

INHALT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	9
	3.1 VORLESUNGEN	9
	3.2 PRAKTIKA	14
	3.3 EXKURSIONEN	15
	3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN	17
4.	PROMOTIONEN	38
5.	FORSCHUNGSARBEITEN	48
	5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK	52
	5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	78
	5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	126
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN	132
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	137
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	140
9.	LAGEPLÄNE	142

1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2017 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Auch im Jahr 2017 wurden wichtige Meilensteine im Bereich der Energiewirtschaft in Deutschland erreicht, die die Umsetzung der Energiewende einerseits weiterhin voranbringen und andererseits deren Effizienz optimieren sollen. Nennenswert sind vor allem die Aktivitäten zur Umstellung von staatlich definierten Fördersätzen auf Direktvermarktung, basierend auf wettbewerblichen Ausschreibungen. Es gab aber auch Aktivitäten hinsichtlich der Digitalisierung der Energiewende, die eine zentrale Bedeutung bei der Bewältigung dieses Großprojektes hat.

Auch für unser Institut war das Jahr 2017 ein gutes Jahr. Zum einen ist unser Leuchtturmprojekt „C/sells“ im Rahmen des Förderprogramms „*Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende (SINTEG)*“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erfolgreich angelaufen. Zum anderen konnten wir unsere Forschungsaktivitäten insbesondere im Bereich Versorgungsqualität deutlich ausbauen. Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg fördert ein neues Forschungsprojekt „*VIPEEER (Versorgungsqualität und -sicherheit in der industriellen Produktion bei Einspeisung aus Erneuerbaren Energien)*“. Außerdem haben wir es geschafft, ein einzigartiges Power-Quality-Monitoringsystem in der kürzlich fertig gestellten Forschungsfabrik „*ARENA2036*“ umzusetzen.

Das Interesse an Themen der Energiewende, des Netzausbaus und Smart Grid Lösungen ist auch bei den Studierenden weiter ungebrochen. Fast 90 studentische Arbeiten wurden 2017 am IEH durchgeführt, wieder ein sehr erfreuliches Ergebnis. Auch dieses Jahr konnten wir unseren Studierenden die Inhalte der Lehrveranstaltungen im Rahmen diverser Exkursionen, u.a. bei der viertägigen Pfingstexkursion, mit Einblicken in die Praxis nahebringen. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Gastgebern herzlich bedanken.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben vier abgeschlossenen Dissertationen von Dr.-Ing. Marc Brunner (*Auswirkungen von Power-to-Heat in elektrischen Verteilnetzen*), Dr.-Ing. Katharina Frey (*Automatisierte Betriebsführung von HGÜ-Verbindungen in einem synchronen Verbundsystem*), Dr.-Ing. Mohsen Nemati (*Optimierung der Fahrpläne von Generatoren und Speichersystemen in Mikronetzen mit Hilfe genetischer Algorithmen und gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung*) und Dr.-Ing. Gerhard Walker (*Folgen und Chancen der Elektromobilität für deutsche Niederspannungsverteilstetze*) dokumentieren 40 Veröffentlichungen unsere Forschungsaktivitäten.

Viele der Veröffentlichungen finden Sie auch auf der neu gestalteten Instituts-Homepage:

<https://www.ieh.uni-stuttgart.de/forschung/publikationen/index.html>

Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns, in diesem Jahr 10 neue akademische Mitarbeiter einzustellen, was fast einem Generationswechsel gleichkommt. Zusammen mit den zahlreichen internationalen Gastwissenschaftlern sind wir nun auch an die räumlichen Grenzen des Institutes gestoßen.

Es haben sich im 2017 auch Änderungen im administrativen Bereich des Instituts ergeben. Zum einen ist Frau Lwowski in den Ruhestand ausgeschieden. Für die langjährige Zusammenarbeit möchten wir uns bei ihr herzlich bedanken und wünschen ihr alles Gute für die Zukunft. Der Aufgabenbereich von Frau Lwowski wurde von Frau Schärli übernommen. Zum anderen wurde unser Team durch Frau Janja Schulz verstärkt, die die Aufgaben im Sekretariat übernommen hat. Wir begrüßen Frau Schulz und wünschen ihr eine schöne Zeit am Institut.

