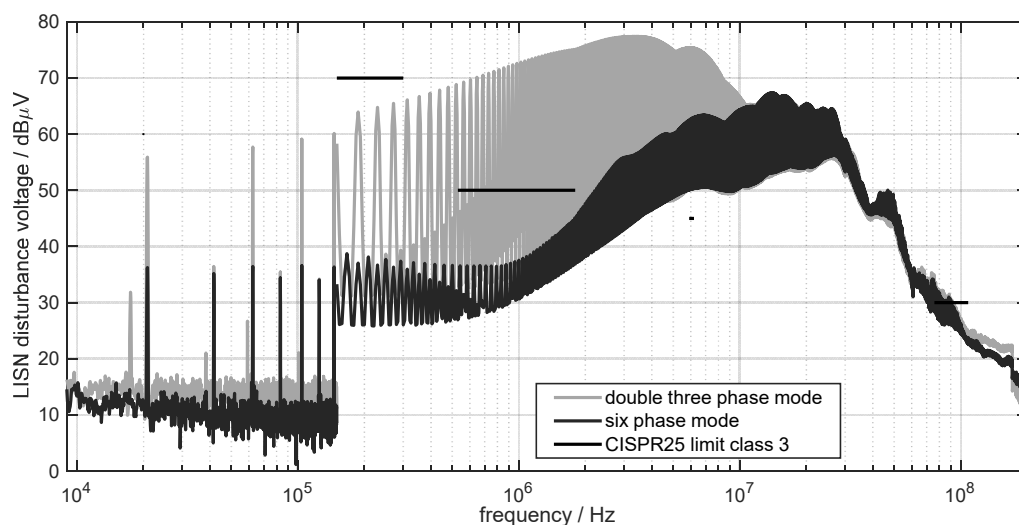


Fig. 2: Emission des Testinverters im klassischen und gegenphasigen Betrieb.
Emission of the test inverter in traditional and antiphase operation.

■ EMV von standardisierten WPT-Systemen im Elektrofahrzeug

M. Sc. Manuel Haug

Das kabellose, induktive Laden von Elektrofahrzeugen wurde in diesem Jahr bereits von den ersten Automobilherstellern als Option für ihre kommenden E-Modelle angekündigt. Die neuartige Ladetechnologie verspricht dem Anwender einen hohen Komfortgewinn bei gleichzeitig sehr guter Effizienz der Energieübertragung. Um die Kompatibilität der induktiven Ladeschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation herstellerübergreifend zu gewährleisten, sollen die sogenannten WPT-Systeme (Wireless Power Transfer) international standardisiert werden. Dabei sind auch Messverfahren und Grenzwerte für EMV Komponententests zu berücksichtigen.

Um das elektromagnetische Verhalten der Ladesysteme zu charakterisieren werden in dieser Forschungsarbeit zwei repräsentative Prototypen nach den aktuellen Vorschlägen des zuständigen Normungsgremiums SAE untersucht. Die EMV-Komponententests werden auf einem dafür geeigneten Prüfstand in der Absorberhalle des Instituts durchgeführt, wie in Fig. 1(a) gezeigt. Der Aufbau einer Ladespule ist schematisch in Fig. 1(b) dargestellt.

Neben den Prototypen werden 3D-Simulationsmodelle entwickelt, die das elektromagnetische Verhalten der Prototypen im Frequenzbereich 9 kHz bis 100 MHz abbilden sollen. Damit ist es beispielsweise möglich, Feldbetrachtungen durchzuführen und die Auswirkungen von Design- oder Materialänderungen zu untersuchen. Weiter können mit den WPT-Modellen auch hohe Übertragungsleistungen betrachtet werden, welche mit den Prototypen im Labor aktuell nicht umsetzbar sind. Fig. 2 zeigt die so ermittelten Emissionswerte der magnetischen Feldstärke in 3 m Abstand zum WPT-System bei einer maximalen Ladeleistung von 11 kW.

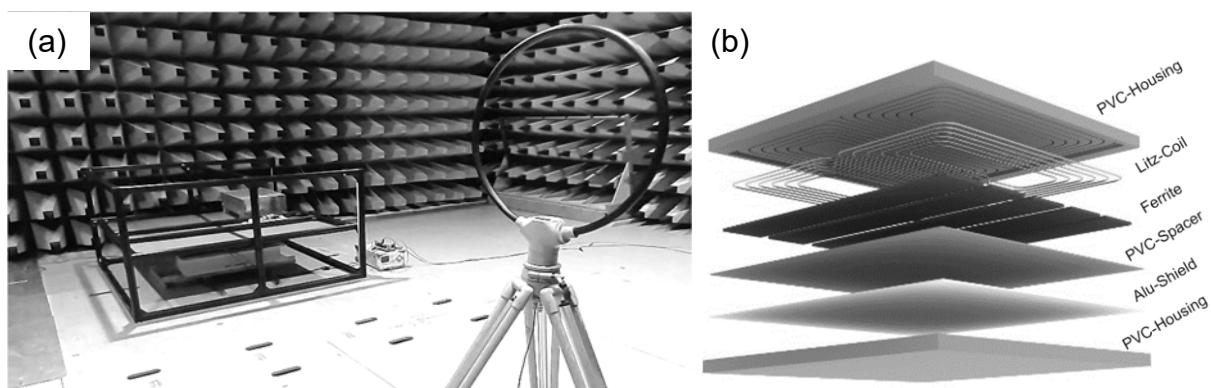


Fig. 1: a) Setup zur H-Feldmessung in 3 m Entfernung zum WPT-Prüfstand
Measuring setup for H-fields with 3 m distance to WPT test bench.
(b) Schematischer Aufbau einer 11 kW Ladespule im Doppelhelixdesign.
Schematic structure of an 11 kW charging coil in double helix design.

