

INHALT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	10
3.1	VORLESUNGEN	10
3.2	PRAKTIKA.....	16
3.3	EXKURSIONEN	17
3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN.....	18
4.	PROMOTIONEN.....	43
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	50
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	54
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	82
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	134
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	146
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	151
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	154
9.	LAGEPLÄNE.....	156

1. VORWORT

Liebe Freundinnen und Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

das Coronavirus hat uns in den vergangenen beiden Semestern sowohl in der Forschung als auch in der Lehre vor einige Herausforderungen gestellt. Weil an der Universität Präsenzlehre z. Z. untersagt ist, haben wir alle unsere Vorlesungen und Übungen auf online Formate umgestellt. Das betrifft nicht nur uns Lehrende, denen der direkte Zugang zu den Studierenden fehlt, sondern auch insbesondere die Studierenden, die weder einen geregelten Stundenplan noch einen persönlichen Kontakt zu den Kommilitonen haben. Die Besetzung in unseren Büros ist deutlich heruntergefahren und das mobile Arbeiten weitestgehend eingeführt. Unsere Projekttreffen und Konferenzen sind ins Internet verlegt. So mussten wir auch das ursprünglich im März geplante Stuttgarter Hochspannungssymposium in der Filderhalle wenige Tage vor der Veranstaltung absagen. Wir werden dies jetzt am 2./3. März 2021 als online Veranstaltung nachholen. Erfreulicherweise konnten wir den Laborbetrieb unter Einhaltung der Hygieneregeln aufrechterhalten. So hatten zumindest die Studierenden die Möglichkeit, ihre Abschlussarbeiten durchzuführen und wir konnten unsere Forschungsaktivitäten größtenteils weiter betreiben. Allerdings fehlt der persönliche Austausch auf vielen Ebenen. Aller Voraussicht nach werden uns die Auswirkungen und Maßnahmen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie auch im Jahr 2021 begleiten. Aber trotzdem sehen wir dem Neuen erwartungsvoll entgegen.

Trotz der Einschränkungen können wir auf die im Jahr 2020 erreichten Ergebnisse positiv zurückblicken. Wir haben einige unserer Projekte erfolgreich zu Ende führen können. Dabei wurden die beiden durch das Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Projekte FELSEN und VIPEEER sowie das Projekt Sonderbuch, das in Kooperation mit unserem langjährigen Partner Netze BW GmbH durchgeführt wurde, erfolgreich abgeschlossen. Darüber hinaus ist das Vorzeigeprojekt C/Sells, das im Rahmen der SINTEG Initiative durch das Bundeswirtschaftsministerium über vier Jahre gefördert wurde, mit einer sehr gelungenen Veranstaltung zum Abschluss gebracht worden. Wir können eine sehr positive Bilanz nach Abschluss dieser Projekte ziehen und freuen uns auf die Dissertationen, die anhand der erarbeiteten Ergebnisse nun angefertigt werden. Die aktuelle Situation hat aber auch negative Folgen für unser Institut. Einige geplante Forschungsaktivitäten sind wegen der schwierigen Situation unserer Partner nicht zu Stande gekommen. Umso mehr freut uns, dass wir die Bearbeitung des schon seit längerem diskutierten Themas «Einfluss wechselrichterbasierter Erzeuger auf das Kurzschlussleistungsverhalten» in Kooperation mit TransnetBW GmbH beginnen konnten.

Leider verzeichnen wir seit einiger Zeit einen Rückgang der Studierenden der Elektrotechnik und Informationstechnik. Trotzdem konnten wir 76 studentische Arbeiten in 2020 am IEH erfolgreich betreuen, wieder ein sehr erfreuliches Ergebnis, insbesondere vor dem Hintergrund der Restriktionen durch die Corona Pandemie.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir trotz der Widrigkeiten auf ein gelungenes Jahr zurückblicken. Es wurden über 30 wissenschaftliche Publikationen in Konferenzbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht, die unsere Forschungsaktivitäten dokumentieren. Viele unserer Veröffentlichungen können Sie auf unserer Instituts-Homepage finden.

Neben allen diesen Publikationen haben Michael Beltle, Daniel Groß und Martin Siegel ihre Dissertationen zu den Themen *«Mechanische Schwingungen und Geräusche von Leistungstransformatoren»*, *«Zustandsschätzung für eine aktive Verteilnetzführung unter Berücksichtigung einer defizitären Messinfrastruktur»* und *«Calibration Methods for Reproducible and Comparable Electromagnetic Partial Discharge Measurements in Power Transformers»* erfolgreich abgeschlossen.

Es gab 2020 einige personelle Veränderungen am Institut. Zum einen sind unsere erfahrenen Mitarbeiter*innen Farzaneh Vahidi, Benjamin Adam, Manswet Banka, Michael Schühle, Stephanie Hägele und Smitha Karambar ausgeschieden. Zum anderen haben neue Mitarbeiter*innen (Laura Barreau, Malte Gerber, Paul Burkhardt, Michaela Gruber und Sharon Müller) unser Team verstärkt. Im Sekretariat konnte unser Team durch Sabine Janzen verstärkt werden. Wir wünschen den ausgeschiedenen Personen viel Erfolg in der zukünftigen Beschäftigung und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit den neuen Mitarbeiter*innen.

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 Januar 2021

PREFACE

Dear friends!

During the last two semesters the coronavirus has confronted us with several challenges in research and in teaching as well. As face-to-face teaching is currently prohibited at the University of Stuttgart, we have been changing all our lectures and tutorials to online format. This does not only concern the teachers, who miss the connection with students, but especially the students themselves who have been deprived of any personal contact to their fellow students and also of any regulated timetable. Our offices are often empty at the moment and mobile working has been established as far as possible. Our project meetings and conferences have been transferred to the internet. Furthermore, we had to cancel the Stuttgart High Voltage Symposium just a few days before its beginning, which initially was planned at the Filderhalle in March 2020. It will now take place from 2 to 3 March 2021 as an online event. Fortunately, we have been able to maintain the laboratory operations in accordance with the hygiene rules. In this way, the students have had at least the possibility to write their theses and we were able to continue the majority of our research activities. However, we strongly are missing the personal exchange. Most likely, the effects and measures in connection with the corona pandemic will continue to accompany our life also in 2021. Anyway, we are looking forward to what future will bring.

Despite of all restrictions during the year, we can look back in a positive way at the results achieved in 2020. We were able to complete with a great success some of our projects: FELSEN and VIPEEER, who were supported by the Federal Ministry of Environment, as well as the project Sonderbuch which was carried out together with our long-standing partner Netze BW GmbH. Furthermore, the showcase project C/Sells promoted within the SINTEG initiative by the Federal Ministry of Economics for over four years came to an end with a succeeded closing event. We are happy to draw a very positive balance after the closure of these projects and we are looking forward to the dissertations that will be written on the basis of these elaborated results. The current situation undeniably has had also negative effects on our institute. Some of our planned research activities couldn't succeed due to the difficult situation of our partners. All the more, we are pleased to announce the beginning of the long discussed project «the influence of inverter based generators on short circuit power» in cooperation with TransnetBW GmbH.

Unfortunately, we see for some time past a decrease of the number of students applying for electrical engineering and information technology. Nevertheless, we could successfully supervise 76 scientific works in 2020 at the IEH, again a very gratifying result, especially when taking in consideration the restrictions due to the corona pandemic.

Despite of all the adversities, we can look back on another successful year in the research field. Over 30 scientific publications were published in conference proceedings and journals documenting our current research activities. You can find many of our publications on our homepage.

Besides all these publications, Michael Beltle, Daniel Groß and Martin Siegel successfully completed their dissertations on the topics «*Mechanical Oscillations and Noises of Power Transformers*», «*State Estimation for an active Distribution Grid Management in Consideration of a deficient Measurement Infrastructure*» and «*Calibration Methods for Reproducible and Comparable Electromagnetic Partial Discharge Measurements in Power Transformers*».

In 2020 we had several personnel changes. On the one hand, our experienced employees Farzaneh Vahidi, Benjamin Adam, Manswet Banka, Michael Schühle, Stephanie Hägele und Smitha Karambar left the institute. On the other hand, new employees (Laura Barreau, Malte Gerber, Paul Burkhardt, Michaela Gruber and Sharon Müller) have strengthened our team. Sabine Janzen has joined our secretary. We wish the former colleagues all the best in their future employment and look forward to collaborating 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 Ministry of Environment, Climate, Industry and Energy 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 will find abstracts of the majority of our graduate's work.

We are looking forward to keeping close contact and cooperation with you also on behalf of Professor Feser and all our staff members.

Our best wishes accompany you in 2021.

Stuttgart, January 2021

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail:	Telefon / phone:
	vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de	+49 (0)711-
	firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	
Institutsleiter / Head of Institute:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN	-685-67871
Leiter des Fachgebiets	Netzintegration erneuerbarer Energien: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof RUDION	-685-67872
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER	
Lehrbeauftragte:	Dr.-Ing. 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 Dr.-Ing. Michael BELTLE (<i>Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern</i>)	-685-67878 -685-68061
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	M. Sc. Benjamin ADAM (bis 31.3.2020) M. Sc. Manswet BANKA (bis 30.6.2020) M. Sc. Laura BARREAU (ab 7.1.2020) M. Sc. Jonas BERTELMANN M. Sc. Chandra Prakash BEURA M. Sc. Matthias BUCHNER M. Sc. Paul BURKHARDT (ab 1.2.2020) M. Sc. Daniel CONTRERAS M. Sc. Deepak DEEPAK M. Sc. Adrian EISENMANN M. Sc. Markus FISCHER	-685-69164 -685-69195 -685-69152 -685-67838 -685-61735 -685-69193 -685-67889 -685-67867 -685-61525

	M. Sc. Heiner FRÜH	-685-69151
	M. Sc. Malte GERBER (ab 7.1.2020)	-685-69168
	M. Sc. Michaela GRUBER (ab 1.7.2020)	-685-67868
	M. Sc. Stephanie HÄGELE (bis 30.9.2020)	
	M. Sc. Manuel HAUG	-685-60832
	M. Sc. Chuxuan HE	-685-67857
	M. Sc. Smitha KARAMBAR (bis 31.12.2020)	
	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. Sharon MÜLLER (ab 3.11.2020)	-685-67875
	M. Sc. Daniel PASSOW	-685-69165
	M. Sc. Jan SCHABEL	-685-67874
	M. Sc. Michael SCHÜHLE (bis 31.7.2020)	
	M. Sc. Tim STREUBEL	-685-69167
	M. Sc. Mehran TAHIR	-685-67855
	M. Sc. Farzaneh VAHIDI (bis 2.3.2020)	
	M. Sc. Kathrin WALZ	-685-69196
	M. Sc. Philipp WENGER	-685-69177
Sekretariat / Secretary:	<i>Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:</i>	
	Sabine JANZEN (ab 1.6.2020)	-685-67870
	Janja SCHULZ	
	Annette GUGEL	-685-67880
	<i>Hochspannungslabor Ostfildern:</i>	
	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:

Dr. Pradhan Arpan KUMAR, <i>Humboldt-Stipendiat</i>	-685-61716
Prof. Dr. Tankut YALCINÖZ (bis 31.8.2020)	

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 Master-Studierende 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

6. Februar 2020, ganztägig:

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

Weitere geplante Exkursionen fielen Corona zum Opfer.

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 01.11.2019 bis 31.10.2020:

Albrecht, Daniel

Langzeitspeicherung interner Zellinformationen für KNN

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen KNN-Langzeitspeicher zur Vorhersage von Strom-, Spannungs- und Leistungswerten zu modellieren, welcher die Trainingsgenauigkeit bei sehr weit zurückreichenden historischen Trainingsdaten erhöht. Bei einer großen Anzahl von Trainingsdaten besteht die Gefahr einer katastrophalen Interferenz, bei der ein Großteil der gespeicherten Informationen unbrauchbar wird. Um die Prognoseabweichung zu verringern, wird auf der Grundlage der Neurowissenschaften (Aufbau des menschlichen Gedächtnisses und dessen Prozesse) und der Neuropsychologie (Lernmethoden z. B. verschachteltes Lernen) eine KNN-Architektur nachmodelliert. Das Langzeitspeichermodell besteht aus mehreren unterschiedlichen RNN-Schichten (RNN, LSTM, LTM), die jeweils eine bestimmte Funktionalität/Eigenschaft (Speicherkapazität, Selektion, Stabilität, Konsolidierung) abbilden.

Long-term Storage of internal Cell States for KNN

The aim of this thesis is to model a KNN long-term memory for the prediction of current, voltage and power values, which increases the training accuracy for very far back historical training data. However, with a large amount of training data there is a risk of catastrophic interference which may cause an unusability of a large part of the stored information. In order to reduce the forecast deviation, a KNN architecture is modelled on the basis of neuroscience (structure of human memory and its processes) and neuropsychology (learning methods e.g. nested learning). The long-term storage model consists of several different RNN layers (RNN, LSTM, LTM), each of which maps a specific functionality/property (storage capacity, selection, stability, consolidation).

Barreau, Laura

Evaluierung einer neuen Methode zur Störfestigkeitsprüfung von Strommesssystemen für den Netzschutz mit Rogowski-Sensoren

In Mittelspannungsschaltanlagen werden heute vermehrt Rogowski-Sensoren zur Strommessung für Schutz- und Messzwecke eingesetzt. Diese Sensoren stellen jedoch andere Anforderungen an die Störfestigkeitsprüfung als konventionelle Systeme. Auch normative Prüfungen sind bisher noch nicht an Kleinsignalwandler adaptiert. Ziel dieser Arbeit ist es, eine neue Methode zur Störfestigkeitsprüfung für die genannten Systeme evaluieren zu können. Dafür müssen die Parameter, welche einen Einfluss auf den Koppelpfad von Störspannungen haben, hinsichtlich Amplitude, Frequenz und Asymmetrie untersucht werden. Anhand der Ergebnisse werden die tatsächlich in Mittelspannungsschaltanlagen auftretenden Störgrößen gemessen. Diese werden genutzt, um verschiedene Nachbildungsmethoden zu evaluieren, welche zur Störfestigkeitsprüfung von Schutzgeräten eingesetzt werden können.

Evaluation of a New Method for Immunity Testing of Current Measuring Systems for Grid Protection with Rogowski Sensors

Medium voltage switchgear protection devices increasingly start using Rogowski sensors for current measurement. These devices place different demands on immunity tests than conventional systems do, as well as normative tests have not yet been adapted. The aim of this work is to evaluate a new method for immunity testing. Therefore, the parameters which influence the coupling path of disturbance voltages have to be examined, regarding amplitude, frequency and asymmetry. The results are used to measure the actual disturbance levels occurring in medium voltage switchgears. These are subsequently used to evaluate different emulation methods which can be used for protection device immunity tests.

Berger, Julian

Die Auswirkungen von Prognosefehlern bei erneuerbaren Energien auf das Energiesystem und den Intraday Strommarkt

In von erneuerbaren Energien dominierten Elektrizitätssystemen sind Variabilität und Unvorhersehbarkeit von intermittierenden erneuerbaren Energien herausragende Merkmale. Da komplexe meteorologische Zusammenhänge in der Atmosphäre sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die Sonneneinstrahlung stark beeinflussen, wird es niemals möglich diese ohne Abweichungen vorhersagen zu können. Die Auswirkungen von diesen Prognosefehler auf das aktuelle Energie- und Handelssystem zu verstehen und eine Abschätzung zu treffen, wo in Zukunft Anpassungen möglich und in Zukunft erforderlich sind, ist Bestandteil dieser Arbeit. Aus diesem Grund werden die verschiedenen Akteure innerhalb des Energiesystems detailliert beschrieben und hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Prognosefehlern erneuerbarer Energiequellen analysiert. Darüber hinaus werden historische Daten zu Prognosefehlern hinsichtlich charakteristischer Muster und Abhängigkeiten analysiert. Darauf aufbauend wird ein statistischer Modellansatz entwickelt, um die Windkraftleistung kurzfristig prognostizieren und die Ergebnisse bewertet. Abschließend werden die verschiedenen Instanzen des Systems und ihre Wechselwirkungen erörtert, mit besonderem Blick auf den (kurzfristigen) Handel, Redispatch Maßnahmen sowie Regelerneuerbaremarkt.

The Impact of Renewable Energy Forecasting Errors on Power Systems and the Intraday Electricity Market

In RES dominated electricity systems, variability and unpredictability of intermittent RES are prominent features. Since complex meteorological relationships in the atmosphere greatly influence both wind speed and solar radiation, it will never be possible to reach a 100% forecast accuracy of variable renewable energy.

For this reason, it is important to understand what effects forecast errors have on the current energy system and the trading system in order to answer where future adjustments are possible and necessary. Therefore, the different actors in the energy system are described and analyzed regarding their dependence on forecast errors of renewable energy sources. Moreover, historical data of forecast errors is analyzed in terms of characteristic patterns and dependencies. Based on that, a statistical model

approach is developed in order to forecast the wind power output in the short-term and the results are evaluated. Finally, the different parameters of the balancing system and their interactions are discussed, including the fields of (short-term) trading, redispatch measures, and the activation and allocation of balancing power.

Burkhardt, Paul

Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Netzausbauplanung unter Einbeziehung der dynamischen Spitzenkappung

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Methoden vorgestellt, welche unter Verwendung von dynamischer Spitzenkappung automatisiert Netzausbaumaßnahmen identifizieren. Dabei werden als mögliche Ausbauvarianten die Netzverstärkung mittels Bündelleiter, mittels paralleler Systeme sowie als dritte Variante die Umbeseilung von Leitungen auf höhere thermische Grenzströme betrachtet. Die mit den erstellten Algorithmen erzielten Ergebnisse werden anhand eines 5-Knoten-Testsystems sowie anhand des Modells eines realen, sich in Süddeutschland befindlichen 110-kV-Netzes erläutert. Abschließend wird untersucht, ob mit den erstellten Methoden weniger Ausbauschritte ermittelt werden als mit einer Vergleichsmethode.

Development of an automated Method for Grid Expansion Planning including dynamic Curtailment

In this thesis two methods are presented which automatically identify grid expansion measures using dynamic curtailment. For grid expansion different options are considered: the use of bundle conductors, parallel systems and, as a third option, the use of lines with higher thermal limit capacities. The results obtained with the developed algorithms are explained using a 5-node test system and a model of a real 110 kV network located in southern Germany. Finally, it will be examined whether the methods developed in this thesis allow fewer expansion steps than a comparison method.

Dahlmann, Benjamin

Entwicklung einer modularen Softwareanwendung zur PQ-Analyse und dem zielgerichteten Einsatz netzdienlicher Komponenten

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer modularen Softwareanwendung zur Ausführung von PQ-Analysen. Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Strukturbildung der Software. Dabei werden die Hauptfunktionen in verschiedene Module unterteilt. Zielsetzung ist die einfache Erweiterbarkeit der Anwendung. Zur Analyse von Daten auf Netzurückwirkungen sind Algorithmen zur Erkennung von Spannungsüberhöhungen/Überspannungen, Spannungseinbrüchen/Unterspannungen, Versorgungsunterbrechungen und transienten Überspannungen implementiert. Das Verhalten des Algorithmus zur Transientendetektion kann durch die Einstellung der minimalen Anstiegsgeschwindigkeit, der minimalen Spitzenspannung, des Abklingspannungslimits und der Abklingprüfzeit beeinflusst werden. Die Auswirkung der Verwendung verschiedener Werte für diese Parameter ist in einer Parameterstudie quantifiziert.

Development of a modular Software Application for PQ Analysis and the targeted Deployment of grid-assistive Components

The aim of this master thesis is the development of a modular software application to carry out PQ analyses. The main part of the thesis deals with the structure formation of the software. The main functions are divided into different modules. The objective is the easy extensibility of the application. Recognition algorithms to analyze data on network perturbations like swell/overvoltage, sag/undervoltage, supply interruptions and transient overvoltages are implemented. The behavior of the algorithm can be influenced by setting the minimum slew rate, the minimum peak voltage, the decay voltage limit and the decay test time. The effect of using different values for these parameters is quantified in a parameter study.

Felix de Souza, Mariana

Praktisches Verfahren zur modellbasierten Bestimmung der Leerlaufverluste an Leistungstransformatoren

Angesichts der wachsenden Nachfrage nach Elektrizität ist Energieeffizienz ein wichtiges Anliegen. Da Transformatoren die Hauptkomponenten in einem Stromverteilungsnetz sind, ist ihre Effizienz von entscheidender Bedeutung. Um eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen, ist es notwendig, die Verluste weiter zu erforschen. Dieses Thema hat mit der Kommissions Verordnung (EU) Nr. 548/2014 die, die Höchstgrenzen für die Verlustleistung von Leistungstransformatoren festlegt, noch mehr an Bedeutung gewonnen. Nach [1] sind etwa 54% der Verluste eines Transformators die Leerlaufverluste, die sich aus Kern-, Kupfer-, Streu- und dielektrischen Verlusten zusammensetzen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Kernverluste, d.h. den Leistungsverbrauch des ferromagnetischen Materials des Transformator kernels. Ziel dieser Arbeit ist die praktische Entwicklung einer modellbasierten Methode zur Abschätzung der Leerlaufverluste von Leistungstransformatoren in Verteiltransformatoren mit Hilfe von Messdaten, ohne dass ein Betrieb des Transformators mit Nennspannung und -frequenz erforderlich ist.

Practical Method for the model-based Determination of no Load Losses in Power Transformers

Energy efficiency is a major concern with the growing demand for electricity. Since transformers are the main components in a power distribution grid, their efficiency is essential. To approach efficiency, it is necessary to get into the theme losses. This topic has gained even more strength with the Commission Regulation (EU) No 548/2014, which sets maximum power loss limits for power transformers. According to [1], approximately 54% of the losses from a transformer are the no-load losses, which is composed by core, copper, stray and dielectric losses. This thesis aims to focus on the core losses, which is the power consumed by the ferromagnetic material of the transformer core. The objective of this thesis is the practical development of a model-based method to estimate the no-load power loss in distribution type power transformers, using measurement data for it, but without requesting to operate the transformer with rated voltage and frequency.

Frohnmaier, Jens

Messtechnische Untersuchung von Entladungseinsetzspannungen durch elektrische und optische Methoden in diversen Isolierflüssigkeiten bei verschiedenen Arten der Spannungsbeanspruchung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Bestimmung der Einsetzspannung von Entladungen im inhomogenen Feld in natürlichem Ester und Mineralöl. Dabei werden verschiedene inhomogene Anordnungen untersucht. Dies sind Grammophonnnadel – Kugel, aber auch Spitze–Kugel-Anordnungen. Die Prüflinge werden mit AC- und Blitzstoßspannungen belastet. Bei den Untersuchungen wird auch die Anzahl der Entladungen und der Entladungspegel innerhalb eines bestimmten zeitlichen Intervalls erfasst und in die Auswertung aufgenommen. Aus dem erfassten Pegel wird mithilfe des Ansatzes nach Schwaiger die Feldstärke berechnet. Mittels geeigneter Software wird die Entladungsverteilung erfasst. Diese wird ebenfalls im Laufe der vorliegenden Arbeit untersucht und ausgewertet. Ein weiterer Punkt ist, dass die Kritik an der Norm IEC 60270 bezüglich der Klassifikation einer Teilentladung im Laufe der Untersuchungen überprüft wird. Somit dient diese Arbeit dazu, einen Vergleich zwischen der bestehenden Norm und den Verbesserungsvorschlägen aufzuzeigen.

Metrological Investigation of Discharge Inception Voltages by Electrical and Optical Methods in various Insulating Liquids with different Kinds of Voltage Stress

This master thesis deals with the topic of determining the inception voltage of discharges in the inhomogeneous field in natural ester and mineral oil. Different inhomogeneous arrangements are investigated. The investigated arrangements are needle-ball but also tip-ball arrangements. The test specimens are loaded with AC and lightning impulse voltages. During the investigations, the number of discharges and the discharge level within a certain time interval is also recorded and included in the evaluation. The resulting field strength is calculated from the recorded level using the Schwaiger approach. The discharge distribution is recorded using suitable software. This will also be investigated and evaluated in the course of the present work. A further point is that the criticism of the IEC 60270 standard regarding the classification of a partial discharge is examined in the course of the investigations. Thus, this work serves to show a comparison between the existing standard and the suggestions for improvement.

Fu, Yuzhuo

Untersuchung von Fahrtenmustern im Pkw-Verkehr zur Überprüfung des Potentials von Vehicle-to-Grid-Anwendungen

In der Arbeit wird das Fahrverhalten von Pkw anhand von Fahrtenbüchern aus dem Deutschen Mobilitätspanel untersucht und deren Potential für vehicle2grid-Anwendungen analysiert. Zur Modellierung des Fahrverhaltens wird ein probabilistisches Modell auf Basis des Semi-Markov-Prozesses aufgebaut. Zuletzt wird ein Lademanagement mit unterschiedlichen Ladestrategien zur Ausschöpfung des vehicle2grid-Potentials der Pkw entwickelt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Pkw ein großes Potential

für vehicle2grid-Anwendungen zur Unterstützung des Netzbetreibers haben, z.B. Ausgleich der Lastschwankung, Entlastung von Betriebsmitteln und Verbesserung der Stromqualität. Allerdings müssen die zusätzlich in der Ladeinfrastruktur erzeugten Verluste bei der Energierückspeisung und die Alterung der Fahrzeugbatterie berücksichtigt werden.

Analysis of Driving Patterns in Car Traffic to check the Potential of Vehicle-to-Grid Applications

In this thesis, the driving behavior of passenger cars is examined using logbooks from the German Mobility Panel and their potential for vehicle2grid applications is analyzed. A probabilistic model, based on the semi-Markov process, is developed to model the driving behavior. Finally, a charging management is developed to exploit the vehicle2grid potential of passenger cars. As a result, passenger cars have great potential for vehicle2grid applications to support the distribution network operator, e.g. minimizing load variance, reducing the load of electrical components and improving power quality. However, losses generated in the charging infrastructure and the aging of the battery must be considered.

Gruber, Michaela

EMV-konforme elektrische Maschinenemulation im CISPR 25 Komponententest

Bei der Entwicklung von Wechselrichtern für den Automobilbereich müssen diese hinsichtlich der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) möglichst unter realen Lastbedingungen geprüft werden. Die Arbeit analysiert einen neuen Ansatz, um die Belastungskomponente (passive Impedanznachbildung oder belastete elektrische Maschine) bei EMV-Tests durch eine elektrische Maschinennachbildung zu ersetzen. Eine solche Emulation kann das elektrische Klemmenverhalten verschiedener elektrischer Antriebe in unterschiedlichen Betriebszuständen nachbilden. Es werden Funktionsweise, Anforderungen und typische Ausführungen vorgestellt. Anhand einer bestehenden Maschinenemulation wird die Eignung für den Einsatz bei EMV-Tests nach CISPR 25 untersucht. Vergleichsmessungen der leitungsgebundenen Emission mit Emulator bzw. Motor zeigen bereits eine gute Übereinstimmung bis ca. 100 kHz.

EMC compliant Electrical Machine Emulation in CISPR 25 Component Test

During the development of inverters for vehicles, inverters shall be tested according to electromagnetic compatibility (EMC) under realistic load conditions. This thesis analyses a new approach to replace the auxiliary equipment (passive impedance network or electric machine) in EMC tests by an electrical machine emulation. It simulates the electrical behavior of different electrical drives in multiple operating states at its terminals. The operating principle, its requirements and typical designs are presented in this work. The suitability of an existing emulation is evaluated for its use in EMC tests in compliance with CISPR 25. Comparative tests of the conducted emission show good agreement up to 100 kHz.

Höhn, Julia

Bestärkendes Lernen zur Optimierung der Power Quality industrieller, elektrischer Netze

Diese Arbeit untersucht die Einbettung von Reinforcement Learning in Demand Side Management, um Einsatzpläne eines industriellen Maschinenparks zu erstellen. Dabei wird das Ziel verfolgt, durch geeignete Pläne die Power Quality des Industrienetzes zu verbessern. Hierzu liefert diese Arbeit ein Reinforcement Learning Framework, welches einen Maschinenpark, die Umgebung, und eine Intelligenz, die den Einsatzplan erstellt, auch Agent genannt, implementiert. Durch Ausprobieren unterschiedlicher Einsatzpläne lernt der Agent über das Feedback der Umgebung Pläne zu erstellen, die wiederum eine gute Power Quality des Industrienetzes begünstigen. Als mögliche Ziele können einzeln oder in Kombination die Maximierung der Leistung, die Minimierung der harmonischen Verzerrung oder die Minimierung des Anteils einer Harmonischen des gesamten Maschinenparks angegeben werden.

Reinforcement Learning for Optimization of Power Quality in Industrial Electrical Grids

This work analyses the potential of applying a reinforcement learning based control strategy for a machine plant in demand side management to reduce its power quality disturbances on the overlying grid. The task of controlling a machine plant is transferred into a reinforcement learning problem. Therefore, it offers an implementation of an environment that represents the machine plant and an agent that learns by interacting with the environment to create operation plans that improve the power quality of the machine plant. Explicitly implemented objectives are maximizing the power of the machine plant, minimizing the total harmonic distortion or minimizing the harmonic content of a single harmonic order of the whole machine plant. Every single point can be a target as well.

John, Lukas

Untersuchung des Flexibilitätspotentials eines Logistikzentrums zur Erbringung von Netzdienstleistungen

In dieser Arbeit wird das netzdienliche Flexibilitätspotential eines Logistikzentrums anhand der Auswertung von Messdaten evaluiert. Hierfür wurde eine Lastoptimierung implementiert, welche Prozess-Verschiebungen der Regalbediengeräte berechnet, um die maximale Leistung zu minimieren. Damit kann die maximale Leistung im Durchschnitt um die Hälfte reduziert werden. Die Lastoptimierung kann zur Abschätzung des Flexibilitätspotentials prinzipiell auf alle Verbrauchertypen mit verschiebbaren Prozessen angewendet werden. Wie durch eine Lastflussberechnung nachgewiesen wurde, kann die Auslastung der Leitungen im Netz durch die Lastoptimierung um bis zu 1 % reduziert werden. Bei stärker ausgelasteten Netzen und der Optimierung größerer oder mehrerer Logistikzentren kann mit einem deutlich höheren Effekt gerechnet werden.

Analysis of the Flexibility Potential of a Logistic Center for the Provision of ancillary Services

This thesis evaluates the grid-oriented flexibility potential of a logistics center, based on measured data. For this purpose, a load optimization problem was implemented, which redefines the utilization of warehouse cranes to minimize the peak load. The approach can be applied to all types of machines with adaptable processes. As demonstrated by a load flow calculation, the utilization of the power lines in the network can be reduced by up to 1 % by optimizing the load in this way. A significantly higher effect can be expected for networks with higher occupation and by optimizing larger or multiple logistics centers.

Juraske, Marcel

Analyse der Realisierbarkeit einer elektrischen Großstadtbelieferung unter Berücksichtigung von Netzauswirkungen

Diese Arbeit zielt auf den Aufbau eines Modells zur Bestimmung des Energiebedarfs einer mit batterieelektrischen Fahrzeugen belieferten Großstadt. Dem Modell liegen Verkehrszählungen zugrunde, mithilfe derer zeitliche und örtliche Aussagen zu Verkehrsströmen getroffen werden können. Ergänzend werden reale Fahrprofile und aktuell verfügbare batterieelektrische Lkw hinterlegt, um Berechnungen für Energiebedarf, Nachladebedarf und auftretende Lasten für jede durchgeführte Fahrt zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem für schwere Lkw ein hoher Energiebedarf besteht. Diese sorgen für hohe Lastspitzen. Der Nachladebedarf kann reduziert werden, wenn Fahrzeuge ihre Fahrten vollgeladen antreten. So kann der Energiebedarf der Stadt reduziert und mithilfe von Photovoltaikanlagen gedeckt werden.

Analysis of the Feasibility of an electric Delivery Traffic to large Cities and its Consideration in Grid Planning

In this thesis, a model to determine the energy demand regarding the usage of battery electric vehicles for the delivery of large cities is created. It is based on traffic censuses. Furthermore, real driving profiles and the data of real electric vehicles are added to calculate the energy demand, the need of interim charging and occurring loads. The results show a high energy demand of heavy trucks. The requirement of interim charging can be reduced by using fully charged trucks. This also lowers the energy demand within the city, which can be provided using photovoltaics.

Khazaal, Tarek

Power Quality Zustandsschätzung in industriellen Niederspannungsnetzen

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird gezeigt, dass sich Oberschwingungen im Spannungs- und Stromsignal mit dem Kalman-Filter Algorithmus bestimmen lassen. Das Problem hierbei ist jedoch, dass der Kalman-Filter nur den nächsten Abtastschritt vorhersagen kann. Die Fähigkeit nur einen Zeitschritt in die Zukunft vorherzusagen rechtfertigt nicht den dadurch entstehenden Schätzfehler. Deshalb wird dieser Algorithmus um einen innovativen Ansatz erweitert, der Messdaten aus der Vergangenheit als

Grundlage für den Schätzprozess für zukünftig auftretende Oberschwingungen verwendet. Es zeigt sich, dass bei ausreichend vorhandenen Erfahrungswerten ein prädiktives Verhalten zur Bestimmung des Einflusses von Oberschwingungen erreicht werden kann. Eine hinreichend gute Schätzung hat zur Folge, dass Störungen bereits präventiv behandelt werden können.

Power Quality Estimation for industrial Low Voltage Grids

This master thesis shows that the voltage and current harmonics can be determined using the Kalman filter algorithm. The problem lies, however, in the fact that the Kalman filter only predicts the next sampling step. The ability to predict only a time step forward into the future does not justify the resulting estimation error. Therefore, this algorithm is based on an innovative approach that uses measurement data from the past as the basis for the estimation process for harmonics occurring in the future. It turns out that if there are sufficient experience values, a prediction of the future influence of harmonics can be reached. This signifies that malfunctions already can be treated preventively.

Koch, Stephan

EMV-Bewertung verschiedener Kontaktierungen von Gehäusebauteilen

Es existieren bereits genormte Vorgänge und Aufbauten, um die Einfügedämpfung eines Bauteils auf einem Signalpfad zu messen. Allerdings sind die vorhandenen Antennen und Messapparaturen aufgrund ihrer Größe nicht für alle Anwendungen geeignet. Soll beispielsweise die Einfügedämpfung innerhalb eines Gehäuses gemessen werden, können gängige Verfahren aufgrund der beengten Platzverhältnisse nicht zum Einsatz kommen. Diese Arbeit untersucht, wie die Einfügedämpfung innerhalb räumlich beschränkter Gehäuse gemessen werden kann. Der konzeptionelle Messaufbau wird an einem Aluminiumgehäuse mit zwei separaten EMV-Zonen bewertet. Zusätzlich werden mögliche Maßnahmen erarbeitet, durch welche die Schirmung zwischen den Zonen erhöht werden kann.

EMC Evaluation of different Contacts of housing Components

There are already standardized procedures and setups for measuring the insertion loss of a component on a signal path. However, the existing antennas and measuring equipment are not suitable for all applications due to their size. If, for example, the insertion loss is to be measured inside a housing, conventional methods cannot be applied due to the limited space available. This thesis investigates how the insertion loss can be measured within spatially limited housings. The conceptual measurement setup is evaluated on an aluminum housing with two separate EMC zones. Additionally, possible measures are worked out by which the shielding between the respective zones can be increased.

Kornev, Vjaceslav

Entwicklung eines adaptiven Netzschutzkonzepts für Microgrids auf der Mittelspannungsebene

Der Einsatz von Microgrids kann helfen, erneuerbare Energien in Verteilnetze zu integrieren und die Energieeffizienz zu steigern. Elektrische Energieversorgungssysteme mit dezentralen Einspeiseeinheiten und geringen Kurzschlussleistungen stellen Netzschutzsysteme vor neue Herausforderungen. Inhalt der vorliegenden Masterarbeit ist die Entwicklung eines adaptiven Netzschutzkonzepts für Microgrids auf der Mittelspannungsebene. Die Arbeit beinhaltet die Entwicklung eines dezentralen adaptiven Netzschutzkonzepts, die Entwicklung eines digitalen Distanzschutzes sowie die Funktionsprüfung des adaptiven Netzschutzkonzepts an einem einfachen Netzmodell mit Hilfe eines HiL-Systems.

Development of an adaptive Power System Protection Concept for Microgrids at the Medium-Voltage Level

The use of microgrids can help to integrate renewable energies into distribution networks and increase energy efficiency. Electrical power supply systems with decentralized power supply units and low short-circuit power pose new challenges for network protection systems. The content of this master thesis is the development of an adaptive network protection concept for microgrids on the medium voltage level. The thesis includes the development of a decentralized adaptive network protection concept, the development of a digital distance protection, and the functional testing of the adaptive network protection concept on a simple network model using a HiL system.

Ledri, Matteo

FPGA basierte automatische Optimierung der Gleichtaktauslöschung im gegenphasigen Inverterbetrieb

Wechselrichter erzeugen elektromagnetische Störungen und können eine negative Beeinflussung weiterer elektronischen Komponenten hervorrufen. In redundanten Systemen, die zur Sicherstellung der ordnungsgemäßen Funktion konzipiert wurden, z.B. in Lenksystemen, können Gleichtakt-Emissionen durch gegenphasige Ansteuerung der Halbleiter im Wechselrichter reduziert werden. Streuung von Komponenten, Asymmetrien des Schaltungslayouts oder Verzögerungen in der Ansteuerkette führen zu einer schlechteren Kompensation der Emissionen. Durch Anpassung des Schaltpunktes kann die Reduzierung der Emission massiv verbessert werden. Dies kann durch manuelle Anpassung oder durch einen automatischen Algorithmus, der in dieser Arbeit entwickelt wird, erreicht werden.

FPGA based automatic optimization of common mode cancellation in inverse clocking inverter mode

Switching power converters generate electromagnetic interference and can have negative effects on other electric components. In redundant systems, which were designed to ensure the proper function, for example in steering systems, common mode emissions can be reduced by phase opposite control of the semiconductors inside the converter. Scattering of components, asymmetries in circuit layouts or delays in the control chain results in a worse compensation of emission. By adjusting

the switching point the reduction of emission can be massively improved. This can be achieved by manual adjustment or an automatic algorithm which is developed in this thesis.

Li, Xinyi

An Intelligent Fault Diagnosis Approach for Power Transformers Based on Artificial Neural Network

For assessing the mechanical condition of power transformers using the well-known frequency response analysis (FRA) method, proper interpretation of FRA results is crucial. In this work, an intelligent fault diagnosis approach for power transformers based on artificial neural network (ANN) is proposed. The database used in this thesis consists of FRA measurements from 60 power transformers of different designs, sizes, and different manufacturers. First, the algorithm for identification of frequency sub-bands are developed based on a lot of FRA traces. Second, six indicators are analysed and the best one is chosen to generate the features in order to train the neural network. Finally, the network performance is validated to classify six classes of transformer condition through real case studies.