Allen unseren Freunden möchten wir an dieser Stelle recht herzlich für die Anregungen und die 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 2018

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

PREFACE

Dear friends!

As usual, our annual report would like to update you about the current developments of our institute.

In the year 2017 important milestones have been reached which shall promote the change of the energy sector in Germany but also its efficiency. Perhaps most notable is the shift from the funding system defined by the government to a direct marketing system based on competitive auctions. There have also been various activities concerning the digitalization, which is essential for the further development of the energy market in Germany.

2017 was also a very successful year for our institute. On the one hand our flagship project “C/sells” has been launched successfully within the funding program “SINTEG”, supported by the Federal Ministry for Economic Affairs. On the other hand we have developed our research activities especially in the field of supply reliability. In this context a new research project called “VIPEEER (*Supply Quality and Reliability in the Industrial Production taking into account the Input from Renewable Sources*)” has started successfully. We also succeeded in creating a unique power-quality monitoring system in cooperation with the recently established Research Factory “ARENA2036”.

The students remain highly interested in themes concerning the change of the energy sector, the expansion of the grids and smart grid solutions. Almost 90 scientific works have been completed at our institute, again a very positive result. Various excursions offered the students excellent opportunities to gain an insight into everyday practice, for example during our 4-day excursion in June 2017. Once again we would like to thank all partners for their support.

In the research field we look back on another very successful year. In addition to four finished dissertations by Dr.-Ing. Marc Brunner (*Impacts of Power-to-Heat in Electrical Distribution Grids*), Dr.-Ing. Katharina Frey (*Automated Control of HVDC Connections Embedded in a Synchronous Network*), Dr.-Ing. Mohsen Nemati (*Optimization of Unit Commitment and Economic Dispatch in Microgrids Based on Genetic Algorithm and Mixed Integer Linear Programming*) und Dr.-Ing. Gerhard Walker (*Impact and Chances of Electric Mobility on German Low Voltage Distribution Grids*), 40 conference papers and publications testify our research activities.

You can download many of them from our redesigned homepage:

<https://www.ieh.uni-stuttgart.de/forschung/publikationen/index.html>

The high number of graduates at our institute and numerous industrial encouragements allowed us to hire 10 new employees. This is almost a change of generation. Together with the numerous international visiting scientists we have reached the limits of our rooms.

Some changes have also taken place in the administrative field. On the one hand Hermine Lwowski retired. We would like to thank her warmly for her cooperation over the past years and wish her all the best for the future. Nicole Schärli has taken over her responsibilities. Therefore Janja Schulz joined our team in June 2017 and took over the secretarial duties. We welcome her and wish her a successful time at our institute.

Finally we would like to send our sincere thanks to all our friends who have contributed to our success in many ways. Especially we would like to express our gratitude to the partners who supported us with research contracts and donation, to the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy, the government of Baden-Württemberg and to the German Research Foundation (DFG). We hope that our annual report will strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. For this purpose we would like to refer to chapter 3.4, where you find abstracts of our graduate's work.

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

Our best wishes accompany you in 2018.