■ Electromagnetic Compatibility of Standardized WPT Vehicle Charging Systems

M. Sc. Manuel Haug

The inductive charging of electric vehicles was already announced this year by the first automobile manufacturers as an optional feature for their upcoming electric vehicles. The innovative charging technology promises comfort and a good efficiency in energy transmission. In order to ensure the compatibility of the inductive charging interface between the vehicle and the charging station throughout all manufacturers, WPT systems (Wireless Power Transfer) shall be standardized internationally. Therefore, measurement methods and limit values for EMC component tests have to be considered.

In order to characterize the electromagnetic behavior of the charging systems, two representative prototypes are investigated in this research project. The technical specifications meet the requirements of the current proposals of the responsible standardization committee SAE. The EMC component tests are performed on a suitable test bench in the ALSE of the institute, as shown in Fig. 1(a). The structure of a used charging coil, is shown in Fig. 1(b).

In addition to the prototypes, 3D simulation models are designed to represent their electromagnetic behavior in the frequency range from 9 kHz to 100 MHz. This makes it possible to study the electromagnetic fields and to investigate the effects of design or material changes. In addition, the WPT models can also be used to observe high transmission powers, which cannot be achieved with the prototypes in the laboratory. Fig. 2 shows the emissions of magnetic field, calculated with a 3D model by maximum charging power of 11 kW. The distance between DUT and measuring point was 3 m.

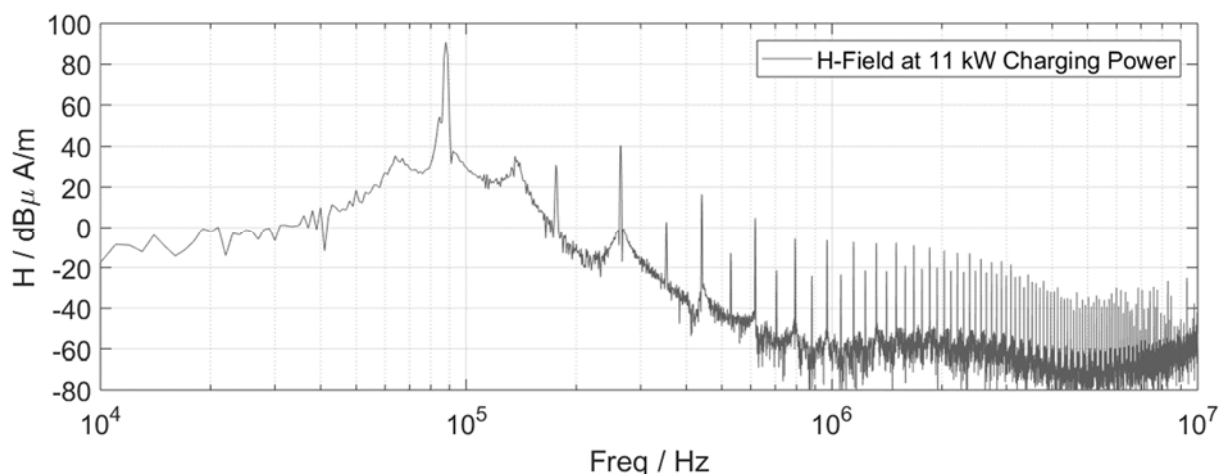


Fig. 2: Berechnetes Emissionsspektrum eines WPT-Systems in 3 m Abstand bei einer Ladeleistung von 11 kW.

Calculated emission spectrum of an 11 kW WPT system in 3 m distance.

■ Prädiktive Pulskompensation zur Entstörung von Hochvolt – Bordnetzwandlern

M. Sc. Denis Müller

Bedingt durch die zunehmende Elektrifizierung halten immer mehr leistungselektronische Komponenten Einzug in Fahrzeuge. Dabei werden im Fall der Bordnetzwandler und Traktionsinverter große Leistungen umgesetzt, was zu hohem elektromagnetischem Störpotential führt. Konventionell werden zur Sicherstellung der EMV daher passive Filter an den betreffenden Komponenten eingesetzt. Diese passiven Filter bringen jedoch deutliche Nachteile hinsichtlich des nötigen Bauraums der Leistungselektronik mit sich. Ein Ansatz zur Reduzierung des Bauraums solcher EMV – Filter können aktive Filter darstellen. Um die notwendige Breitbandigkeit zu erreichen, werden diese mit passiven Filterteilen zu sogenannten Hybridfiltern kombiniert.

Als vielversprechenden Ansatz hat sich am IEH die prädiktive Pulskompensation herausgestellt. Dabei werden geeignete Gegenpulse durch einfache, leistungselektronische Stellglieder erzeugt und - synchronisiert mit der Störanregung - auf die zu entstörende Versorgungsleitung eingekoppelt. Mittels destruktiver Überlagerung von Störpuls und Kompensationspuls kann eine deutliche Reduzierung der messbaren Störpegel über einen weiten Frequenzbereich erreicht werden.