Ein intelligenter Fehlerdiagnoseansatz für Leistungstransformatoren auf der Basis eines künstlichen neuronalen Netzes

Für die Beurteilung des mechanischen Zustands von Leistungstransformatoren mithilfe der bekannten Frequenzganganalyse (FRA) ist die richtige Interpretation der FRA-Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit wird ein intelligenter Fehlerdiagnoseansatz für Leistungstransformatoren auf der Basis eines künstlichen neuronalen Netzes (ANN) vorgeschlagen. Die in dieser Arbeit verwendete Datenbank besteht aus FRA-Messungen von 60 Leistungstransformatoren unterschiedlicher Bauart, Größe und Hersteller. Zunächst wird der Algorithmus zur Identifizierung von Frequenzteilbändern auf der Grundlage vieler FRA-Kurven entwickelt. Zweitens werden sechs Indikatoren analysiert, und der beste Indikator wird ausgewählt, um die Merkmale zum Trainieren des neuronalen Netzwerks zu generieren. Schließlich wird die Performance des Netzwerks validiert, um sechs Klassen von Transformatorzuständen anhand realer Fallstudien zu klassifizieren.

Luo, Yuqi

Erkennung von Langzeitanomalien in PQ-Messdaten

Die stetig zunehmende Anzahl an Wechselrichtern in Verteilnetzen, beispielsweise von PV-Anlagen und Elektrofahrzeugen, reduzieren die Spannungsqualität durch die Einspeisung harmonischer Oberschwingungen. Die frühzeitige Erkennung von Spannungsqualitätsproblemen kann zu deutlichen Kostenersparnissen für Verbraucher und Verteilnetzbetreiber führen. Um solche Trends zu erkennen, wurde in dieser Arbeit eine Vorhersage der Spannungsqualität anhand historischer Messdaten implementiert. Durch die Abweichung von Vorhersage und Ist-Zustand konnten so Anomalien in den Daten detektiert werden. Dabei wurden Messdaten eines Verteilnetzes mit hoher Durchdringung erneuerbarer Energien verwendet.

Detection of Long Term Anomalies in Power Quality Data

The continuing growth of inverters in distribution grids, for example with PV systems and electric vehicles, has a detrimental effects on the Power Quality due to the generated harmonic emission and voltage fluctuations. An early detection of power quality problems can result in a significant reduction in cost for customers and distribution system operators. In order to detect such trends, a prediction method was implemented in the scope of this work based on historical measurements. With the deviation of predicted values and observed measurements anomalies in the data could be detected. The measurements of a distribution grid with a high penetration of renewable energies was utilized for this work.

Müller, Sharon

Weiterentwicklung einer Aggregationsmethode zur zeitreihenbasierten Betrachtung und Integration in den Onlinebetrieb

Diese Arbeit befasst sich mit der Aggregation von Flexibilitäten eines Verteilnetzes auf Basis des aktuellen Netzzustands. So soll anhand des Netzmodells und realer Messwerte periodisch das vorhandene Flexibilitätspotential beliebiger Verteilnetze berechnet werden können. Langfristiges Ziel ist eine Online-Anbindung der Implementierung, um so eine Echtzeitberechnung des Flexibilitätspotential durchzuführen. Dafür wird zunächst eine Zustandsschätzung als Weighted-Least-Square-Algorithmus durchgeführt und so der aktuelle Betriebspunkt des Netzes sowie der einzelnen Anlagen ermittelt. Basierend auf den Ergebnissen werden die Flexibilitäten der einzelnen Anlagen an ihren aktuellen Arbeitspunkt angepasst und anschließend unter Berücksichtigung der Netzrestriktionen zusammengefasst. Die Aggregation der Flexibilitäten wird anhand eines linearisierten Optimierungsproblem durchgeführt.

Enhancement of an Aggregation Method for a Time Series-Based Analysis and its Integration into an On-Line Operation

This thesis deals with the aggregation of flexibilities in a distribution grid based on its current state. The long-term goal is an online application in order to carry out a real-time calculation of the flexibility potential. Firstly, the system state is estimated using the weighted-least-square technique obtaining both, the actual operation points of the grid and of each flexibility providing unit. Based on the results, the flexibility potential of a power unit is adapted to its current operating point and then aggregated, considering grid restrictions. The aggregation of the flexibilities is carried out based on a linearized optimization problem.

Otteny, Felix

Modellierung von Ladeprofilen elektrischer Lkw aus Fahrtenketten zur Untersuchung einer zukünftigen Netzintegration

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und Modellierung von Mobilitäts- und Ladestrategien für einen elektrischen Wirtschaftsverkehrssektor sowie die ortsabhängige Netzintegration der Lastverläufe. Reale Fahrprofile und auf dem Markt verfügbare Lkw-

Modelle bilden die Grundlage. Ladestationen und Oberleitungen fungieren als Ladesystem zur Deckung des Energiebedarfs. Anhand eines exemplarischen Logistikzentrums inklusive der realen Nachbildung des Warenein- und Warenausgangs werden der Ladebedarf und die Netzauswirkungen von unterschiedlichen Ladeleistungen und Synergieeffekten bei der Kopplung mehrerer Ladesysteme untersucht. Selbst bei vollständiger Elektrifizierung des Güterverkehrs sind keine Netzengpässe am Logistikzentrum zu erwarten.

Modelling of Electric Truck Charging Profiles using Trip Chain Generation for future Grid Planning

The goal of this thesis is the analysis and modelling of mobility and charging strategies for an electric economic transport sector along with the location-dependent grid integration of charging profiles. They are based on real driving profiles and electric truck models available on the market. Using an exemplary logistics center, including a real model of the incoming and outgoing goods, the charging demands and the grid effects of different charging powers and synergy effects from the linking of different charging systems are analyzed. Even in the case of full electrification of freight transport, no grid bottlenecks are to be expected at the logistics center.

Riegert, Tim

Entwicklung eines automatisierten Netzplanungstools auf Basis heuristischer Verfahren

Durch den Zubau der dezentralen Energieerzeugungsanlagen kommt es zu einem bidirektionalen Leistungsfluss und erhöhten Anforderungen an die Verteilnetze. Dies führt zu einem erhöhten Planungsaufwand der Netzverstärkung und des Netzausbaus. Durch die Entwicklung eines Tools auf Basis heuristischer Verfahren soll der komplexer werdende Planungsprozess automatisiert werden. Die Entwicklung erfolgt in Python, beinhaltet die Veränderung und Bewertung von Netzmodellen und gleicht dem manuellen Prozess zum Aus- und Umbau von Verteilnetzen. Zum Einsatz kommt ein Differential Evolution Algorithmus zur Optimierung einer Fitnessfunktion für die Bewertung neuer Netze. Die Entwicklung zeigt, dass es möglich ist, den Planungsprozess zu automatisieren und mit Hilfe der heuristischen Verfahren zuverlässige Ergebnisse mit verschiedensten Bewertungsfaktoren zu erhalten.

Development of an automated 'Network Planning Tool based on heuristic Methods

Due to the expansion of decentralized power generation plants a bidirectional power flow and increased demands on distribution networks are provoked. This leads to an increased planning effort for network reinforcement and network expansion. By developing a tool based on heuristic methods it is intended to simplify and automate the increasingly complex planning process. The development is done in Python, includes the modification and evaluation of network models and is based on the manual process for the extension and modification of distribution networks. A differential evolution algorithm is used to optimize a fitness function for the evaluation of the newly created networks. The progress shows that it is possible to automate the planning process and obtain reliable results based on different evaluation factors with heuristic methods.

Rudolf, Daniel

Aufbau eines Lastmanagementsystems für ein Logistikzentrum unter Berücksichtigung von Elektromobilität

Ziel dieser Arbeit ist es, die Ladevorgänge von E-PKWs und E-Lkw mit dem Energieverbrauch eines Logistikzentrums und der Erzeugung einer Photovoltaikanlage durch ein Lastmanagementsystem zu kombinieren. Als Unterstützung dient ein elektrischer Energiespeicher. Das Lademanagementsystem führt zu einer erheblichen Reduzierung der maximalen Last am Logistikzentrum. Ein Energiespeicher ist jedoch nur zur Glättung kurzer Lastspitzen geeignet, da ansonsten die Speicherkosten die Einsparungen übersteigen. Eine Erhöhung des Eigenverbrauchs durch den Energiespeicher ist nur begrenzt möglich, da nur an Wochenenden Überschüsse auftreten. Das Lastmanagementsystem verringert die Auslastung der elektrischen Betriebsmittel des überlagerten MS-Netzes. Auch die Spannungsabsenkung am Anschlusspunkt kann so reduziert werden.

Development of an intelligent Charge-and-Load Management System for a Logistics Centre

In this work charging processes of E-cars and E-trucks are combined with the load of a logistics center and the generation of a photovoltaic system by a load management system supported by an electrical energy storage. This leads to a considerable reduction of the maximum load. However, an energy storage system can only smooth out short load peaks, as otherwise the storage costs exceed the savings. An increase in the internal consumption is limited, as surpluses only occur on weekends. The load management system reduces the loading and voltage drop of the overlaid MV grid.

Stang, Irene

Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Netzausbauplanung auf Basis von Performanceindizes

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist ein Verfahren zu entwickeln, welches auf Basis von Performanceindizes automatisiert Netzausbaumaßnahmen identifiziert. In Anlehnung an die Arbeit von Wood und Wollenberg werden zwei Performanceindizes definiert, die beide auszubauende Leitungen lokalisieren können. Als Ausbaumaßnahmen werden der Ausbau mittels Bündelleiter, Umbeseilung und paralleler Systeme betrachtet. Durch die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Performanceindizes und Ausbaumaßnahmen ergeben sich verschiedene Szenarien für den Netzausbau. Diese werden zunächst an einem 5-Knoten-Testsystem und anschließend an einem realen 110-kV-Netz angewendet und validiert. Zum Schluss werden die verschiedenen Szenarien miteinander verglichen und die beste Methode zur Netzausbauplanung bestimmt.

Development of an automated Process for Grid Expansion Planning based on Performance Indices

The overall objective of this master thesis is to develop an automated process for grid expansion planning based on performance indices. In accordance with Wood and Wollenberg's research two different performance indices are defined which also represent two approaches for identifying those lines in need for expansion. For the expansion

measures three particular options are considered: expansion by bundle conductors, rewiring and parallel systems. Dependent on different possible combinations of performance indices as well as expansion measures, so-called scenarios can be derived. These scenarios are first applied and validated on a 5-node test system and subsequently on a real 110 kV network. Finally, the various scenarios are compared with each other and the best method for network expansion planning is determined.

Steiner, David

Bewertung von LSTM Architekturen und Prognostizierbarkeit von Datensätzen in der Zeitreihenprognose

Diese Arbeit untersucht unterschiedliche LSTM-Architekturen für die Mehrschrittprognose von Zeitreihen. Dabei werden den LSTM-Schichten Convolutional-Netze vorgeschaltet und ebenfalls eine Encoder-Decoder-Architektur implementiert. Dafür wurde mittels der Programmiersprache Python unter Verwendung der Keras-Bibliothek ein LSTM-Framework entwickelt, welches sowohl das Training, als auch die Validierung übernimmt. Die zu prognostizierenden Zeitreihen bestanden aus Strom- und Spannungsverläufen unterschiedlicher Netz-Knotenpunkten, aus synthetisierten Sinusdaten, die mit Power Quality Fehler behaftet waren und aus Lastverläufen einer Stromtankstelle. Um sowohl qualitativ als auch quantitativ beschreiben zu können, wie eindeutig und in sich konsistent eine Zeitreihe ist, wurde ein Daten-Analyse-Algorithmus entwickelt. Dieser schätzt die Prognostizierbarkeit einer Zeitreihe anhand eines Prognose-Kennwerts ab.

Evaluation of LSTM Architectures and Predictability of Data Sets for Time Series Forecasting

This research examines different LSTM architectures allowing forecasts of the multi-step time series. In the course of this work convolutional neural networks get attached to LSTMs and an Encoder-Decoder-Architecture is implemented as well. For this purpose, an LSTM framework was developed by using the programming language Python with the Keras library which takes over both the training and the validation process. The time series to be forecasted consisted of current and voltage profiles originated from different network nodes, synthesized sine data including power quality errors and from load profiles of an electric charging station. In order to be able to describe the further course, all influencing factors must be considered. A data-analysis-algorithm was developed to evaluate the consistency and the deterministic and the stochastic proportion of each given dataset.

Straub, Adrian

Detektion und Separierung fester Störstellen in HGÜ-GIS

Um die Versorgungssicherheit in elektrischen Energienetzen zu beherrschen bedarf es der genauen Kenntnis von Fehlerstellen in Gleichspannungskomponenten. In der vorliegenden Arbeit werden am Beispiel einer gasisolierten Schaltanlage für Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ-GIS) feste Störstellen anhand verschiedener

Methoden vermessen. Dabei wird mit einem UHF-Teilentladungs-Sensor, zwei Strommessungen und optisch mit einem Photomultiplier gemessen. Variationen gibt es hinsichtlich des Fehlerortes, der Störstellenlänge, des Gasdrucks sowie der angelegten Spannungspolarität. Mithilfe der Software MATLAB werden verschiedene Merkmale der TE-Impulse ausgewertet. Dadurch kann ein TE-Impuls einem bestimmten Defekttyp der festen Störstelle oder des frei beweglichen Partikels zugeordnet werden. Die Messergebnisse zeigen zudem, dass die Sensibilität der TE-Messsysteme in Abhängigkeit der untersuchten Defektparameter variieren.

Detection and Separation of fixed Defects in HVDC GIS

In order to control the supply in electrical energy networks, it is necessary to have precise knowledge of defect locations in DC-voltage components. In the present work, fixed protrusions are attached in a HVDC-GIS and surveyed using various measurement methods such as a UHF, two current measuring systems and a photomultiplier. The results vary with respect to the defect location, the length of the protrusion, the gas pressure and the applied voltage polarity. By using the software MATLAB® PD, pulses are evaluated according to various characteristics. This allows an assignment of a PD-pulse to the correspondent defect type of the fixed protrusion or to the free moving particle. The measurement results also show that the sensitivity for the detection of partial discharges varies for each measuring system.

Thomas, Florian

Bestimmung und Beeinflussung von Transitflüssen im Hochspannungsnetz unter Einsatz von Phasor Measurement Units

Die vorliegende Masterarbeit behandelt die Bestimmung von Transitflüssen in der Hochspannungsebene elektrischer Energienetze. Diese Flüsse stellen Durchleitungen zwischen verschiedenen Verknüpfungspunkten mit dem Höchstspannungsnetz dar, die aus Leistungsflüssen in dieser Netzebene resultieren. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe von Messdaten aus Phasor Measurement Units an diesen Verknüpfungspunkten. Die Transitflüsse werden aus der Differenz der tatsächlichen Leistungsflüsse auf einer Leitung und den Verteilflüssen berechnet, welche nur aus der Verteilfunktion des Hochspannungsnetzes an Verbraucher und untergeordnete Netzebenen resultieren. Daneben wurde auch die Beeinflussbarkeit dieser Flüsse mittels verschiedener Komponenten analysiert.

Determination and Regulation of Transit Flows in the High Voltage Network using Phasor Measurement Units

This master thesis deals with the determination of transit flows in High-voltage level of electrical energy networks. These flows represent transmissions between different connection points with the extra-high voltage grid, resulting from power flows at this grid level. The calculation is performed using measurement data from Phasor Measurement Units at these connection points. The transit flows are calculated from the difference between the actual power flows on a line and the distribution flows resulting only from the distribution function of the high-voltage network to consumers and subordinate network levels. In addition, the influence of these flows by different components was analyzed.

Tyroller, Karina

Der Day-Ahead Strommarkt unter Berücksichtigung der Kontingenzzanalyse und erneuerbarer Energien

Die erneuerbaren Energien spielen eine wichtige Rolle auf dem Strommarkt. Die Stromproduktion der Erneuerbaren ist jedoch nur begrenzt vorhersagbar, und eine Regulierung der Einspeisung ist nur bei drohender Netzüberlastung erlaubt. Die Integration der regenerativen Energien stellt eine Herausforderung für die Stromnetzbetreiber dar, wofür ein erhöhter Forschungsbedarf besteht. Es werden modellbasierte Vorhersagen über die energiewirtschaftlichen Auswirkungen benötigt, um die Veränderungen im Strommarkt abzubilden. Aus diesem Grund behandelt diese Arbeit die Simulation eines Day-Ahead Strommarktes mit Wind und Photovoltaik (PV)-Generatoren unter Berücksichtigung der Kontingenzzanalyse. Das Marktmodell, welches den kostengünstigsten Einsatz der Generatoren bestimmt, basiert auf dem Unit Commitment und Economic Dispatch Ansatz. Die Berechnung des Netzmodells erfolgt nach der Newton-Raphson-Methode. Mit dieser Methode wird nicht nur die Leistungsflüsse der Leitungen bestimmt, sondern auch die Netzverluste. Überlastungen der Leitungen werden durch die Redispatch-Methode behoben. Während dem Redispatch wird der Einsatzplan der Generatoren durch die Verwendung einer Optimierungsfunktion und des Power Transfer Distribution Faktors neu bestimmt. Zusätzlich wird im Netz eine Kontingenzzanalyse mithilfe des Load Outage Distribution Faktors durchgeführt. Dieser Faktor wird verwendet, um die Leistungsflüsse der Leitungen auf den höchsten Wert zu erhöhen, welcher bei dem Ausfall einer Leitung auftreten kann. Der Redispatch-Prozess wird dann mit diesen erhöhten Leistungsflüssen durchlaufen. Die Simulationen werden mit dem IEEE 30-Busssystem und dem IEEE 118-Busssystem ausgeführt. Der Datensatz der erneuerbaren Energieerzeugern wird auf Grundlage von historischen Windgeschwindigkeits- und Sonnenstrahlungsdaten aus Deutschland erstellt. Zusätzlich werden die Lastdaten des IEEE 118-Bussystems durch Berechnung eines deutschen Standardlastprofils generiert. Die Ergebnisse zeigen, dass beide IEEE Systeme unter normalen Bedingungen mit und ohne erneuerbare Energien betrieben werden können. Bei Anwendung der Kontingenzzanalyse ist jedoch eine hohe Lastreduzierung erforderlich. Im Falle des Marktmodells werden zwei verschiedene Versionen simuliert. Die konventionelle Version versucht für jede Stunde eine optimale Lösung des Problems zu finden, während die neue Version für den gesamten simulierten Zeitraum eine Lösung sucht. Die Simulationen zeigen, dass die zweite Version eine kostengünstigere Lösung findet, jedoch bei zunehmender Netzwerkgröße die Simulationsdauer stark zunimmt.

Day-ahead Marketing considering the Contingency Analysis and Renewable Energies

Renewable energies play an important role in the electricity market. Renewable generation is not completely predictable, and feed-in management is restricted to situations in which grid congestions in the power system could occur. The integration of renewable energies into the energy system is a challenge that requires an in-depth investigation. There is the need for model-based forecasts of the economic impacts to describe the changes in the electricity market. Therefore, in this thesis simulations of

the day-ahead electricity market including wind and photovoltaic (PV) generators as well as the contingency analysis are run. The simulations include a market model to solve the unit commitment and economic dispatch problem. A grid model is used to calculate the power flow of the branches and the grid losses using Newton Raphson's method. Branch congestions are solved through redispatching. For this purpose, the generators are redispatched through an optimisation solver and the power transfer distribution factor. A contingency analysis, investigating the outage of one branch, is applied by using the line outage distribution factor. This factor is applied to increase the power flows of the branches to their worst-case scenario. The redispatch process is then operated with these enhanced power flows. The simulations are carried out using the IEEE 30 bus system and the IEEE 118 bus system. Historic wind speed and solar radiation data of Germany are used as input data for the renewable energy production. Additionally, the load data of the IEEE 118 bus system is generated through calculating a standard load profile of Germany. The results indicate that both IEEE systems are able to meet the demand without violation of the grid capacity during normal conditions with and without renewable energies. However, when applying the contingency analysis, a high amount of load curtailment is needed. In the case of the market model, two different versions are simulated. The standard version tries to find an optimal solution to the problem for every hour consecutively while the other version searches for the whole simulated period an optimal solution. The simulations indicate that the second version finds solutions with less costs. However, the computation time increases with the size of the simulated electricity grid.

Wan, Jinping

Automatisierte Erzeugung von Ladeprofilen für Elektromobilität in Gewerbegebieten

Ziel dieser Arbeit ist es, ein möglichst realistisches Lastprofil für das Laden elektrischer Mitarbeiterfahrzeuge an einem Logistikzentrum und in einem Gewerbegebiet zu generieren und den Einfluss der Ladevorgänge der Mitarbeiter auf das Stromnetz zu erforschen. Die Verallgemeinerung der zeitlichen Anordnung des Lastprofils gestattet die Generierung des Lastprofils für Mitarbeiterladen anhand unterschiedlicher Arbeitszeitmodelle. Unter Berücksichtigung eines Hochlaufs der Elektrofahrzeuge in einem Gewerbegebiet besteht keine Gefahr für das Netz sogar bei einer Elektrofahrzeugquote von 100 %, wenn die Ladeleistung 10 kW beträgt. Bei einer Ladeleistung von 22 kW führt das Mitarbeiterladen in dem Gewerbegebiet zur Leitungsüberlastung, wenn die Elektrofahrzeugquote oberhalb 90 % liegt.

Automated Generation of Charging Profiles for Electromobility in Industrial Areas

The aim of this work is to generate realistic charging profiles for electric vehicles of the employees at a logistics center and in an industrial area, and to investigate the influence of the workplace charging on the power grid. The chronological arrangement of charging profiles allows generating charging profiles for electric vehicles in the workplace, based on different working time models. The results of a time-series-based load

flow calculation show that the charging of electric vehicles with of 11 kW and 22 kW charging powers bring no critical load flow situation in the analyzed industrial area.

Wang, Jicheng

Unüberwachtes Lernen in der Power Quality Datenverarbeitung

In dieser Arbeit wird das automatisierte Labeln von PQ-Störfällen anhand von Strom- und Spannungsdaten einer Simulation durchgeführt. Die Datensätze von Strom und Spannung werden in ihrer Dimensionalität reduziert, um Features mittels PCA oder Autoencoder zu extrahieren und anschließend durch Autolabeling in die entsprechende Klasse zugeteilt. Zur Dimensionsreduktion kommen dabei zwei Ansätze – die PCA und der Autoencoder, zum Einsatz. Für das Autolabeling wird der K-Means++ Algorithmus und ein Verfahren zur Distanzberechnung zwischen den Features von Trainingsdaten und Testdaten angewendet. Im Verlauf dieser Ausarbeitung wurden die PCA, ein Autoencoder und ein Sparse Autoencoder aus dem Bereich der neuronalen Netze implementiert.

Unsupervised Learning for Power Quality Data Processing

In this thesis, the automated labeling of PQ incidents is carried out on the basis of current and voltage data of a simulation. The data sets of current and voltage are reduced in their dimensionality in order to extract features using PCA or autoencoder and then assigned to the appropriate class through auto-labeling. Two approaches are applied to reduce dimensions - the PCA and the autoencoder. The K-Means ++ algorithm and a method for calculating the distance between the features of training data and test data are used for auto labeling. In the course of this elaboration, the PCA, an autoencoder and a sparse autoencoder from the field of neural networks were implemented.

Warendorf, Tom

Selbstlernende Hyperparameteroptimierung für LSTM-Netzwerke in der Zeitreihenprognose

In dieser Arbeit wird eine selbstlernende Hyperparameteroptimierung auf der Basis eines Long Short-Term Memory neuronalen Netzes zur Vorhersage von Zeitreihendaten entwickelt. Die erste Aufgabe besteht darin, die Vorhersage von Netzdaten mittels Feature Engineering und Hyperparametertuning zu verbessern, um Power-Quality-Fehlerfälle korrekt vorherzusagen. Die sprunghaften Abweichungen innerhalb einer Sekunde, die Spikes, sind ein Merkmal in den Netzdaten, welche bisher nicht vorhergesagt werden konnten. Die Vorhersage solcher Merkmale ist aber im ersten Schritt wichtig, um später weitere Power-Quality-Fehlerfälle vorhersagen zu können, die schwieriger identifizierbar sind.

Self-Learning Hyper-Parameter Optimization on LSTM-Networks for Time Series Forecasting

This thesis focuses on the self-learning hyper-parameter optimization on long short-term memory neural network to predict time-series data. The first task is the improvement of power-grid-data predictions, via feature engineering and hyperparameter

tuning, to be able to correctly forecast power-quality-issues. Predicting characteristics, such as spikes, i.e. a sharp increase in magnitude within one second in the data could not be done correctly in previous work. However, predicting these characteristics is an important first step when searching to predict power-quality-issues that are more difficult to be identified.

Weiblen, Maximilian

Entwicklung einer Störgrößenregelung für Prädiktive Pulskompensation zur Entstörung von DC/DC Wandlern

Aktive EMV-Filter ermöglichen dieselbe Dämpfung bei geringerem Bauraum im Vergleich zu passiven Filtern. Mit der prädiktiven Pulskompensation kann die Gleichtaktstörung direkt an der Quelle ausgelöscht werden. Die Synchronisation der Schaltflanken ist entscheidend für die Dämpfung. Diese Masterarbeit stellt eine Störgrößenregelung vor, welche die Synchronisation des Gegenpulses optimiert. Hierfür wird eine Messgröße am Y-Kondensator abgegriffen. In der Simulation wird die Grundschwungung des Tiefsetzstellers um etwa 30 dB gedämpft. Die entwickelte Hardware erreicht eine Dämpfung von 40 dB. Ein in VHDL geschriebenes Modul fragt die Messwerte vom ADC ab. In beiden Fällen werden gerade und ungerade Harmonische bis 2 MHz gleichermaßen unterdrückt.

Development of a Disturbance Dependent Control for predictive pulsed Compensation for EMI Suppression of DC/DC Converters

Active EMI-filter enable the same attenuation in a smaller installation space than passive filters. With predictive pulsed compensation, common mode interference can be eliminated directly at the source. The synchronization of the switching edges is decisive. This master thesis presents a disturbance control which optimizes the synchronization of the counter pulses. For this purpose, a signal is measured at the Y-capacitor. In simulation, the fundamental frequency of the buck converter is damped by ≈ 30 dB. The developed hardware achieves an attenuation of 40 dB. A VHDL module queries the measured values from the ADC. In both cases even and odd harmonics up to 2 MHz are suppressed equally.

Wörner, Verena

Simulation der raumladungsbedingten Bewegung leitfähiger Partikel in GIS

In dieser Arbeit wird die Entwicklung einer Raumladungszone an metallischen Partikeln und festen Störspitzen mit Hilfe einer numerischen Simulation analysiert. Zunächst werden die benötigten Gastransportparameter von SF₆ anhand der Boltzmann-Gleichung bestimmt und in einer 1D-Simulation der GIS-Anlage das Verhalten der Raumladungszone bei verschiedenen EEDFs untersucht. In einer 2D-Simulation wird eine Prüfzelle und ein Ausschnitt einer GIS-Anlage nachgebildet. Dabei werden feste Störspitzen und freibewegliche Partikel in der Prüfzelle bzw. GIS-Anlage simuliert. Die Ergebnisse der Simulation werden mit realen Strommessungen aus der Prüfzelle bzw. der GIS-Anlage verglichen. Somit kann der Aufbau der Raumladungszone

und das Verhalten der Elektronendichten sowie der positiven und negativen Ionen-dichten während einer Teilentladung analysiert werden und einen Rückschluss auf die verschiedenen Bewegungsarten des Partikels geben.

Simulation of particle motion influenced by space-charge regions in HVDC GIS

In this thesis the development of a space-charge region at metallic particles and fixed interference peaks is analyzed by means of numerical simulation. The required swarm parameters of SF₆ are determined by means of the Boltzmann equation. In a 1D simulation of the GIS system the behavior of the space-charge zone is examined with different EEDFs. In a 2D simulation fixed protrusions with free moving particles are simulated in a test cell and in a GIS compartment. These results are compared with current measurements performed at the experimental arrangements. Thus, the structure of the space charge zone and the behavior of the electron, pos. and neg. ion densities during a partial discharge can be analyzed.

Wolfrum, Sunpreet

Entwicklung eines Systems zur Lokalisation von TE in Energiekabeln unter Ausnutzung der Frequenzinformationen

Um eine fehlerfreie und funktionstüchtige Stromversorgung zu garantieren, ist die Überwachung des Isolationszustands von Kabelstrecken mittels TE- Monitoring-systemen sinnvoll. Da es sich bei Kabelstrecken um ausgedehnte Prüfobjekte handelt, ist die Lokalisation der TE-Quelle von entscheidender Bedeutung. Aufgrund dessen befasst sich diese Arbeit mit der Untersuchung einer Lokalisationsmethode, die die Frequenzinformation eines TE-Impulses auswertet. Hierzu werden die Dämpfungseigenschaften von Energie- und Koaxialkabeln im Frequenzbereich von 30 kHz bis 1 GHz untersucht. Es wird eine Dämpfungsdatenbank angelegt. Auf Basis der Dämpfungseigenschaften wird ein Messsystem in Hard- und Software entwickelt, das eine grobe Lokalisierung der TE-Quelle im Energiekabel ermöglicht.

Development of a System for Partial Discharge Localization in Power Cables using Frequency dependent Signal Attenuation Characteristics:

Insulation monitoring of cable routes can serve as a useful tool in order to guarantee a faultless and functional PD free power supply. Since cable routes are extended objects it is of crucial importance to localize an occurring PD. This thesis deals with the investigation of a localization method that evaluates the frequency in PD pulses. For this purpose, the attenuation properties of energy and coaxial cables in the frequency range from 30 kHz to 1 GHz are examined. An attenuation database is created. Based on these attenuation properties, a PD localization system is developed using these frequency dependent characteristics.

Yang, Bin

Aufbau eines Verkehrsmodells zur regionalisierten Bewertung der Netzauswirkungen des Ladens elektrischer Lkw

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines autobahnbasierten Verkehrsmodells, das durch eine Knoten- und eine Strecken-Matrix modelliert wird. Hierbei ermöglichen

durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereitgestellte Zählstellendaten und autobahnspezifische Zuweisungen dieser Zählstellen eine Abschätzung der Verkehrsstärke jedes Autobahnabschnitts. Das entwickelte Verkehrsmodell im Straßengüterverkehr wird zur Abschätzung der Stromnachfrage und des Lastgangs von Oberleitungs-Lkw verwendet. Der durch Oberleitungen stromversorgte O-Lkw trägt zur Dekarbonisierung des wachsenden Straßengüterverkehrs bei und zeigt außerdem hohe Marktpotentiale.

Development of a traffic model for regional analysis of electric trucks on distribution grids

The aim of this thesis is to develop a motorway-based traffic model, consisting of a node matrix and a route matrix. The counting point data provided by the Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) and the allocation of these counting points to each motorway section allows to estimate the traffic intensity of each motorway section. The traffic model is implemented in road freight transport for estimating the demand for electricity or load profile of overhead line trucks. The catenary truck, which is powered by overhead lines, contributes to the decarbonization of the growing road freight traffic and shows a high market potential.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 01.11.2019 bis 31.10.2020:

NAME	THEMA
Albrecht, Daniel (*)	Potenzialanalyse und Test von strukturellen Optimierungen bekannter Machine Learning Verfahren. Potential Analysis and Testing of Structural Optimizations of State-of-the-Art Machine learning Algorithms.
Baronat, Lars (*)	Untersuchung niederfrequenter Teilentladungsströme freibeweglicher Partikel Investigation on low frequency partial discharge currents of free metallic particles
Berguiga, Sarra (*)	Simulation von Vorentladungen in Isolierflüssigkeiten. Simulation of Pre-Discharges in Insulating Liquids.
Brenner, Marina (*)	Entwicklung eines Modells des deutschen Übertragungsnetzes zur Analyse und Bewertung von zeitweiligen Überspannungen. Development of a Model of the German Transmission Network for the Analysis of temporary Overvoltages.
Burlakin, Ilya (*)	Auswahl potentiell kritischer Netznutzungsfälle. Selection of Potentially Critical System Use Cases.
Ding, Yiwei	Entwicklung eines differentiellen Impulsgenerators. Development of a differential Impulse Generator.
Dorsch, Simon (*)	Entwicklung einer Methode zur Bestimmung optimaler Kompensationszeitpunkte eines aktiven Gleichtaktfilters. Development of a Method to determinate optimal Compensation Timings for an active Common Mode Filter.

NAME	THEMA
Eherler, Simon (*)	Entwicklung eines automatisierten Netzplanungstools auf Basis heuristischer Verfahren. Development of an automated Network Planning Tool based on heuristic Methods.
Felix de Sousa, Mariana (*)	Gegenüberstellung von SFRA und Stoßspannungsprüfung zur Fehlerdetektion in Rotierenden Elektrischen Maschinen. Comparison of SFRA and Surge Voltage Testing for Fault Detection in Rotating Electrical Machines.
Friedrichs, Nils (*)	Untersuchung der Common-Mode-Störströme in WPT-Systemen. Investigation of common Mode Currents in WPT Systems.
Furmanczyk, Filip (*)	Development of a GUI for the Automated Assessment of Power Quality Measurement Data.
Ge, Wenjie (*)	Modifikation und Erweiterung von Machine-Learning Algorithmen zur PQ Klassifikation Modification and Improvement of Machine Learning Algorithms for PQ Classification
Graf, Jonas (*)	Untersuchung von Harmonischen auf die Funktionsfähigkeit von Inselnetzdetektionsverfahren in einer Power-Hardware-in-the-Loop-Umgebung. Analysis of Harmonics on the Functionality of Islanding Detection Methods on a Power-Hardware-In-The-Loop Test Environment.
Günther, Moritz	Innovative Konzepte zum Schutz von Microgrids. Innovative Concepts for the Protection of Microgrids.
Herrmann, Dominik (*)	TE Aktivität frei beweglicher Partikel bei dielektrisch beschichteten Elektroden in HGÜ GIS. PD Activity of free-moving Particles at dielectric coated Electrodes in HVDC GIS.
Horn, Matthias (*)	Analyse und Validierung eines Ansatzes zur multi-level Flexibilitätsaggregation. Analysis and Validation of a Multi-Level Flexibility Aggregation Approach.
Huhn, Darvid (*)	Development of Transformer Winding Condition Control Technology based on Single-step Nanosecond Impulse Method.
Klötzl, Nico (*)	Aggregation von Verteilnetzen für Stabilitätsanalysen im Übertragungsnetz. Aggregation of Distribution Networks for Stability Analysis in the Transmission System.
Kohlbrenner, Johannes	Ermittlung des realisierbaren Betriebsbereich eines NS-Stromnetzes: Eine Fallstudie. Estimating the Feasible Operating Region of a LV Power Grid: A Case Study.
Kornev, Vjaceslav (*)	Integration eines Schutzgerätes in eine Hardware in the Loop-Umgebung als Vorbereitung für einen Praktikumsversuch. Integration of a Protection Device into a Hardware in the Loop Environment as Preparation for a practical Experiment.

NAME	THEMA
Kovacheska, Mihaela (*)	Potentialbewertung für die Nutzung von Flexibilität aus dem Verteilnetz im Rahmen der Netz- und Systemführung. Assessment of the Utilization of Flexibility from Distribution Grids for Grid and System Operation.
Kratz, Kevin	Anwendung und Analyse einer mehrstufigen Flexibilitätsaggregationsmethode in einem realen MS/HS-Verteilnetz. Application and Analysis of a Multi-Stage Flexibility Aggregation Method in a Real MV Distribution Grid.
Li, Yang (*)	Einflussanalyse der Messstellenplatzierung auf die Güte einer Zustandsschätzung in Verteilnetzen. Influence Analysis of the Measurement Placement on the Accuracy of a State Estimation in Distribution Networks.
Lißner, Nikola (*)	Definition of a Cost-Optimal Approach to Energy Efficiency Measures in New Buildings in Montenegro.
Litke, Eduard (*)	Entwicklung einer emissionsarmen Ansteuerelektronik für KFZ-Lenkungs-Inverter. Development of an EMI reduced Control for an automotive Inverter.
Müller, Artur (*)	Teilentladungsmuster an frei beweglichen Partikeln in koaxialer Elektrodengeometrie unter positiver Gleichspannungsbeanspruchung. Partial Discharge Pattern of free moving Particels in coaxial Electrode Arrangement under positive DC Stress.
Peng, Sixiang (*)	Regelung einer PQ-Synchronkaskade mit einem Mikrokontroller. Control of a PQ-synchron Cascade with a Microcontroller.
Pesler, Daniel (*)	Klassifikation überlagerter Teilentladungsmuster. Classification of superimposed Partial Discharge Patterns.
Ripholz, Felix (*)	Anpassung des Messaufbaus und Durchschlagsmessungen in alternativen Transformatorisolierrflüssigkeiten. Adaption of the Measurement Setup and Breakdown Measurement in Alternative Transformer Liquids.
Schmaus, Claudio (*)	Modellierung eines Ladeprofilgenerators für die Elektrifizierung von Fahrzeugflotten in KEP-Diensten zur bedarfsgerechten Dimensionierung lokaler Ladeinfrastruktur. Modelling of a Charging Profile Generator for the Electrification of Car Fleets in CEP Services for the Purpose of need-based Sizing of local Charging Infrastructure.
Schmid, Thomas	Nichtlineares Transformatormodell für Power Quality Untersuchungen. Nonlinear Transformer Model for Power Quality Investigations.
Singer, Bernd (*)	Systematische Entwicklung und Einbindung nichtlinearer Netzkomponenten in verschiedene Simulationsplattformen. Systematic Development and Implementation of nonlinear Grid Components for different Simulation Platforms.