Stuttgart, January 2018

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail: vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	Telefon / phone: +49 (0)711-
Institutsleiter / Head of Institute:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN	-685-67871
Leiter des Fachgebiets Netzintegration erneuerbarer Energien:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof RUDION	-685-67872
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER	
Lehrbeauftragte:	Dr.-Ing. Wolfgang PFAFF <i>Robert Bosch GmbH</i>	-811-20992
	Dipl.-Ing. Rainer JOSWIG <i>TransnetBW GmbH</i>	-21858-3214
	Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH <i>Schneider Electric Energy GmbH</i>	
	Dr.-Ing. Markus PÖLLER <i>Moeller & Poeller Engineering GmbH</i>	
	Dr.-Ing. habil. Konstantin O. PAPAILIOU	
Oberingenieure:	Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI	-685-67878
	Dipl.-Ing. Michael BELTLE <i>(Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)</i>	-341 2075 / -685-68061
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	M. Sc. Benjamin ADAM	-685-69198
	Dipl.-Ing. Philipp ARNOLD (bis 22.1.2017)	
	M. Sc. Manswet BANKA	-685-67868
	M. Sc. Jonas BERTELMANN (ab 1.10.2017)	-685-69195
	M. Sc. Matthias BUCHNER (ab 17.7.2017)	-685-67838
	M. Sc. Daniel CONTRERAS	-685-69193
	M. Sc. Mohammad DJAMALI (bis 31.8.2017)	
	M. Sc. Simon EBERLEIN	-685-67857
	M. Sc. Adrian EISENMANN (ab 1.7.2017)	-685-67867
	Dipl.-Ing. Katharina FREY (bis 31.5.2017)	

M. Sc. Heiner FRÜH (ab 1.6.2017)	-685-69151
M. Sc. Daniel GROß	-685-67875
M. Sc. Stephanie HÄGELE	-685-67858
M. Sc. Philipp HILLENBRAND (bis 31.10.2017)	
M. Sc. Smitha KARAMBAR	-685-69194
Dipl.-Ing. Christoph KATTMANN	-341 2075 / -685-67874
M. Sc. Saeed KHANDAN SIAR	-685-67809
M. Sc. Ouafa LARIBI	-685-69197
M. Sc. Markus MILLER (ab 9.1.2017)	-685-67869
M. Sc. Denis MÜLLER (ab 9.1.2017)	-685-69199
M. Sc. Daniel PASSOW (ab 9.1.2017)	-341 2075 / -685-69165
M. Sc. Michael SCHÜHLE	-685-69142
Dipl.-Ing. Martin SIEGEL (bis 23.2.2017)	
M. Sc. Tim STREUBEL (ab 1.4.2017)	-685-69167
M. Sc. Christian SUTTNER	-341 2075 / -685-69164
M. Sc. Mehran TAHIR (ab 23.1.2017)	-685-67855
M. Sc. Farzaneh VAHIDI	NA
M. Sc. Philipp WENGER (ab 1.3.2017)	-341 2075 / -685-69177
M. Sc. Pascal WIEST	-685-69196

Sekretariat /

Secretary:

Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:

Janja SCHULZ (ab 12.6.2017) -685-67870

Annette GUGEL -685-67880

Hochspannungslabor Ostfildern:

Konstanze LINS -341 2075

Buchhaltung /

Accounting:

Hermine LWOWSKI (bis 30.5.2017)

Nicole SCHÄRLI (ab 1.6.2017) -685-67876

Technische Angestellte /

Technical Staff:

Muhammed ACAR, *Auszubildender* (ab 1.9.2017) -685-67847Can AKGÜL, *Auszubildender* -685-67847Erwin BECK, *Mechanikermeister* -685-67847Lothar EHINGER, *Elektromeister* (ab 23.1.2017) -341 2075Timon GOLD, *Zentralwerkstattleiter* -685-67847Daniel HARTICH, *Mechaniker* -685-67847Michael HERDTLE, *Mechaniker* -341 2075 / -685-69161Enis KAYNAK, *Mechaniker* (bis 14.5.2017)Edona KUQI, *Mechanikerin* -685-67847Hartmut RÖNISCH, *Elektrotechniker* -685-67856Rudolf van de WEYER, *Elektromeister* (bis 30.11.2016)Christian WÖLZLEIN, *IT-Systemkaufmann* -685-67863

Gastwissenschaftler /

Visiting scientists:

Dr. Wilfred FRITZ, Kapstadt, Südafrika (ab 2.2.2017)

Dr. Satoru MIYAZAKI, Yokosuka-shi, Japan (ab 1.7.2017)

ass. Prof. Dr. Su SU WIN, Yangon, Myanmar (3.7.2017 bis 29.8.2017)