Demonstrator-Anwendung für ein erstes Versuchssystem zur prädiktiven Pulskompensation stellt ein „Phase-Shifted Full-Bridge“ Bordnetzwandler (PhShFB) dar. Dieser Bordnetzwandler besteht aus einer MOSFET-Vollbrücke auf der Eingangsseite, einem Übertrager zur galvanischen Entkopplung der beiden Spannungsebenen und einem Diodengleichrichter auf der Niederspannungsseite. Das Ersatzschaltbild der PhShFB mit der Erweiterung zur prädiktiven Pulskompensation zeigt Fig. 1.

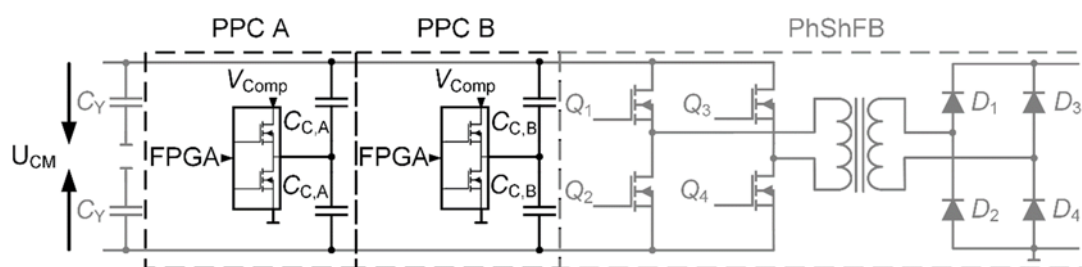


Fig. 1: Ersatzschaltbild der PhShFB mit Kompensationsstufen.

Equivalent circuit of the PhShFB with compensation units.

Die Kompensationsstufen *PPC A* bzw. *PPC B* erzeugen einen geeigneten Gegenpuls, der durch das Schaltsignal der Konvertersteuerung (*FPGA*) synchronisiert wird. Durch die Methode lässt sich eine deutliche Reduktion des Störpegels bis ca. 8 MHz erreichen, was Fig. 2 zu entnehmen ist.

Predictive Pulsed Compensation for EMI Suppression on HV-DC/DC Converter

M. Sc. Denis Müller

As a result of increasing electrification, more and more power electronic components are entering vehicle systems. The high power conversion, in case of onboard converters and traction inverters, leads to an increased level of electromagnetic disturbances. For ensuring EMC, passive filters are used conventionally. The disadvantage of these passive filters is their consumption of installation space. An approach for reducing the size of filter components can be active EMI-filters. The required bandwidth can be achieved using a combination of a small passive filter for HF and an active filter stage for LF.

Predictive pulsed compensation (PPC) has proven to be a promising approach. Therefore, suitable compensation pulses are synchronized to the disturbances and injected on the system. By destructive superposition of compensation pulse and disturbance pulse, a significant reduction of measured disturbance voltage level is achieved.

For a first test system a “Phase-Shifted Full-Bridge” DC/DC converter is used to demonstrate PPC. This converter consists of a MOSFET full-bridge at the input, a transformer for isolation of HV and LV part and a diode rectifier at the output. The equivalent circuit of the PhShFB with PPC modules is shown in Fig. 1.

The compensation units *PPC A* and *PPC B* generate a suitable compensation pulse which is synchronized by the control system of the converter (*FPGA*). This method achieves a considerable reduction of disturbance level up to 8 MHz, as can be seen in Fig. 2.

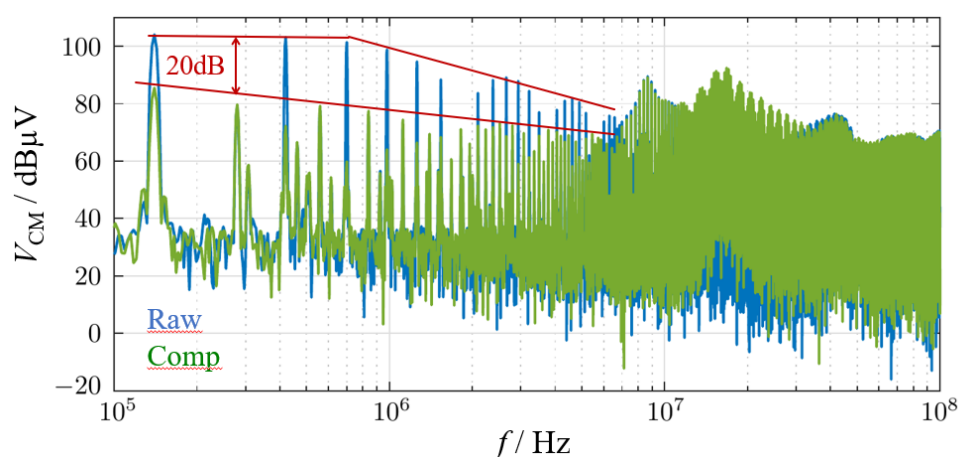


Fig. 2: Gleichtakt-Störspannung ohne (Raw) und mit (Comp) Pulskompensation. Common mode voltage without (Raw) and with (Comp) predictive pulsed compensation.