NAME	THEMA
Spyropoulos, Nicolas	Untersuchung des Auskoppelverhaltens von TE-Signalen an Schirmdeflektoren und aufgebrachten Folienelektroden in Muffen. Analysis of capacitive PD Sensors using Foil Electrodes and semiconductive Ground Deflectors in Cable Joints.
Straub, Adrian (*)	Entwicklung einer Fernsteuereinheit für einen regelbaren Ortsnetztransformator. Development of a Controller Unit for an adjustable Power Transformer.
Sun, Longran	Automated Detection and Classification of RMS events in PQ Measurement Data.
Szeredi, Attila (*)	Entwicklung und Implementierung einer linearisierten Methode der probabilistischen Lastflussrechnung. Development and Implementation of a linearized Method of probabilistic Load Flow Calculation.
Trolliet, Erik	Anwendung von künstlicher Intelligenz in der Fehlererkennung von Hochleistungstransformatoren. Application of Artificial Intelligence in Power Transformer Fault Diagnosis.
Volz, Frederic (*)	EMV-Störfestigkeitsuntersuchungen bei induktiven KFZ-Ladesystemen. EMC Immunity Tests of Inductive Charging Systems.
Wagner, Charlotte (*)	Potenzialanalyse des Einsatzes intelligenter Messsysteme mit Steuerbox zur Lastreduktion beim Heimpladen von Elektrofahrzeugen anhand eines Realnetzlabors der Netze BW. Potential Analysis of the Use of intelligent Smart Meter with Control Box for Load Reduction during Home Charging of electric Vehicles in a Field Test of Netze BW.
Wedernikow, Elisabeth	Künstliche intelligente Fehlerdiagnose für Leistungstransformatoren mit der Frequenzanalyse. Artificial intelligent Fault Diagnosis Method for Power Transformers using Frequency Response Analysis.
Wu, Shu (*)	Aufbau einer Schaltung zur Phasenbestimmung von TE-Impulsen. Development of a Circuit for Phase Detection of PD Impulses.
Zhang, Xiaoang	Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die Inselnetzbildung von Microgrids sowie ein Ausblick auf den Einsatz von MPC und Dynamic Mode Decomposition in Netzanwendungen. Impact of different Boundary Conditions on the Island Network Formation of Microgrids as well as an Outlook on the Use of MPC and Dynamic Mode Decomposition in Grid Applications.

4. PROMOTIONEN

■ **Mechanische Schwingungen und Geräusche von Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Michael Beltle

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried

KIT Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:

26.06.2020

Die vorliegende Arbeit untersucht die Anwendbarkeit der Analyse von mechanischen Schwingungen für die dauerhafte Betriebsüberwachung von Leistungstransformatoren. Zunächst werden dazu die physikalischen Abhängigkeiten zwischen dem mechanischen Zustand des Aktivteils und dem Schwingungsverhalten des Transformators betrachtet. Im zweiten Teil der Arbeit folgt eine Analyse der Praxistauglichkeit des Ansatzes durch Korrelation von Mess- und Betriebsdaten mit Hilfe verschiedener mehrjähriger Langzeitmessungen. Der dritte Teil betrachtet die Anwendung des Schwingungsmonitorings für die Überwachung unerwünschter Gleichstromüberlagerungen in Übertragungsnetzen.

Für die Betrachtung der physikalischen Zusammenhänge werden zunächst die Quellen mechanischer Schwingungen, der magnetisierte Kern und die stromdurchflossenen Wicklungen beschrieben und hergeleitet. Speziell für die Bewertung des Zusammenhangs zwischen mechanischen Schwingungen und den Kerneinspannkräften wird ein Laboraufbau vorgestellt, der die Abhängigkeiten aufzeigt.

Um die betrieblichen und messtechnischen Parameter in der praktischen Anwendung bewerten zu können, werden mit einem eigens entwickelten Monitoringsystem Langzeitmessungen an unterschiedlichen Netzkoppel- und Maschinentransformatoren durchgeführt. Die Analyse berücksichtigt die betrieblichen Beeinflussungen der Schwingungsmessung durch die Stufenschalterstellung, die (Öl-)Temperatur und den Laststrom bzw. den Lastfaktor, die jeweils einzeln bewertet werden. Anhand der Zeitreihen wird gezeigt, wie betriebliche Einflüsse kompensiert werden können, so dass eine Trendanalyse der mechanischen Schwingungen ermöglicht wird.

Der dritte Teil behandelt eine Sonderform mechanischer Schwingungen, die durch überlagerte Gleichströme hervorgerufen wird. Anhand der physikalischen Theorie sowie mit Hilfe von Labormessungen an zwei verschalteten 380 kV-Leistungstransformatoren wird gezeigt, welche signifikanten Auswirkungen Gleichströme haben. Dies berücksichtigt sowohl das Schwingungsverhalten, die Geräuschemissionen als auch den Leistungsbedarf von Transformatoren abhängig von der Kerngeometrie.

Natürliche und künstliche Ursachen von Gleichströmen werden anhand verschiedener Feldmessungen in Übertragungsnetzen identifiziert und bewertet. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe des Schwingungsmonitorings eine qualitative als auch quantitative Bewertung überlagerter Gleichströme ermöglicht werden kann.

■ **Mechanical Oscillations and Noises of Power Transformers**

Dipl.-Ing. Michael Beltle

This work investigates the condition assessment of power transformers by means of mechanical oscillation monitoring. In the first part, the physical dependencies between the mechanical condition of the active part and mechanical oscillations are introduced. The second part of this work presents an analysis of the practical implications using correlations between mechanical oscillations and additional operational data, both obtained by long term measurements. The third part assesses the application of vibration monitoring for the detection and evaluation of undesirable direct current components in power transformers and AC grids.

First, the basic physical dependencies of the sources of mechanical oscillations are introduced: the magnetized core and the current-carrying windings. The focus lies on the influence of changing clamping forces of the active part on mechanical oscillations, which is facilitated by a laboratory setup using a distribution transformer with adjustable core fixations.

In the second part, the operational and measurement driven influencing parameters are evaluated using long term measurements on grid coupling power transformers and generator setup-up units. Therefore, a custom-built vibration monitoring test system is introduced for field measurements. The analysis presents the operational dependencies of the on-load tap changer, the (oil) temperature, and the load current or the load factor on the mechanical oscillations. The compensation of these influencing parameters is demonstrated in a use-case. Thus, a long-term trend-analysis of mechanical oscillation can be provided.

The third part of this work addresses the special case of mechanical oscillations of power transformers driven by superimposed direct currents (DC). Using both, physical theory and extensive laboratory tests performed on two connected 380 kV power transformers, the significant impacts of DC on mechanical oscillations, transformer noise and the transformer's power consumption are determined. The influence of the core geometry is included into the consideration. Natural and man-made DC sources are identified and localized using combined online, onsite current and vibration measurements at different substations of the transmission grid. Correlations between onsite and laboratory measurements demonstrate how vibration monitoring can be used as both, a qualitative and quantitative method to identify and assess superimposed DC.

■ **Zustandsschätzung für eine aktive Verteilnetzführung unter Berücksichtigung einer defizitären Messinfrastruktur**

M. Sc. Daniel Groß

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. P. Schegner

TU Dresden

Tag der mündlichen Prüfung:

05.10.2020

Um den Netzbetrieb der zunehmend komplexeren Verteilnetze unter den zukünftigen Rahmenbedingungen gewährleisten zu können, benötigen die Netzbetreiber in absehbarer Zeit eine genaue Kenntnis über den aktuellen Systemzustand ihrer Verteilnetze. Zunächst steht hierbei die Überwachung der Betriebsmittelauslastungen sowie die Kontrolle der verbindlichen Einhaltung vorgegebener Spannungsbänder im Fokus der Netzbetreiber. Zukünftige Voraussetzungen für die kontinuierliche Ermittlung des Systemzustandes sind darüber hinaus im Bereich der aktiven Steuerung von bspw. Lade- und Einspeisemanagementsystemen zur operativen Verteilnetzführung denkbar. Die benötigte Kenntnis über den aktuellen Systemzustand in Verteilnetzen kann durch eine Verteilnetz-Zustandsschätzung erbracht werden.

Ziel dieser Dissertation ist es, ein praktikables und übertragbares Konzept einer Verteilnetz-Zustandsschätzung für den Einsatz in Mittel- und Niederspannungsnetzen zu entwickeln.

Hierfür konzentriert sich die Arbeit zunächst auf die Analyse vorhandener dreiphasiger Zustandsschätzalgorithmen, um eine geeignete Selektion für den praxisnahen Einsatz treffen zu können. Die Erweiterung der ausgewählten Algorithmen erfolgt sowohl mit dem Fokus der Anwendung unter realen Rahmenbedingungen als auch in Bezug auf eine spannungsebenenübergreifende Berechnung des Systemzustandes.

In Anbetracht der defizitären Messinfrastruktur in Mittel- und Niederspannungsnetzen werden Ersatzwerte für die Berechnung des Systemzustandes benötigt. In der vorliegenden Dissertation wird ein Verfahren zur Generierung anpassbarer synthetischer Ersatzwerte, sogenannter Pseudomesswerte, vorgestellt, welche sowohl für die Verwendung in der Mittelspannung als auch in der Niederspannung geeignet sind.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist der Konzeptnachweis der vorgestellten Methode. Zu diesem Zweck findet eine Überprüfung der implementierten Verteilnetz-Zustandsschätzung in zwei realen Mittelspannungsnetzen statt. Zur Validierung der Berechnungsergebnisse stehen hierfür weitreichende Messinfrastrukturen in den beiden Netzgebieten zur Verfügung. Das Ziel ist dabei einerseits den Einfluss der Pseudowerte auf die Schätzgenauigkeit definierter Bewertungskriterien zu beurteilen. Andererseits dienen die Analysen zur Evaluierung der Übertragbarkeit der implementierten Methode auf andere Netzgebiete.

- **State Estimation for an active Distribution Grid Management in Consideration of a deficient Measurement Infrastructure**

M. Sc. Daniel Groß

In order to be able to guarantee the system operation of the increasingly complex distribution grids under the future framework conditions, the distribution system operators will in the foreseeable future require precise knowledge of the current system status of their distribution grids. First of all, the monitoring of equipment utilization as well as the control of mandatory compliance with specified voltage bands are the focus of the system operator. Future requirements for the continuous determination of the system state are also conceivable in the field of active control of, for example, charging and feed-in management systems for operational distribution system management. The required knowledge about the current system state in distribution grids can be provided by a distribution system state estimation.

The aim of this dissertation is to develop a feasible and transferable concept of a distribution system state estimation for use in medium and low voltage grids.

For this purpose, the work initially focuses on the analysis of existing three-phase state estimation algorithms in order to be able to make a suitable selection for the practical application. The extension of the selected algorithms takes place both with the focus of the application under real boundary conditions, as well as in relation to a voltage level spanning calculation of the system state.

In view of the deficient measurement infrastructure in medium and low voltage grids, substitute values are required for the calculation of the system state. In the present dissertation, a method is presented for the generation of adaptable synthetic substitute values, so-called pseudomeasurements, which are suitable for use both in medium voltage and in low voltage grids.

Another focus of the work is the proof of concept of the presented method. For this purpose, a check of the implemented distribution system state estimation takes place in two real medium voltage networks. To validate the calculation results, extensive measuring infrastructures are available in both grids. On the one hand, the goal is to assess the influence of the pseudomeasurements on the estimation accuracy of defined evaluation criteria. On the other hand, the analyzes serve to evaluate the transferability of the implemented method to other grids.

■ **Kalibrierverfahren für reproduzier- und vergleichbare elektromagnetische Teilentladungsmessungen in Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Martin Siegel

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr. J. J. Smit

Delft University of Technology

Tag der mündlichen Prüfung:

08.10.2020

Die Zuverlässigkeit von elektrischen Energienetzen hängt von der Qualität und Verfügbarkeit ihrer elektrischen Betriebsmittel, z.B. Leistungstransformatoren, ab. Lokale Fehler innerhalb ihrer Isolierung können zu kompletten Ausfällen führen und damit hohe Ausfall- und Neuanschaffungskosten verursachen. Um diese Ausfälle zu verhindern, werden Leistungstransformatoren vor der Auslieferung in einer Stückprüfung auf Teilentladungen (TE) getestet. Darüber hinaus kann die TE-Aktivität als Diagnosemessung vor Ort (online oder offline) ausgewertet oder während des Betriebs mit der Ultrahochfrequenz (UHF)-Methode ständig überwacht werden.

In dieser Arbeit wird ein Kalibrierverfahren für die bisher unkalibrierte UHF-Methode an Leistungstransformatoren vorgeschlagen. Das Kalibrierverfahren ist notwendig, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von UHF-Messungen zu gewährleisten. Nur ein kalibriertes UHF-Messverfahren kann seine Zuverlässigkeit nachweisen und schließlich ergänzend in (Vorort-)Abnahmetests von Leistungstransformatoren eingeführt werden. Das vorgeschlagene Kalibrierverfahren berücksichtigt zwei Faktoren: den Einfluss der Empfindlichkeit der UHF-Sensoren und die Eigenschaften des UHF Messgerätes inklusive Kabel, Vorverstärker, etc. Der Einfluss der UHF Messgeräte wird korrigiert, indem ein definiertes, unveränderliches Prüfsignal als Referenz für alle Aufzeichnungsgeräte verwendet wird, vergleichbar mit der in der IEC 60270 verwendeten Kalibriermethode für die elektrische TE-Messung.

Die Empfindlichkeit des UHF-Sensors wird durch eine Charakterisierung der UHF-Sensoren mit Hilfe des Antennenfaktors (AF), der in einem speziellen, reproduzierbaren Aufbau, einer GTEM-Zelle, gemessen wird, berücksichtigt. In dieser Arbeit wird eine selbst gebaute, ölgefüllte GTEM-Zelle vorgestellt, um die Umgebungsbedingungen im Inneren eines Transformators, in dem der Sensor eingesetzt werden soll, zu berücksichtigen. Mit dieser Zelle werden Einflüsse auf den AF von UHF-Sensoren untersucht und es wird gezeigt, dass die in einer luftgefüllten Zelle gemessenen Sensorempfindlichkeiten auf die Ölumgebung korrigiert werden können.

Eine praktische Evaluierung des vorgeschlagenen Kalibrierverfahrens wird in einem Laboraufbau an einem Verteiltransformator mit verschiedenen UHF-Instrumenten und Sensoren unter Verwendung von künstlichen TE-Signalen und echten Teilentladungen durchgeführt.

Schließlich werden in dieser Arbeit zukünftige Forschungsthemen identifiziert, die zur Verbesserung des vorgeschlagenen UHF-Kalibrierverfahrens für Leistungstransformatoren und der UHF-Methode im Allgemeinen notwendig werden/sein könnten.

- **Calibration Methods for Reproducible and Comparable Electromagnetic Partial Discharge Measurements in Power Transformers**

Dipl.-Ing. Martin Siegel

The reliability of electrical energy networks depends on the quality and availability of their electrical equipment, e.g., power transformers. Local failures inside their insulation can lead to breakdowns resulting in high outage and penalty costs. To prevent these destructive events, power transformers are tested for partial discharge (PD) activity in a routine test before shipment. Furthermore, PD activity can be evaluated as a diagnostic measurement on-site (on-line or off-line) or be constantly monitored during service using the ultra-high frequency (UHF) method.

In this thesis, a calibration procedure is proposed for the UHF method used in power transformers, which is lacking so far. The calibration process is required to ensure both reproducibility and comparability of UHF measurements. Only a calibrated UHF measurement procedure can be deemed reliable and eventually be introduced to supplement in (site-)acceptance tests of power transformers. The proposed calibration method considers two factors: The influence of the UHF sensors' sensitivity and that of the UHF instrument characteristics, including accessories like cables, pre-amplifier, etc. The UHF instruments' influence is corrected by using a defined and invariable test signal as a reference for all recording devices comparable to the calibration method used in IEC 60270 for electrical PD measurement.

The sensitivity of the UHF sensor is addressed by a characterization of UHF sensors using the antenna factor (AF) measured in a special reproducible setup, i.e., a GTEM cell. In this thesis, a self-built GTEM cell is presented, which is oil-filled to address the environmental conditions inside a transformer where the sensor will be used. With such a cell, influences on the AF of UHF sensors are investigated, and it is shown that sensor sensitivities measured in an air-filled cell can be corrected to the oil environment.

A practical evaluation of the proposed calibration procedure is performed in a laboratory setup on a distribution transformer with different UHF instruments and sensors using artificial PD signals and real high voltage driven PD sources.

Finally, this thesis identifies future research topics, which may be needed to improve the proposed UHF calibration procedure for power transformers and the UHF method in general.

- **Transfer Function Estimation and Classification using Machine Learning of Transformer Windings for Transformer Diagnosis**

M. Sc. Xiaozhou Mao

Hauptberichter: Prof. Zhongdong Wang
University of Manchester
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung: 16.01.2020

- **Protection of VSC-HVDC Systems with mixed Usage of Power Cables and Overhead Lines**

M. Sc. Philipp Tünnerhoff

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
RWTH Aachen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung: 11.05.2020

- **Hierarchische Optimierung zur Nutzung sektorenübergreifender Flexibilität in Strom- und Gasverteilnetzen**

M. Sc. Martin Rene Zimmerlin

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried
KIT Karlsruhe
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2020

- **Elektromagnetische transiente Ausgleichsvorgänge in HGÜ-Systemen und deren Auswirkung auf die Isolationskoordination von Kabelanlagen**

M. Sc. Max Heinrich Görtz

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried
KIT Karlsruhe
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung: 14.12.2020

5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Hochspannungstechnik

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

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

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

RESEARCH ACTIVITIES

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

High Voltage Engineering

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

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

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

Elektrische Energieversorgung / Smart Grids

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

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

Elektromagnetische Verträglichkeit

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

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

Electrical Power Supply / Smart Grids

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

Most relevant topics on this field are:

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

Electromagnetic Compatibility

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

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

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

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

Laufzeit: November 2019 – Oktober 2022

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

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Period: November 2019 – October 2022

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

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

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag

■ Elektromagnetische Verträglichkeit von Mittelspannungsschaltanlagen

M. Sc. Laura Barreau

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

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

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

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

■ **Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switch Gears**

M. Sc. Laura Barreau

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

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

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

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

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

M. Sc. Chandra Prakash Beura

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

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

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

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

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).

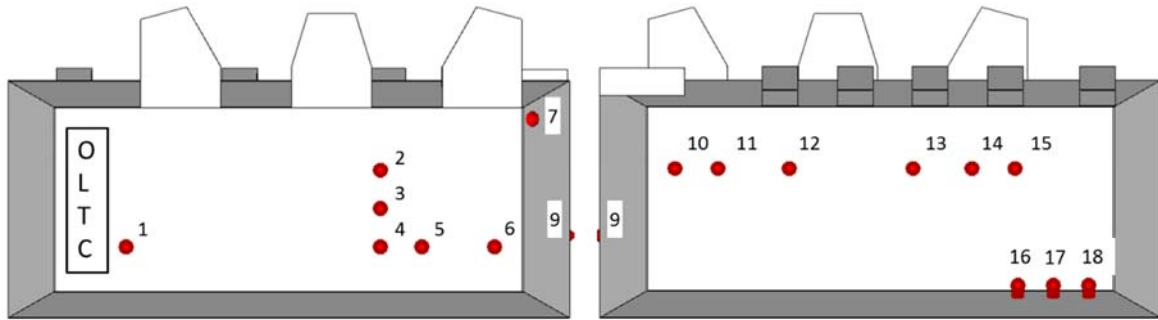


Fig. 1: Sensor distribution over tank surface for HV side (left) and MV/LV side (right)

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).

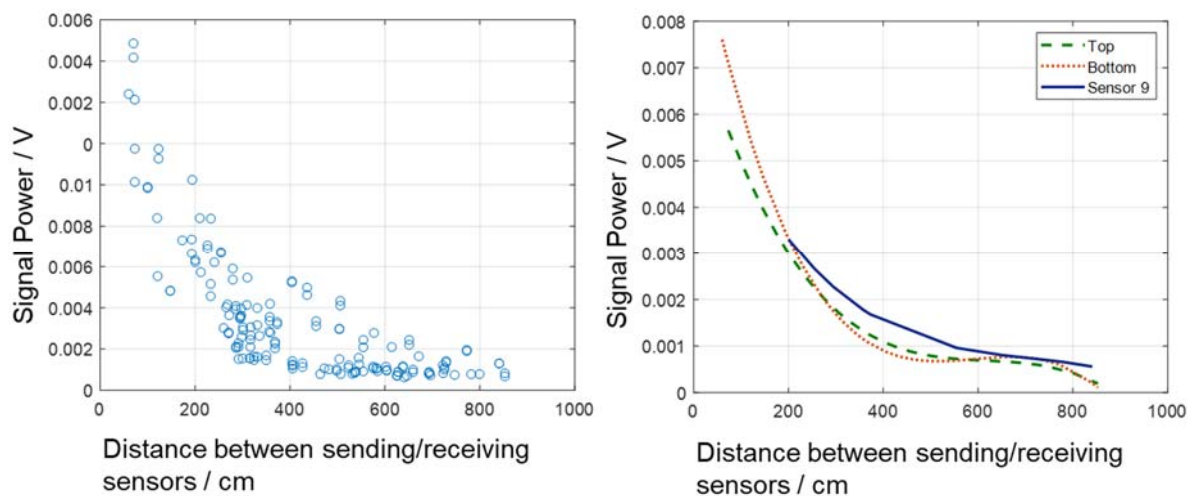


Fig. 2: Signal power of sending/receiving antenna pairs vs distance (left) and fitted curves for different groups of antennas (right)

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

■ Einfluss des Kontaktwerkstoffs auf das Schaltverhalten in Vakuumschaltern

M. Sc. Markus Fischer

Die Verwendung des Isoliermediums Vakuum in Schaltern für den Mittelspannungsbereich bietet den großen Vorteil einer kompakten Bauform. Im geöffneten Zustand ist bereits ein kleiner Kontaktabstand ausreichend, um eine hohe Isolationsfestigkeit zu erzielen. In Fig. 1 ist der Schnitt einer solchen Vakuumschaltkammer dargestellt. Während einer Schalthandlung entsteht zum Zeitpunkt der mechanischen Kontakttrennung ein Lichtbogen, welcher aus verdampftem Kontaktmaterial besteht. Bereits vor dem natürlichen Nulldurchgang des zu unterbrechenden Laststroms kommt es aufgrund zu geringer Energie zum abrupten Abriss des Lichtbogens. Speziell an induktiven Verbrauchern, wie z. B. Mittelspannungsmotoren, führt ein hoher Wert des Stroms zum Abrisszeitpunkt, und damit auch ein hoher Stromgradient, zu transienten Überspannungen. Irreparable Schäden an den Betriebsmitteln können die Folge sein.

Ein wichtiger Ansatzpunkt zur Beeinflussung des Lichtbogenabrisses liegt in der Materialauswahl der Schaltkontakte. Diese sind in der Regel nicht aus einem einzelnen Reinstoff gefertigt, sondern werden in speziellen Herstellungsverfahren zu Legierungen kombiniert. In Lastschaltern für betriebsmäßige Schaltaufgaben wird üblicherweise der Werkstoff Wolframcarbid-Silber (WCAg) eingesetzt. Die Untersuchung mittels Schaltversuchen in einem Versuchsstand mit automatisierter Datenauswertung zeigt bei über 50 Öffnungsvorgängen einen mittleren Stromabrisswert von $I_{ch} = 0,8 \text{ A}$. Für Leistungsschalter mit Kontakten aus Kupfer-Chrom (CuCr) liegt dieser Wert bei $I_{ch} = 5,5 \text{ A}$. Da bei Leistungsschaltern das sichere Trennen im gestörten Netzzustand (z. B. Kurzschluss) im Vordergrund liegt, ergibt sich mit den darauf optimierten Werkstoffen ein höherer Stromabrisswert. Weitere Untersuchungen mit anderen Materialkombinationen zeigen, dass ein Silberanteil in den Kontakten einen positiven Einfluss auf das Schaltverhalten in Lastschaltern hat.

Zusätzliche Versuche nehmen den Aspekt eines Magnetfeldeinflusses mit auf. Je nach verwendetem Kontaktwerkstoff wirkt sich ein extern um die Schaltkammer angelegtes axiales Magnetfeld vielversprechend auf den Stromabrisswert aus. Meist liegt das Optimum bei magnetischen Flussdichten im Bereich von $B = 30 \text{ mT}$ bis $B = 80 \text{ mT}$. Da dies aber stark materialabhängig ist, kann kein allgemeiner fester Wert angegeben werden, sondern muss für jedes Kontaktmaterial individuell ermittelt werden.

■ Influence of the Contact Material on the Switching Behavior of Vacuum Interrupters

M. Sc. Markus Fischer

The usage of vacuum as an insulating medium in switches for the medium voltage range offers the great advantage of a compact design. In the open state a small contact gap is sufficient to achieve a high insulation strength. Fig. 1 shows a cross-section of a vacuum chamber. During a switching operation an arc is generated at the time of mechanical contact separation, which consists of vaporized contact material. Before the natural zero crossing of the load current to be interrupted, the arc abruptly chops due to insufficient energy. Particularly, on inductive loads, such as medium voltage motors, a high value of the current at the chopping time, and thus also a high current gradient, leads to transient disturbances. Irreparable damages to the components can be the result.

An important approach to influence the chopping of the arc is the material of the switching contacts. Usually these are not made of a single pure material but are combined into alloys with special manufacturing processes. In load switches for operational switching tasks the material tungsten carbide silver (WCAg) is used. The investigation by means of switching tests in a test setup with automatic data evaluation shows an average chopping current of $I_{ch} = 0.8 \text{ A}$ for more than 50 opening operations. For circuit breakers with contacts of copper-chromium (CuCr) this value is $I_{ch} = 5.5 \text{ A}$. The focus of circuit breakers is on the safe disconnection in a disturbed network state (e.g. short circuit), so the materials optimized for this purpose result in a higher value of the chopping current. Further investigations with other material combinations show a positive influence on the switching behavior in load switches with silver content in the contacts.

Additional experiments include the influence of a magnetic field. Depending on the used contact material an external axial magnetic field applied to the switching chamber shows a positive influence on the chopping current. Mostly, the optimal magnetic flux densities are in the range of $B = 30 \text{ mT}$ to $B = 80 \text{ mT}$. This value is strongly dependent on the material so no general fixed value can be given and must be individually determined for each contact material.

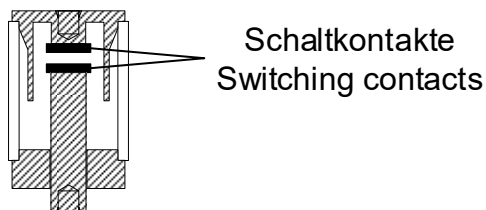


Fig. 1: Schnitt durch eine Vakuumschaltkammer.
Crossing-section of a vacuum switching chamber.

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

M. Sc. Malte Gerber

Aufgrund der fortschreitenden Energiewende entwickelt sich die Versorgungsstruktur von einer zentralen hin zu einer dezentralen Energieversorgung. Hierbei müssen immer häufiger Betriebsmittel ausgebaut werden, um deren Überlastung zu verhindern. Damit jedoch eine Überlastung von Transformatoren ermöglicht und somit ein kostspieliger Ausbau vermieden werden kann, ist zuerst die Abschätzung der thermischen Belastung und der vorzeitigen Alterung des Transformators notwendig. Steigt die Heißpunkttemperatur im Öl über den Grenzwert von 98°C nach IEC 60076-7, können negative Alterungseffekte am Transformator auftreten. Durch eine dauerhafte Überwachung des thermischen Verhaltens mittels eines Monitoringsystems ist die mögliche Überlastung bei aktuellen Umgebungsparametern mit Hilfe des thermischen Modells des Transformators abschätzbar.

Das dabei verwendete thermische Modell wurde unter Berücksichtigung der verschiedenen Wärmeübertragungsphänomene im Transformator optimiert und am IEH entwickelt. Sowohl die natürliche Konvektion von Öl und Luft als auch die natürliche Strahlung im Kühler werden berücksichtigt. Außerdem werden, je nach Kühlungsart, sowohl die durch Pumpen erzwungene Bewegung des Öls als auch die durch Ventilatoren erzwungene Bewegung der Luft berücksichtigt. Fig. 1 zeigt die thermisch-elektrische Analogie dieses Wärmeübertragungsverhaltens.

Dank der Bestimmung des gesamten thermischen Widerstandes gelingt eine genauere Berechnung der oberen Öltemperatur. Die Parametrisierung des thermischen Modells erfolgt durch den über einen längeren Zeitraum aufgezeichneten Betriebszustand. Die Berechnung der oberen Öltemperatur ermöglicht auch eine Berechnung der Heißpunkttemperatur und somit eine Abschätzung der Überlastbarkeit des Transformators bei gegebenen Umgebungsparametern.

Ziele des Forschungsprojektes „ZÜbReNe“ sind unter anderem die weitere Validierung der thermischen Modellierung bei Kupplungs- und Verteilnetztransformatoren sowie die Implementierung des Modells in ein Monitoringsystem. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Darüber hinaus sind weitere Umweltparameter, wie die Sonneneinstrahlung oder die Windgeschwindigkeit und deren Einfluss auf die thermische Modellierung, Gegenstand der Untersuchung.

■ Validation of thermal Models for the Overload Capacity of Transformers

M. Sc. Malte Gerber

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

The thermal model applied for this purpose was optimized under consideration of the different heat transfer phenomena in the transformer and developed at the IEH. Therefore both, the natural convection of oil and air and the natural radiation in the cooler are considered in this work. In addition, depending on the type of cooling, the forced movement of the oil by oil pumps as well as the forced movement of the air by fans are part of the examination. Fig. 1 shows the thermal-electrical analogy of this heat transfer behavior.

Determining the total thermal resistance allows a more precise calculation of the upper oil temperature. The parameterization of the thermal model is done by recording the operating condition over a longer period of time. By calculating the upper oil temperature, it is also possible to calculate the hot spot temperature and thus estimate the overload capacity of the transformer at given ambient parameters.

Objectives of the research project "ZÜbReNe" include the further validation of the thermal modelling for both coupling and distribution transformers and the implementation of the model in a monitoring system. This project is funded by the Federal Ministry of Economics and Energy. Furthermore, an investigation of additional environmental parameters, such as solar radiation or wind speed and their influence on thermal modelling is planned for the future.

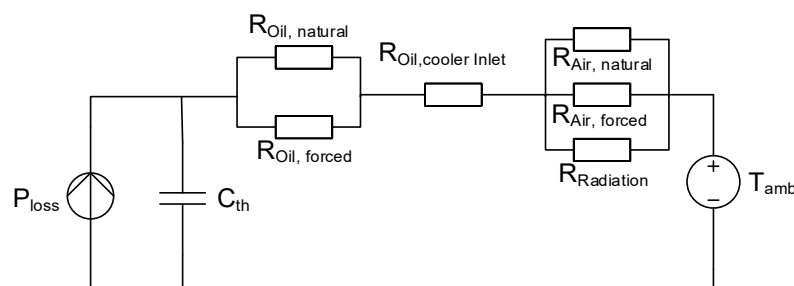


Fig. 1: Thermisch-elektrische Analogie des verbesserten thermischen Modells.
Thermal electrical analogy of the improved model.

■ PD Measurement of Motors for electric Vehicle

M. Sc. Chuxuan He

The electrical motor of the electric vehicle attracts much attention as the world market of the electric mobility is growing impressively. Among the electric motors used in the vehicle, the motor with hairpin wound stator is gaining increasing popularity, which is lighter than other motors but with higher performances and lower consumptions. In order to guarantee the safety and the reliability of the vehicle, the state monitoring of the motor is required and the lifetime model of the motor would be built. In order to predict the lifetime of the motor, the evaluation of its insulation condition is an important index.

The partial discharge (PD) behavior is an important indicator for the insulation system. The partial discharge behavior of the motor with hairpin wound stator should be investigated in order to understand its insulation aging process.

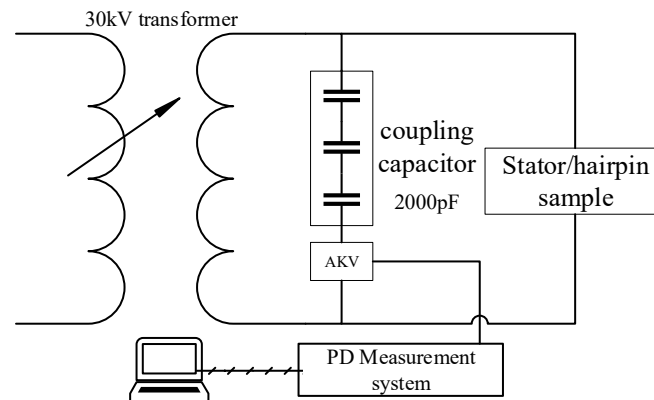


Fig. 1: Test platform for the PD measurement under AC sine wave.

The test platform in Fig. 1 is used for the PD measurement under AC sine wave voltage, which is built according to IEC 60270. On the platform, a transformer, a coupling capacitor and the PD measurement system are used, whereby the PDIV, PDEV and PRPD pattern can be measured. To analyze the PD activity of the motor for the electric vehicle, the PD inception voltage (PDIV), the PD extinction voltage (PDEV) and the phase-resolved partial discharge (PRPD) patterns are measured. The PDIV and PDEV values can reflect the insulation capacity of the motor and the PRPD patterns can help us find out the sort of insulation defect in the motor.

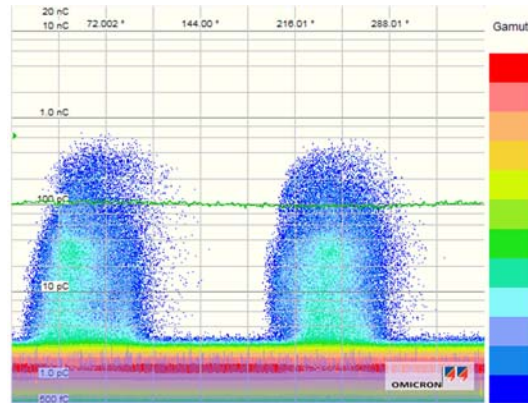


Fig. 2: PRPD pattern of the motor with hairpin wound stator.

The PRPD pattern of the motor with hairpin wound stator can be observed in Fig. 2. The PRPD pattern shows that the source of the PD in the motor is the void discharge, which is the main cause of the PD in the motor with hairpin wound stator. The production process of the hairpin winding results in the micro void of the insulation material. And the environmental factors, such as the humidity, the temperature and the pressure, have an effect on the PD behavior of the motor.

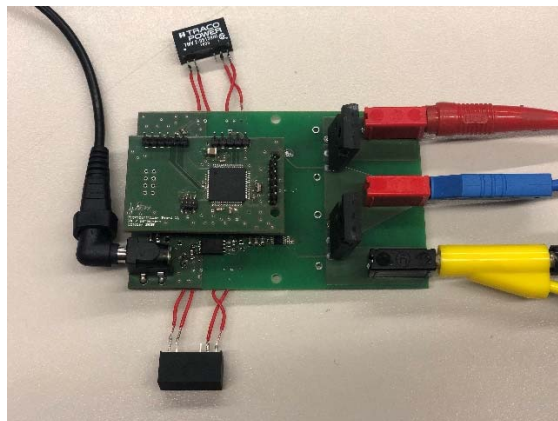
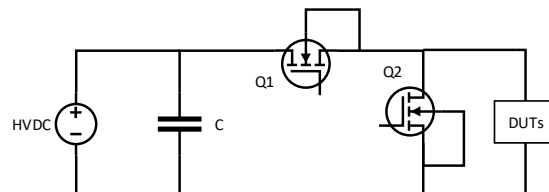


Fig. 3: Test platform for PD measurement under PWM wave.

For the motor used in the vehicle, it is necessary to consider the harmonic of the inverter. The PD measurement under PWM wave is also important for the insulation analysis of the motor. Fig. 3 shows the platform used for the PD measurement under PWM wave, which can regulate the rise time, fall time, frequency and the amplitude of the output. The sensor, that is used for the PD measurement under PWM wave, is still under study.

Determination of Breakdown Characteristics of Solid Insulation - Mineral Oil Insulation Systems under 1 min AC Power Frequency Test

M. Sc. Smitha Karambar

High Voltage (HV) lead exits are special insulation systems used on HV side of power transformers to lead conductors from windings to bushings through the tank wall. Conventionally, lead exits are composed of paper and pressboard insulation and designed by placing pressboard barriers around paper insulated conductors. The smaller oil gap widths have higher dielectric strength and hence, by dividing the large oil gap widths into smaller gaps using pressboard barriers, the dielectric strength of oil gap can be increased.

However, the usage of barriers results in a complex structure of HV lead exit. These lead exits are difficult to manufacture, to transport and to mount on-site. Additionally, these cellulose based insulations are low temperature materials which degrade faster at higher temperatures. Therefore, many alternative high temperature materials are being investigated for their application in power transformers. In this study, silicone rubber is examined for its application in HV lead exits.

In order to design a silicone rubber insulated HV lead exit, a 400 kV lead exit with two barrier systems available on the market is considered as the reference lead exit. The critical safety factor (Q_{crit}) of the reference lead exit is determined and obtained as 1.143. Silicone insulated HV lead exit is designed by considering Q_{crit} as the minimum allowed safety factor value at every point along the oil gap. Initial thickness of silicone rubber is set to 1 mm and the insulation thickness will be increased until $Q_{crit} \geq 1.143$.

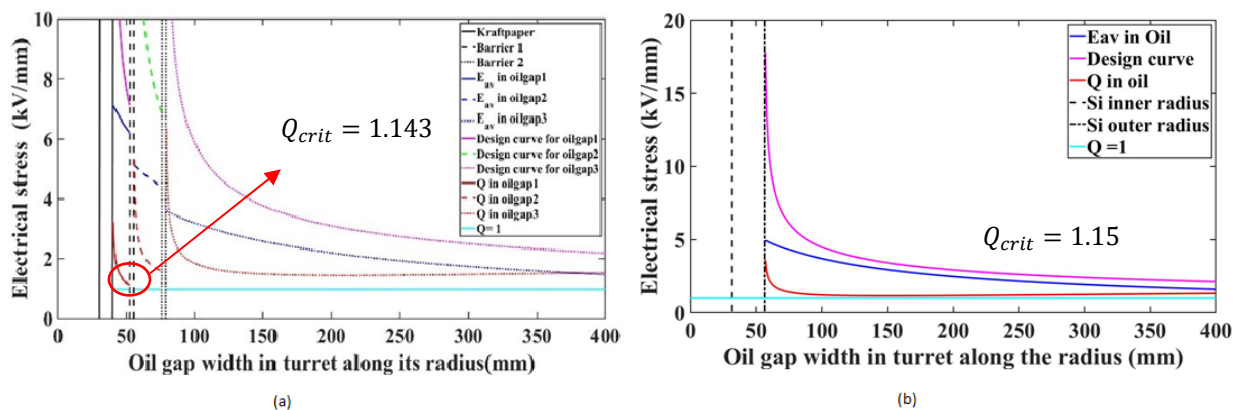


Fig 1: Allowable field strength, cumulative field strength and Q_{crit} of a
(a) Reference lead exit. (b) Silicone rubber insulated lead exit.

The thickness of silicone rubber for which $Q_{crit} \geq 1.143$ is obtained as 24 mm and the electrical field strength in the designed lead exit is as shown in Fig 1 (b).