M. Sc. Takahiro UMEMOTO, Amagasaki, Japan (ab 25.9.2017)

M. Sc. Jinchao DU, Chongqing, China (ab 2.10.2017)

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***

Sommersemester, 2 V, 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***Energiewirtschaft in elektrischen Verbundsystemen***

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*

DR.-ING. K. PAPALIOU***Hochspannungsfreileitungen***

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Planung, Wirtschaftlichkeit, Verlustberechnungen*
- *Leitungskonstanten, natürliche Leistung, HGÜ*
- *Maste und Fundamente; Erdungsfragen*
- *Seile und Armaturen, Hochtemperaturseile, Monitoring*
- *Seilschwingungen*
- *Isolatoren, Kompaktleitungen mit Silikonverbundisolatoren*
- *Bau und Unterhalt, Arbeiten unter Spannung*
- *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*

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

Praktische Übungen im Labor „Hochspannungstechnik“ sowie „Energieübertragung“

Die Praktischen Übungen im Labor „Hochspannungstechnik“ umfassen Versuche mit folgenden Inhalten:

- *Erzeugung, Messung und Anwendung hoher Wechselspannungen*
- *Erzeugung und Anwendung hoher Stossspannungen*
- *Ermittlung von elektrostatischen Feldern*
- *Wanderwellen*
- *Gasentladungen und Isolierstoffe*
- *Elektromagnetische Verträglichkeit*
- *Lastflussrechnung*

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

10. Februar 2017, ganztägig:

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



Besuch bei der SAG GmbH in Langen.

17. Mai 2017, ganztägig

Besichtigung des Kernkraftwerks Neckarwestheim der EnBW Kernkraft GmbH mit ausführlicher Diskussion aktueller Fragen zur Energiepolitik und –versorgung

6. – 9. Juni 2017: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei
- Siemens AG Dresden Leistungstransformatoren
 - Highvolt Dresden Prüftechnik
 - Vattenfall Europe Generation Braunkohlekraftwerk Boxberg
 - Enercon Magdeburg Windkraftanlagen



Die Exkursionsteilnehmer bei Enercon in Magdeburg.

29. Juni 2017, ganztägig

Besuch des Kraftwerks Altbach/Deizisau mit Rundgang; Besichtigung der 380- und 110-kV-GIS-Schaltanlage und Erläuterung der Besonderheiten; zum Vergleich auch Besichtigung der 380-kV-Freiluftschaltanlage Stuttgart-Mühlhausen

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 1.11.2016 bis 31.10.2017:

Benimmar, Karima

Modellierung der Regelung virtueller Synchronmaschinen in Mikronetzen

In dieser Arbeit werden Modelle der virtuellen Synchronmaschine (VSM) zweiter und siebter Ordnung entwickelt, mit deren Hilfe die Netzregelung künftiger Netze über Wechselrichter stabilisiert werden soll. Die in MATLAB/Simulink als Strom- und Spannungsquellen implementierten Modelle werden mit verschiedenen Regelungsstrategien und Szenarien getestet. Aufgrund numerischer Probleme der VSM siebter Ordnung als Spannungsquelle und in Orientierung an der vorherrschenden Fachliteratur konzentriert sich die Arbeit auf die VSM zweiter Ordnung. Es zeigt sich, dass mit dieser VSM betriebene Netze im Insel- und auch netzgekoppelten Modus dem Betrieb mit rein *Droop*-geregelten Wechselrichter für transiente Vorgänge, wie der Zuschaltung von Lasten oder Übergänge der Netzmodi, meist überlegen sind. Das gilt sowohl im Strahlennetz auf Nieder-, als auch auf Mittelspannungsebene im vermaschten Netz.

Modeling and Control of Virtual Synchronous Machines in Microgrids

With this work, models of a virtual synchronous machine (VSM) of second and seventh order are developed in order to stabilize the inverter control of future grids. Implemented in MATLAB/Simulink as current and voltage sources, the models are tested for different control strategies and scenarios. Due to numerical difficulties of the VSM implemented as a seventh order voltage source and standards of specialized literature, the work focuses on the VSM of second order. The results show, that a VSM in island or grid modus with transient states occurring, mostly is more capable to run a grid stably than a merely droop-controlled inverter. Further investigation should target the control of the VSM of seventh order, allowing a comparison of both model types.