■ 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: Prüfaufbau für die Messung gestrahlter Emissionen nach CISPR 25.
Setup for the measurement of radiated emissions acc. to CISPR 25.

Fig. 2 zeigt die entsprechenden gestrahlten Emissionen mit zwei jeweils normgerechten Messaufbauten, jedoch mit unterschiedlichen Leitungslängen. Es ist deutlich zu sehen, dass obwohl beide Varianten die Norm erfüllen, große Unterschiede in der gemessenen Feldstärke bestehen.

Ziel der Untersuchungen soll es sein, den Einfluss des Aufbaus auf die Emissionen bestimmen zu können. Dadurch können insbesondere für komplexe Messaufbauten Vorschläge erarbeitet werden, durch welche die Messungen von gestrahlten Emissionen vergleichbarer und reproduzierbarer werden.

■ 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.

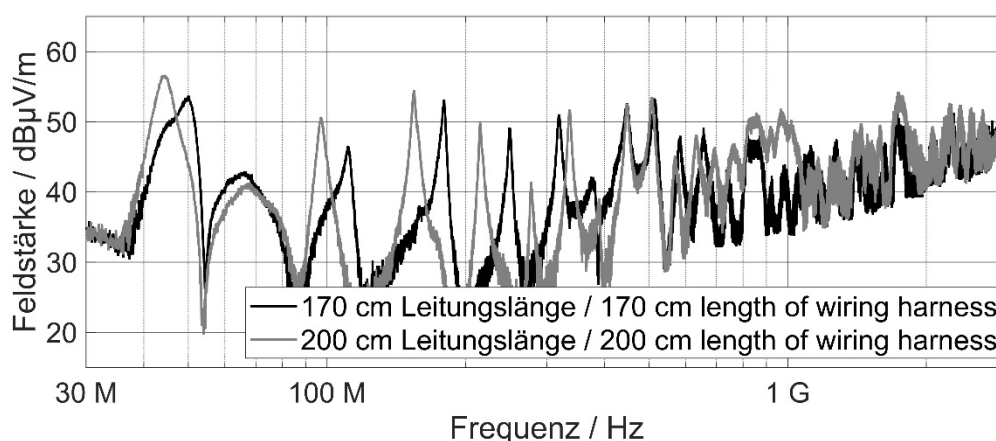


Fig 2: Gestrahlte Emissionen zwei normkonformer Messaufbauten nur mit unterschiedlichen Leitungslängen.

Radiated emissions of two compliant measuring setups which only differ in the length of the used cable harness.

Fig. 2 shows the radiated emissions with two different setups, varying the cable length. As one can see, there are substantial differences in the measured field strength, even though both setups comply with the standard.

The aim of the investigations is to be able to determine the influence of measurement setup on the emissions. In this way, proposals can be developed, especially for complex measurement setups, which make the measurements of radiated emissions more comparable and reproducible.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

S. Karambar, S. Tenbohlen

Study on Thermal Ageing Characteristics of Silicone Rubber and Pressboard in Mineral Oil.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, Postersession - Isoliersysteme, Tagungsband, S. 642-647

M. Tahir, S. Tenbohlen

Towards Objective Interpretation of Frequency Response of Power Transformers.

International Transformer Conference (ITCE '19), Teheran, Iran, January 29-30, 2019

S. Tenbohlen, M. Siegel

UHF Partial Discharge Measurement for Acceptance Tests of Power Transformers.

International Transformer Conference (ITCE 2019), Teheran, January 29-30, 2019

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

Minimierung der Gleichtaktstörung in elektrischen Lenkungssystemen durch gegenphasiges Takten der Leistungshalbleiter.

AmE 2019 Automotive meets Electronics, Dortmund, Deutschland, 12.-13. März 2019, S. 71-75

S. Miyazaki, Y. Mizutani, M. Tahir, S. Tenbohlen

Influence of Employing Different Measuring Systems on Measurement Repeatability in Frequency Response Analysis of Power Transformers.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 35, Issue 2, April 2019, pp. 27-33

D. Müller, K. Spanos, M. Beltle, S. Tenbohlen

Design of a Hybrid Common-Mode EMI Filter for Traction Inverters in Electrical Vehicle.

International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM), Nürnberg, Germany, May 7-9, 2019, pp. 638-642

O. Laribi, K. Rudion, J. Schnaars

Planung des Hochspannungsnetzes unter Berücksichtigung von Speichern und dynamischer Spitzenkappung.

Internationaler ETG-Kongress 2019, 8.-9. Mai 2019, Esslingen, S. 411-416

M. Miller, P. Wiest, K. Rudion, F. Fischer

Bestimmung und Anwendung von konstanten Jahreszeitwerten für die Strombelastbarkeit von Freileitungen in der Netzplanung.

Internationaler ETG Kongress 2019, 8.-9. Mai 2019, Esslingen, S. 423-428

S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle, S. Coenen

Calibration of UHF Partial Discharge Measurements for Power Transformers.

HIGHVOLT KOLLOQUIUM 2019, Dresden, May 9-10, 2019

T. Umemoto, S. Tenbohlen

Validations of simulation of UHF electromagnetic wave propagation in an oil-filled tank by time-domain measurements.

IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 9, May 2019, pp. 1646-1652, DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6173

T. Streubel, A. Eisenmann, K. Rudion

Object Detection Based Power Quality Expert System for an Electric Vehicle Infrastructure.