For a comprehensive insulation design, it is also necessary to understand the combined breakdown behaviour of solid insulation-mineral oil systems. However, due to higher level of voltages, it is not possible to measure the breakdown voltage on the actual lead exit. Therefore, simplified electrodes are designed using the 3D finite element tool Comsol. A transparent rectangular container of plexiglass having a dimension of 550 mm x 500 mm x 650 mm is used as a test container. Silicone 5 mm thick is considered and the distance between the electrodes is set to 50 mm. Diameters of high voltage electrode and ground electrode are being varied to obtain the maximum electrical field strength in oil which is the same as in the designed silicone lead exit. The diameter of HV electrode and ground electrode is obtained as 30 mm and 62 mm respectively. The plexiglass container is filled with mineral oil and the oil gap width between the electrodes is set to 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm and 50 mm. The actual test setup is as shown in Fig 2 (a). The breakdown voltages are determined for arrangements with and without solid insulation. For each oil gap width, ten breakdown tests are performed under 1 min AC power frequency test.

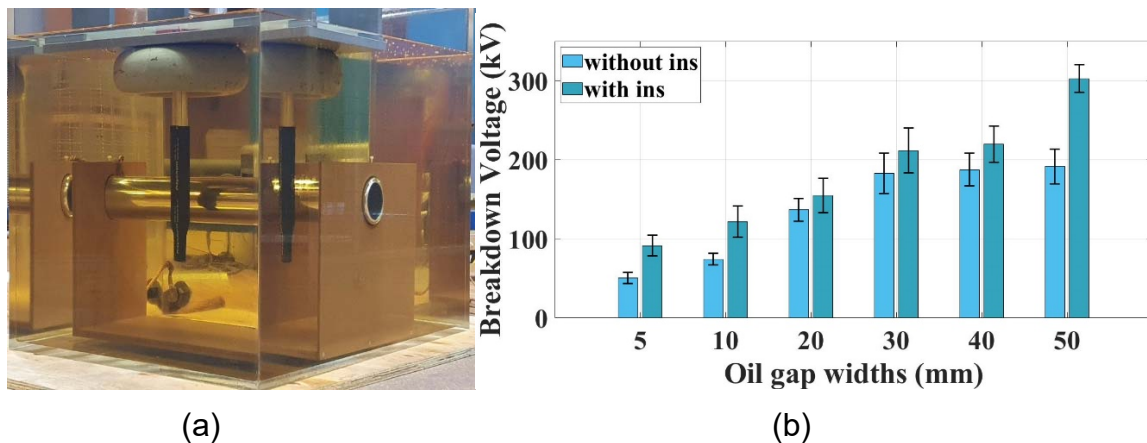


Fig 2: (a) Test setup to determine the breakdown strength of solid insulation mineral oil insulation system under 1 min AC power frequency test.
(b) The breakdown voltages for arrangements with and without solid insulation for oil gap width of 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm and 50 mm.

The mean value and standard deviation of breakdown voltages for each oil gap width is calculated. The breakdown voltages obtained for arrangements with and without solid insulation are compared. The mean breakdown voltages and their standard deviations are as presented in Fig 2 (b). The results show that with an increasing oil gap width, breakdown voltage is increasing, too. The presence of solid insulation considerably increases the breakdown voltage as well. The test results were compared with the theoretically expected values obtained from the allowable field strength curve. In reality, the measured breakdown voltages were higher than the expected breakdown voltage for the considered arrangements.

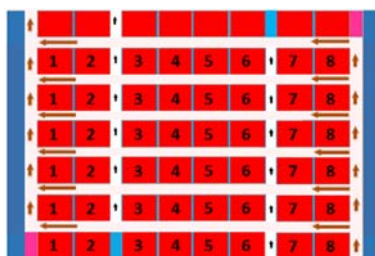
■ Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren mittels CFD

M. Sc. Saeed Khandan Siar

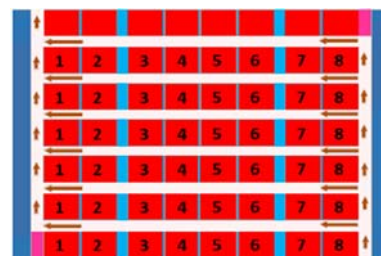
Leistungstransformatoren sind während ihrer Lebensdauer unterschiedlichen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Daher ist es sehr wichtig, den Einfluss unterschiedlicher Konstruktionen zu untersuchen, damit die Alterung verringert wird. Um die geforderte Gesamtbetriebsdauer und die Betriebssicherheit des Transformators zu gewährleisten, darf im Nennbetrieb die Temperatur den festgelegten Grenzwert nicht überschreiten. Ein optimiertes Design der Kühlung ist ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung, um Betriebsstörungen und Materialalterung aufgrund von thermischen Schäden zu vermeiden.

Im Folgenden werden numerische Strömungssimulationen zur Kühlleistung eines Zick-Zack-Wicklungsmodells mit pumpen-betriebem Ölumlauf im Transformator vorgestellt. Fig. 1 zeigt die Position der Spalte und die Strömungsrichtungen des Fluides, um die geometrischen Unterschiede zu identifizieren. Die Längen der Lücken mit Noppenband werden genauso gewählt wie die der vertikalen Kanäle. Bei der Ausführung ohne Noppenband werden die Lücken mit einer dicken Schicht aus Isolationsmaterial aufgebaut. Die Isolationschichten sind genauso groß wie die Lücken, um die Abmessungen der Wicklung vergleichbar zu halten.

Im Vergleich zu den Lastverlusten sind die Leerlaufverluste typischerweise klein und werden daher unter Betriebsbedingungen oft vernachlässigt. Die Lastverluste variieren je nach Belastung des Leistungstransformators. Sie werden als ohmsche Verluste sowie als Streuverluste klassifiziert. Die ohmschen Verluste haben den größten Anteil an der Wärmeentwicklung in der Wicklung. Der Streufluss führt zu lokalen Überhitzungen in den metallischen Leiter. Daher können die zusätzlichen Wärmeverluste durch den Einfluss des Streuflusses an der Unter- und der Oberseite der Wicklung im Konstruktionsprozess nicht vernachlässigt werden.



a. Wicklungsmodell mit Noppenband.
Winding model with clack-band.



b. Wicklungsmodell ohne Noppenband.
Winding model without clack-band.

Fig. 1: Lage der Spalte und Strömungsrichtungen des Fluides.
Position of the fluid channels and flow direction of the fluids.

■ Thermal Modelling of Power Transformers with CFD

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Since the power transformers experience different mechanical and thermal stresses during their lifetime, it is very important to investigate the influence of different designs to decrease the rate of ageing. Therefore, it is very important to investigate the influence of different designs to decrease the rate of ageing. The degradation of materials sets a limitation on the lifetime of the winding insulation to avoid overheated domains within the windings; therefore, the accurate determination of the highest temperature of the winding and its location inside the winding has to be considered at the design or manufacturing stage. This leads to avoid unexpected material ageing due to thermal stresses.

Simulations present numerical Computational Fluid Dynamics (CFD) investigations on the cooling performance of a zig-zag winding model used direct-oil-forced flow (OD). Fig. 1 shows the position of gaps and the fluid flow directions to identify the geometrical differences. The lengths of gaps with clack-band are selected the same as the vertical channels. In the design without clack-band, the gaps are built with a thick layer of isolations which are the same size as the gaps to keep the winding's dimensions similar.

In comparison to the load losses, no-load losses are small and consequently often neglected under operational conditions. Load losses are varied by a load of power transformers and classified as ohmic losses and as stray losses. Ohmic losses contribute the largest part of heat within the winding. Apart from the ohmic losses, leakage flux dominantly affects the stray losses that can led to excessive heat losses in the metal parts around leads. Local overheating due to the extra heat losses by the influence of leakage flux at the bottom and the top of windings at design steps are not neglectable.

By using CFD simulations that are set with the specified boundary conditions, the detailed insight into the thermal behavior of the winding in power transformer can be determined. At the first prior, this section proposes to discuss the effect of using clack-band in the winding model. Furthermore, the average temperature of the winding is lower, and the temperatures are distributed with a lower gradient between the conductors. Due to the more homogenous oil distribution, there is no local overheating which is emerged in the design without clack-band. Notably, the entrance section of the bottom horizontal channels experiences fewer eddies resulting in a smoother oil flow. In contrast to the design equipped with clack-band, the other design has more eddies and reversed flow at the inlets of the horizontal channels. Apart from the thermal point of view, the maximum magnitude of the velocity is lower in the winding model with clack-band. As a result, the lower velocity due to the extra second oil path emerges in the winding.

Durch den Einsatz von CFD-Simulationen, die mit den vorgegebenen Randbedingungen eingestellt werden, erhält man einen detaillierten Einblick in das thermische Verhalten der Wicklung. In diesem Abschnitt wird zunächst die Auswirkung auf den Heißpunktfaktor bei der Verwendung eines Noppenbandes diskutiert. Die Durchschnittstemperatur der Wicklung ist bei der Ausführung mit Noppenband niedriger. Auch das Temperaturfeld zwischen den Leitern weist einen geringeren Gradienten auf. Bemerkenswert ist, dass im Eingangsbereich der unteren Horizontalkanäle weniger Wirbel entstehen, so dass sich eine gleichmäßigere Ölströmung ergibt. Die Ausführung ohne Noppenband weist mehr Wirbel und gegenläufige Strömungen an den Einlässen der horizontalen Kanäle auf. Abgesehen von den thermischen Verhältnissen ist die maximale Geschwindigkeit beim Wicklungsmodell mit Noppenband geringer.

Die Oberfläche des Öls bildet mit der Oberfläche der Isolation vom Noppenband eine zusätzliche Grenzfläche. Das führt zu einer besseren Wärmeübertragung durch Konvektion entlang der neuen vertikalen Kanäle. Es ist zu berücksichtigen, dass die ungleichmäßige Wärmeverteilung die Lage des Heißpunkts und die Durchschnittstemperatur beider Wicklungskonstruktionen bei der Ölströmungsgeschwindigkeit in Höhe von 3 kg/s beeinflusst hat. Daraus ist ersichtlich, dass die optimale Kombination aus thermischer Sicht bei gleichmäßiger Wärmeverteilung und gleichzeitig bei der Verwendung eines Noppenbandes vorliegt. Tabelle 1 zeigt den Heißpunktfaktor (H) bei unterschiedlichen Betriebszuständen und Geometriebedingungen.

Tab.1: Numerisch ermittelte Zustände bei verschiedenen Betriebsbedingungen.
Numerical results with different operating conditions.

Massenstrom		3 kg/s			9 kg/s		
Betriebsbedingung		Heißpunkttemperatur (°C)	Durchschnittstemperatur (°C)	H	Heißpunkttemperatur (°C)	Durchschnittstemperatur (°C)	H
Ungleichmäßige Wärmeverluste	Mit Noppenband	134	120	1.31	116	108	1.29
	Ohne Noppenband	141	123	1.43	130	114	1.38
Gleichmäßige Wärmeverluste	Mit Noppenband	112	104	1.26	103	98	1.21
	Ohne Noppenband	125	113	1.32	115	106	1.29

Andererseits ist der höchste Heißpunktfaktor bei der Geometrievariante ohne Noppenband und bei ungleichmäßiger Wärmeverteilung ermittelt worden.

In the second table, the effect of using ester oil and mineral oil in the winding models is summarized. As shown, the hot-spot temperature and the average temperature of the ester oil is lower than the winding filled with mineral oil. As a result, in both designs, the cooling condition of the models with ester oil is better at oil-directed cooling mode. The location of the hot-spot is not changed at various oil materials. Although the ester oil condition has a lower hot-spot temperature, the overheated local section is also not neglectable. It should be noted that the additional path which is created because of the gap used clack-band in the winding model creates a new interface.

The interface of oil with the surface of insulation leads to obtain better heat transfer using convection along the new vertical channels. Moreover, the designed models have been built with fully-isolated conductors that make it possible to compare the effects of coupled convection and conduction heat transfer at the same study. It is important to discuss that the non-uniform heat loss distribution has affected the location of the hot-spot and the average temperature of both winding designs at the flow rate of 9 kg/s.

Tab.2: Zustände bei verschiedenen Betriebsbedingungen und Ölen.
Numerical results with different operating conditions and fluids.

Oil Materials		Mineral Oil			Ester Oil		
Operating Condition		Hot-spot temperature (°C)	Averaged temperature (°C)	Hot-spot location	Hot-spot temperature (°C)	Averaged temperature (°C)	Hot-spot location
Non-uniform Heat Loss	With clack-band	109	102	Disc 6 /conductor 5	106	99	D. 6 /conductor 5
	Without clack-band	122	112	Disc 6 /conductor 4	118	110	D. 6 /conductor 4
Uniform Heat Loss	With clack-band	102	98	Disc 2 /conductor 4	99.2	92	Disc 2 /conductor4
	Without clack-band	117	106	Disc 2 /conductor 2	113	106	Disc 2 /conductor 2

The location of the hot-spot doesn't change with various oil materials. Although the ester oil condition has a lower hot-spot temperature, the overheated local section is also not neglectable. It should be noted that the additional path, which is created because of the gap with clack-band, creates a new interface. The interface of oil with the surface of insulation results in a better heat transfer using convection along the new vertical channels. Although the cooling condition is similar (the same oil material at the same flow rate), a higher temperature has been experienced within the winding model. Despite the higher flow rate of the oil at the top channels, the hot-spot temperature is located at the top disc of the winding. It shows that the influence of the higher losses of heat is dominated in comparison to the oil flow rate. Therefore, the effect of the non-uniform heat loss distribution is not neglectable.

Lokalisation von TE-Quellen in Kabelstrecken bei Monitoring-Anwendungen unter Ausnutzung der im TE-Signal enthaltenen Frequenzinformationen

M. Sc. Daniel Passow

Statistiken zum Thema der Fehlerverteilung in VPE Kabelsystemen zeigen, dass auf alle Komponenten einer Kabelstrecke signifikante Fehleranteile entfallen. Für den Einsatz eines Teilentladungsmonitoringsystems bedeutet dies, dass ein solches System nicht nur Informationen in Bezug auf das Auftreten einer TE liefern, sondern zusätzlich eine grobe Lokalisation der TE-Quelle ermöglichen sollte. Fig. 1 zeigt das typische Schema eines Kabelmonitoringsetups. Klassischerweise werden die TE-Sensoren und Detektionseinheiten in der Nähe einer Kabelmuffe platziert. Zur Auskopplung der Teilentladungen werden entweder breitbandig kapazitive oder induktive Sensoren eingesetzt. Die Breitbandigkeit der Sensoren ist dabei von entscheidender Bedeutung, da dadurch gezielt das frequenzabhängige Dämpfungsverhalten sowie die frequenzabhängige Dispersion bei der Ausbreitung eines TE-Impulses im Kabel ausgenutzt werden kann (vgl. Fig. 1). Mit Hilfe dieser beiden frequenzabhängigen Mechanismen ist es möglich, anhand der Auswertung der in einem TE-Signal enthaltenen Frequenzinformationen Rückschlüsse auf den Ursprungsort der TE zu ziehen. Hierfür wird ein breitbandiges TE-Messsystem benötigt, das mehrere unterschiedliche Frequenzbänder parallel auswertet (vgl. Fig. 2). Da hochfrequente Signalkomponenten stärker gedämpft werden als niederfrequente, ist das Anschlagen aller Frequenzbänder ein deutliches Zeichen dafür, dass eine TE in unmittelbarer Nähe zum Messsystem auftritt. Hingegen bedeutet das einzelne Anschlagen des niederfrequentesten Bands, dass die TE in deutlichem Abstand zum Messsystem auftritt. Das Ziel der weiteren Arbeit ist es, die Grenzen dieser Lokalisationsmethodik genauer zu bestimmen und die Sensitivität eines solchen TE-Monitoringsystems durch Labormessung und durch Erprobung im Feld nachzuweisen.

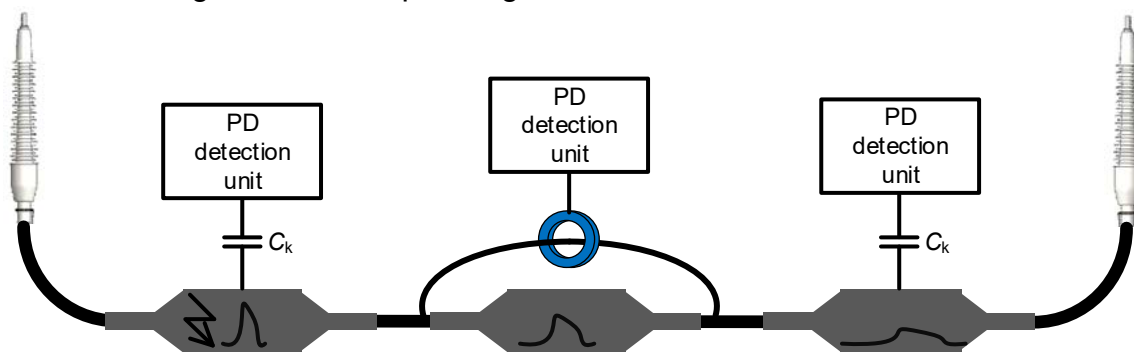


Fig. 1: Schema eines typischen Kabelmonitoringsetups.
Principle of a typical PD monitoring setup for power cables.

■ Evaluation of the Frequency Information Contained in PD Signals for Localization in Power Cable Monitoring

M. Sc. Daniel Passow

The recently published Cigré TB 815 shows that every component in a power cable system represents a significant part in the component failure distribution. Therefore, partial discharge (PD) measurement systems for power cable monitoring should not only detect but also localize PDs roughly. In general, the main purpose of a monitoring system is to constantly evaluate the insulation condition of the power cable system. While diagnosis measurements heavily rely on principles like time domain reflectometry, a monitoring system can't offer this if an autonomous operation is required. In order to gather localization information in a power cable monitoring setup, the frequency content of a PD signal can be evaluated. Fig. 1 shows a typical monitoring setup. The measurement system consists of either a capacitive or an inductive PD sensor and a detection unit. The afore mentioned sensors require a broadband bandwidth design in order to be used for the frequency content evaluation. Furthermore, the complete detection system needs a broadband bandwidth design, Fig. 2 illustrates this. The system consists of three different detection bands, which are evaluated in parallel. This system design takes advantage of the natural attenuation and dispersion characteristics of a power cable. Since signal components, which contain higher frequencies are attenuated more severe than low frequency components. A PD signal which contains only low frequency components (IEC 60270 range) has to be further away from the measurement system as a PD signal that also contains high frequency components. Also, dispersion will lead to the widening of the PD pulse and will therefore lead to an effective low-pass filtering of a PD signal. The aim of the future research is to explore the limits of this localization approach and to demonstrate the sensitivity of such monitoring systems using laboratory setups for validation.

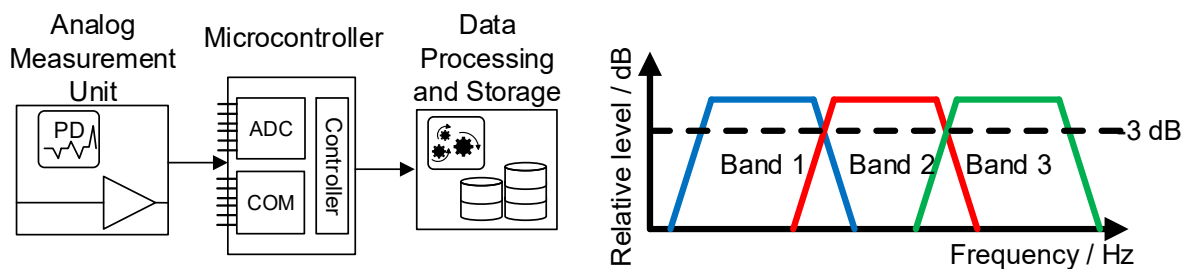


Fig 2: Schema des frequenzabhängigen TE-Lokalisationssystems für das Monitoring von Kabelstrecken.

Setup of the frequency dependent PD localization system for power cable monitoring.

■ **Condition Assessment of Oil-Paper Insulation by Switching Impulse**

Dr. Arpan Kumar Pradhan

High voltage transformer is one of the most essential and important components in power system network. Failure of transformer causes power interruption, which may result in substantial monetary loss in heavy industries. Performance of transformer can be declined due to the degradation of its oil-paper insulation. Therefore, the condition of transformer insulation needs to be assessed regularly for reliable power transmission. Condition of transformer insulation can reliably be monitored through employing non-invasive techniques like dielectric spectroscopy. In dielectric spectroscopy, excitation voltage is applied to the insulation under test and corresponding dielectric response current is measured. Based on the applied excitation voltage and corresponding dielectric response current, various dielectric parameters (like dielectric dissipation factor ($\tan\delta$), complex permittivity, dipolar relaxation time, etc.) are evaluated. These dielectric parameters are employed for estimation of moisture content within insulation as well as its aging status through well-established correlations. However, assessment of insulation through dielectric spectroscopy requires electrical isolation of the transformer from the grid for several hours in order to attain thermodynamic equilibrium of moisture content within oil and cellulosic parts before conducting tests. Moreover, the testing of insulation through dielectric spectroscopy is very time consuming, which leads to an extended period of transformer shut down. This prolonged process results in the requirement of auxiliary transformers for uninterrupted power supply. The requirement of this extra transformer increases overall cost which is not economical. As the time requirement is quite long, environmental conditions (especially temperature) may change during the testing process resulting in moisture migration between oil and cellulosic parts within the insulation. Moisture migration may lead to a somewhat inappropriate estimation about the condition of transformer insulation. Considering the limitations of conventional dielectric spectroscopy, the proposed research is oriented towards development of an advanced technique that can assess the insulation condition through analyzing the dielectric response current during switching operation of the transformer to the grid.

The transformer undergoes switching on and off to the grid depending on the power requirement at consumers end. During switching operation, transformer insulation is stressed by impulse voltage, which results in flow of dielectric response current through it. The characteristics of the dielectric response current depends on the condition of transformer insulation. Therefore, analysis of dielectric response current can be an alternative way for assessing the condition of transformer insulation if acquired through proper arrangement. In order to investigate the effectiveness, the

technique has first been applied on laboratory emulated few insulation models. A setup has been developed in the laboratory for generating switching impulse voltage besides acquiring both voltage and corresponding current data of the insulation models. Fig. 1a) shows the setup for generating the impulse voltage. The front time ($250\mu\text{s}\pm 20\%$) and tail time ($2500\mu\text{s}\pm 60\%$) of the switching impulse voltage has been controlled through adjusting the resistors and capacitors values in the setup whereas its peak (tolerance: $\pm 3\%$) has been set through the DC charging voltage.



Fig. 1: a) Setup for generating impulse voltage in laboratory.
b) Current measurement setup of scaled down insulation model.

Fig. 1b) represents the current measurement arrangement of the insulation model. As a preliminary investigation under switching impulse, few oil-impregnated pressboard samples containing different moisture content have been employed. These pressboard samples have been stressed with the switching impulse of desired peak at a particular temperature through placing them in between the two electrodes (HV and LV electrodes shown by Fig. 1b)). The usage of guard electrode in current measurement prevents the current signal to be interfered by the external noises during measurement. A $50\ \Omega$ shunt resistor has been used in measurement circuit to protect the data acquisition system from high dielectric response current. During measurement, usage of higher bit data acquisition system can eliminate the error due to quantization. For this experimental investigation, 12-bit multi-channel pico-scope has been employed for acquiring both voltage and current data. Besides, the sampling rate of the acquired data has been kept nearly $100\ \text{MS/s}$ to avoid any information loss of both the voltage and current signals.

Based on the applied voltage and corresponding measured dielectric response current, corresponding $\tan\delta$ profile over certain frequency range of the pressboard samples have been evaluated through employing signal processing technique as a preliminary analysis. The $\tan\delta$ profile of the pressboard samples under switching impulse have been compared with the corresponding $\tan\delta$ profile obtained through commercially available instruments (like DIRANATM). The agreement of $\tan\delta$ profile under switching impulse with the corresponding values obtained through DIRANATM indicates that the usage of the proposed technique can be a potential way for assessing the condition of transformer insulation reliably.

■ **FRA Lookup Charts for Quantitative Determination of Winding Axial Displacement Fault in Power Transformers**

M. Sc. Mehran Tahir

Power transformers are considered as one of the most expensive assets and the vital links in electrical power transmission and distribution networks. Nowadays, mechanical faults are one of the major reasons behind transformer failures. Among these mechanical faults, axial winding elongation “Telescoping” is one of the most frequent mechanical faults in power transformers. Frequency Response Analysis (FRA) has gained attention as a reliable diagnostic tool to assess the mechanical integrity of power transformers. However, the assessment of FRA results is still a challenge as it demands skilful personnel for diagnosis, as there is no definitive and reliable code available for FRA interpretation.

To solve these issues, in this contribution a 3D high-frequency model of a three-phase, 3 MVA transformer is used which emulate the behaviour of real transformer and frequency response measurements. This novel model eliminates the need for lumped parameter circuit models, as it provides the ability to extract the FRA signatures directly from the 3D winding model. In the HF model, the axial displacement fault (ADF) is implemented in three levels, in each level a 10 mm (1.2% of its height) of axial displacement is applied to the middle phase HV winding. The simulated transfer functions (TFs) of capacitive inter-winding (CIW) configuration for four vector groups (YNyn0, Ynd0, Dd0 and Dyn0) and also for single-phase are shown in Fig. 1. Here the linear region is dominated by the interwinding capacitance (C_w). It can be seen that variation of the inter-winding capacitance due to the axial displacement possesses a linear relationship with the degree of axial displacement fault. This provides the possibility for the quantitative determination of winding axial displacement fault using FRA. Moreover, the change in C_w can be approximated by linear regression line as shown in Fig. 2. In this way, the amount of ADF can be estimated by change in TF through change in C_w with a maximum error of 4.8%. However, the variation of C_w also depends on a number of geometrical parameters of the windings. To derive a generic method, a sensitivity study is performed and it was found that variation of C_w due to ADF is mostly influenced by D (spacing between windings) for given winding height (H). Thus, a geometrical factor (D/H) is introduced to generalize the method. Based on different D/H , three lookup charts are introduced to diagnose axial displacement fault in different power transformers as shown in Fig. 3. Results of this research aid in precisely diagnosing winding axial displacement fault in power transformers using FRA.

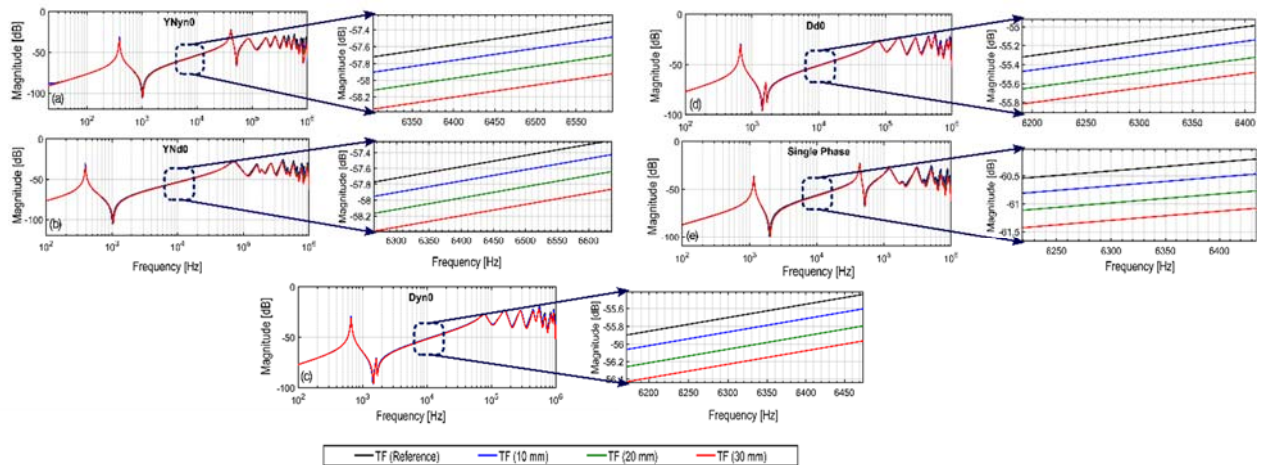


Fig. 1: Capacitive interwinding transfer functions (TFs) of healthy and displaced middle-phase winding: (a)YNyn0, (b)YNd0, (c)Dyn0, (d)Dd0, (e)Single-phase

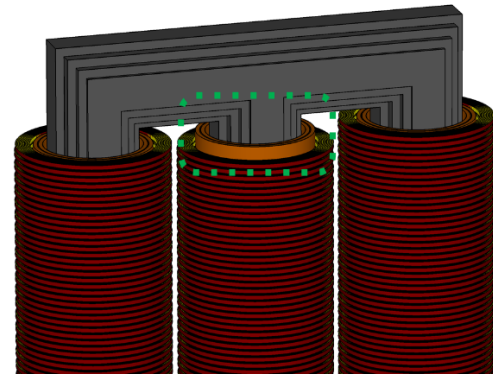
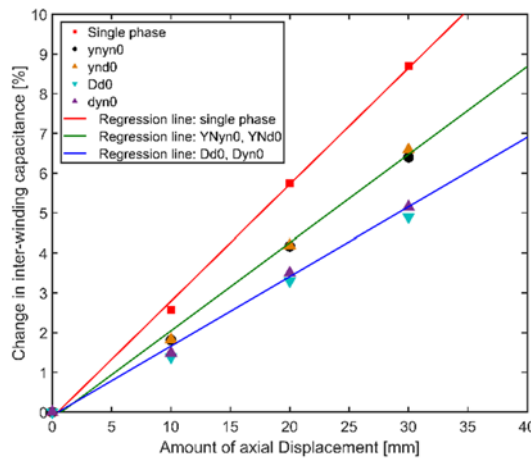


Fig. 2: Linear approximation of change in inter-winding capacitance due to ADF for different vector groups (left) and an illustration of ADF (right)

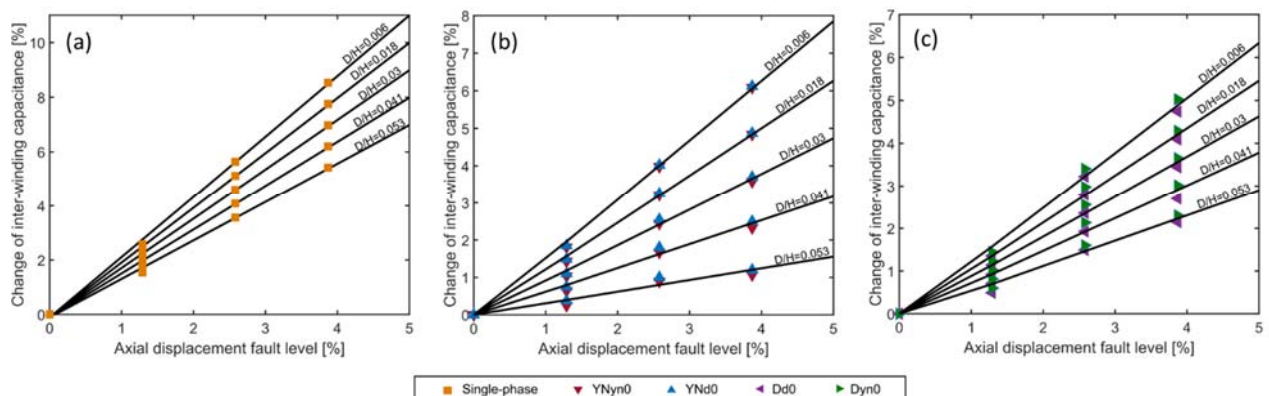


Fig. 3: Lookup charts for quantitative assessment of axial displacement faults in power transformers: (a)Single-phase, (b)YNyn0 and YNd0, (c)Dd0 and Dyn0

■ **Teilentladungen an festen Störspitzen in HGÜ-GIS**

M. Sc. Philipp Wenger

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) zeichnen sich durch hohe Zuverlässigkeit, Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen und kompakte Bauweise aus. Um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten sind dielektrische Prüfungen, wie z.B. die Teilentladungsmessung, von entscheidender Bedeutung, um die Qualität des Isolationsystems zu beurteilen. Neben Kontakten auf freiem Potential, frei beweglichen Partikeln und Hohlräumen in der Feststoffisolierung werden auch metallische Störspitzen als kritische Defekte bewertet. Unter AC-Beanspruchung können diese Defekte anhand der Entladungsentwicklung und Impulsabfolge kategorisiert und durch Werkzeuge der Mustererkennung separierbar werden.

Die für Wechselspannung gültigen Messmethoden und Auswerteverfahren lassen sich jedoch nur bedingt auf Gleichspannungsanwendungen übertragen. Für gasisolierte HGÜ-Systeme existieren bis heute keine normativ festgelegten Methoden, um unterschiedliche Teilentladungsquellen zu messen, detektieren und zu analysieren. Parameter wie Gasdruck, Defektposition und -geometrie, Spannungsamplitude und Polarität beeinflussen den Entladungsprozess erheblich. Teilentladungen können mit unterschiedlichen Messsystemen erfasst werden, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien basieren. An der Spitze der Störstelle werden Lichtquanten emittiert, die durch Photomultiplerröhren (PMT) mit hoher Empfindlichkeit detektiert werden können. Das Auftreten von TE in SF₆ ist mit elektromagnetischen Impulsen mit Bandbreiten von mehr als 10 GHz verbunden, die mit UHF-Messtechniken messbar sind. Der Entladungsstrom, der sich aus schnell beweglichen Elektronen und langsamen Ionenströmen zusammensetzt, kann mit HFCTs oder Stromshunts gemessen werden.

Eine zeitsynchrone Kombination mehrerer Messverfahren ermöglicht eine exaktere Auswertung und fördert ein besseres Verständnis der Defektcharakteristik. Die Experimente werden in kommerziell verfügbaren 300 kV HGÜ-GIS-Komponenten durchgeführt. Der Versuchsaufbau, einschließlich Messsysteme und Störstelle, ist in Fig. 1 dargestellt. Es werden vier Defektkonfigurationen untersucht, die in Abhängigkeit von der Defektposition (Spitze auf Masse- oder Hochspannungspotential) und der Polarität der angelegten Gleichspannung benannt werden.

Es wird zwischen drei typischen Entladungsmerkmalen fester Störstellen unterschieden: die impulslose Entladung, die impulsbehaftete Entladung und die Überlagerung von Impulsen und impulslosem TE-Strom. Die Fähigkeit der Messsysteme, TE zu detektieren, ist stark von den auftretenden TE-Merkmalen und somit von der Defektkonfiguration abhängig. Die Merkmale, die ein Defekt aufweist, sowie die individuellen Empfindlichkeiten der Messsysteme sind in Tabelle 1 dargestellt.

■ **Partial Discharges on fixed Protrusions in HVDC-GIS**

M. Sc. Philipp Wenger

Gas-insulated switchgears (GIS) benefit from high reliability, robustness against environmental conditions and compact construction. To ensure reliable operation, dielectric testing such as partial discharge (PD) measurement is crucial in order to guarantee a defect free insulation system. Besides floating contacts, free moving particles and voids in bulk insulation, metallic protrusions are likewise considered as critical defects. Under AC conditions, discharge phenomena are well categorized by discharge stages and pulse sequences which allow the separation by pattern recognition.

However, at DC field distribution, the dielectric defect behaviour differs in a large measure. A high number of parameters such as gas pressure, defect position and geometry, voltage amplitude and polarity influence significantly the PD discharge process. PD can be detected with several measurements systems which are based on different physical principles. E.g. light emissions are generated at the protrusion's tip. In light-tight GIS compartments, optical signals can be detected by highly sensitive Photomultiplier tubes (PMT). The occurrence of PD in SF₆ is associated with electromagnetic pulses showing fast rise-time in excess of 10 GHz which can be measured using UHF techniques. HFCTs or current shunt measuring techniques allow a measurement of the discharge current, which is composed by fast moving electrons and slow-moving ions.

Hence, a timesynchronised combination of several measurement techniques enables an advanced evaluation and understanding of the defects. The experiments are performed in commercially available 300 kV DC-GIS components. The experimental setup including measurements systems and protrusion defect, is given in Fig. 1. Four defect configurations are considered which are determined according to the defect position (protrusion on ground or high voltage potential) and the polarity of the applied DC voltage.

Three characteristic discharge features are extracted like pulseless discharge, impulse discharge and the superposition of pulses and pulseless PD current in particular. The ability of the measurement systems to detect PD is highly dependent on the occurring features of the PD and therefore dependent on the defect configuration. The features provided by a defect as well as individual measurement system sensitivities are shown in Tab. 1.

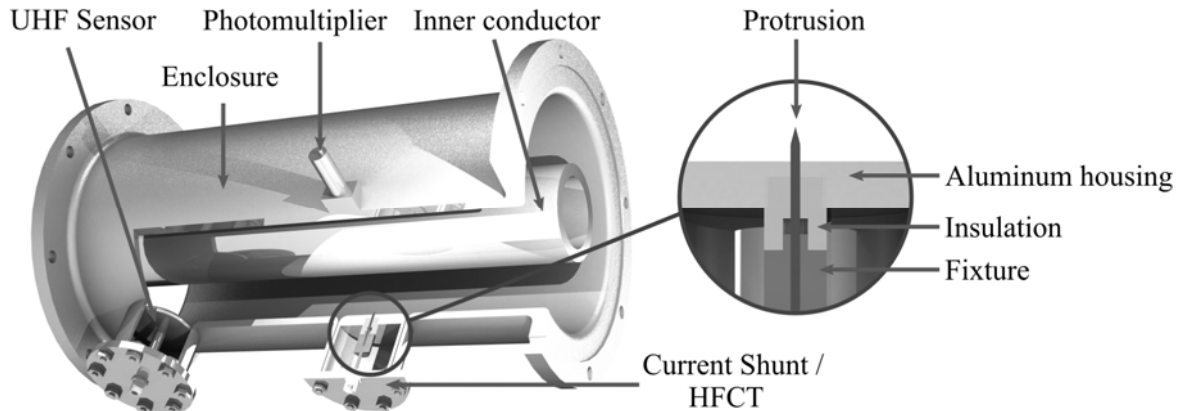


Fig. 1: Experimenteller Aufbau des Versuchsfäßes mit erdseitigem Defekt und adaptierten UHF, PMT, HFCT und Stromshuntmesssystem.
Experimental GIS setup with protrusion defect on ground potential and applied UHF, PMT, HFCT and shunt measurement system.

Impulslose TE tritt an negativen Spitzen auf, wenn der Defekt am Innenleiter befestigt ist. Bei niedrigen Gasdrücken tritt impulslose Entladung zudem dann auf, wenn der Defekt auf Erdpotential liegt. Diese Defektkonfiguration wird von Breitbandmesssystemen wie UHF und HFCT nicht detektiert. Lichtemissions- und Gleichstromkomponenten können jedoch durch PMT- und Shuntmessungen erfasst werden.

Impulsbehaftete TE werden an positiven Fehlstellen (auf Hochspannung- und Erdpotential), bzw. an negativen Spitzen auf Erdpotential detektiert. Mit steigenden Prüfspannungen erfolgt der Übergang von einzelnen, zeitlich weit auseinanderliegenden TE-Impulsereignissen hin zu Impulsfolgen mit hoher Wiederholrate und reduzierten Amplituden.

Eine Überlagerung von impulsloser und impulsbehafteter TE wird an positiven Spitzen (auf Hochspannung und Erdpotential) bzw. an negativen Spitzen auf Erdpotential detektiert. Strommessungen weisen darauf hin, dass die Amplitude der Impulse, die von negativen Spitzen ausgehen, nahe am Rauschpegel liegen und eine verhältnismäßig langsam ansteigende Signalfanke aufweisen. Deshalb kann der Defekt mit UHF- und HFCT-Messungen nur an positiven Spitzen erkannt werden.

Optische Messungen eignen sich dazu, alle Defektkonfigurationen im Versuchsaufbau zuverlässig zu erkennen. Die alleinige Auswertung der Lichtemissionen reicht jedoch nicht aus, um verschiedene Defektkonfiguration zu unterscheiden. Im Allgemeinen erfordert die hohe Varianz der TE-Amplitude und der Zeitverzögerung zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen den Einsatz von Messsystemen mit sowohl hoher vertikaler als auch horizontaler Auflösung. Darüber hinaus ist eine hohe analoge Bandbreite erforderlich, um Gleichstromanteile bis hin zu TE-Impulsen mit spektralen Komponenten im GHz-Bereich zu erfassen. Die Kombination von verschiedenen Messsystemen ermöglicht ein tieferes Verständnis der TE-Aktivität von festen Störspitzen.

Tab.1: TE-Empfindlichkeiten der Messsysteme abhängig von der Defektart.
PD sensitivity of the measurement systems for different defects.

Configuration	PMT	UHF	HFCT	Shunt
Protrusion on ground potential Negative test voltage	I	I	I	S
Protrusion on HV potential Positive test voltage	I	I	I	S
Protrusion on ground potential Positive test voltage	I	-	-	S
Protrusion on HV potential Negative test voltage	P	-	-	P

P = Pulseless PD current

I = PD impulses

S = Superposition of pulseless PD current and PD impulses

Pulseless PD occurs at negative protrusions if the defect is attached to the inner conductor. A detection is also possible at low gas pressures if the protrusion is on ground potential. This defect configuration cannot be detected by high frequency measurement systems such as UHF and HFCT. However, light emission and DC current components can be detected by PMT and shunt measurements.

Impulse PD is respectively detected at positive protrusions (on high voltage and ground potential) and at negative protrusion on ground potential. With rising absolute voltages, there is a transition from single PD impulses events to pulse sequences showing a high repetition rate and reduced amplitudes.

Superposition of pulseless PD and impulse PD is respectively detected at positive protrusions (on high voltage and ground potential) and at negative protrusion on ground potential. Shunt measurements indicate that the amplitude of the impulses emitted by negative protrusions are close to the noise level and lack a fast rising slope. Hence, the defect can only be detected with UHF and HFCT measurement at positive protrusions.

Optical measurements are suitable to detect all defect configurations reliably in this test setup. However, the sole evaluation of the light emissions is not sufficient to differentiate between different discharge features. In general, the high variation of PD amplitude and time delay between successive impulses requires measurement systems with both, high vertical and horizontal resolution. Moreover, a high analog bandwidth is necessary to detect components ranging from DC-like pulseless PD up to PD impulses with spectral components in the GHz domain. A combination of measurement systems enables an advanced understanding of the PD activity of protrusion defects.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

■ Forschungsprojekt „C/sells“

Laufzeit: Januar 2017 – März 2021

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



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

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project “C/sells”**

Period: January 2017 – March 2021

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



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

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

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Laufzeit: April 2017 – Dezember 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 – December 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.

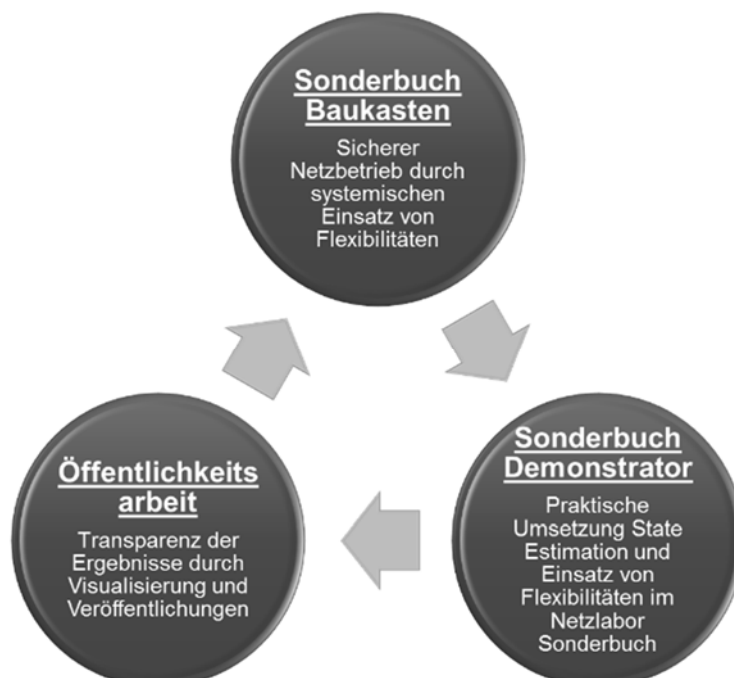


Fig. 1: Schwerpunkte des Forschungsprojekts.
Main emphasis of the research project.

■ 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.

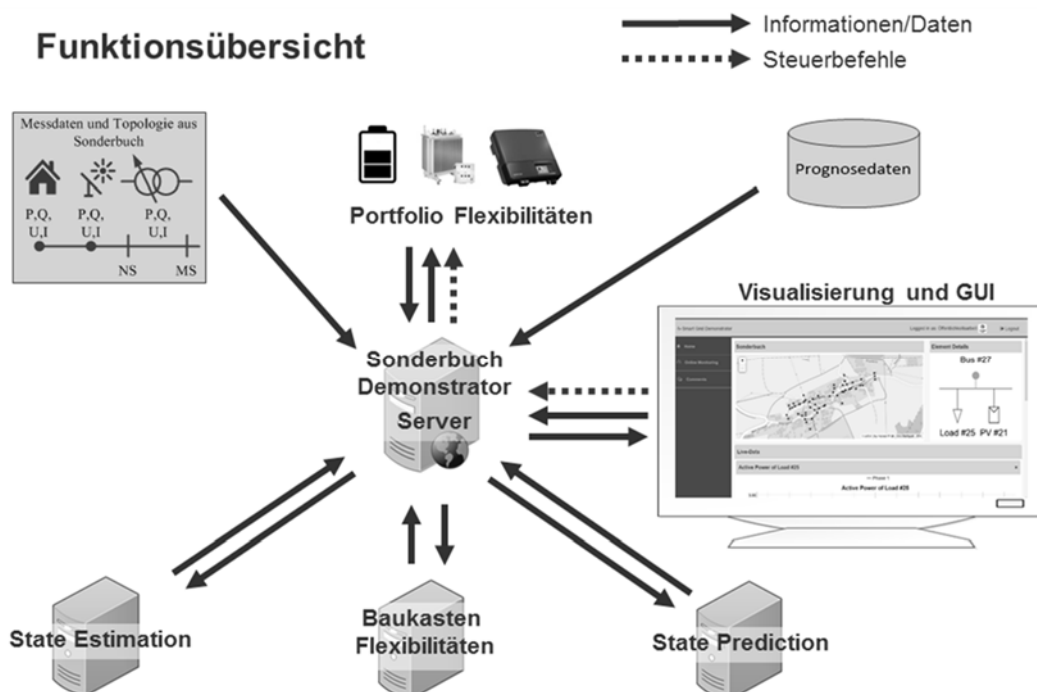


Fig. 2: Projektbausteine und deren Kopplung.
 Project blocks and their coupling.

- **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 Pkws 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 Nagold



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

Laufzeit: Juli 2019 – Juni 2021

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

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

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Period: July 2019 – June 2021

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

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Laufzeit: Oktober 2019 – September 2022

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

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



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

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

Period: October 2019 – September 2022

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

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Laufzeit: November 2019 – Oktober 2022

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



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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektpartner während der Auftaktveranstaltung

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

Period: November 2019 – October 2022

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



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

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag



Storage system at field test location

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

Laufzeit: Oktober 2020 – September 2022

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

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

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



Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

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

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

Period: October 2020 – September 2022

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

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

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



Ministerium für Wissenschaft, Forschung
und Kunst Baden-Württemberg

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

■ **Bewertung der Stabilität von netzspeisenden Wechselrichtern anhand gemessener Netz- und Wechselrichterimpedanzen**

M. Sc. Matthias Buchner

Der Wandel von zentraler zu dezentraler nachhaltiger Energieerzeugung sowie die zunehmende Elektrifizierung aller Lebensbereiche, wie z.B. der Mobilität, führt dazu, dass immer mehr Leistungselektronik an das Stromnetz angeschlossen wird. Dies kann unter Umständen zu einer Destabilisierung der Regelkreise von Wechselrichtern und zu anhaltenden harmonischen Resonanzen oder anderen Instabilitätsproblemen führen [1].

Die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Regelkreisen von über die Netzimpedanz gekoppelten parallelen Umrichtern, wie z.B. den Umrichtern der Windkraftanlagen in Windparks [2], den Photovoltaik (PV)-Wechselrichtern in PV-Anlagen [3] oder den Lokomotivumrichtern in den elektrischen Bahnnetzen [4] können zu Funktionsbeeinträchtigungen oder Ausfällen der Systeme führen.

Die impedanzbasierte Stabilitätsanalyse, die zuerst für die Untersuchung von Gleichstromsystemen eingesetzt und auf 3-Phasen-Wechselstromsysteme erweitert wurde, bietet eine Möglichkeit, die Kleinsignalstabilität zu bewerten und mögliche Fehlerursachen aufzuzeigen. Das untersuchte System besteht aus einem Netzanschlusspunkt im Smart-Grid-Labor und einem PV-Konverter. Wie in Fig. 1 dargestellt, kann das Netz durch eine Spannungsquelle mit Serienimpedanz und der PV-Konverter durch eine Stromquelle mit Parallelimpedanz dargestellt werden.

Basierend auf dem Ersatzschaltbild in Fig. 1 beträgt der Wechselrichter-Ausgangsstrom

$$I(s) = \frac{I_c(s)Z_c(s)}{Z_c(s) + Z_g(s)} - \frac{V_g(s)}{Z_c(s) + Z_g(s)} \quad (1)$$

der umgeschrieben werden kann als

$$I(s) = \left(I_c(s) - \frac{V_g(s)}{Z_c(s)} \right) \frac{1}{1 + Z_c(s)/Z_g(s)} \quad (2)$$

Basierend auf (2) und den oben genannten Annahmen funktioniert ein netzgekoppelter Wechselrichter stabil, wenn das Verhältnis der Netzimpedanz zur Ausgangsimpedanz des Wechselrichters, $Z_c(s)/Z_g(s)$, das Nyquist-Kriterium [5] erfüllt.

Die getrennte Messung der Ausgangsimpedanz Z_c des PV-Wechselrichters und der Netzimpedanz Z_g . Diese Impedanzen können zur Abschätzung der Stabilität nach dem Anschluss des PV-Wechselrichters an das Netz verwendet werden.

■ Evaluation of the Stability of Grid-Feeding Inverters using measured Grid and Inverter Impedances

M. Sc. Matthias Buchner

The change from centralized to decentralized sustainable energy production as well as the increasing electrification of all areas of life, such as mobility, leads to more and more power electronics being connected to the grid. Under certain circumstances this can lead to destabilization of the control circuits of inverters and to persistent harmonic resonances or other instability problems [1]. The mutual interactions between the control loops of parallel converters coupled via the mains impedance, such as the converters of the wind turbines in wind farms [2], the photovoltaic (PV) inverters in PV systems [3] or the locomotive converters in the electrical railroad networks [4], can lead to impaired operation or failure of the systems.

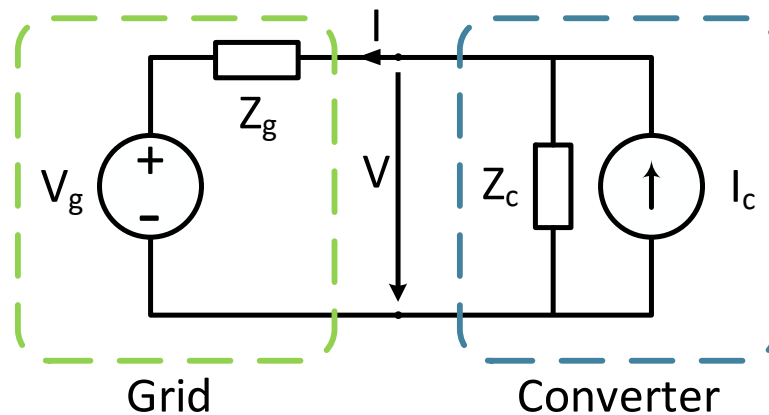


Fig. 1: Kleinsignaldarstellung eines Wechselrichter-Netz-Systems.
Small-signal representation of an inverter-grid system.

The impedance based stability analysis, which was first used for the investigation of DC-systems and was extended to 3-phase-AC systems, offers a possibility to evaluate the small signal stability and to show possible causes for errors. The system under study consists of a grid-connection point in the smart-grid laboratory and a PV converter. As shown in Fig. 1 the grid can be represented by a voltage source with series impedance and the PV converter by a current source with parallel impedance.

Based on the equivalent circuit in Fig. 1, the inverter output current is (1) which can be rewritten as (2). Based on (2) and the assumptions stated before, a grid-connected inverter will stably operate if the ratio of the grid impedance to the inverter output impedance, $Z_g(s)/Z_c(s)$, satisfies the Nyquist criterion [5].

The separate measurement of the output impedance Z_c of the PV inverter and the grid impedance Z_g . These impedances can be used to estimate the stability after connecting the PV inverter to the grid.

Die Messung der Ausgangsimpedanz des PV-Wechselrichters wird mit einem Linearverstärker (siehe Fig. 2) und einer Methode zur Messung der Wechselrichterimpedanz in einem dq-Rahmen [6] durchgeführt. Fig. 3 zeigt die gemessene Wechselrichterimpedanz. Mit Hilfe des verallgemeinerten Nyquist-Stabilitätskriteriums [7], das für Systeme mit mehreren Ein- und Ausgängen anwendbar ist, kann abgeschätzt werden, ob der Wechselrichter in dem gemessenen Netz stabil arbeiten würde.

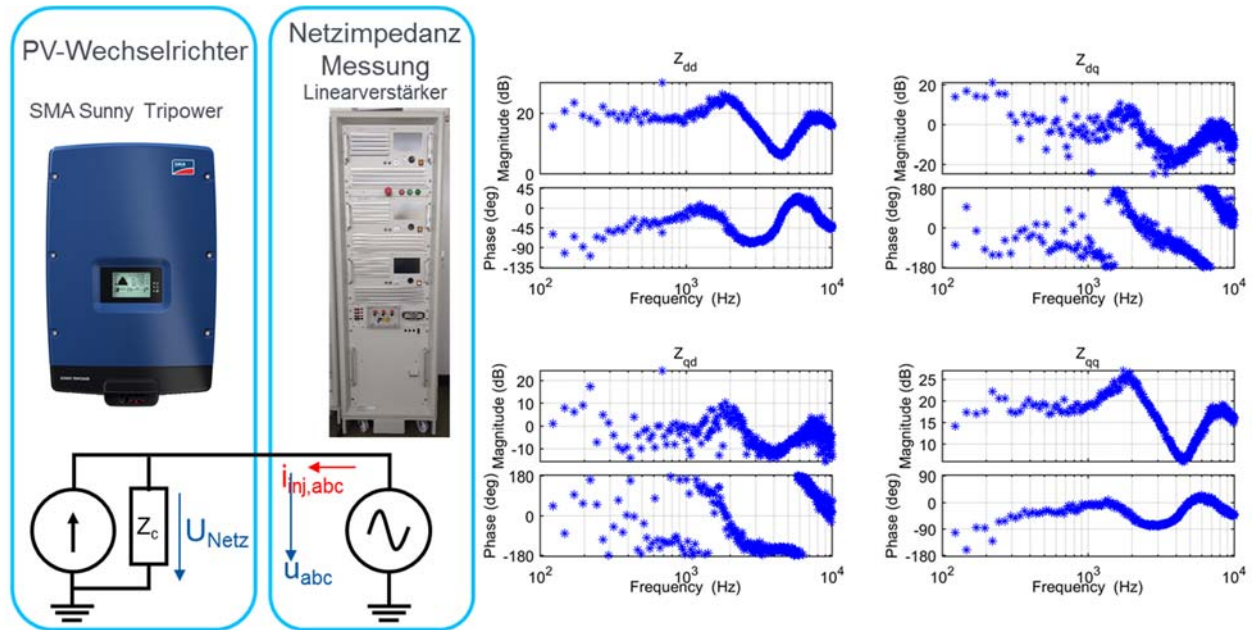


Fig. 2: Gemessene Ausgangsimpedanz des PV-Wechselrichters.
Measured output impedance of the PV inverter.

Der Wechselrichter kann am Netzanschlusspunkt stabil betrieben werden, wenn die Eigenwerte λ_1 und λ_2 den kritischen Punkt -1 auf der linken Seite nicht umkreisen. Wie in Fig. 4 ersichtlich ist, gibt es eine große Stabilitätsreserve bis zum kritischen Punkt 1.

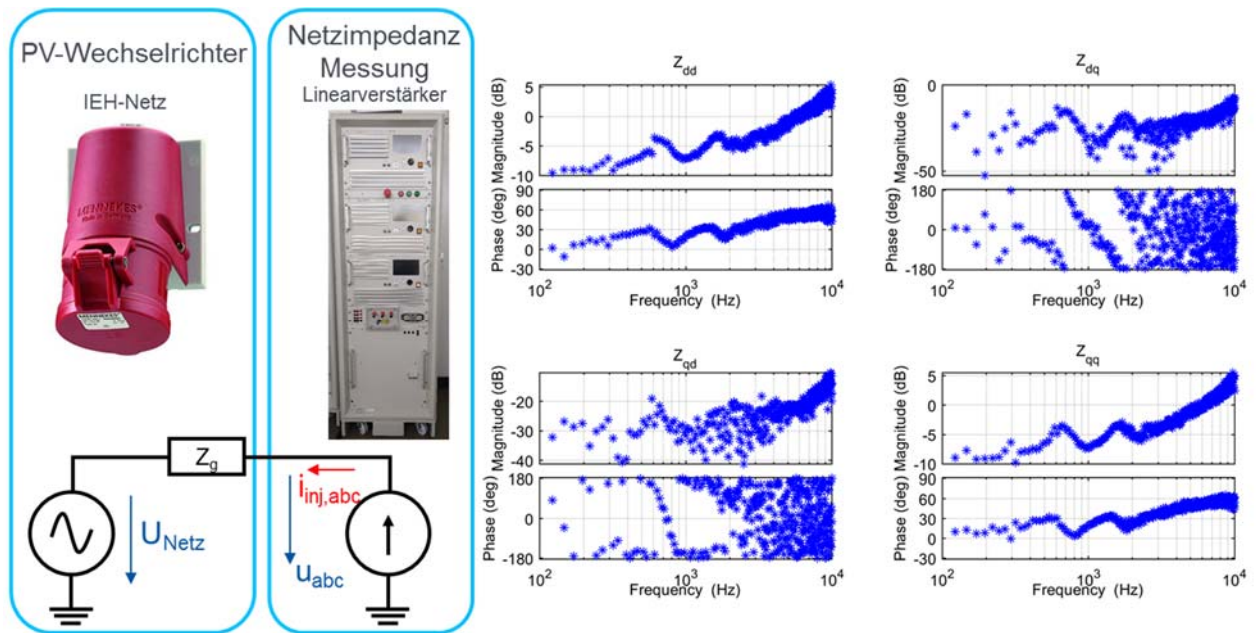


Fig. 3: Im Smart-Grid-Labor gemessene Netzimpedanz.
Grid impedance measured in the Smart-Grid laboratory.

The measurement output impedance of the PV inverter is realized with a linear amplifier see Fig. 2 and a method to measure the inverter impedance in a dq-frame [6].

Fig. 3 shows the measured inverter impedance. With the help of the generalized Nyquist stability criterion [7], which is the generalization of the Nyquist stability criterion for multi-input and multi-output systems, it can be estimated whether the inverter would work stable on a grid, shown in Fig. 3 with this operation point.

The inverter can be operated in a stable way at the grid connection point if the eigenvalues λ_1 and λ_2 do not circle the critical point -1 on the left. As one can see from Fig. 4 there is a large stability reserve up to the critical point -1.

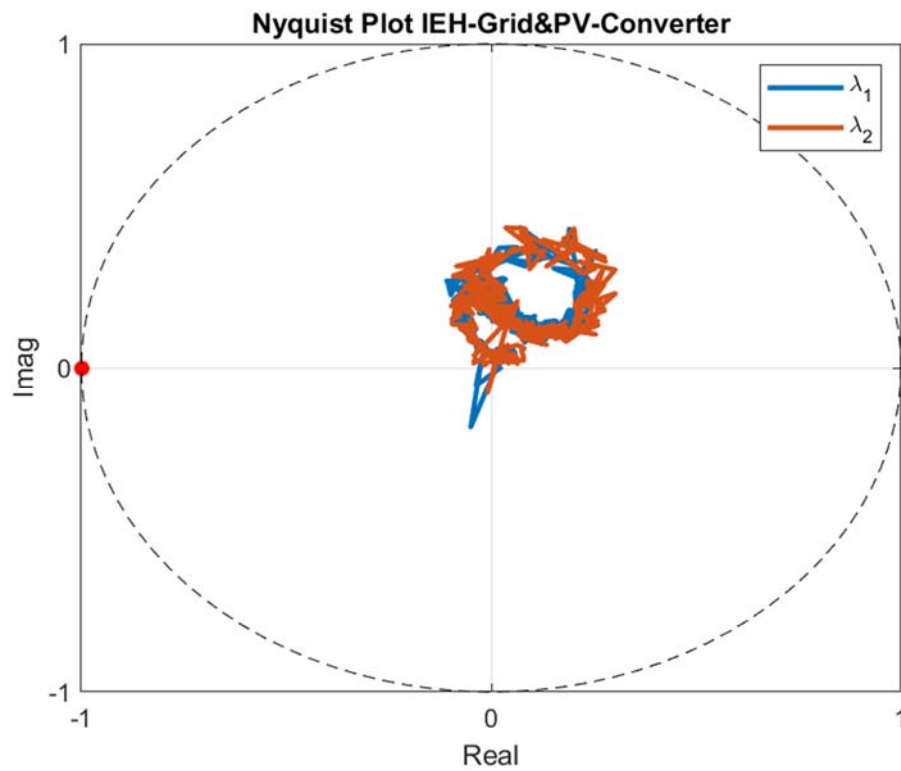


Fig. 4: Stabilitätsbewertung durch einen generalisierten Nyquist-Plot.
Stability analysis by a generalized Nyquist plot.

- [1] M. Liserre, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2006.
- [2] P. Brogan, "The stability of multiple, high power, active front end voltage sourced converters when connected to wind farm collector systems," in *EPE Wind Energy Chapter Symposium 2010*, 2010.
- [3] J. L. Agorreta, M. Borrega, J. López, and L. Marroyo, "Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2011.
- [4] E. Mollerstedt and B. Bernhardsson, "Out of Control Because of Harmonics: An Analysis of the Harmonic Response of an Inverter Locomotive," *IEEE Control Syst.*, 2000.
- [5] J. Sun, "Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2011.
- [6] T. Roinila, M. Vilkkö, and J. Sun, "Broadband methods for online grid impedance measurement," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013*, 2013.
- [7] A. G. J. Macfarlane and I. Postlethwaite, "The generalized nyquist stability criterion and multivariable root loci," *Int. J. Control*, 1977.

■ Entwicklung eines PMU-Monitoring-Systems

M. Sc. Paul Burkhardt

Durch den fortschreitenden Ausbau von Erneuerbaren Energien stehen die Verteilnetzbetreiber vor neuen Herausforderungen. Dazu zählen beispielsweise ungewollte Leistungstransite, welche bei vermaschten 110 kV-Netzen auftreten, falls sich die Spannungsbeträge und -winkel an den Anschlusspunkten zum überlagerten Netz voneinander unterscheiden. Um die Transite durch die 110 kV-Ebene bestimmen zu können, sind die Spannungen nach Betrag und Winkel an den Transformatoren zum 380 kV-Netz zu messen. Hierfür werden Phasor Measurement Units (PMU) eingesetzt, welche über eine GPS-Synchronisation einen hochgenauen Zeitstempel liefern. Ein GPS-Zeitstempel wird benötigt, um speziell für die gemessenen Spannungswinkel eine Vergleichbarkeit der Werte der einzelnen Messstandorte zu gewährleisten.

Mittels des PMU-Monitoring-Systems werden die PMU-Messwerte auf einem Datenkonzentrator lokal abgespeichert und per Mobilfunkverbindung an eine sich auf einem Server befindliche InfluxDB-Datenbank übermittelt. Die dort abgespeicherten Werte sollen für eine weitere Datenverarbeitung und die Bestimmung der Transite genutzt werden. Fig. 1 zeigt die allgemeine Struktur des Monitoring-Systems.

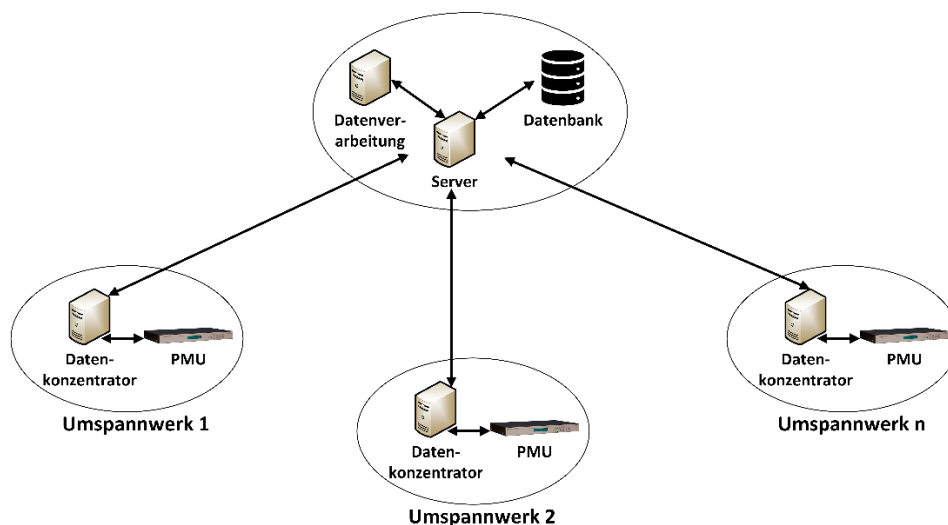


Fig. 1: Struktur des PMU-Monitoring-Systems.
Structure of the PMU monitoring system.

Das Monitoring-System wird in einem Netzgebiet der Netze BW eingesetzt und soll im nächsten Schritt mit der jeweils aktuellen Netztopologie aus der Leitwarte gekoppelt werden, um die Ermittlung der Transite zu ermöglichen.

■ **Development of a PMU-Monitoring System**

M. Sc. Paul Burkhardt

Due to the increasing integration of renewable energies in distribution grids, network operators in Germany are facing new challenges. These include, for example, unwanted active power and reactive power transits. Transits can occur in meshed 110 kV grids, if there is a difference in voltage amount or phase angle at the connection points to the superimposed grid. In addition, the transit flows depend on the current network topology, as for example the impedance between the connection points changes after switching operations. Transit flows may lead to increased line loading and therefore higher losses. Due to an increased loading the integration of renewable energies is more difficult. Therefore, transit flows should be known and reduced.

In order to determine the transits, voltage must be measured by amount and angle at the transformers to the superimposed 380 kV grid. For this purpose, Phasor Measurement Units (PMU) are used, which provide a highly accurate time stamp via GPS synchronization. A highly accurate stamp is required to ensure comparability of the values of the individual measurement locations, especially for the measured voltage angles.

By means of the PMU monitoring system, the PMU measured values are stored locally on a data concentrator and are transmitted via LTE connection to an InfluxDB database located on a server. The stored data can be used for further processing and for determining the transits. Fig. 1 shows the general structure of the monitoring system.

The monitoring system will be used in a grid area of Netze BW, a German distribution network operator. The next step will be the coupling of the monitoring system with the current grid topology to enable the determination of the transits. Moreover, an algorithm developed at the IEH for the calculation of transits is to be further improved and tested on the basis of a model of the real grid.

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

M.Sc. Daniel Contreras

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

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

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

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

M. Sc. Daniel Contreras

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

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

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

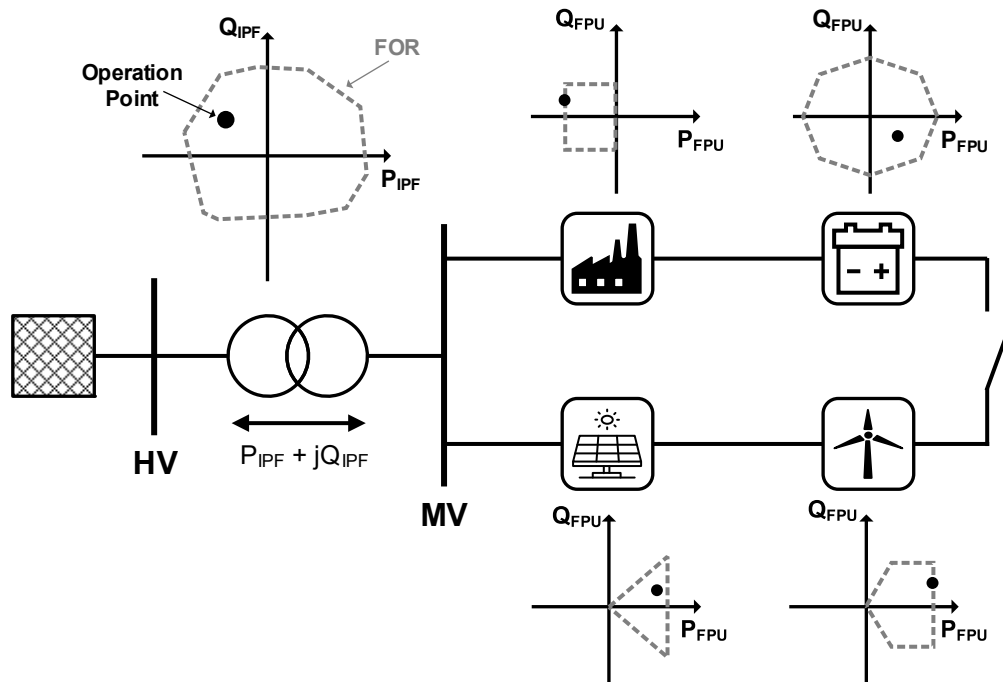


Fig. 1: Schematische Darstellung des Aggregationsalgorithmus.
Schematic representation of the aggregation algorithm.

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

Die erwarteten Ergebnisse sind PQ-Flexibilitätsdiagramme des Netzes, welche die möglichen Betriebspunkte zeigen, die das gesamte Netz ohne Verletzung von Netzrestriktionen erreichen kann. Diese Informationen können von Netzbetreibern gemeinsam genutzt werden (unter Berücksichtigung eines Bottom-up-Ansatzes) und helfen ihnen, ihre Entscheidungsmechanismen 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, mit der Verteilung der Betriebspunkte des Netzes.

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

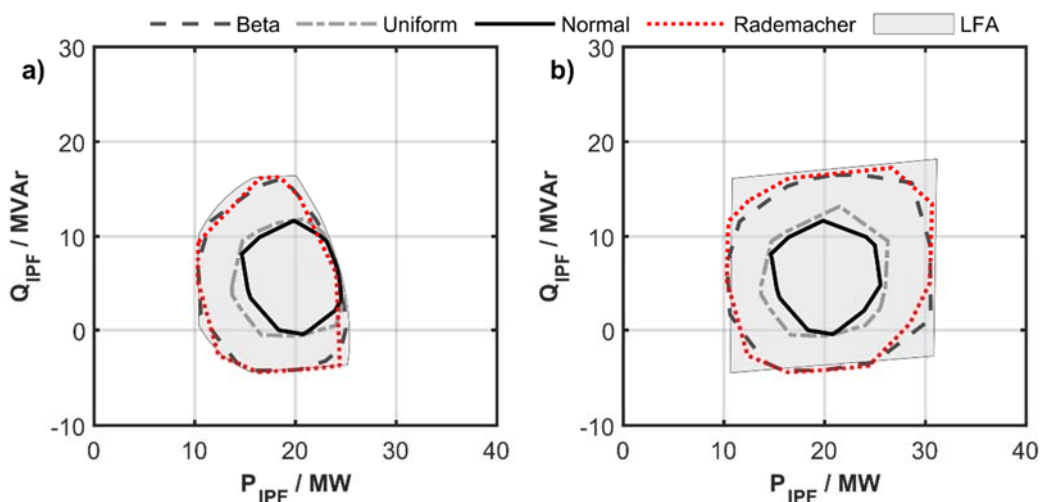


Fig. 2: Vergleich des linearen Aggregationsverfahrens mit Monte-Carlo Simulationen. Comparison of LFA method with random sampling approach using different PDF.

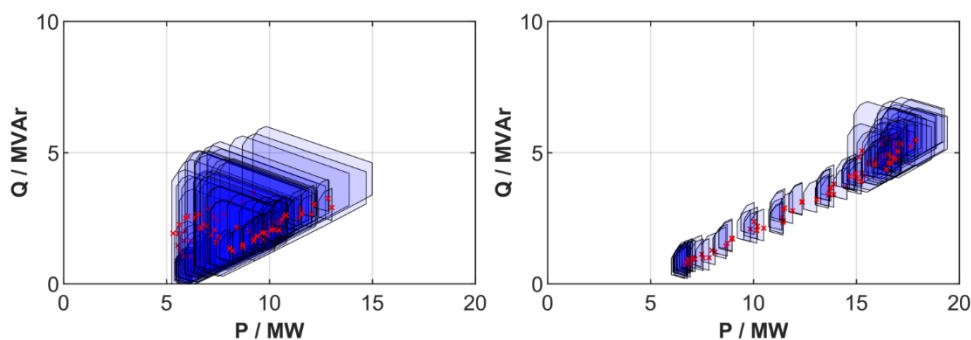


Fig. 3: Aggregiertes Diagramm der Flexibilität des CIGRE 20kV-Netzes über verschiedene Zeitrahmen. Aggregated flexibility chart of CIGRE 20 kV test-bench over different time-frames.

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

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

■ Investigation of the Applicability of the Short-Circuit Power as Central Parameter for the Design and Operation of Inverter-dominated Networks

M. Sc. Deepak Deepak

Power system is transitioning towards the power electronics based generating units (PE-G) from synchronous machines (SM). This is motivated by integration of more and more renewable sources of energies (RES). As a result of this transition, there are fundamental changes happening in the way power system is operated. This is mainly because of the difference in the physical characteristics of these generating units. While, the dynamics of SMs dictated by the physical laws, the response of PE-G depends on the control which can be freely defined by mathematical models.

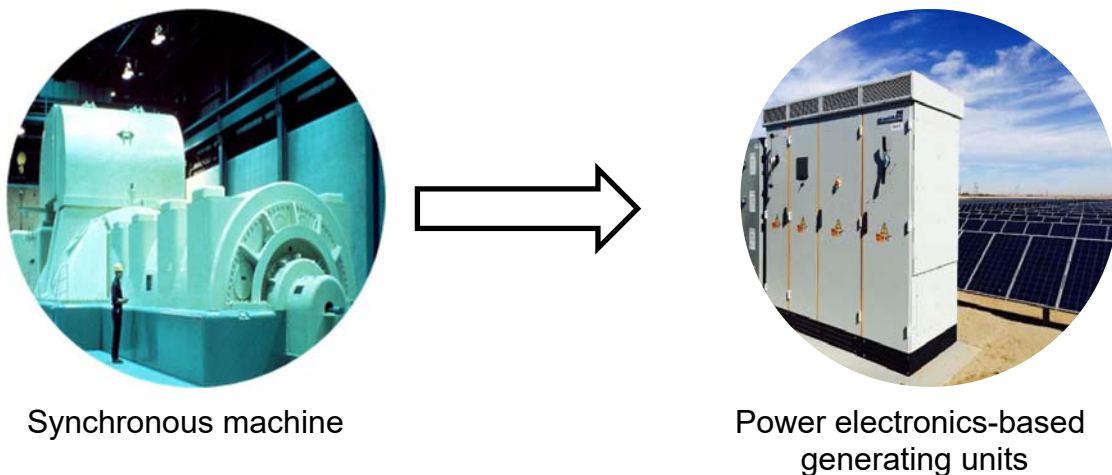


Fig. 1: Transition of generating units from SM to PE-G

Short-circuit power (SCP) has been used as a central parameter for the design and operation of classical power system with SMs. This is due to the inherent property of the SMs which makes SCP a central parameter to characterize the power system. Furthermore, using SCP, short-circuit ratio (SCR) can be calculated which defines the strength of the grid at a node. The higher the SCR ratio, the stronger and consequently more stable is the grid. This is directly related to the amount of fault current a SM can inject which can be 5-6 times its nominal current. However, in the case of PE-G, due to thermal limitations of power electronic switches, it can only inject 1.1 p.u. of fault current. This brings to the research the question

“if SCP can be the central parameter today, in fully PE-G based power system ?”

This work is being done in collaboration with Transnet BW which began in March 2020.

IEEE-39 bus system is being used to study the penetration of PE-Gs by displacing the SM with type 4B Wind Turbines (WTs). The model is simulated using PowerFactory. The steady-state short-circuit calculation as per the VDE 0102 (2016) is carried out and the preliminary results are shown as a heat map in Fig. 2.