25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Madrid, Spain, June 3-6, 2019, Paper No. 958

S. Eberlein, K. Rudion, M. Radloff

Small-Signal Stability Optimization of LV microgrids with Grid-forming and Grid-supporting Inverters.

25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Madrid, Spain, June 3-6, 2019, Paper No. 1766

O. Laribi, K. Rudion, T. Lübke

Optimal Planning of High Voltage Distribution Grids under a Combined Use of Energy Storage Systems and Dynamic feed-in Management.

25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Madrid, Spain, June 3-6, 2019, Paper No. 1778

M. Miller, P. Wiest, K. Rudion, F. Fischer

Determination of Constant Seasonal Values for the Current Rating of Overhead Lines in the Network Planning.

25th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Madrid, Spain, June 3-6, 2019, Paper No. 1972

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

PQ Prediction by Way of Parallel Computing - Benchmark and Sensitivity Analysis for classical ML Approaches.

25th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Madrid, Spain, June 3-6, 2019, Paper No. 2049

S. Tenbohlen, M. Beltle, M. Siegel

Thermal Modelling and Overloading of Power Transformers.

Proceedings of TechCon SE Asia 2019, Bangkok, Thailand, June 11-13, 2019

T. Yalcinoz, K. Rudion

Economic Load Dispatch Using an Improved Particle Swarm Optimization based on functional Constriction Factor and functional Inertia Weight.

2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 11-14, 2019, Genoa, Italy, Paper No. 428.

DOI: 10.1109/EEEIC.2019.8783432.

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

Development of Handy Tools for Power Quality Analysis.

10th PAC World Conference, Glasgow, UK, June 18-20, 2019, Paper No. PW68

L. Dieterich, C. Mempel, A. Eisenmann

Power Quality Testing Made Easy.

10th PAC World Conference, Glasgow, UK, Juni 18-20, 2019, Paper No. PW48

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

PQ Classification by Way of parallel Computing - A Sensitivity Analysis for a Real-Time LSTM Approach using Waveform and RMS Data.

13th IEEE PES PowerTech Conference, Mailand, Italien, Juni 23-27, 2019, Paper No. 777

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

Detection and Monitoring of Supraharmonic Anomalies of an Electric Vehicle Charging Station.

13th IEEE PES PowerTech Conference, Milano, Italy, June 23-27, 2019, Paper No. 467

S. Khandan, S. Tenbohlen

Transient Thermal Condition of Natural Oil-cooled Disc-type Winding.

IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), June 23-27, 2019, Roma, DOI: 10.1109/ICDL.2019.8796572

D. Contreras, K. Rudion

Verification of Linear Flexibility Range Assessment in Distribution Grids.

IEEE Powertech, Milano, Italy, June 23-27, 2019,

DOI: 10.1109/PTC.2019.8810542

J. Berger, T. Yalcinoz, K. Rudion

An Analysis of the Price Behavior of the Intraday Continuous Market.

Power & Energy Student Summit (PESS 2019), Magdeburg, Germany, July 9-11, 2019, pp. 37-42

P. Li, T. Yalcinoz, K. Rudion

A mixed Integer Linear Programming for the Day ahead Electricity Market with Wind Power Generators.

Power & Energy Student Summit (PESS 2019), Magdeburg, Germany, July 9-11, 2019, pp. 97-102

M. Siegel, S. Coenen, M. Beltle, S. Tenbohlen, M. Weber, P. Fehlmann, S. M. Hoek, U. Kempf, R. Schwarz, Th. Linn, J. Fuhr

Calibration Proposal for UHF Partial Discharge Measurements at Power Transformers.

Energies 2019, August 2019, 12, 3058,

DOI: 103390/en12163058

D. Contreras, K. Rudion

Time-Based Aggregation of Flexibility at the TSO-DSO Interconnection Point.

IEEE PES General Meeting, Atlanta, GA, USA, August 4-8, 2019

D. Contreras, K. Rudion

Estimation of Flexibility Potentials at the Grid Connection Point.

IEEE PES General Meeting, Atlanta, GA, USA, August 4-8, 2019

S. Abdul Madhar, P. Wenger

Simultaneous Electrical and UHF Measurement of DC-PD from Point-Plane Defect.

21. International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019), August 26-30, 2019, Budapest, Hungary, Proceedings, Volume 2, pp. 991-1003

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

Attenuation of UHF Signals in a 420 kV Power Transformer based on Experiments and Simulation.

21. International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019), August 26-30, 2019, Budapest, Hungary, Proceedings, Volume 2, pp. 1276-1285

S. Karambar, S. Tenbohlen

Investigation of Ageing Characteristics of Silicone Rubber in Mineral Oil.

21. International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019), August 26-30, 2019, Budapest, Hungary, Proceedings, Volume 2, pp. 582-591.

S. Khandan, S. Tenbohlen

Investigation of Operational and Design Parameters Affecting the Thermal Behaviour of Disc-Type Winding.

21. International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019), August 26-30, 2019, Budapest, Hungary, Proceedings, Volume 2, pp. 242-249

M. Tahir, S. Tenbohlen, M. H. Samimi

Evaluation of Numerical Indices for Objective Interpretation of Frequency Response to detect Mechanical Faults in Power Transformers.

21. International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019), August 26-30, 2019, Budapest, Hungary, Proceedings, Volume 1, pp. 811– 824

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

Positioning of UHF PD Sensors on Power Transformers based on the Attenuation of UHF Signals.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, No. 4, August 2019, pp. 1520-1529

S. Miyazaki, M. Tahir, S. Tenbohlen

Detection and quantitative Diagnosis of axial Displacement of Transformer Winding by Frequency Response Analysis.

IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 15, August 2019, pp. 3493-3500

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

Combined Characterization of Free-Moving Particles in HVDC-GIS Using UHF PD, High-Speed Imaging, and Pulse-Sequence Analysis.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, No. 4, August 2019, pp. 1540-1548

D. Müller, D.N. Schweitzer, M. Beltle, S. Tenbohlen

An Active Common Mode EMI Filter Approach introducing Predictive Pulsed Compensation.

International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019), Barcelona, Spain, September 2-6, 2019, pp. 1003-1008

M. Banka, K. Rudion

Integrated Simulation Environment for Investigation of Multi-Agent Systems in Smart Grids Applications.

IEEE Modern Electric Power Systems Conference (MEPS 2019), Wroclaw, Poland, September 9-12, 2019, Paper No. 63

H. Früh, D. Groß, K. Rudion

Short Term Load Forecasting for Individual Consumers based on Markov Chains.

IEEE Modern Electric Power Systems Conference (MEPS 2019), Wroclaw, Poland, September 9-12, 2019, Paper No. 61

M. Buchner, K. Rudion

Design of an inverter model according to the network code requirements for low voltage grids.

IEEE Modern Electric Power Systems Conference (MEPS 2019), Wroclaw, Poland, September 9-12, 2019, Paper No. 9

D. Pflieger, K. Walz

E-Mobilität flexibel.

LOGISTIK HEUTE, Sonderheft Logistik-Immobilien & Standorte 2019, September 2019, S. 26-27

D. Contreras, K. Rudion

Impact of Grid Topology and Tap Position Changes on the Flexibility Provision from Distribution Grids.

IEEE ISGT Europe, Bucharest, Romania, September 29 – October 2, 2019,
DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905479

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

Power Quality Prediction by way of Parallel Computing - A New Approach based on a Long Short-Term Memory Network.

IEEE ISGT Europe, Bucharest, Romania, September 29 – October 2, 2019, Paper No. 410.

D. Groß, H. Früh, P. Wiest, D. Contreras, K. Rudion, L. Rupp, C. Lakenbrink

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

IEEE ISGT Europe, Bucharest, Romania, September 29 – October 2, 2019,
DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905526

M. Tahir, S. Tenbohlen

Novel Calculation Method for Power Transformer Winding Fault Detection using Frequency Response Analysis.

5th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management" (ICTRAM'05 2019), Opatija, Croatia, October 09–12, 2019, Paper No. NM-10

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

UHF-PD Measurement and High-Speed-Imaging of Firefly Motion at the Positive Electrode in HVDC-GIS.

IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Richland, Washington, USA, October 20-23, 2019, Paper No. 1122

P. Wenger, S. Abdul Madhar, M. Beltle

Simultaneous Electrical, UHF, Current and Optical PD Measurement on Floating Potential und DC Stress.

IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Richland, Washington, USA, October 20-23, 2019, Paper No. 1143

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

UHF Sensor Placement on Power Transformers for PD Monitoring.

CIGRE Colloquium New Delhi, India, SC A2, SC B2 & SC D1, November 21–22, 2019, Proceedings, pp. A2-174 – A2-181

M. Tahir, S. Tenbohlen

Transformer Equivalent Circuit Parameter Estimation using Frequency Response Analysis.

CIGRE Colloquium New Delhi, India, SC A2, SC B2 & SC D1, November 21-22, 2019, Proceedings, pp. A2-182 – A2-189

S. Tenbohlen, M. Siegel, S. Coenen, M. Beltle, U. Kempf, S. Hoeck, M. Weber, R. Schwarz, J. Fuhr, P. Fehlmann, T. Linn

Calibration of UHF PD Measurements for Power Transformers

CIGRE Colloquium New Delhi, India, SC A2, SC B2 & SC D1, November 21-22, 2019, Proceedings, pp. D1-57 – D1-68

D. Passow, M. Beltle, S. Tenbohlen, J. Hohloch, R. Grund

Online and On-site Partial Discharge Measurement of Long Length Power Cables by Using Joints with Integrated PD Sensors.

Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019), Springer, Vol. 1, LNEE 598, November 2019, pp. 219-231,

DOI: 10.1007/978-3-030-31676-1_21

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

Quantitative Analysis of the Sensitivity of UHF Sensor Positions on a 420 kV Power Transformer Based on Electromagnetic Simulation.

Energies 2020, December 2019, 13, 3,

DOI: 103390/en130100003

M. Tahir, S. Tenbohlen

A Comprehensive Analysis of Windings Electrical and Mechanical Faults Using a High-Frequency Model.