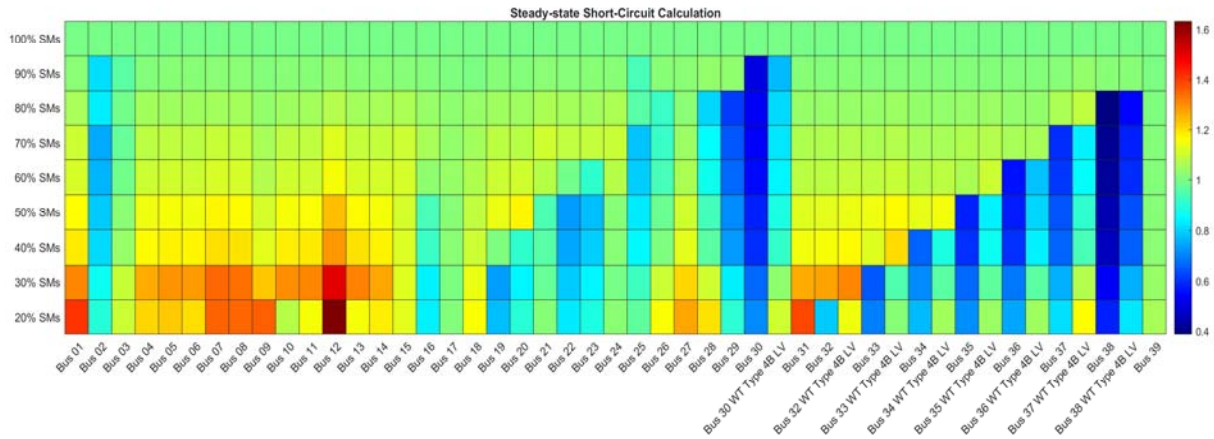


Fig. 2: Heat-map for steady-state short-circuit calculation as per VDE 0102 (2016)

The left side of Fig. 2 shows percentage of SMs from 100% to 20% and x-label is the steady-state short-circuit value calculated at these buses. For example, in Bus-12, the SCP increases as the SMs are being displaced. This is because the wind turbines inject full 1.1p.u. of fault current, irrespective of voltage at its terminal, which even leads to over-voltages. Other steady-state SCP-calculation methods have also been used.

The dynamic simulation is demonstrated in Fig. 3. This response is shown for Bus-16. As it can be seen that, due to integration of WTs, the post-fault voltage is more damped and stabilizes quickly. This is due to the fast control action of the WTs.

Further investigations will be done to seek the answer for up to 100% PE-G based power systems.

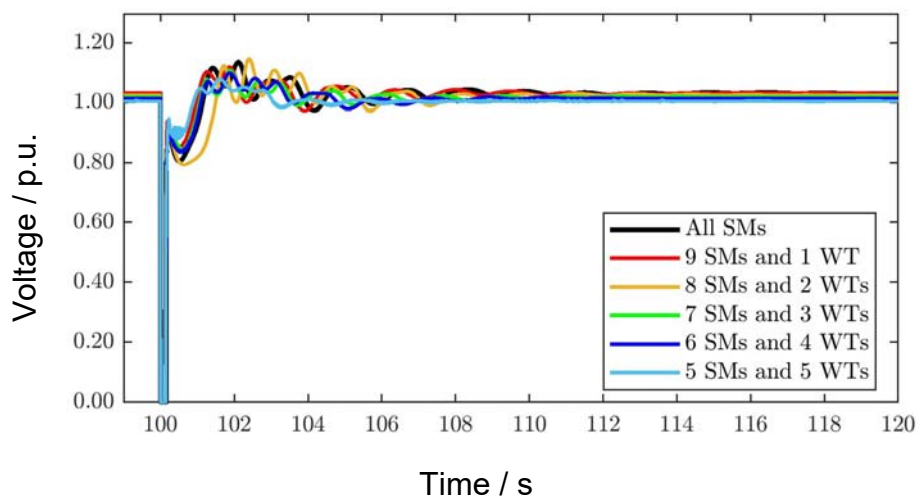


Fig. 3: Dynamic simulation of three-phase short-circuit at Bus-16 for 150 ms

■ **Erkennung, Klassifikation, Vorhersage und Prävention von Power Quality Störungen**

M. Sc. Adrian Eisenmann

Die Energiewende bedingt einen technologischen Umbau des heute bekannten elektrischen Energiesystems. Eine leistungselektronikbasierte Netzkopplung von spannungsbildenden Netzelementen auf der einen Seite und von spannungsgeführten auf der anderen bildet dabei das Rückgrat zukünftiger Elektrizitätsnetze. Fortschritte bei den Leistungshalbleitern haben in den letzten Jahren zu einer stetig zunehmenden Anzahl an wechsellrichterbasierten Systemen in den elektrischen Netzen geführt. Klassische, heute noch vorherrschende elektro-mechanische Erzeugungseinheiten, die mittels großer Synchrongeneratoren und den damit verbundenen rotierenden Massen maßgeblich zur Systemstabilität beitragen, treten zunehmend in den Hintergrund und werden von ruhenden Halbleitersystemen verdrängt. Photovoltaik- und Windkraftanlagen in Kombination mit elektrischen Batteriesystemen auf Erzeugerseite und frequenzumrichter-gesteuerte Antriebe sowie Elektrolyseure und viele weitere Netzkomponenten auf Verbraucherseite werden zukünftig über Stromrichter auf Halbleiterbasis ans Netz gekoppelt. Die wegfallenden rotierenden Massen sorgen dabei für einen Bedarf an systemstabilisierenden Elementen und Verfahren, was unter anderem durch geeignete Wechsel- und Umrichter gewährleistet werden muss. Hierbei gilt es neben der Frequenz- und Spannungsstabilität auch eine hohe elektrische Versorgungsqualität zu gewährleisten.

Zur Untersuchung der Spannungs- und Stromqualität (englisch Power Quality) werden dabei am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) Methoden entwickelt, die eine Zeitreihenanalyse auf Basis hochaufgelöster Messreihen sowie gemittelter Effektivwerte ermöglicht. Dabei steht neben der bloßen Erkennung von Power Quality Störungen auch eine Vorhersage kritischer Systemzustände im Fokus, damit frühzeitig vorbeugende Maßnahmen ergriffen werden können.

Die Instrumente, die zur Umsetzung dieser Methoden entwickelt werden, reichen von Ansätzen aus der klassischen Statistik, fuzzy-basierter Logik, genetischen Algorithmen bis hin zu Machine- und Deep-Learning. Durch die Möglichkeiten moderner Messtechnik und die damit einhergehenden hohen Datenaufkommen, bieten sich im Bereich der Spannungsqualitätsanalyse große Potentiale zur Implementierung effektiver, datengetriebener Ansätze.

Neben der Erkennung problematischer Netzsituationen und der Zuordnung von Störfällen ist eine aktive Vermeidung von Spannungsqualitätsproblemen der Schlüssel zu einer verträglichen Eingliederung der Erneuerbaren in unser Energiesystem. Dazu werden neben der Analyse klassischer Filtertechnologien darüber hinaus auch neuartige Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz entwickelt.

■ **Detection, Classification, Prediction and Prevention of Power Quality Incidents**

M. Sc. Adrian Eisenmann

The energy transition towards sustainability requires a technological restructuring of the energy system known today. A power electronic based coupling of grid-forming generators on the one hand and voltage-fed consumers on the other represent the backbone future electricity grids. Advances in power semiconductors in recent years have led to a growing number of inverter-based systems in the power grids. Classic, still predominant electro-mechanical generating units, which determine the system stability by means of large synchronous generators and their associated rotating masses, take a back seat and are being replaced by static semiconductor systems. Photovoltaic and wind power plants in combination with battery systems on generator side and frequency converter-controlled drives, electrolyzers as well as many other grid elements on the consumer side are connected to the grid via converters based on semiconductors. The stabilizing rotating masses ceasing to exist bring up the need for a substitution to keep up the system stability, which has to be provided in big parts by suitable inverters and converters. Besides the frequency and voltage stability, the issue at stake is to ensure a high voltage and current quality (Power Quality).

To investigate the Power Quality, methods are being developed at the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) that enable a time series analysis on the basis of high-resolution measurement data and root mean square (RMS) values. In addition to the mere detection of power quality faults, the focus is also on predicting critical system states so that countermeasures can be taken early on.

The instruments that are being developed to implement these methods range from approaches from classic statistics, fuzzy-based logic, and genetic algorithms to machine and deep learning. Due to the possibilities of modern measurement technology and the associated high volume of data, there is great potential for the implementation of effective, data-driven approaches in the field of power quality analysis.

In addition to the detection of problematic grid situations and the allocation of incidents, the active avoidance of power quality problems is the key to a compatible integration of renewables into our energy system. For this purpose and in addition to the analysis of classic filter technologies, new methods from the field of artificial intelligence are being developed.

- **Umsetzung und Validierung einer Verteilnetz-Zustandsschätzung in einem realen Niederspannungsnetz**

M. Sc. Heiner Früh

Der kontinuierliche Ausbau der dezentralen Energieerzeugungsanlagen im Mittel- und Niederspannungsbereich und die Stilllegung von Großkraftwerken im Übertragungsnetz im Rahmen der Energiewende in Deutschland führen dazu, dass sich die Verteilnetze künftig an der Erbringung von Systemdienstleistungen beteiligen müssen. Um die daraus resultierenden neuen Aufgaben effizient und zuverlässig erfüllen zu können, benötigen die Verteilnetzbetreiber genaue Kenntnisse über den aktuellen Zustand ihrer Systeme. Auch zukünftige Smart Grid-Anwendungen erfordern die Kenntnis des aktuellen Systemzustands, um in den Betrieb übernommen werden zu können. Die Methode der Zustandsabschätzung (ZS) wird für diese Aufgabe im Übertragungsnetz seit den 1970er Jahren erfolgreich eingesetzt. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen, insbesondere die Nichtverfügbarkeit von Messwerten, verhinderten jedoch eine sofortige Übernahme in die Verteilnetze. Der asymmetrische Betrieb der Verteilnetze erhöht die Komplexität zusätzlich. Außerdem ist die Auswertung der Ergebnisse der Verteilnetzzustandsschätzung (DSSE) während des Betriebs in realen Systemen eine Herausforderung, da die wahren Systemzustände nicht bekannt sind. Eine Methode der Validierung besteht darin, einige Messungen aus den Eingangsdaten der DSSE auszuschließen und dann die Ergebnisse der DSSE mit diesen Messungen zu vergleichen. Verteilnetze werden in der Regel nicht vermascht betrieben, sondern radial. Daher sind die Leistungsflüsse der einzelnen Abgänge unabhängig voneinander, und die Validierungsmessungen zur Bestimmung der Güte der DSSE müssen über das gesamte Netz verteilt werden.

Eine dreiphasige DSSE, basierend auf der Methode der gewichteten kleinsten Fehlerquadrate (WLS), wird für ein reales Niederspannungsnetz in Deutschland durchgeführt. Neben hochaufgelösten Messungen aus dem Netz werden Pseudomessungen, die auf historischen Daten und Wetterberichten basieren, als Eingangsdaten verwendet. Die Untersuchungen sind Teil des kooperativen Forschungsprojekts "Smart Grid Demonstrator" zwischen dem Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart und dem Verteilnetzbetreiber Netze BW GmbH. Ein Ziel dieses Projektes ist es, die Qualität der durchgeführten DSSE für ein reales Niederspannungsnetz zu evaluieren. Der Fokus liegt dabei nicht auf den SE-Algorithmen selbst, sondern auf Fragen zu deren Implementierung. Da eines der Hauptprobleme des DSSE der Mangel an Messungen in Nieder- und Mittelspannungsnetzen ist, wird versucht, den kostengünstigsten Messaufbau für eine gegebene Fehlerspanne der DSSE zu finden.

■ **Implementation and Validation of a Distribution System State Estimation in a real Low Voltage System**

M. Sc. Heiner Früh

The continuous expansion of decentralized RES in the medium and low-voltage systems and the decommissioning of large power plants in the transmission system as part of the Energy Transition in Germany mean that distribution systems will have to participate in the provision of system services in the future. In order to be able to accomplish the resulting new tasks efficiently and reliably, the DSOs need precise knowledge of the current state of their systems. Future smart grid applications require knowledge of the current system state as well, in order to be adopted into operation. The state estimation (SE) method has been successfully used for this task in the transmission system since the 1970s. However, the different framework conditions, especially the unavailability of measurement values, prevented an immediate adoption to the distribution systems. The asymmetrical operation of distribution systems further increases the complexity. Additionally, the evaluation of distribution system state estimation (DSSE) results during operation in real systems is challenging, because the true system states are not known. One method of validation is to exclude some measurements from the input data of the DSSE and then compare the results of the DSSE with these measurements. However, distribution systems are generally not meshed, but radial. Therefore, the power flows of each feeder are independent from each other and evaluation measurements need to be distributed throughout the whole distribution system.

A three-phase DSSE, based on the weighted least squares (WLS) method, is performed for a real low-voltage system in Germany. In addition to high-resolution measurements, pseudo measurements, based on historical data and weather reports, are used as input data. The studies are part of the cooperative research project “Smart Grid Demonstrator” between the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology at the University of Stuttgart and the DSO Netze BW GmbH. One goal of this project is to evaluate the quality of the performed DSSE for a real low-voltage system. The focus is not on SE algorithms themselves, but on questions regarding their implementation. As one of the key problems of DSSE is the lack of measurements in low and medium voltage systems, this paper tries to find the least expensive measurement setup for a given error margin of the DSSE.

In order to perform a DSSE, measurement devices are installed at different locations in the grid, as marked in Fig. 1 (left) by the green circles. In addition to the low-voltage busbar of the transformer (node 48), all outgoing connections to the individual feeders of the grid are measured as well.

Um ein DSSE durchzuführen, werden Messgeräte an verschiedenen Stellen im Netz installiert, wie in Fig. 1 (links) durch die grünen Kreise gekennzeichnet. Neben der Niederspannungssammelschiene des Transformators (Knoten 48) werden auch alle Abgänge des Netzes vermessen. Die relevanten Messungen sind die Spannungs- und Strombeträge sowie die vorzeichenbehafteten Werte der Wirk- und Blindleistung. Bei allen Messungen handelt es sich um Zehnperioden-Effektivwerte für jede der drei Hauptphasen des Niederspannungsnetzes, die in einem Zeitintervall von einer Sekunde erfasst werden. Da es unwahrscheinlich ist, dass in naher Zukunft derart hochaufgelöste Daten für Niederspannungsnetze zur Verfügung stehen werden, wurden die verwendeten Daten zu Ein-Minuten-Mittelwerten aggregiert. Die Menge der verfügbaren Messungen reicht jedoch nicht aus, um eine DSSE durchzuführen, da nicht jeder Knoten im Netz mit einem Messgerät ausgestattet ist. Daher werden auch Pseudomessungen als Eingabedaten verwendet. Diese Pseudo-Messungen werden aus den Leistungsflussmessungen am Transformator in Kombination mit einer Schätzung der gesamten erzeugten Leistung des Systems abgeleitet. Aus diesen Daten wird der Gesamtleistungsbedarf des Systems berechnet und auf die nicht gemessenen Lasten verteilt. Das Ablaufdiagramm in Fig. 1 (rechts) erklärt diesen Prozess, wenn nur die Transformatordaten selbst betrachtet werden. Werden auch die Leistungsflussmessungen der einzelnen Abgänge berücksichtigt, wird der Prozess entsprechend angepasst und die Aufteilung der Pseudo-Lastwerte individuell für jeden Strang vorgenommen. Um die DSSE zu evaluieren und einen kostengünstigen Messaufbau zu finden, werden verschiedene Szenarien untersucht. Alle diese Szenarien basieren auf einem minimalen Messaufbau.

Sc. 1 – Basisszenario: In diesem Szenario werden nur die an der Niederspannungssammelschiene des Transformators aufgezeichneten Messungen verwendet. Die restlichen DSSE-Eingangsdaten sind Pseudomessungen, die gemäß Fig. 1 (rechts) bestimmt werden.

Sc. 2 – Abgangsmessungen: Zusätzlich zu den Messungen an der Niederspannungssammelschiene des Transformators werden auch die Leistungsflussmessungen jedes Abgangs als Eingangsdaten verwendet. Die Pseudo-Messungen werden für jeden Abgang separat bestimmt.

Sc. 3 – Alle verteilten Messungen im Netz: In diesem Szenario werden die Messungen an allen Knoten als Eingangsdaten verwendet. Dies schließt die Leistungsflussmessungen der einzelnen Zubringer aus. Die Generierung der Pseudo-Messungen basiert auf PV-Messungen an den Knoten anstelle der in Sc. 1 verwendeten Wetterdaten.

Da die wahren Systemzustände unbekannt sind, basiert die Auswertung der DSSE-Ergebnisse auf den Abweichungen zu allen verfügbaren Messungen. Die Abweichungen der Spannungsgrößen werden relativ zur Nennspannung nach Gleichung (6) berechnet. Die Berechnung der Abweichungen der Stromgrößen erfolgt relativ zum Nennstrom jeder Leitung, gemäß Gleichung (7).

The relevant measurements for the scope of this paper are the voltage and current magnitudes as well as the signed values of the active and reactive power. All measurements are ten period RMS values for each of the three main phases of the low-voltage system, which are collected in a time interval of one second. As it is unlikely that such high-resolution data will be available for low-voltage systems in the near future, the data used in this paper was aggregated to one-minute average values.

However, the amount of available measurements is not enough to perform a DSSE, because not every node in the grid is equipped with a measurement device. Therefore, pseudo measurements are used as input data as well. These pseudo measurements are derived from the power flow measurements at the transformer in combination with an estimation of the total generated power of the system. From these data the system's total power demand is calculated and distributed among the unmeasured loads. The flowchart in Fig. 1 (right) explains this process, if only the transformer data itself is considered. If the power flow measurements of each feeder are considered as well, the process is adapted accordingly.

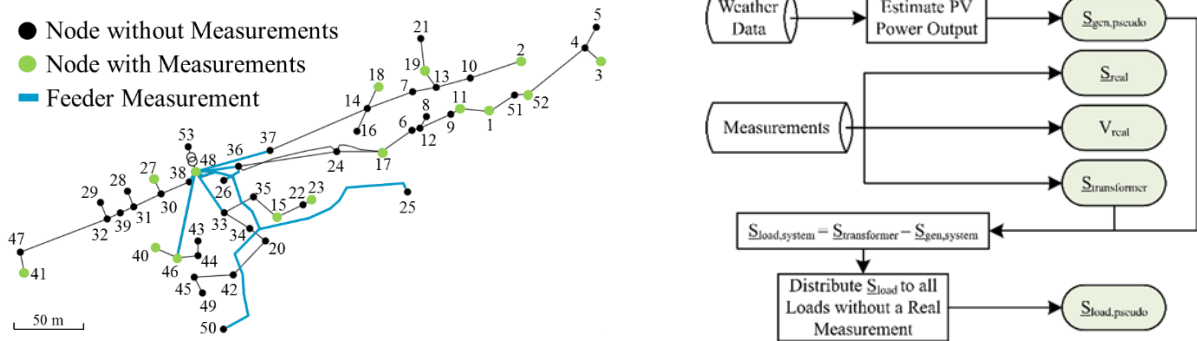


Fig. 1: Netztopologie und Messdatengrundlage (links),
Generierung der Pseudomesstungen (rechts).
Grid topology and measurement setup (left),
Generation of pseudo measurements (right).

In order to evaluate the DSSE and to find a cost-effective measurement setup, different scenarios are investigated. All of these scenarios are based on a minimal measurement setup.

Sc. 1 – Base Scenario: this scenario utilizes only the measurements recorded at the low-voltage busbar of the transformer. The rest of the DSSE input data are pseudo measurements, which are determined according to Fig. 1 (right).

Sc. 2 – Feeder Measurements: in addition to the measurements at the low-voltage busbar of the transformer, the power flow measurements of each feeder are used as input data. The pseudo measurements are determined separately for each feeder.

Sc. 3 – All Node Measurements: in this scenario the measurements at all nodes are used as input data. This excludes the power flow measurements of each feeder. The generation of pseudo measurements is based on the PV measurements instead of weather data, as in Scenario 1.

$$V_{dev} = \frac{|V_{mes}| - |V_{DSSE}|}{|V_n|} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$I_{dev} = \frac{|I_{mes}| - |I_{DSSE}|}{|I_{rated}|} \cdot 100\% \quad (7)$$

Die Nennspannungen V_n und Nennströme I_{rated} werden als Bezugswerte gewählt, da sie auch zur Beschreibung der Grenzwerte des Systems verwendet werden können. Ein Abweichungsbereich von $\pm 1\%$ ist für V_{dev} als DSSE-Genauigkeitsziel definiert. Für die Stromstärken wird für jede Phase des Systems ein Bereich von $\pm 3\%$ gewählt. Dies führt zu einer Ungenauigkeit von weniger als 10% der Leitungsauslastungen, für den ungünstigsten Fall einer konstruktiven Überlagerung der Abweichungen.

Die DSSE-Evaluierungsergebnisse von Sc.1, Sc. 2 und Sc. 3 sind in Fig. 2 dargestellt. Die Anteile der Werte innerhalb der definierten Abweichungsbereiche, die durch den grauen Hintergrund gekennzeichnet sind, sind in den Legenden enthalten. Es ist zu beobachten, dass die Abweichungen der Spannungsbeträge bereits bei dem minimalen Messaufbau des Basisszenarios sehr gering sind. Sc. 2 hat den Nachteil, alle verfügbaren Strommessungen als Eingangsdaten und als Bewertungsgrundlage zu verwenden. Daher ist die sehr geringe Abweichung der Stromgrößen in Sc. 2 zu erwarten. Sc. 3 wird als Vergleich zu Sc. 2 betrachtet und hat praktische Bedeutung, da für Niederspannungsnetze oft keine Abgangsmessungen zur Verfügung stehen. In naher Zukunft könnten viele verteilte Messungen aus dem Netz zugänglich werden, z.B. durch Smart Meter, um einen ähnlichen Messaufbau wie in Sc. 3 zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen eine große Verbesserung der Strombetragsabschätzungen im Vergleich zu Sc. 1.

Es wird deutlich, dass die Abschätzung der Spannungsbeträge genauer ist, als die Abschätzung der Strombeträge und damit der resultierenden Leistungsflüsse. Eine weitere Steigerung der DSSE-Genauigkeit kann durch den zusätzlichen Einsatz von Smart-Meter-Messungen erreicht werden. Die bevorstehenden Herausforderungen bei der Implementierung von DSSE hängen daher sehr stark mit dem Anschluss und der Verwaltung von Millionen von Datenendpunkten in den Verteilnetzen sowie mit der realistischen Modellierung dieser Systeme zusammen.

Because the true system states are unknown, the evaluation of the DSSE results is based on the deviations to all available measurements. The deviations of the voltage magnitudes are calculated relative to the nominal voltage, according to equation (6). The calculation of the current magnitude deviations is relative to the rated current of each line, according to equation (7). The nominal voltages V_n and rated currents I_{rated} are chosen as reference values, because they can also be used to describe the thresholds of the system. A deviation range of $\pm 1\%$ is defined for V_{dev} as the DSSE accuracy target. For the current magnitudes a range of $\pm 3\%$ is chosen for each phase of the system. This results in an inaccuracy of less than 10% of the line loadings, for the worst case of constructive superposition of the deviations.

The DSSE evaluation results of Sc. 1 and Sc. 2 are shown in Fig. 2. The share of values inside the deviation ranges, marked by the grey background, are included in the legends. It can be observed that the deviations in voltage magnitudes are already very low, with the minimal measurement setup of the base scenario. Sc. 2 has the disadvantage of using all the available current magnitude measurements as input data and as the evaluation basis. Therefore, a very low deviation of the current magnitudes is to be expected and the results of Sc. 2 meet this expectation. Sc. 3 is considered as a comparison to Sc. 2. It has practical significance, because there are often no feeder measurements available for low-voltage systems. In the near future many distributed measurements from the grid could become accessible, e.g. through smart meters, to form a similar measurement setup to Sc. 3. The results show a big improvement of the current magnitude estimations compared to Sc. 1. It becomes apparent that the estimations of the voltage magnitudes are more accurate than the estimations of the current magnitudes and therefore the resulting power flows. A further increase in accuracy can be achieved through the usage of smart meter measurements. The upcoming challenges in the implementation of DSSE are heavily related to the connection and management of millions of data endpoints in the distribution systems, as well as the realistic modelling of these systems.

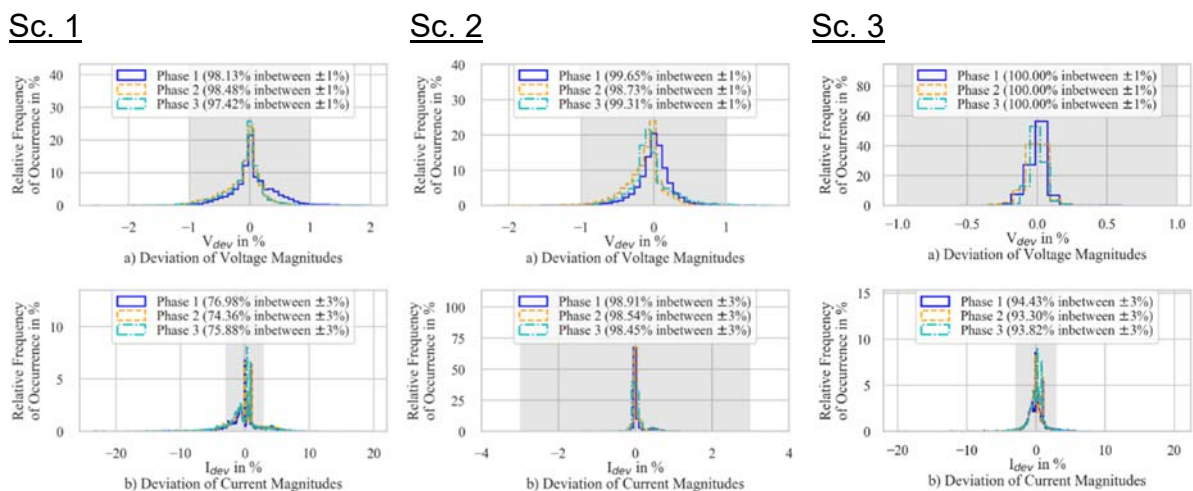


Fig. 2: DSSE-Evaluierungsergebnisse für Sc. 1, Sc. 2 und Sc. 3.
DSSE evaluation results for Sc. 1, Sc. 2 and Sc. 3.

■ **Optimierte Netzplanung unter Einsatz von Batteriesystemen und dynamischer Spitzenkappung**

M. Sc. Ouafa Laribi

Im Rahmen dieser Forschung wurde eine neue Planungsmethode des Verteilnetzes entwickelt. Der erarbeitete Planungsalgorithmus plant das Netz unter Einsatz von klassischen Netzausbaumaßnahmen wie Freileitungen und Kabeln sowie innovativen Technologien und Tools wie Speicher und dynamischer Spitzenkappung. Diese Planungstools können einzeln oder kombiniert zur Netzerhöhung eingesetzt werden. Das Ziel hierbei ist, den Netzbetreibern eine Hilfestellung für die Planung der elektrischen Netze unter Anwendung von innovativen Systemlösungen zu geben.

Die Methode soll die kostengünstigste Auslegung des zu planenden Netzes bestimmen, welche eine Einhaltung der Planungsanforderungen und eine Erfüllung des (n-1)-Kriteriums gewährleistet. Bei der Kalkulation der Netzplanungskosten werden Investitionskosten für den Netzausbau und die Batteriespeicher, die Ersatzinvestitionen für neue Batteriezellen und Wechselrichter nach deren Lebensdauerende sowie die Abregelungs- und Betriebskosten berücksichtigt.

Als Ergebnis liefert der Planungsalgorithmus eine geeignete Kombination von Maßnahmen, um das betrachtete Netz über eine bestimmte Nutzungsdauer kostengünstig für den Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) zu ertüchtigen. Die resultierenden Ergebnisse aus dem Planungsalgorithmus umfassen:

- Die benötigten Leitungsausbaumaßnahmen (betroffene Leitung und Typ der Maßnahme)
- Eine optimierte Abregelung der EE-Anlagen entsprechend der dynamischen Spitzenkappung
- Eine optimale Platzierung, Dimensionierung und Betrieb der Batteriespeicher

Die entwickelte Planungsmethode mit dem kombinierten Einsatz von Netzausbau, Speichern und Spitzenkappung soll für Hoch- und Mittelspannungsnetze eingesetzt und geprüft werden. Geplant ist, daraus die technisch und wirtschaftlich sinnvollen Werkzeuge der Netzplanung in Abhängigkeit der Netzeigenschaften und der Spannungsebene des betrachteten Netzes zu identifizieren.

Darüber hinaus sollen mögliche marktgetriebene Multi-Use-Ansätze der Speicher betrachtet werden. Dadurch können die Gesamtkosten des netzdienlichen Ansatzes durch Gewinnerzielung aus dem Stromhandel reduziert werden. Der marktgetriebene Ansatz der Speicher muss hierbei mit den erforderlichen Netzrestriktionen konform sein und nur in den Zeiten, in denen keine Engpässe prognostiziert sind, stattfinden (siehe Fig. 1 und Fig. 2).

■ **Optimized Planning of Distribution Grid using Battery Systems and dynamic Curtailment**

M. Sc. Ouafa Laribi

Within the scope of this research, a new planning method for distribution grids has been developed. The elaborated planning approach applies traditional power line expansion based on overhead lines and buried cables as well as innovative planning technologies and tools such as stationary battery systems and dynamic power curtailment of renewable energies. These planning tools could be used singly or in combination to reinforce the existing grid. Regarding the increasing integration of renewable energy into the grid, the developed planning algorithm could give assistance to grid operators by the planning of the electrical grid.

The planning method determines the most economical grid reinforcement measures, which ensure the compliance with the grid planning requirements and the fulfillment of the (n-1) criterion. The total costs of the grid reinforcement measures over a considered economic life are calculated depending on the initial investments in grid expansion and battery projects, as well as on the replacement costs of battery cells and converters. The curtailment costs of renewables and the operation costs are also considered in the calculation.

Based on the modeled grid and the prognosed load and supply of RES, the planning algorithm delivers the most economical combination of grid planning measures including the following output:

- Required power line expansion measures (type of the expansion measure and concerned power line)
- Optimized power curtailment of RES
- Optimal placement, dimensioning and scheduling of the BSS

The proposed planning method combining classical power line expansion with the use of BSS and power curtailment shall be applied and verified on real high and middle voltage grids. In what follows, an example of the contribution of innovative technologies such as BSS and dynamic curtailment in the planning of high voltage grids. Fig. 3 shows the power load on the lines for a modeled high voltage grid in the form of boxplots. The boxplots indicate the values of the power load for every line for 25, 50 and 75 % of the total calculated states considering the (n-1) outages and the maximum and minimum values calculated. The maximum permissible load on the lines regarding their thermal limits is represented by the dotted red line in percent. It can be deduced from the figure that the load flow exceeds the thermal limit for some power lines. The modeled grid must be hence reinforced in order to prevent these congestions and ensure the security of the power supply.

Aus den Untersuchungen werden die Randbedingungen für einen netzdienlichen und wirtschaftseffizienten Beitrag von Speichern in der Netzplanung zur Förderung der Integration von erneuerbaren Energien konkretisiert.

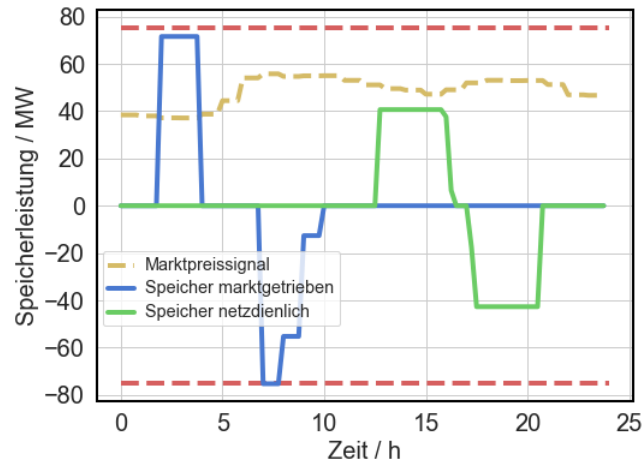


Fig. 1: Speicherleistung für das Engpassmanagement (grüne Kurve) und für die Teilnahme am Strommarkt (blaue Kurve) an einem Beispieltag. Storage power for the management of grid congestions (green line) and for the participation in the electricity market (blue line) on an exemplary day.

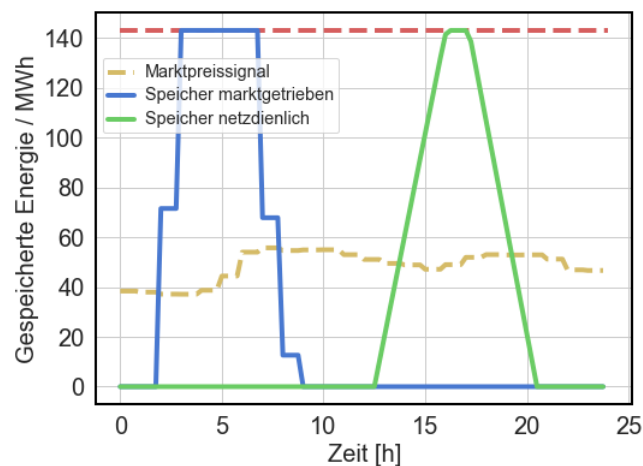


Fig. 2: Speicherenergie für das Engpassmanagement (grüne Kurve) und für die Teilnahme am Strommarkt (blaue Kurve) an einem Beispieltag. Storage energy for the management of grid congestions (green line) and for the participation in the electricity market (blue line) on an exemplary day.

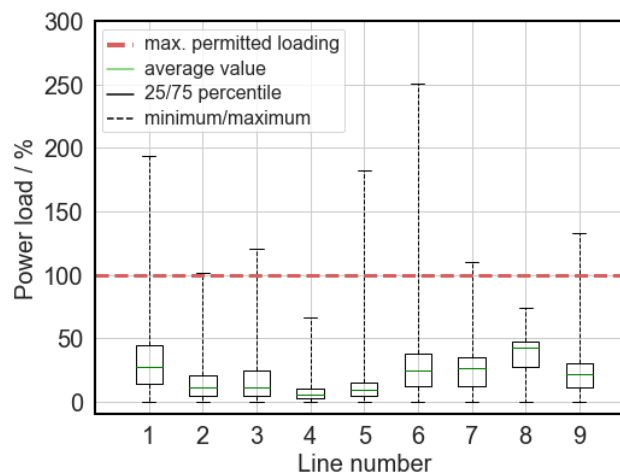


Fig. 3: Auslastung der Leitungen des modellierten Hochspannungsnetzes ohne Optimierungsmaßnahmen.

Power load on the lines of the high voltage grid without remedy measures.

Fig. 4 shows, in the form of boxplots, the power load values of the lines considered for the simulated year after application of BSS and dynamic curtailment as grid reinforcement tools. With the help of the optimized power schedule of the BSS and the curtailment of the RES power plants, the forecasted congestions on the power lines could be prevented and a (n-1) safe operation of the power lines ensured.

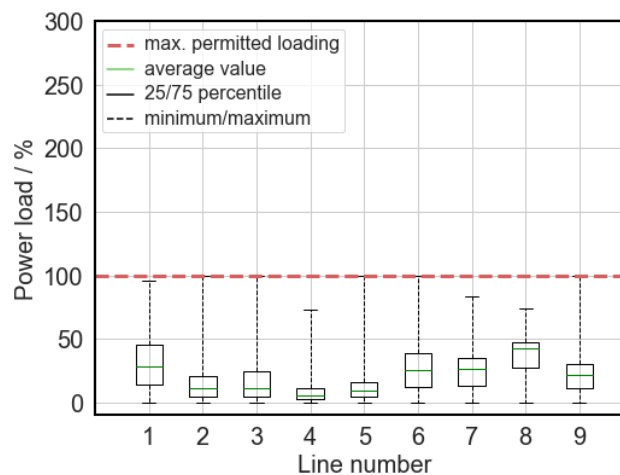


Fig. 4: Auslastung der Leitungen nach Einsatz von Batteriespeichern und dynamischer Spitzenkappung.

Power load on the lines after application of BSS and dynamic curtailment.

Furthermore, a market-based application of the BSS shall be considered in order to reduce the costs of their grid-supporting application by generating revenues from the electricity trade. The market-based use of the BSS must also conform to the grid restrictions of the considered voltage level. On these bases, the specific conditions of a grid-supporting and economic efficient application of BSS in the grid planning to support the integration of renewable energies can be deduced.

■ **Einsatz neuer Planungsmethoden 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 sie aufgrund der langen Planungs- und Genehmigungszeiten für neue Leitungen bereits heute die Erhöhung der Übertragungskapazitäten planen, um zukünftige Überlastungen zu vermeiden. 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. Eine der entwickelten Planungsmethoden bestimmt auf der Grundlage des (n-1)-Kriteriums die Leitungsauslastungsindikatoren, die neben den Leitungsüberlastungen in der Ausfallanalyse auch die Übertragungsverluste und die durchschnittliche Leitungsbelastung im Normalzustand berücksichtigen. Diese können dann verwendet werden, um geeignete Netzverstärkungen und Ausbaumaßnahmen vorzunehmen.

Basierend auf den Ergebnissen der am IEH entwickelten linearisierten Ausfallanalyse werden die im betrachteten Zeitraum auftretenden Leitungsüberlastungen erkannt und deren Anzahl bestimmt. Zu diesem Zweck werden für die betrachtete Leitung alle Überlastungen identifiziert, die durch den Ausfall aller anderen Leitungen verursacht werden. Zusätzlich werden auch die Überlastungen der anderen Leitungen berücksichtigt, die durch den Ausfall der betrachteten Leitung verursacht werden. Anschließend wird für jede Leitung ein Leitungsauslastungsindikator bestimmt. In einem weiteren Schritt werden die zuvor ermittelten Leitungsauslastungsindikatoren im neuen Planungsverfahren mit mehreren Faktoren gewichtet. Die Faktoren sind zum einen von den Übertragungsverlusten und zum anderen von der durchschnittlichen Leitungsbelastung im Normalzustand abhängig. Auf diese Weise soll das Planungsverfahren die Netzverstärkungen so durchführen, dass die Übertragungsverluste so gering wie möglich sind und das Netz gleichmäßig ausgelastet wird.

Das Simulationsverfahren wählt anhand der ermittelten Leitungsauslastungsindikatoren geeignete Maßnahmen zur Netzverstärkung aus, wie z.B. die Änderung des Leitertyps, den Bau von parallelen Leitungen und die Verwendung von gebündelten Leitern. Dann verstärkt die Methode das Verteilnetz mit der gewählten Maßnahme. Zu diesem Zweck wählt die Methode selbständig die Leitung mit dem maximalsten Leitungsauslastungsindikator aus und verstärkt diese gemäß einer definierten Ausbaureihenfolge. Der automatische Ausbauprozess mit den Berechnungen für die Ausfallanalyse sowie den Leitungsauslastungsindikatoren und der Netzverstärkung wird dann so lange wiederholt, bis das untersuchte Netz die (n-1)-Sicherheit zu jedem Zeitpunkt des untersuchten Jahres erfüllt.