Energies 2020, December 2019, 13, 105,

DOI: 103390/en13010105

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 29.-30.1.19 International Transformer and Conference Exhibition (ITCE2019)
Teheran, Iran
Prof. S. Tenbohlen
- 18.3.19 Statuskolloquium Umweltforschung - Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart,
Prof. K. Rudion
- 21.3.19 ETG Fachtagung V2 „Übertragung und Verteilung elektrischer
Energie“, Frankfurt, Prof. K. Rudion
- 2.-3.5.19 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, WG A2.53, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 8.-9.5.19 ETG-Kongress, Esslingen,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, M. Miller, O. Laribi, D. Groß
- 8.-9.5.19 ETG-Kongress 2019 "Das Gesamtsystem im Fokus der
Energiewende", Esslingen
Prof. S. Tenbohlen
- 21.-22.5.19 Technischer Beirat Omexom, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.-13.6.19 TechCon SE Asia, Bangkok, Thailand
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 23.-27.6.19 IEEE ICDL, 20th International Conference on Dielectric Liquids, Rom
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, S. Khandan
- 23.-27.6.19 Power Tech, Mailand,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, A. Eisenmann, D. Contreras, T. Streubel
- 17.7.19 C/sells TP4/6 Konferenz, München,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, M. Buchner, T. Streubel
- 4.-8.8.19 IEEE PES General Meeting, Atlanta, USA,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, D. Contreras
- 26.-30.8.19 ISH 2019 International Symposium on High Voltage Engineering,
Budapest, Ungarn
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, S. Khandan, C. Beura, M. Tahir, P.
Passow, S. Karambar
- 9.-12.9.19 MEPS 19, Breslau, Polen,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, M. Buchner, M. Banka, H. Früh
- 18.-19.19 13. ETG-GMA Fachtagung „Netzregelung und Systemführung“,
Berlin, Prof. K. Rudion
- 19.9.19 Transformatortagung, Doorwerth, Niederlande
Prof. S. Tenbohlen
- 1.-2.10.19 CIGRE D1.01 TF3, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 22.10.19 DAK C1-Sitzung 50Hertz, Berlin, Prof. K. Rudion

- 22.10.19 CIGRE/CIRED Deutschland Sitzung, Berlin
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Prof. K. Rudion
- 5.11.19 Umweltabend - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
Baden-Württemberg, Stuttgart, Prof. K. Rudion
- 5.-6.11.19 Technischer Beirat Omexom, Darmstadt
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 12.11.19 Herbsttreffen des DAK CIGRE A2, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 16.-23.11.19 Cigre A2 Kolloquium, Neu-Delhi, Indien
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 4.12.19 8. Smart Grids-Kongress Baden-Württemberg 2019,
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Prof. K. Rudion, M. Miller, D.
Contreras, A. Eisenmann, O. Laribi, K. Walz

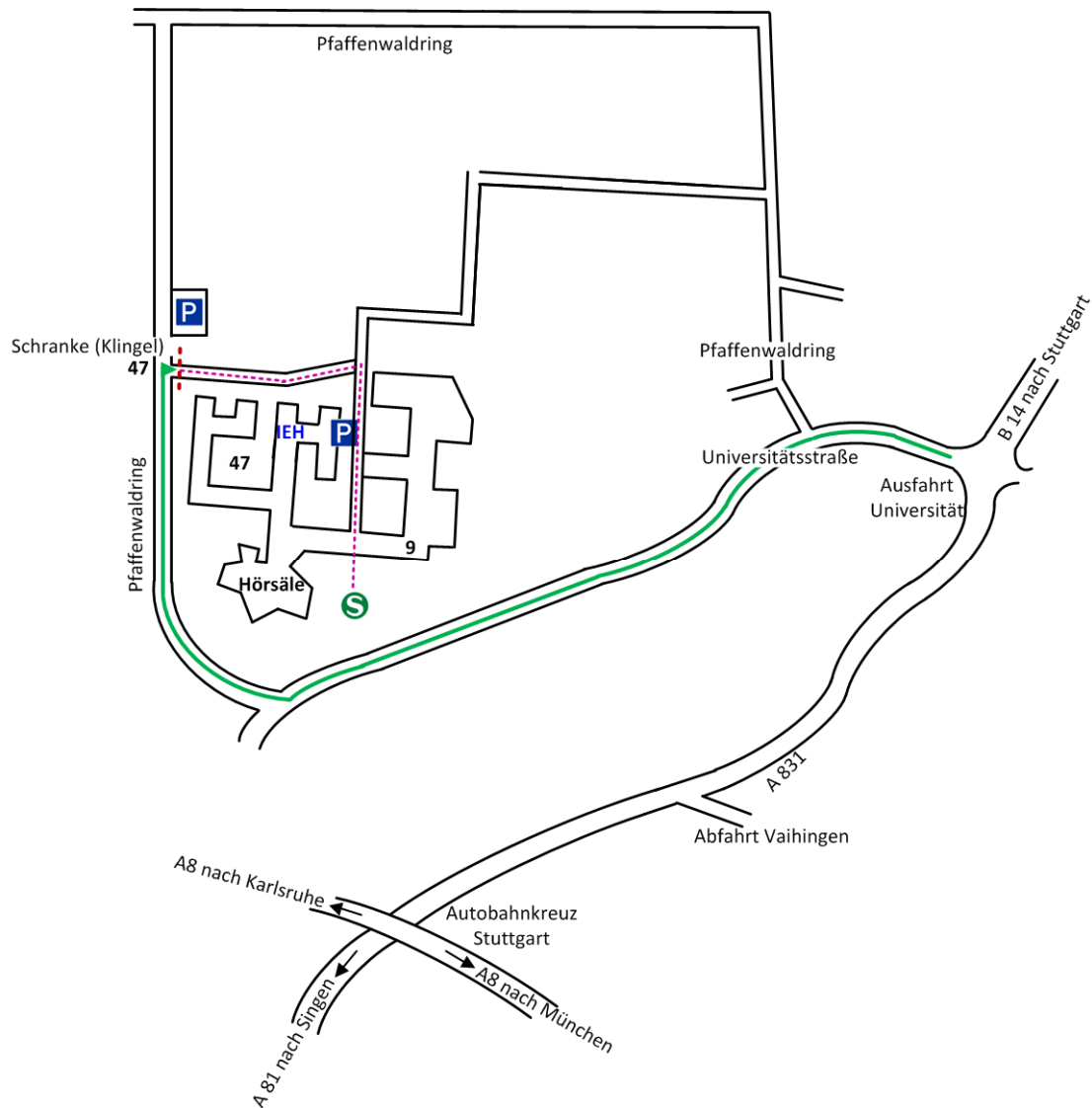
8. PRÜFEINRICHTUNGEN

Stoßspannungsanlagen	bis 1.4 MV, 100 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	300 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 CIPSR 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 SF6-Anlage	Un = 525 kV, max. Länge mit Abzweigen ca. 25 m
Einpolige SF6-Anlage	Un = 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

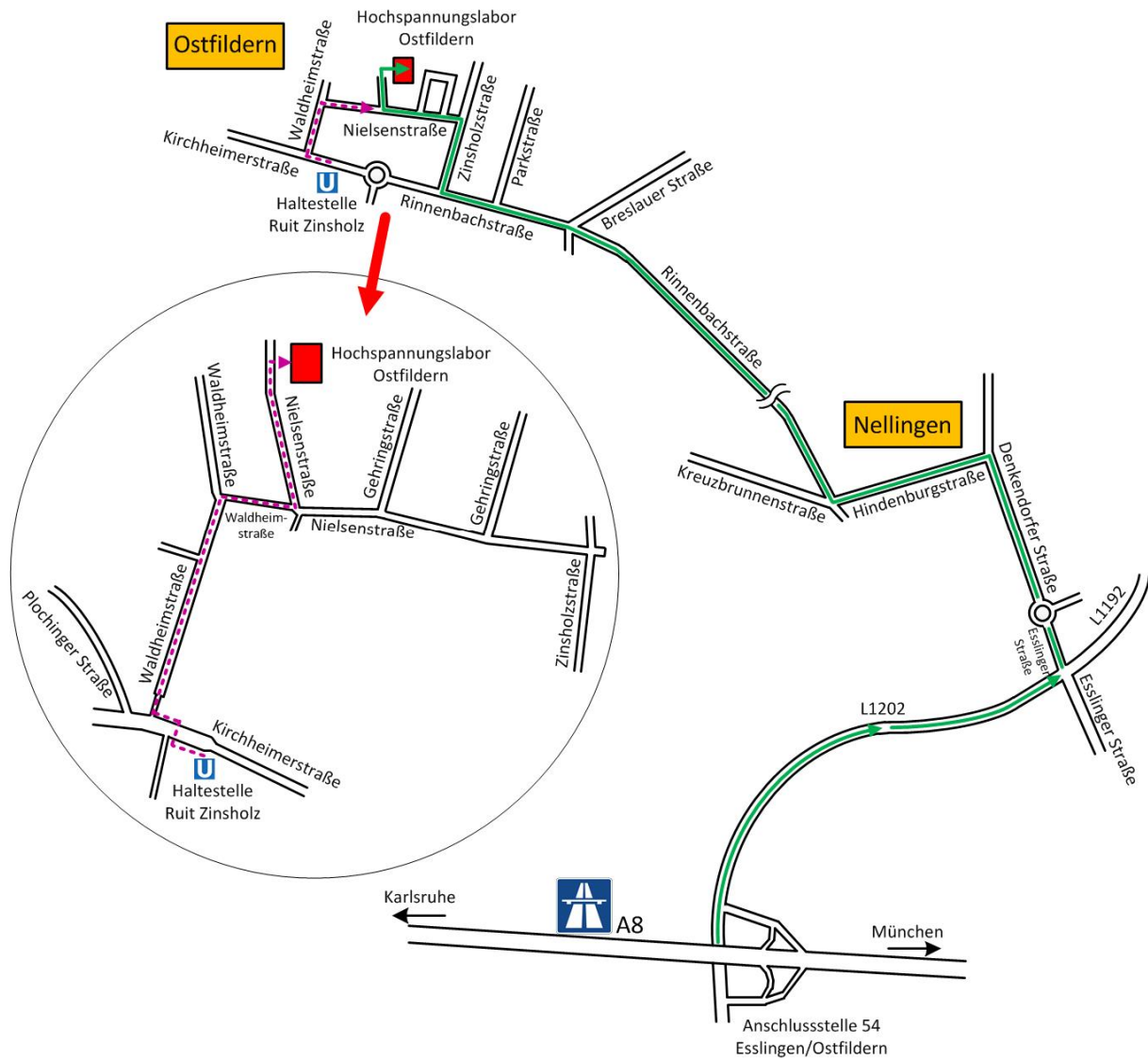


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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)