■ **Use of new Planning Methods 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 over-loadings. However, the necessary measures to expand the distribution grid are met with low acceptance from the people. 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 make use of the existing grid and to ensure a useful grid expansion. One of the developed planning methods based on the (n-1)-criterion determines line loading indicators, which, in addition to line overloads in the contingency analysis, take into account the transmission losses and the average line loading in the normal state. These can then be used to make suitable grid reinforcements and expansion measures.

Based on the results of the linearized contingency analysis developed at the IEH, the line overloads occurring during the considered period of time are detected and their number is determined. For this purpose, all overloads are identified for the considered line, which are caused by the outage of all other lines. In addition, the overloads of the other lines are taken into account, which are caused by the outage of the considered line. Subsequently, a line loading indicator is determined for each line in the grid. In a further step, the previously determined line loading indicators are weighted with several factors in the new planning procedure. The factors depend on the transmission losses on the one hand and the average line loading in the normal state on the other hand. In this way, the planning method should carry out the grid reinforcements so that the transmission losses are as low as possible and the grid is equally utilized.

The simulation process selects suitable measures for grid reinforcement based on the determined line loading indicators, such as the change of the conductor type, the construction of parallel lines and the use of bundled conductors. Then, the method reinforces the distribution grid with the selected measure. For this purpose, the method independently selects the line with the maximum line loading indicator and reinforces it according to a defined expansion order. The automatic expansion process with the calculations for the contingency analysis as well as the line loading indicators and the grid reinforcement is then repeated until the investigated grid fulfils the (n-1)-security at all times of the studied year.

Die Ergebnisse der Lastfluss- und Ausfallanalyse eines 110 kV-Netzes sind in Fig. 1 zu sehen, in der die Leitungsauslastungen im Normal- und (n-1)-Zustand für die 15 am stärksten überlasteten Leitungen als Boxplots dargestellt sind. Diese Leitungen sind nach der maximalen Belastung sortiert und die Überlastung ist auf den hohen Anstieg der installierten EE zurückzuführen. Eine Auslastung von 100 % stellt hier die Nennstrombelastbarkeit der Leitung dar, bei der der Leiter den maximal zulässigen Durchhang und die maximale Leitertemperatur nicht überschreitet. Im Normalzustand werden drei Leitungen im betrachteten Netz ohne Verstärkungen überlastet. Diese Überlastungen treten jedoch nur in sehr wenigen Fällen auf. Der Großteil der Auslastungen im Jahr liegt weit unter 50 % des zulässigen Nennstroms. Im (n-1)-Zustand sind diese drei Leitungen mit einer Belastung von bis zu 230 % die am stärksten überlasteten Leitungen. Darüber hinaus treten Überlastungen auch in 10 weiteren Leitungen auf.

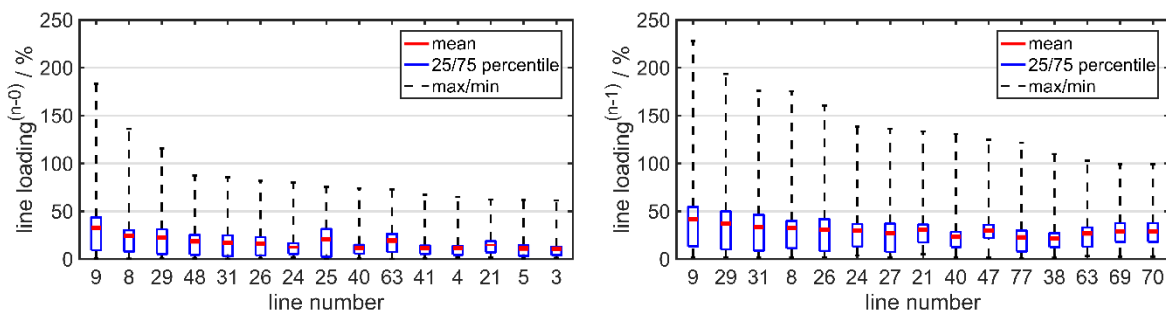


Fig. 1: Leitungsauslastung im Normalzustand (links) und (n-1)-Zustand (rechts).
Line loading in normal state (left) and (n-1)-state (right).

Fig. 2 zeigt auf der linken Seite die durchschnittliche Leitungsauslastung für die 10 am stärksten überlasteten Leitungen im Normalzustand aus Fig. 1 vor dem Netzausbau. Alle Leitungen haben eine durchschnittliche Leitungsauslastung zwischen 11 und 30 %, wobei die Leitung 9 den höchsten Wert aufweist. Dann werden die kritischen Leitungen anhand drei unterschiedlicher Leitungsauslastungsindikatoren identifiziert und entsprechend einer festen Ausbaureihenfolge ausgebaut, bis das Netz (n-1) sicher ist. Der erste Indikator berücksichtigt nur die Überlastungen im (n-1)-Zustand und beim zweiten und dritten Indikator wird der erste Indikator mit der durchschnittlichen Auslastung und den Übertragungsverlusten gewichtet. Fig. 2 zeigt auf der rechten Seite die durchschnittliche Leitungsbelastung im Normalzustand nach dem Netzausbau. Die durchschnittliche Leitungsauslastung für die verschiedenen Indikatoren ist für die meisten Leitungen nach dem Netzausbau ähnlich. Der einzige Unterschied besteht bei den Leitungen 8, 24, 31 und 40, die je nach Indikator ausgebaut wurden.

Auf diese Weise kann der Verteilnetzbetreiber das Netz gezielter ausbauen und wirtschaftlicher betreiben, da die Betriebskosten durch die Berücksichtigung der Übertragungsverluste im Normalzustand gesenkt werden können. Zudem führt die gleichmäßige Auslastung des Netzes zu Übertragungsreserven, die den Bedarf an Netzverstärkungen begrenzen können.

The results of the load flow and contingency analysis of a 110 kV grid can be seen in Fig. 1, in which the line loadings in the normal and (n-1)-state are shown as box plots for the 15 most overloaded lines. These lines are sorted according to the maximum loading and the overloading is due to the high increase of the installed RES. Here, a line loading of 100 % represents the nominal current rating of the line at which the conductor does not exceed the maximum allowed sag and the maximum conductor temperature. Under normal conditions, the three lines will be overloaded in the present grid without reinforcements. However, these overloadings will occur only in rare cases. The majority of loadings during the year are well below 50 % of the permissible current rating. In the (n-1)-state, these three lines are the most heavily overloaded lines with a loading of up to 230 %. In addition, overloadings also occur in 10 other lines.

Fig. 2 shows on the left side the average line loading for the 10 most overloaded lines in the normal state from Fig. 1 before grid expansion. All the lines have an average line loading between 11 and 30 % and the highest value is at line 9. Then, the critical lines are identified using three different line loading indicators and expanded according to a defined expansion order until the grid fulfils the (n-1)-security. The first indicator only takes into account the overloadings in the (n-1)-state and the second and third indicators are weighted with the average line loading and the transmission losses. Fig. 2 shows on the right side the average line loading in the normal state after grid expansion. The average line loading for the various indicators is similar on the most lines after expansion. The only difference is on the lines 8, 24, 31 and 40, which have been expanded depending on the indicator.

In this way, the distribution grid operator can expand the network in a more directed manner and operate it more economically, since the operating costs can be reduced by considering the transmission losses in the normal state. In addition, the uniform utilization of the grid leads to transmission reserves, which can limit the need of grid reinforcements.

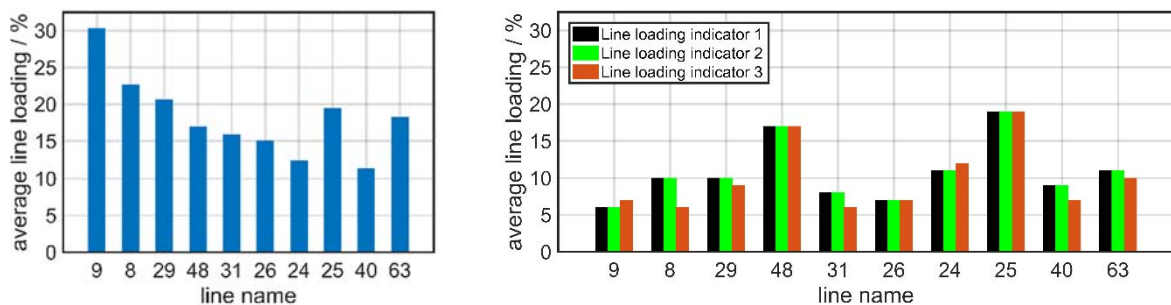


Fig. 2: Durchschnittliche Leitungsauslastung im Normalzustand vor dem Netzausbau (links) und nach dem Netzausbau (rechts).

Average line loading in normal state before grid expansion (left) and after grid expansion (right).

■ **Charakterisierung des Kurzzeit Verhaltens von Supraharmonischen Emissionen**

M. Sc. Tim Streubel

Die stetige Zunahme von leistungselektronisch gekoppelten Komponenten im Verteilnetz hat zu erhöhten Harmonischen Emissionen im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz geführt. Diese Harmonischen werden auch als Supraharmonische bezeichnet. Es gibt mehrere Gründe für den Anstieg der Emissionen in diesem Frequenzbereich. Zum einen haben die fehlenden normativen Emissionsgrenzen im genannten Frequenzbereich dazu geführt, dass Hersteller von Wechselrichtern die Harmonischen von niedrigeren Frequenzen in höhere Frequenzbereiche verschoben haben. Die zunehmend dezentrale Energieerzeugung sowie die wachsende Verbreitung von Elektrofahrzeugen im Verteilnetz führen ebenfalls zu einer deutlichen Erhöhung der Supraharmonischen Emission. Dies hat eine allgemeine Verschlechterung der Spannungsqualität (engl. Power Quality) zur Folge.

Die Untersuchung dieses relativ neu auftretenden Phänomens der Spannungsqualität der Supraharmonischen wurde bisher hauptsächlich im Labor durchgeführt. Ein Grund hierfür sind die großen Datenmengen, die bei Messungen der Supraharmonischen über einen längeren Zeitraum entstehen. Für Messungen im Feld werden die Daten daher stark aggregiert, was jedoch zu einem Informationsverlust bei der Charakterisierung der Emissionen führt. Am IEH wird deshalb an Konzepten geforscht, die diesen Informationsverlust minimieren und die Messdaten direkt auf dem Messgerät dynamisch und automatisiert verarbeiten. Dabei wird insbesondere das Kurzzeitverhalten ($< 200\text{ms}$) der Supraharmonischen Emissionen untersucht. Berechnungen der Indizes im Zeit- und Frequenzbereich sollen die Verzerrung durch die hochfrequenten Harmonischen genauer beschreiben. Die gemessenen Strom- und Spannungssignale werden dazu gefiltert, um den Einfluss von Frequenzen unterhalb von 2 kHz zu eliminieren. Die gefilterten Signale werden anschließend auf instationäre Vorgänge untersucht, welche beispielsweise Störungen mit Power Line Kommunikation auslösen können.

Um das Kurzzeitverhalten der Supraharmonischen im Feld zu charakterisieren, wurden in verschiedenen Umgebungen PQ-Monitoring Systeme implementiert, die jeweils mehrere Messgeräte umfassen. Jedes der Messgeräte wertet dabei die Daten lokal aus und sendet nur Ergebnisse an den Server des Monitoring Systems. Die verschiedenen Umgebungen umfassen dabei Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, Verteilnetze mit hoher Durchdringung Erneuerbarer Energien als auch diverse Haushaltslasten.

■ **Characterization of the short-term behavior of Supraharmonics**

M. Sc. Tim Streubel

The continuous increase of power electronic coupled devices in the distribution grid has led to higher harmonic emission levels in the frequency range from 2 kHz to 150 kHz. These harmonics are also referred to as Supraharmonics. There are several reasons responsible for the increase of emission in this frequency range. One reason being the absence of normative limits in this frequency range, which has led manufacturers of inverters to shift their emission from lower frequencies to higher ranges. The increase in decentralized renewable energy generation and the proliferation of electric vehicles in the distribution grid increase the Supraharmonic emission significantly, which leads to lower power quality in general.

The investigation of this relatively new power quality phenomenon was primarily carried out under laboratory conditions. A reason for this is the significant data sizes that are generated when Supraharmonics are measured over longer time periods. Consequently, for measurements carried out in field, the data is aggregated which leads to a loss of information in respect to the characterization of the emission. At the IEH, research is conducted to develop concepts which minimize the loss of information for in field measurements and allow the measurement device to process the data locally in a dynamic and automated manner. Especially the shortterm behavior of the emission ($< 200\text{ms}$) is investigated. Indices are calculated in frequency and time domain which allow a more detailed description of the distortion. In order to remove the influence of frequencies below 2 kHz, the measured voltage and current signals are filtered. The filtered signals are then analyzed in respect to in stationary processes which can cause disturbances with power line communication.

In order to investigate the shortterm behavior of the Supraharmonics, monitoring systems were implemented in different environments, each consisting of multiple measurement devices. Each meter processes the measured data locally and only sends results to the monitoring server. The different environments include electric vehicle charging infrastructure, distribution grids with a high penetration of renewable energies and different household loads.

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

M. Sc. Kathrin Walz

Der Hochlauf der Elektromobilität sorgt für neue Herausforderungen im Stromnetz. Gerade im Bereich des Wirtschaftsverkehrs, der in Deutschland zwar nur einen geringen Teil des Fahrzeugbestandes, jedoch aufgrund von hohen Fahrleistungen einen großen Teil der Verkehrsemissionen erzeugt, ist ein Wandel in der Antriebstechnologie nötig. So bringen immer mehr Fahrzeughersteller batterieelektrische Lkw auf den Markt. Die Netzauswirkungen von deren Ladevorgängen sind aber noch Großteils 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.

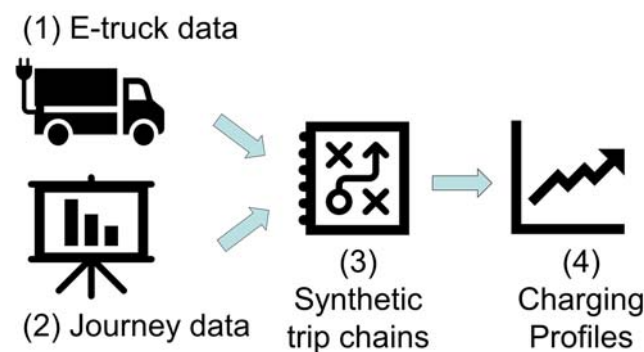


Fig. 1: Verfahren zur Ladeprofilgeneration elektrischer Lkw.

Method for charging profile generation of electric trucks.

Fig. 1 zeigt das entwickelte Verfahren zur Ladeprofilgeneration elektrischer Lkw. Fahrzeugparameter (1), wie Batteriegröße, Verbrauch und Reichweite, realer elektrischer Lkw werden mit Fahrprofilen (2) kombiniert. Diese Fahrprofile entstammen der Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ und enthalten Fahrtenbücher konventioneller Lkw, die Informationen zu gefahrenen Strecken und deren Zeitverhalten liefern. Diese historischen Fahrten werden mithilfe des sogenannten Trip Chain Verfahrens zu neuen synthetischen Fahrprofilen zusammengefasst (3). Das Verfahren verläuft analog zur Trip Chain Generation für Pkw ab, welches schematisch in Fig 2. dargestellt ist. Durch die Trip Chain Generation ist die gefahrene Strecke sowie der Standort des Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt des Jahres festgelegt. Aus den Trip Chains lassen sich dann unter Annahme der zur Verfügung stehenden Ladeleistung an jedem Standort und der Berechnung des aktuellen SOC aus den gefahrenen Strecken die Ladeprofile bestimmen (4).

■ 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 are publicly available. Since the charging behavior of trucks may differ significantly from that of passenger cars due to different mobility behaviors, the development of synthetic charging profiles seems necessary. This allows considering electric truck charging in grid planning.

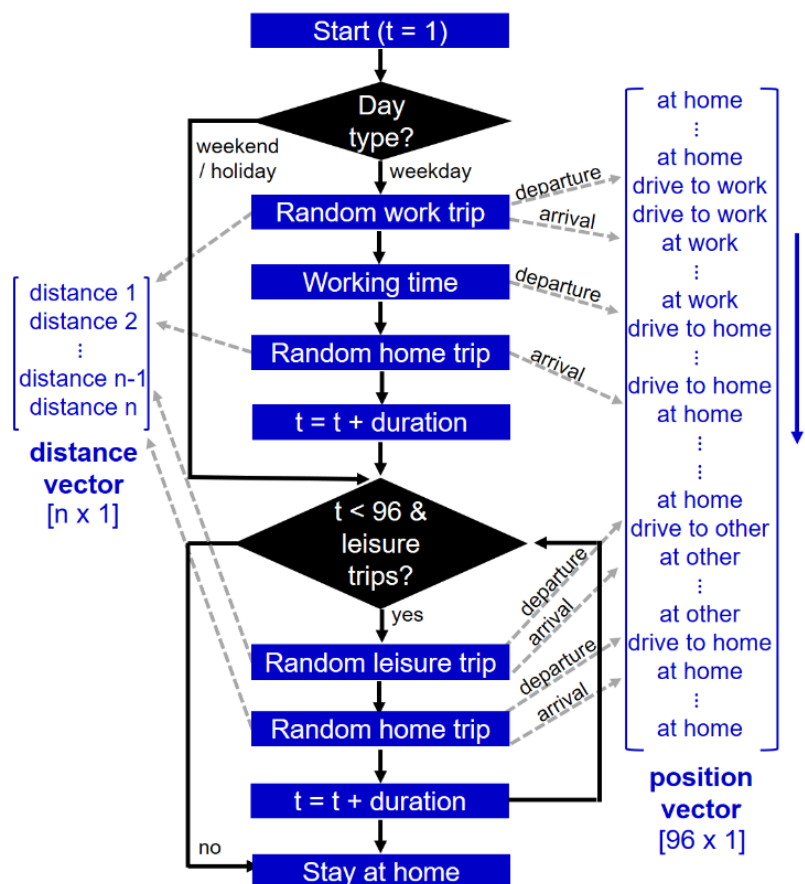


Fig. 2: Ablaufdiagramm der Trip Chain Methodik exemplarisch für Pkw.
Flowchart of the Trip Chain Methodology exemplary for cars.

Ein Test der Anwendbarkeit des vorgestellten Ladeprofilgenerationsverfahrens kann anhand eines realen Logistikzentrums durchgeführt werden. Dazu werden historische Daten der Ankunfts- und Standzeiten der am Wareneingang ankommenden Lkw genutzt und mit den generierten Ladeprofilen kombiniert. Das aggregierte Lastprofil aller an einem Tag ankommenden Lkw ist in Fig. 3 dargestellt. Der Vergleich der Ladeleistungen 50 kW und 350 kW zeigt, dass Schnellladeleistungen im zweistelligen Bereich nicht ausreichen, um den Energiebedarf der ankommenden Lkw zu decken. Begrenzt man die Ladedauer auf die ursprüngliche Standzeit der Lkw (limited), kann nicht der gesamte Energiebedarf nachgeladen werden, sondern nur der in Fig. 4 dargestellte Anteil. Ein zeitlich unbegrenztes Laden wiederum (unlimited) führt besonders bei niedrigeren Ladeleistungen zur Verzögerung der Ladevorgänge bis in die Nacht. Dadurch werden die Prozesse am Logistikzentrum verzögert, Rampen blockiert und die Rentabilität des Fahrzeugeinsatzes gesenkt.

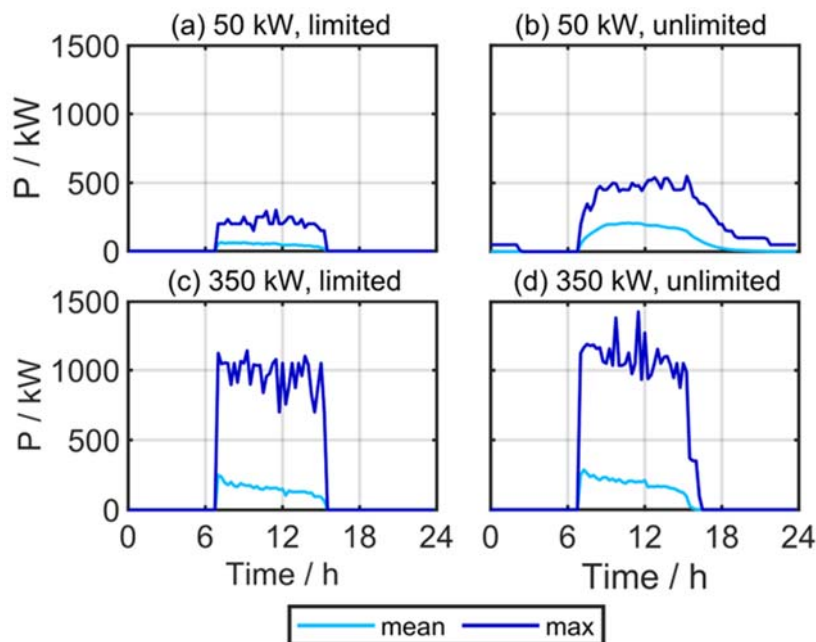


Fig. 3: Beispiel des mittleren und maximalen aggregierten Lastgangs beim Laden elektrischer Lkw am Wareneingang eines Logistikzentrums.

Example of average and maximum aggregated daily load profile of truck charging at the logistics center goods receipt.

Die Analyse zeigt, dass gerade bei größeren Distanzen das Nachladen der Fahrzeuge am Logistikzentrum hinsichtlich Zeit- und Leistungsbedarf schwierig ist. Daher bieten sich gerade im Fernverkehr andere Elektrifizierungsarten an, wie Brennstoffzellen- und Oberleitungs-Lkw. Deren Energie- und Leistungsbedarf sowie die Anforderungen an das elektrische Netz unterscheiden sich jedoch von denen der batterieelektrischen Lkw. Daher wird im nächsten Schritt ein Modell erstellt, in dem der Energiebedarf dieser Lkw-Arten quantifiziert und regional differenziert werden kann um deren Einfluss auf das elektrische Energiesystem zu untersuchen.

Fig. 1 shows the developed method for the charge profile generation of electric trucks. Vehicle parameters (1) such as battery size, consumption and range of real electric trucks are combined with driving profiles (2). These driving profiles are taken from the study "Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland" and contain logbooks of conventional trucks, which provide information about driven routes and their time behavior. These historical journeys are combined into new synthetic driving profiles using the so-called Trip Chain Method (3). The process is similar to the Trip Chain Generation for passenger cars, which is shown schematically in Fig 2. With Trip Chain Generation, the distance travelled and the location of the vehicle is determined at any time of the year. The charging profiles can then be determined from the trip chains by considering the available charging power at each location and calculating the current SOC from the driven routes (4).

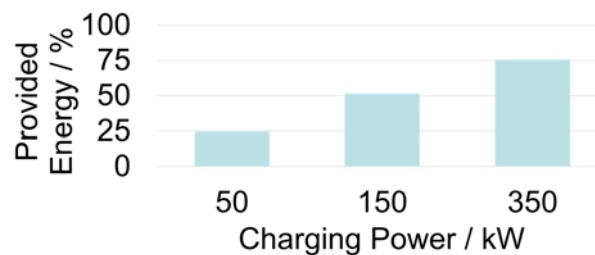


Fig. 4: Anteil des Energiebedarfs der elektrischen Lkw am Logistikzentrum, der durch die jeweilige Ladeleistung gedeckt werden kann.

Proportion of needed energy provided in truck charging at the logistics center.

A test of the applicability of the presented charging profile generation method can be carried out using a real logistics center. For this purpose, historical data of the arrival and standing time of the arriving trucks at the goods receipt are used and combined with the generated charging profiles. The aggregated load profile of all trucks arriving on one day is shown in Fig. 3. The comparison of the charging powers 50 kW and 350 kW shows that fast charging capacities in the double-digit range are not sufficient to cover the energy demand of the arriving trucks. If the charging time is limited to the original standing time of the trucks, not the entire energy requirement can be recharged, but only the portion shown in Fig. 4. If the charging process is unlimited, the charging process is delayed until the night. This delays the processes at the logistics center, blocks ramps and reduces the profitability of truck use.

The analysis shows that, especially for longer distances, recharging the trucks at the logistics center is difficult in terms of time and power requirements. For this reason, other types of electrification, such as fuel cell and overhead line trucks, are particularly suitable for long-distance transport. However, their energy and power requirements and the demands on the electrical grid are different from those of battery-electric trucks. Therefore, the next step is to create a model in which the energy requirements of these types of trucks can be quantified and regionally differentiated in order to investigate their influence on the electrical energy system.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

■ Gleichtaktauslöschung zur Reduzierung der Störaussendung von elektrischen Lenkungssystemen

M. Sc. Jonas Bertelmann

Die zunehmende Elektrifizierung verschiedener Komponenten im Automobilbereich, wie beispielsweise der Lenkung, erfordert in der Entwicklung einen wesentlich größeren Aufwand, um einen störungsfreien, EMV-gerechten Betrieb gewährleisten zu können. Besonders bei taktender Leistungselektronik ist mit erheblichen Störemissionen zu rechnen. Im klassischen EMV-Ansatz werden Emissionen mithilfe passiver Filter auf ein dem Grenzwert entsprechendes, konformes Maß reduziert. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird eine Methode vorgestellt, wie in mehrphasigen, redundant aufgebauten Invertern eine Gleichtaktauslöschung ohne zusätzlichen Bauteilaufwand erreicht werden kann. Dies geschieht mithilfe geeigneter Ansteuerung der MOSFETs und einem symmetrischen Schaltungsdesign. Eine Reduzierung im Gleichtaktspektrum von bis zu 40 dB bis in den Frequenzbereich der Mittelwelle ist damit möglich.

In Fig. 1 ist der zu diesem Zweck entwickelte sechsheisige Wechselrichter als Prüfling zwischen den Netznachbildungen und dem Motor einer elektrischen Servolenkung zu sehen. Am Wechselrichter können verschiedene Tests der synchronen und phasenverschobenen Ansteuerung der Halbleiter vorgenommen werden. Wie groß die Streuung bei einzelnen diskreten Bauteilen ist, wird am Beispiel von MOSFETs in Fig. 2 und Fig. 3 gezeigt. Die 10 untersuchten MOSFETs aus unterschiedlichen Chargen werden exakt zeitgleich angesteuert. Dabei zeigt sich, dass aufgrund der Bauteilstreuung die maximale zeitliche Abweichung im tatsächlichen Schaltvorgang bis zu 20 ns beträgt. Um dennoch eine kontinuierlich gute Auslöschung des Gleichtakts zu erreichen, muss diese Verzögerung kompensiert und jede Halbbrücke des Wechselrichters individuell eingestellt werden.

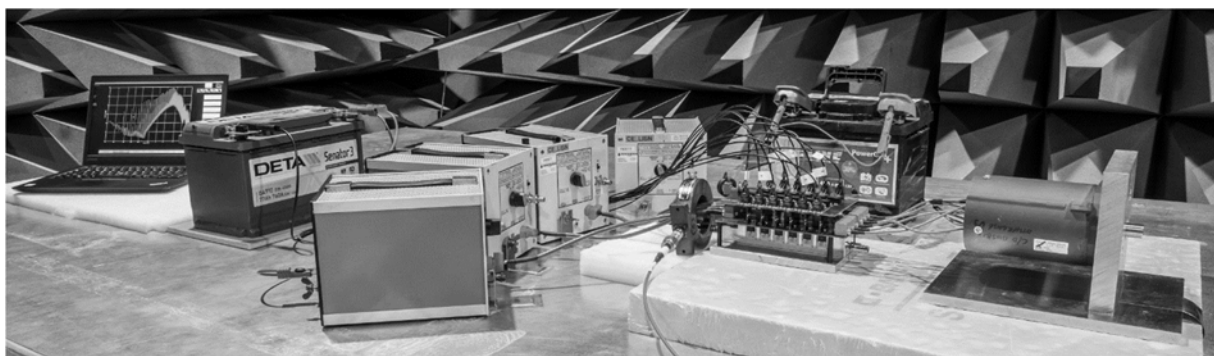


Fig. 1: Aufbau des Lenkungssystems im CISPR 25 Komponententest.
Structure of the steering system in the CISPR 25 component test.

■ Common Mode Cancellation Techniques to minimize EMI of Automotive Steering

M. Sc. Jonas Bertelmann

Due to the increasing electrification of various components, such as the steering system in the automotive sector, much greater effort must be invested in development to ensure EMC compliant operation. In particular regarding power electronics, considerable electromagnetic interference emissions are to be expected. In the classic EMC approach, emissions are reduced to a standard limit value with the aid of passive filters. Within the scope of this research project, a method is elaborated to achieve common-mode cancellation in multi-phase, redundantly designed inverters without any additional component expenditure by means of suitable control of the MOSFETs and a symmetrical circuit design. A reduction in the common-mode spectrum of up to 40 dB up to the frequency range of the medium wave is thus possible.

In Fig. 1 the six-phase inverter specially developed for this purpose is shown as a test specimen between the line impedance stabilization network and a motor of an electric power steering system. Various tests regarding the synchronous and phase-shifted control of the semiconductors can be carried out on this setup. The example of MOSFETs in Fig. 2 and Fig. 3 shows how large the scattering is for individual discrete components. The 10 MOSFETs examined from different batches are controlled exactly simultaneously and it is proven that due to component scattering, the maximum time deviation in the actual switching process is up to 20 ns. In order to achieve a continuously good common mode cancellation, this delay must be compensated and every half bridge of the inverter has to be set individually.

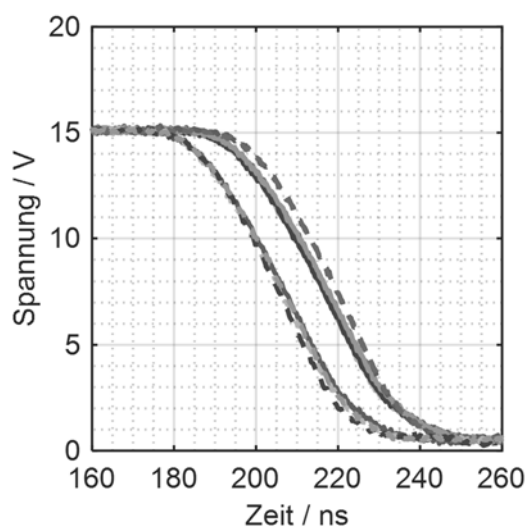


Fig. 2: Einschaltflanken ohne Laststrom.
Switch-on edge without load current.

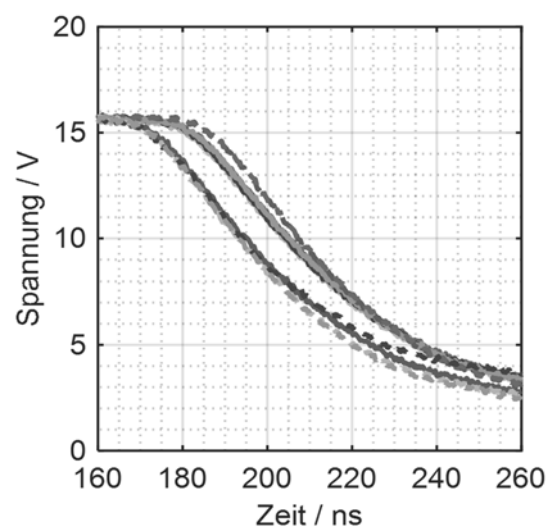


Fig. 3: Einschaltflanke mit Laststrom.
Switch-on edge with load current (30 A).

■ EMV-konforme elektrische Maschinenemulation

M. Sc. Michaela Gruber

Kfz-Wechselrichter erzeugen aufgrund ihres Schaltverhaltens hohe elektromagnetische Emissionen. Um die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) sicherzustellen, werden u.a. EMV-Prüfungen hinsichtlich der Störaussendung nach CISPR 25 durchgeführt. Gemäß der Norm muss der Prüfling (DUT) unter typischen Lastbedingungen betrieben werden. In der Regel wird eine einfache passive Impedanznachbildung als Ersatzlast verwendet oder die spezifische Maschine im Leerlauf betrieben. Um realistische Lastbedingungen herzustellen, wird die anzutreibende elektrische Maschine entweder hydraulisch oder durch eine zusätzliche Lastmaschine belastet. Diese Verfahren sind innerhalb einer EMV-Prüfhalle nur schwer und mit hohem Kostenaufwand zu implementieren und werden deshalb selten verwendet.

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf einen neuen, einfachen und zugleich kostengünstigen Ansatz zur Durchführung der EMV-Komponentenprüfungen von Antriebsumrichtern unter realistischen Lastbedingungen. Ziel ist die Entwicklung eines Gerätes, welches das elektrische Klemmenverhalten einer elektrischen Maschine unter Last emuliert. Fig. 1 zeigt das Blockschaltbild mit der sogenannten elektrischen Maschinenemulation, an die der Umrichter des Prüflings angeschlossen ist.

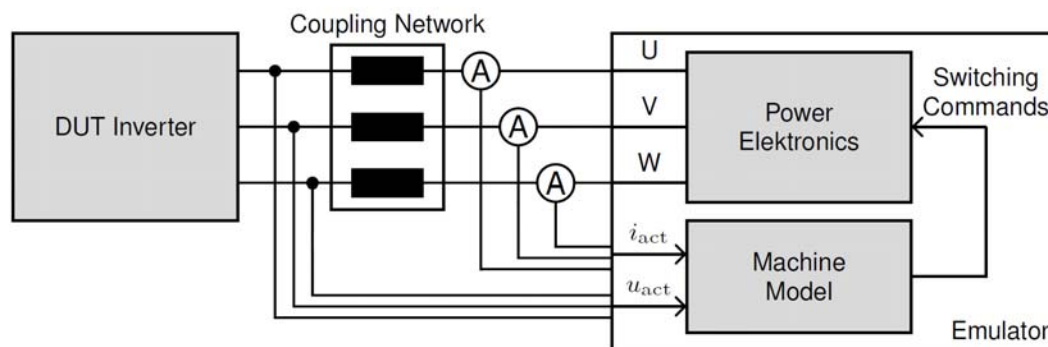


Fig. 1: Blockschaltbild der elektrischen Maschinenemulation.

Block diagram of the electrical machine emulation.

Während bislang entwickelte Maschinenemulationen lediglich das Funktionsverhalten elektrischer Maschinen abdecken, soll die EMV-konforme Maschinenemulation zusätzlich vernachlässigbar geringe Emissionen aufweisen und die hochfrequenten Koppelpfade für den Gleichtakt- (CM) und den Gegentaktstrom (DM) nachbilden.

Zur Analyse einer prototypischen funktionalen Maschinenemulation werden Vergleichsmessungen der leitungsgebundenen Emission mit der realen Maschine durchgeführt. Erste Messergebnisse des Gleichtaktstroms sind in Fig. 2 dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen eine vielversprechende Emulation des Gleichtaktkoppelpfades, jedoch hohe Eigenemissionen. Beides soll im Rahmen des Forschungsprojekts verbessert werden.

■ EMC compliant Electrical Machine Emulation

M. Sc. Michaela Gruber

Automotive drive inverters generate high electromagnetic emission due to their switching behavior. To ensure that their electromagnetic compatibility (EMC) complies with the CISPR 25 standard, the electromagnetic emission of the device under test (DUT) is tested under typical load conditions. Conventional tests use a simple passive impedance emulation as equivalent load or operate the specific machine in idle mode. To run EMC tests on the inverter under realistic load conditions, the corresponding electric machine is loaded either by hydraulics or by an additional load machine. These approaches, however, are difficult and expensive to implement within an EMC test chamber and for this reason, rarely realized.

This research proposes a new, simple and affordable approach to perform EMC component tests of drive inverters under realistic load conditions. The aim is to develop a device that emulates the electrical terminal behavior of an electric machine under load that is suitable for EMC measurements. Fig. 1 shows a block diagram with the so-called electrical machine emulation connected to the DUT inverter.

While previous developed electrical machine emulations only cover the functional behavior of electric machines, the EMC compliant machine emulation shall show negligible low emission and emulate as well as the high frequency coupling paths for the common mode (CM) current and the differential mode (DM) current.

Comparative measurements of the conducted emission with the real machine are performed for the analysis of a prototypical functional machine emulation. First measurement results of the common mode current are depicted in Fig. 2.

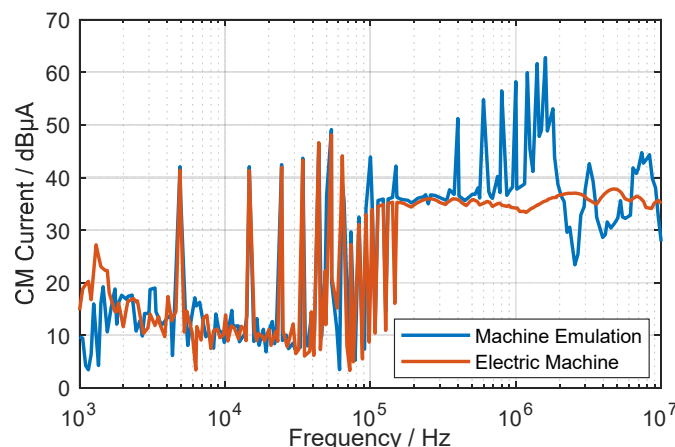


Fig. 2: Gleichtaktstrom des Prüflings mit Maschine und Maschinenemulation.
Measured CM current of the DUT with machine and machine emulation.

Due to the promising emulation of the CM coupling path, the machine emulation offers a solution to the drawbacks of traditional approaches. However, its high emissions as well as coupling paths need to be addressed in further research.

■ EMV von standardisierten WPT-Systemen im Fahrzeug

M. Sc. Manuel Haug

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

In dieser Forschungsarbeit wurden bereits repräsentative Prototypen nach den Vorschlägen des zuständigen Normungsgremiums SAE aufgebaut (Fig. 1a). Es wurden außerdem Simulationsmodelle entwickelt, mit denen es möglich ist, das elektromagnetische Verhalten der Prototypen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 100 MHz zu untersuchen. Dies beinhaltet u.a. die Abstrahlung von elektromagnetischen Feldern (Fig 1b) oder die Betrachtung von Störströmen, die beim Ladevorgang in das HV-Bordnetz des Fahrzeugs induziert werden.

Die Prototypen wurden zuletzt dahingehend modifiziert, dass auch höhere Leistungen übertragen werden können, wie sie im realen Betrieb auftreten. Dies ist von großer Bedeutung, da Störpegel und Emissionsfeldstärken für steigende Ladeleistungen i.d.R. nicht linear interpoliert werden können. Um die Ladeleistung erhöhen zu können, ist beispielsweise eine modifizierte Anordnung der Ferritplatten erforderlich, damit die Verlustleistung im Ferritmaterial reduziert wird. Fig. 2 zeigt die Verluste in den Ferriten der Fahrzeugspule. Diese entstehen aufgrund der Litzendurchführung zur elektrischen Kontaktierung der Spulenwicklung und ihrer resultierenden geschlossenen magnetischen Flusslinien im hochpermeablen Material. Durch Luftspalte zwischen den Ferritplatten kann die Verlustleistung deutlich verringert werden.

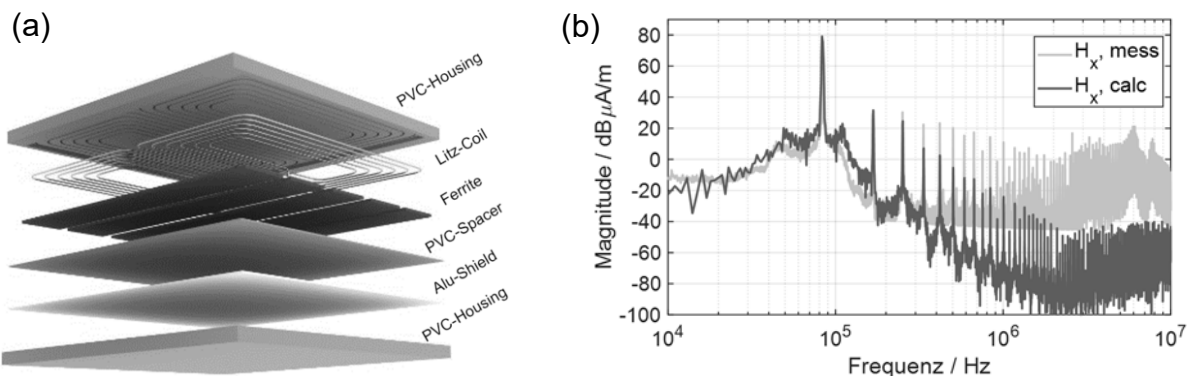


Fig. 1: (a) Schematischer Aufbau einer Ladespule.

Schematic structure of a charging coil.

(b) H-Emissionsspektrum in 3 m Abstand bei 3 kW Ladeleistung.

H-Emission at 3 kW charging power and 3 m distance.

■ EMC of standardized WPT Vehicle Charging Systems

M. Sc. Manuel Haug

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

In this research, representative prototypes have already been built according to the proposals of the responsible standardization committee SAE, see Fig. 1a. In addition, simulation models have been developed which allow to investigate the electromagnetic behavior of the prototypes in the frequency range from 9 kHz to 100 MHz. This includes the emission of electromagnetic fields (see Fig. 1b) or interfering currents, which are induced into the HV board system of the vehicle during the charging process.

The prototypes have now been modified in such a way that higher power levels can be transmitted, as they occur in real charging operation. This is important because interference levels and emission field strengths usually cannot be interpolated linearly for increasing charging powers. To increase the charging power, for example, a modified arrangement of the ferrite plates is necessary to reduce the power losses in the ferrite material. Fig. 2 shows the losses in the ferrites of the vehicle coil. These are caused by the litz-wire lead-through for the electrical contact of the coil winding and its related closed lines of magnetic flux in the highly permeable material. Air gaps between the ferrite plates can significantly reduce the power losses.

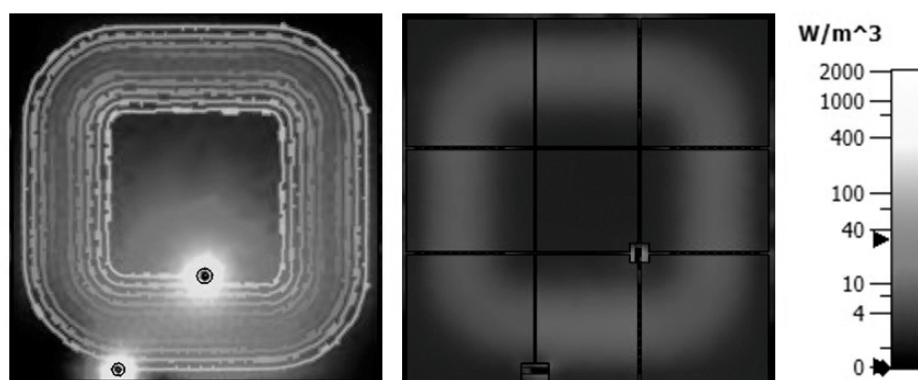


Fig. 2: Leistungsverluste in den Ferritplatten bei 85 kHz und 1 A Spulenstrom, ohne (links) und mit (rechts) Luftspalt zwischen den Ferritplatten.
Power loss density of ferrite plates at 85 kHz and 1A coil current, without (left) and with (right) air gaps between ferrite plates.

- **Prädiktive Pulskompensation zur Entstörung von leistungselektronischen Komponenten in Fahrzeugen**

M. Sc. Denis Müller

Bedingt durch die zunehmende Elektrifizierung halten immer mehr leistungselektronische Komponenten Einzug in Fahrzeuge. Dabei werden im Fall der Bordnetzrichter und Antriebsumrichter 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 Gesamtkomponente mit sich. Einen Ansatz zur Reduzierung des Bauraums solcher EMV-Filter können aktive Filter darstellen.

Als vielversprechende Möglichkeit hat sich am IEH die prädiktive Pulskompensation herausgestellt. Bei der prädiktiven Pulskompensation werden geeignete Gegenpulse durch einfache, leistungselektronische Stellglieder erzeugt, synchronisiert und dann zur Störanregung auf die zu entstörenden Versorgungsleitungen eingekoppelt. Mittels destruktiver Überlagerung von Störpuls und Kompensationspuls kann eine deutliche Reduzierung der messbaren Störpegel über einen weiten Frequenzbereich erreicht werden. Das Verfahren konnte im Lauf des Jahres erfolgreich sowohl an DC/DC-Wandlern als auch an Antriebsumrichtern erprobt werden.

Im Fall eines Tiefsetzstellers beschränkt sich der notwendige Hardwareaufwand zur Pulskompensation lediglich auf einen MOSFET-Halbbrückentreiber zur Pulserzeugung und zwei Kondensatoren C_{Comp} zur Einkopplung der Kompensationspulse. Das Ersatzschaltbild des Tiefsetzstellers ist in Fig. 1 dargestellt.

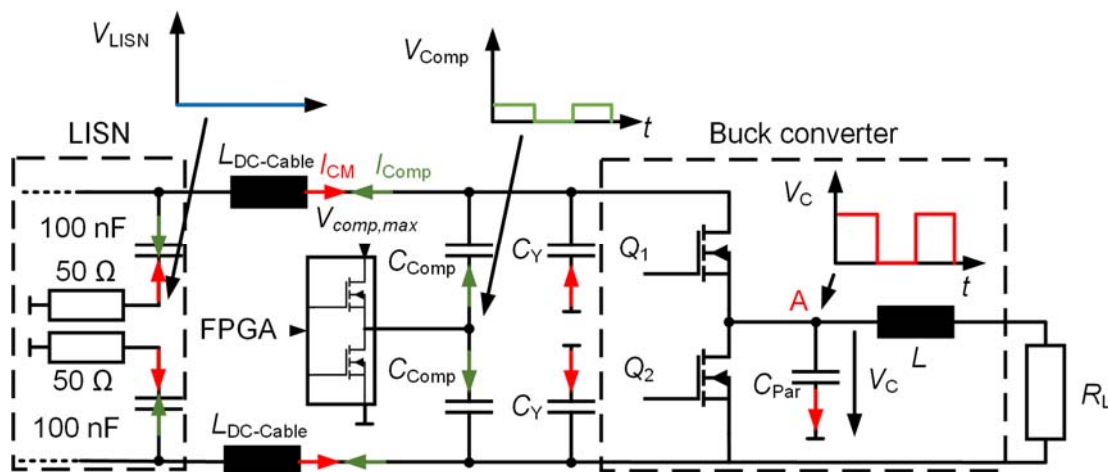


Fig. 1: Ersatzschaltbild des Tiefsetzstellers mit Pulskompensation und Strompfaden.
Schematic of the buck converter with pulse compensation and current paths.

Die Störanregung an Knoten A verursacht einen Gleichtaktstrom I_{CM} , der an der Netznachbildung (LISN) einen messbaren Spannungsabfall verursacht.

■ Predictive Pulsed Compensation for EMI Suppression of Power Electronic Converter in Vehicles

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 are active EMI-filters. The required bandwidth can be achieved by 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 solution. Therefore, suitable two-level compensation pulses are synchronized to the disturbances and injected on the system. These two-level pulses are quite easy to realize via a commercial half-bridge gate-driver IC. As compensation and disturbance signal are being superimposed destructively, a significant reduction of measured disturbance voltage level is achieved. During the past year, the method has been tested successfully on both, a DC/DC-converter and a traction inverter.

The required hardware parts for the buck converter are just a half-bridge gate-driver IC to create the two-level compensation pulses and two capacitors C_{Comp} to inject the signals onto the power lines. Fig. 1 shows the schematic of the buck converter with the PPC module included. The disturbance source at node A causes a common mode ground current I_{CM} . Vice versa, I_{CM} causes a voltage drop at line impedance stabilization network (LISN) which will be measured and compared to the standard., The compensation current I_{Comp} is injected by applying a scaled compensation voltage with an equal shape to the source pulse at node A. However, I_{CM} and I_{Comp} are being superimposed destructively at the LISN and therefore are reducing the disturbance voltage.

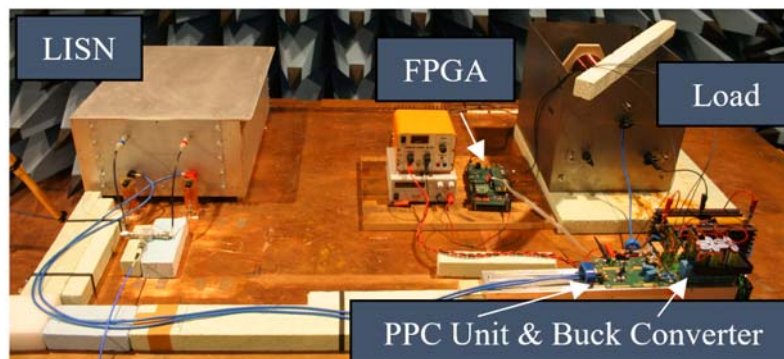


Fig. 2: Laboraufbau des Tiefsetzstellers nach CISPR 25.

Test setup of the buck converter according to CISPR 25.

Durch Anlegen eines skalierten Kompensationssignals mit identischem Kurvenverlauf wird der Strom I_{Comp} eingekoppelt. Aufgrund der gegenläufigen Stromrichtung zu I_{CM} verursacht I_{Comp} an der LISN eine destruktive Interferenz, was zu einer Reduzierung der messbaren Störspannung führt. Als Demonstratoranwendung für die neue Kompensationsmethode wurde ein Tiefsetzsteller gewählt.

In Fig. 2 wird der zugehörige Laboraufbau gezeigt. Der erzielte Effekt auf das Störspektrum des Tiefsetzstellers im Frequenzbereich von 10 kHz bis 30 MHz ist in Fig. 3 zu sehen. Wird dieser Test zum Vergleich ohne Filtermaßnahmen (Rawemission) durchgeführt, so kann durch Zuschalten der Pulskompensation (Compensation) eine Dämpfung des Störpegels zwischen 35 und 55 dB bis zu 2 MHz erreicht werden. Diese hohe Dämpfung ist ausreichend, um die Grenzwerte für den Langwellen- (LW) und Mittelwellenfrequenzbereich (MW) ohne weitere Filtermaßnahmen einzuhalten.

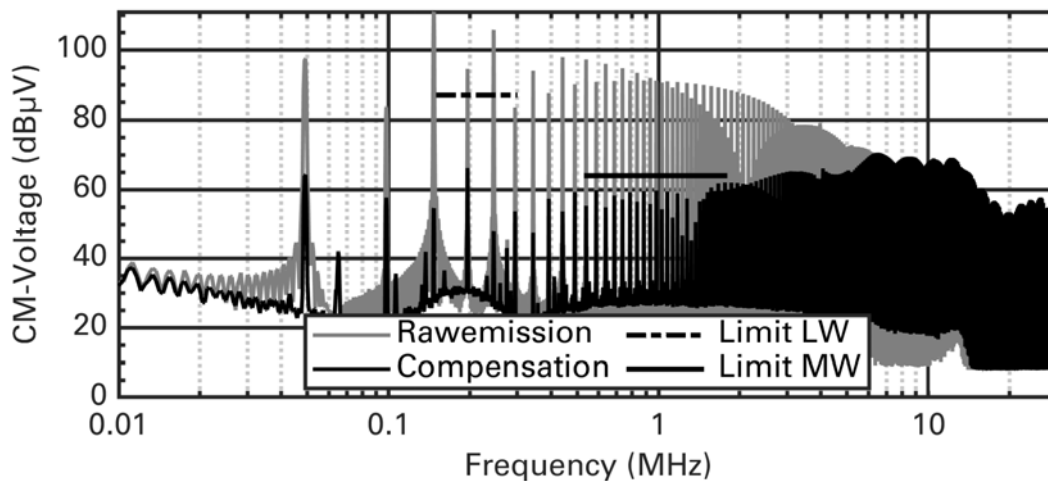


Fig. 3: Gleichtaktemission des Tiefsetzstellers ohne und mit Pulskompensation.
Common mode emission of the buck converter with and without pulse compensation.

Um die Transformation der Pulskompensation auf einen Antriebswechselrichter prinzipiell darstellen zu können, wurde der Tiefsetzsteller mit einem sinusmodulierten Ausgangsstrom betrieben. Durch die kontinuierliche Anpassung des Tastgrads der PWM über einer Periode des Ausgangsstroms ist eine kontinuierliche Anpassung des Kompensationssignal ebenfalls notwendig. Das Störspektrum des Tiefsetzstellers im sinusmodulierten Betrieb zeigt Fig. 4. Auch in diesem Betriebsfall kann die Pulskompensation (Compensation dynamic) gegenüber der Emission ohne Filtermaßnahmen (Rawemission modulated) eine deutliche Reduzierung des Störpegels erreichen. Somit eignet sich das Verfahren für einen praktischen Einsatz.

Oberhalb von 5 MHz nimmt die Bandbreite der Pulskompensation in dem Maße ab, dass es zu einer leichten Erhöhung des Spektrums kommt. Für eine praktische Anwendung sollte daher, um eine normgerechte Entstörung des Wandlers zu gewährleisten, eine deutlich reduzierte, passive Filterstufe für den Frequenzbereich oberhalb von 2 MHz ergänzt werden.

Fig. 2 depicts the test setup of the buck converter as a chosen demonstrator application. The test setup is built up according to CISPR 25 standard. Fig. 3 shows the achieved attenuation on the conducted emission of the buck converter in an extended frequency range from 10 kHz up to 30 MHz. However, in comparison to the emission without any filtering element (Rawemission), the PPC provides an attenuation of the disturbance spectrum of 35 – 55 dB up to 2 MHz. In consideration of achieving that high attenuation, the buck converter can fulfill the limits of CISPR 25 Class 5 in longwave (LW) and mediumwave (MW) frequency bands without any need of using additional passive filtering elements.

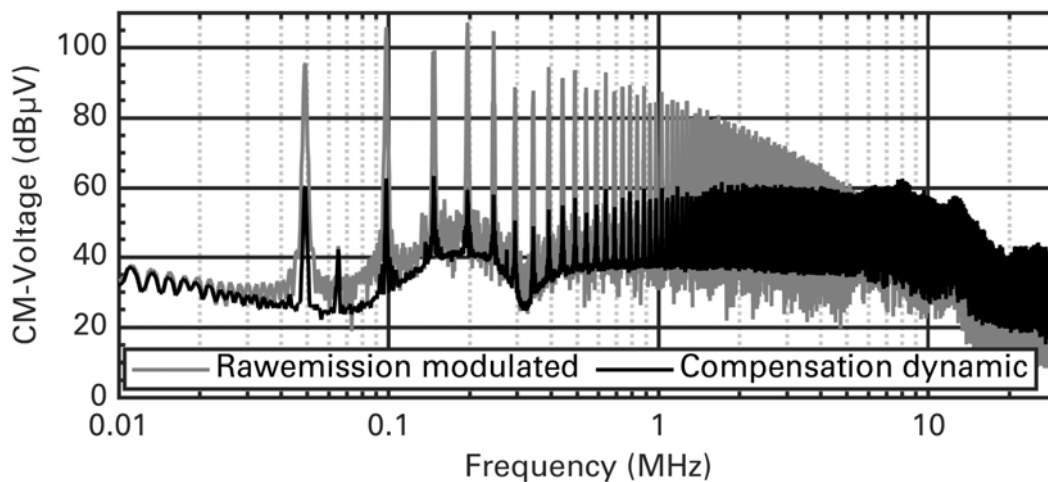


Fig. 4: Gleichtaktemission des Tiefsetzstellers bei sinusmoduliertem Betrieb.
Common mode emission of the buck converter at sinusoidal operation.

Moreover, the PPC was tested for an application to suppress disturbances at the input of a three-phase traction inverter. Therefore, the buck converter was operated under sinusoidal modulated duty cycle. The continually changing duty cycle during a period of the sinusoidal output current is requiring a permanent adaption of the PPC's synchronization. Fig. 4 shows the conducted common mode (CM) emission under the extended operation mode. Also in this case, the PPC (Compensation dynamic) provides a significant reduction of conducted CM emission, compared to the test without using any passive filter (Rawemission modulated). It is obvious that the method is quite suitable for a practical implementation. Due to the PPC's limited bandwidth, a slight increase of emission occurs above 5 MHz. Thus, in a practical application, a highly reduced passive filter should be used additionally above a frequency range of 2 MHz to fulfill the standards.

Nevertheless, the results demonstrate a compatibility of the PPC under sinusoidal operating mode. Therefore, the method was extended to a three-phase system and implemented on a traction inverter. Despite of a reduced bandwidth of 2 MHz and a value of 10 to 15 dB less attenuation, the satisfactory performance especially in frequency range below 500 kHz is achieved in this application as well. Thus, the PPC can be a useful component for the miniaturization of the EMI filter.

■ 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 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 also to higher requirements for electronic control units. In order to ensure both reliable and reproducible component level tests, the soaring complexity of the measurement setup needs to be incorporated into CISPR 25.

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

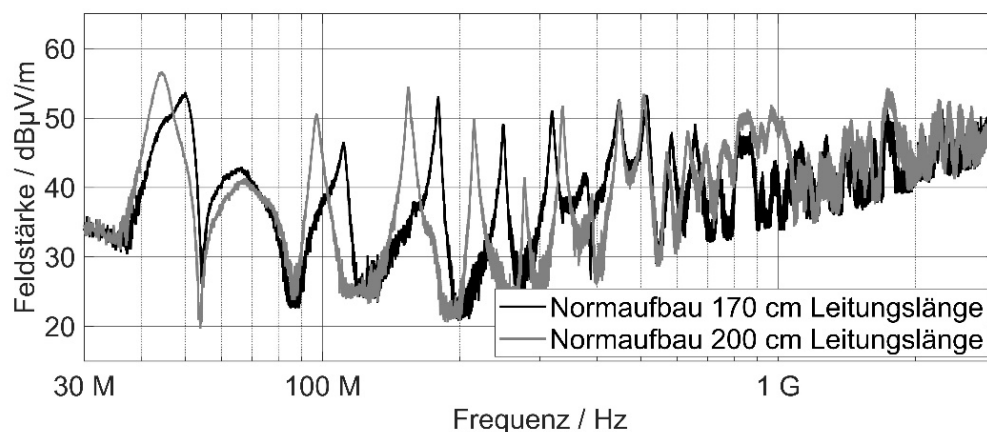


Fig 2: Gestrahlte Emissionen zweier normkonformer Messaufbauten nur mit unterschiedlichen Leitungslängen.

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

Figure 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 the 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 unter www.ieh.uni-stuttgart.de abgerufen werden.

M. Tahir, S. Tenbohlen

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

Energies, vol. 13, no. 1, p. 105, December 2019 . DOI: 10.3390/en13010105

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

Einflussparameter und Grenzen der Gleichtaktauslöschung im gegenphasigen Inverterbetrieb.

EMV 2020, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Köln, 17.-19. März 2020, Tagungsband, S. 239-246,

DOI: 10.15488/10033

M. Haug, M. Beltle, S. Tenbohlen

Modellierung von Wireless Power Transfer (WPT) Systemen zur Analyse der magnetischen Feldemissionen.

EMV 2020, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Köln, 17.-19. März 2020, Tagungsband, S. 47-54, DOI: 10.15488/10009

D. Müller, M. Beltle, S. Tenbohlen

Bewertung der Sensitivität eines hybriden Gleichtaktfilters für Traktionsinverter gegenüber Variationen der Betriebsparameter.

EMV 2020, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Köln, 17.-19. März 2020, Tagungsband, S. 197-204, DOI: 10.15488/10028

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

Methoden zur Untersuchung von Einflussparametern im Messaufbau von gestrahlten Emissionsmessungen im Komponententest nach CISPR 25.

EMV 2020, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Köln, 17.-19. März 2020, Tagungsband, S. 275-282, DOI: 10.15488/10037

M. Tahir, S. Tenbohlen, S. Miyazaki

Analysis of Statistical Methods for Assessment of Power Transformer Frequency Response Measurements.

IEEE Transactions on Power Delivery, Date of Publication: 21 April 2020

DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2987205

J. Berger, T. Yalcinoz, K. Rudion

Investigating the Intraday Continuous Electricity Market using Auto Regression Integrated Moving Average Model with Exogenous Inputs.

2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Madrid, June 9-12, 2020, Madrid, Spain,

DOI: 10.1109/EEEIC/ICPS Europe49358.2020.9160595

S. Khandan, S. Tenbohlen

Numerical Investigation on the Influence of Clack-bands on Lifetime of Disc-type Windings.

Conference Paper, IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Valencia, Online, July 06-31, 2020

B. Adam, S. Tenbohlen

Separation of superimposed PRPD Patterns by Signal Clustering.

Conference Paper, IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Valencia, Online, July 06-31, 2020

T. Götz, P. Wenger, M. Beltle, K. Backhaus, S. Tenbohlen, U. Riechert

Partial Discharge Analysis in Gas-Insulated HVDC Systems Using Conventional and Non-Conventional Methods.

Cigré Session 48, 23.08.-04.09.2020, Paris, D1-109

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

Proposal of a Calibration Methodology of UHF Partial Discharge Measurements for Power Transformers.

Cigré Session 48, 23.08.-04.09.2020, Paris, D1-116

C. He, C. P. Beura, S. Tenbohlen

Investigation of Partial Discharge Activity in the Slot of a Hairpin-wound Stator.

9th International Symposium on Electrical Insulating Material (ISEIM), Online, September 13–15, 2020, Tokyo, Japan, paper No. VL-2

M. Buchner, M. Banka, K. Rudion

Coordination of the Islanding and Resynchronization Process of Microgrids through a Smart Meter Gateway Interface.

CIREN 2020 Workshop, Berlin, Online, September 22–23, 2020, Paper No. 0101

K. Walz, D. Contreras, K. Rudion

Synthetic Charging Profiles Development of Battery-Electric Trucks for Probabilistic Grid Planning.

CIREN 2020 Workshop, Berlin, Online, September 22–23, 2020, Paper No. 0264

M. Banka, D. Contreras, K. Rudion

Multi-Agent Based Strategy for Controlled Islanding and System Restoration Employing Dispersed Generation.

CIREN 2020 Workshop, Berlin, Online, September 22–23, 2020, Paper No. 0365

H. Früh, K. Rudion, A. von Haken, B. Wasowicz, M. Gerber

Field-Test Based Comparison of LTE and PLC Communication Technologies for Smart Grid Applications.

CIREN 2020 Workshop, Berlin, Online, September 22-23, 2020, Paper No. 0152

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

Optimal Distribution Grid Expansion Planning under Consideration of dynamic DG Curtailment.

CIREN 2020 Workshop, Berlin, Online, September 22-23, 2020, Paper No. 0386

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

Improvement of Predictive Pulsed Compensation using Adapted Synchronization.

International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2020), Online, September 23-25, 2020, pp. 1003-1008, Paper No. 224

K. Walz, D. Contreras, K. Rudion, P. Wiest

Modelling of Workplace Electric Vehicle Charging Profiles based on Trip Chain Generation.

2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Virtual, October 26-28, 2020, pp. 459-463.

O. Laribi, K. Rudion, H. Nägele

Combined Grid-supporting and Market-based Operation Strategy for Battery Storage Systems.

6th IEEE International Energy Conference 2020 (ENERGYCon 2020), September 28 – October 1, 2020, Tunis, Online, S. 296-301,

DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236468

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, 13(1), 3; DOI: 10.3390/en13010003

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

Study of the Influence of Winding and Sensor Design on Ultra-High Frequency Partial Discharge Signals in Power Transformers.

Sensors 2020, 20(18), 5113; DOI: 10.3390/s20185113

T. Yalcinoz, K. Rudion

Multi-objective Environmental-economic Load Dispatch Considering Generator Constraints and Wind Power Using Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization.

AECE Advances in Electrical and Computer Engineering, Volume 20, Number 4, November 2020, pp. 3-10

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

Influence of Dielectric Window on the Performance of Window-type UHF PD Sensors.

VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.-11. November 2020, Berlin, Online, ETG-Fachbericht 162, S. 561

S. Karambar, S. Tenbohlen

Design of High Voltage Lead Exit for Power Transformers using Silicone Rubber Insulation.

VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.-11. November 2020, Berlin, Online, ETG-Fachbericht 162, S. 343-347

C. Kattmann, M. Siegel, D. Passow, M. Beltle, S. Tenbohlen

Inductive Energy Harvesting for the Monitoring of Power Cable Systems.

VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.-11. November 2020, Berlin, Online, ETG-Fachbericht 162, S. 132-138

S. Khandan, S. Tenbohlen

Numerische Untersuchungen des Einflusses von Betriebsparametern auf den Heißpunktfaktor einer Scheibenwicklung mittels CFD.

VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.-11. November 2020, Berlin, Online, ETG-Fachbericht 162, S. 556

D. Passow, M. Beltle, S. Tenbohlen, J. Hohloch, M. Siegel

Evaluation of the Frequency Information Contained in PD Signals for Localization in Power Cable Monitoring.

VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.-11. November 2020, Berlin, Online, ETG-Fachbericht 162, S. 288-293

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

Partial Discharge Characteristic of Fixed Protrusions in HVDC-GIS.

VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.-11. November 2020, Berlin, Online, ETG-Fachbericht 162, S. 656-661

M. Tahir, S. Tenbohlen

FRA Lookup Charts for the quantitative Determination of Winding Axial Displacement Fault in Power Transformers.

IET Electric Power Applications, Volume 14, Issue 12, December 2020, p. 2370 – 2377. DOI: 10.1049/iet-epa.2020.0273

A. K. Pradhan, S. Tenbohlen

Estimation of Moisture Content in Oil-impregnated Pressboard through Analyzing Dielectric Response Current under Switching Impulse.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Paper No. 9367, 2020 (accepted for publication)

M. Schühle, S. Tenbohlen

Berechnung von geomagnetisch induzierten Strömen auf Basis eines dreidimensionalen Leitfähigkeitsmodells.

e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Österreichischer Verband für Elektronik, Jg. 137, Ausgabe 8, 2020

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 2018-2020 CIREC Working Group, Digital DSO - WG 2018-2: New opportunities and challenges to improve customer experience and to increase their engagement in distribution system operation, Mitarbeit von H. Früh, K. Rudion.
- CIGRE Study Committee A2, Power Transformers and Reactors, Mitarbeit von S. Tenbohlen.
- CIGRE Working Group JWG A2/D1.51, Partial Discharge Measurements for Factory Acceptance Tests and Site Acceptance Tests of Power Transformers, Mitarbeit von S. Tenbohlen, M. Beltle.
- CIGRE Working Group A2.53, Objective interpretation methodology for the mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA), Mitarbeit: S. Tenbohlen, M. Tahir.
- CIGRE Working Group A2.57, Effects of DC Bias on power transformers Mitarbeit: S. Tenbohlen.
- CIGRE Working Group A2.62, Analysis of Transformer Reliability, Leitung: S. Tenbohlen.
- CIGRE Working Group A2.60, Mitarbeit von S. Tenbohlen.
- CIGRE Working Group D1.70, Dielectric Performance of insulating Liquids, Mitarbeit von S. Tenbohlen.
- CIGRE Working Group D1.74, Mitarbeit von S. Tenbohlen, M. Beltle, C. He.
- 24.1.20 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 29.1.20 Fachtagung 2020, E-Motoren und Transformatoren, ZVEI, Fulda
Vortrag: Prof. S. Tenbohlen
- 12.-13.2.20 Omexom Forum, Würzburg
Moderation: Prof. S. Tenbohlen
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, A. Eisenmann, H. Früh, O. Laribi, M. Beltle
- 23.3.20 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 30.3.30 Programmausschusssitzung VDE Hochspannungstechnik, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

- 12.-15.5.20 Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV 2020, Online
Teilnehmer/Beiträge: S. Tenbohlen, M. Beltle, D. Müller
- 26.5.20 Network²-Kolloquium 2020, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 26.5.20 Omicron Anwendertagung, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 16.6.20 Workshop Energie/CO₂, (Fraunhofer IPA), online
Teilnehmer: D. Contreras
- 9.7.20 SmartGridsBW: Smart-Meter-Rollout im Dialog, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 9.7.20 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 29.7.20 Workshop Energie/CO₂ (Fraunhofer IPA), online
- 31.8.-2.9.20 E-CIGRE Session 2020, online
Vortrag: Prof. S. Tenbohlen
- 14.9.-23.9.20 ISEIM - International Symposium on Electrical Insulating Materials 2020, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, C. Beura, C. He
- 23.-25.9.20 EMC Europe 2020, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Onlinesymposium
Teilnehmer/Beiträge: S. Tenbohlen, M. Beltle, D. Müller
- 24.9.20 ETG Fachtagung V2 „Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 9.10.20 CIRED Working Group EV planning, online
Teilnehmerin: K. Walz
- 13.10.20 CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 14.10.20 SmartGridsBW: Vorstandssitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 27.10.20 VDE Online-Seminar "Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung", online, Teilnehmer: K. Rudion
- 27.10.20 CIGRE DAK C1-Sitzung, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 3.11.20 IBA Lenkungsausschuss, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 9.-11.11.20 VDE Hochspannungstechnik, online
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, C.P. Beura, S. Karambar, S. Khandan, D. Passow, P. Wenger
- 13.11.20 CIRED Working Group EV, online
Teilnehmerin: K. Walz

- 18.11.20 Die Energiewende: Von der Alten Energiewelt zur Neuen Energiewelt
- Forschungsnetzwerks Energie.
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 23.-24.11.20 SET-Plan Conference 2020, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion
- 9.12.20 9. Smart Grids-Kongress Baden-Württemberg 2020
Teilnehmer: Prof. K. Rudion Prof. S. Tenbohlen
- 11.12.20 CIRED Working Group EV, online
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, K. Walz
- 15.12.20 C/sells Abschlusskonferenz
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, M. Buchner, T. Streubel
- 17.12.20 VDE Tagung „25 Jahre elektrische Wiedervereinigung“, online
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen

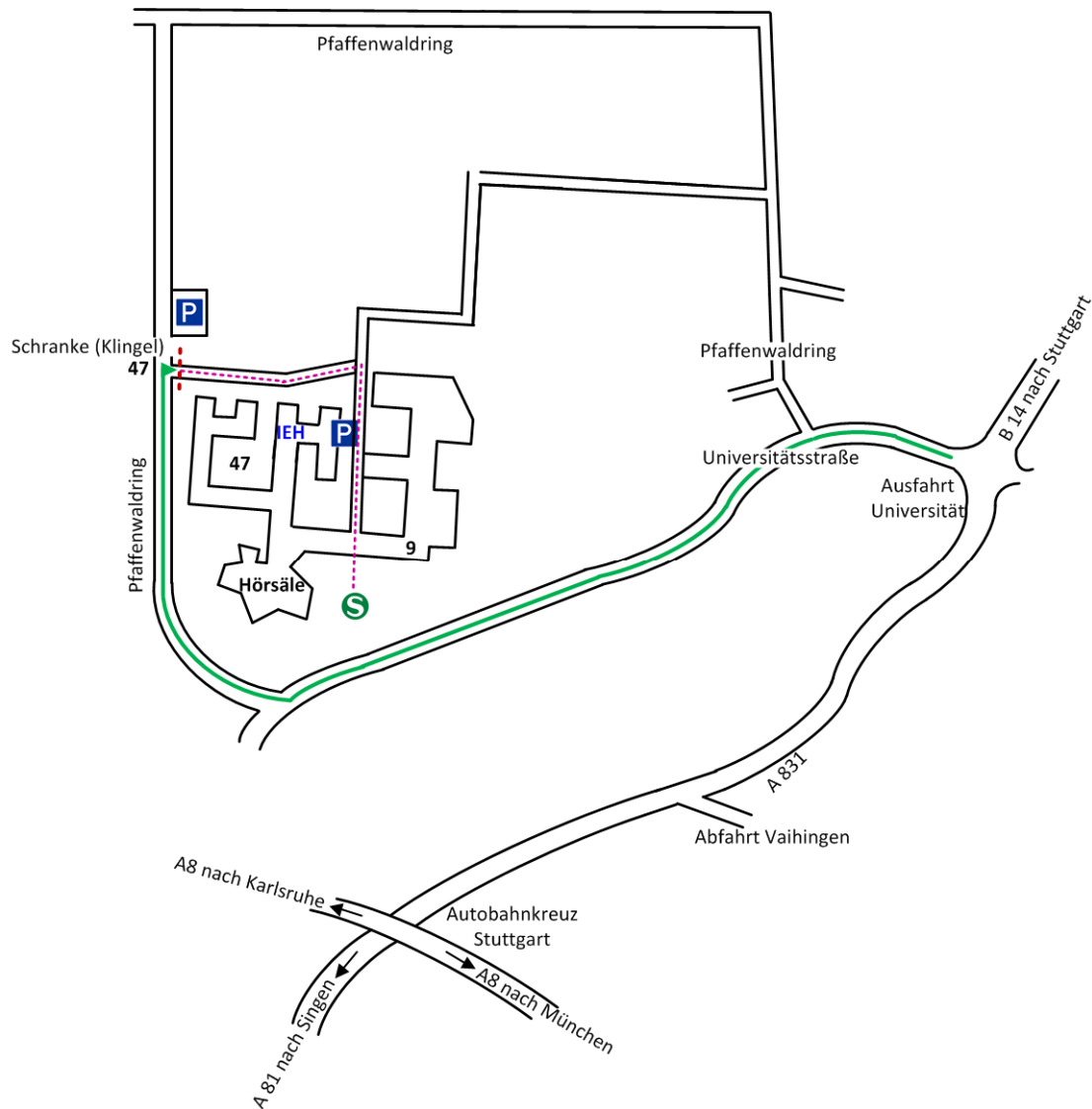
8. PRÜFEINRICHTUNGEN

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

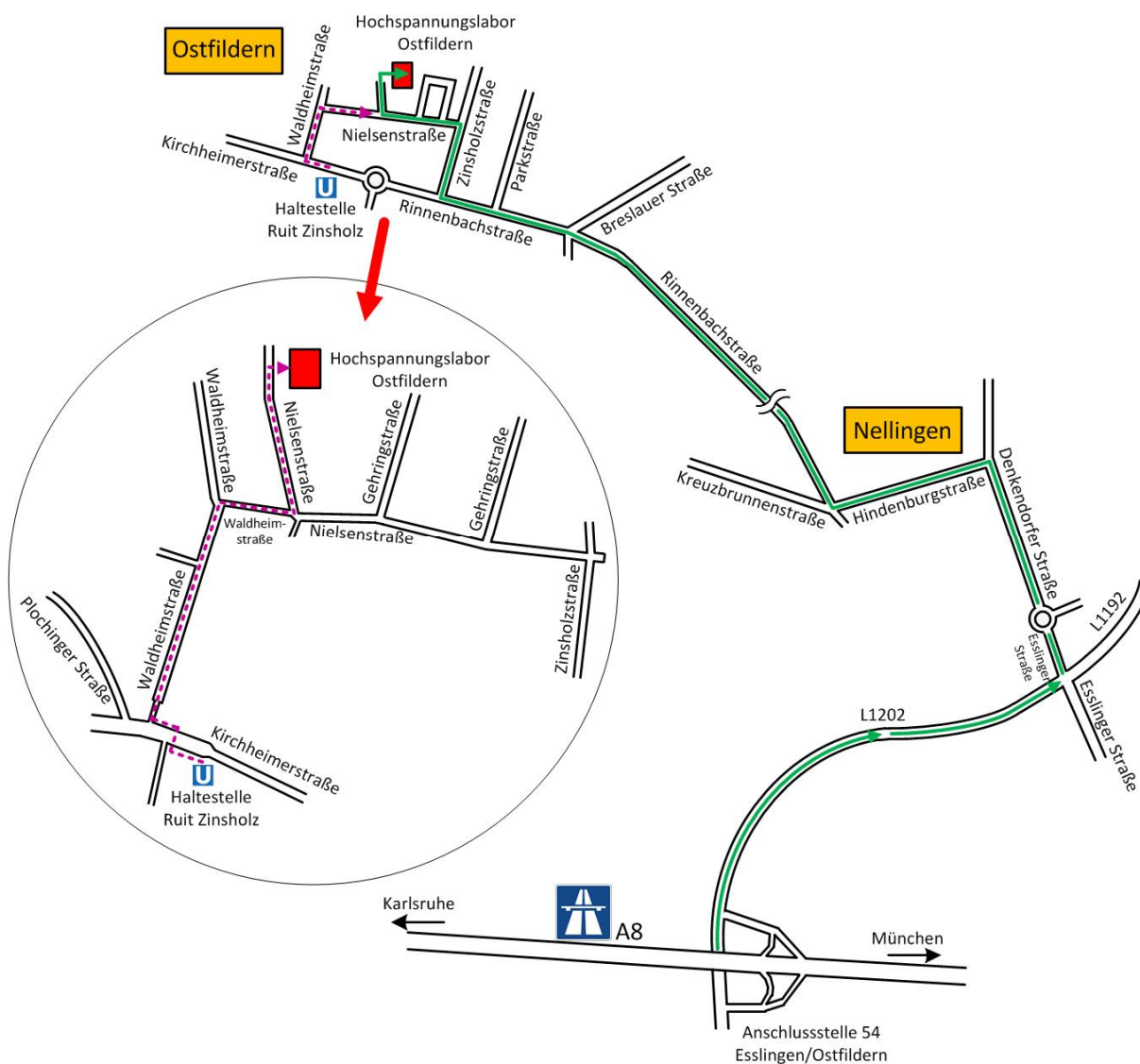


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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)