Benz, Jan

Simulation der Stromeinspeisung für Sensoren in der EMV

Simulation of Bulk-Current-Injection in Sensor EMC

Bertelmann, Jonas

Entwicklung eines sechsphasigen Traktionsinverters zur Minimierung der Gleichtaktstörung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines sechsphasigen Traktionsinverters, welcher für elektrische Antriebssysteme in zweierlei Hinsicht Vorteile bietet. Zum einen erfüllt der Inverter die Redundanzanforderung von autonomen Fahrsystemen, zum anderen ergibt sich die Möglichkeit, durch eine EMV-optimierte Ansteuerung die Gleichtaktstörung der Leistungshalbleiter stark zu minimieren. Durch entgegengesetztes und simultanes Schalten von jeweils zwei Leistungsschaltern unterschiedlicher Halbbrücken ergibt sich für die entstehenden Störungen eine Phasen-

verschiebung von 180° . Es werden unterschiedliche Anordnungen der Leistungshalbleiter und Variationen in der Ansteuerung mit Simulationen und Messungen untersucht. Messergebnisse zeigen, dass der Störstrom um 20 dB reduziert werden kann.

Development of a Six-Phase Traction Inverter for Common-Mode Cancellation

This study deals with the development of a six-phase traction inverter, which offers two advantages for an electric drive train. The inverter fulfils the redundancy requirement for self driving cars and it offers the possibility of minimizing the common-mode disturbance by using EMC-optimized control algorithm. The inverse and simultaneous switching of two power MOSFETs of different half-bridges yield to a phase shift of 180° for the resulting disturbance currents. For the prototype developed in this work, measurements show a reduction of the common-mode noise by 20 dB. In addition, different arrangements of the power semiconductors and variations in the control are investigated in simulations and measurement.

Blank, Albert

Lösungsvarianten für die Resonanzregelung in MS-Netzen mit hohem Verkabelungsgrad

Alternative Solutions for Resonance Control in MV Grids with a high Grade of Cabling

Buchner, Matthias

Bestimmung der Betriebsweise eines Speichers zur Netzentlastung auf Basis Linearer Optimierung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration eines Speichers in ein Stromnetz durch Lineare Optimierung mit einer anschließenden Potentialbewertung, bis zu welchem Grad der Netzausbau durch diese Maßnahme reduziert werden kann. Hierfür wurde anhand eines Modellnetzes eine Methode zur Bestimmung der benötigten Speichergröße und des Speicherfahrplans ermittelt. Diese Methode wurde auf ein reales Netz übertragen, an dem die Funktionalität überprüft und das Potential des Speichers zur Netzausbaureduzierung untersucht wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass die Fähigkeit zur Netzentlastung und dem damit verbunden Potenzial zur Netzausbaureduzierung in hohem Maße vom Speicherstandort und der installierten Speicherleistung abhängt.

Determination of the Operating Mode of a Storage System for Network Relief based on linear Optimization

This master thesis aims the integration of storage systems into a power grid using linear optimization. The potential to reduce grid expansions using storage systems is assessed. For this purpose, a method for determining the required storage size and storage schedule is developed using a simplified grid model. This method was transferred to a real grid model, where the functionality was checked and the potential to reduce grid expansions by means of storage systems was investigated. It has been shown that the ability of storage systems to reduce grid expansions depends mostly on the location and storage capacity.

Bühler, Laura

Untersuchung des dielektrischen Verhaltens natürlicher Esterflüssigkeit und Mineralöls bei Tieftemperaturen

In dieser Arbeit wird das dielektrische Verhalten bei Tieftemperaturen bis -10°C für den natürlichen Ester Envirotemp FR3 untersucht und mit einem herkömmlichen Isoliermedium, dem des Mineralöls Nytro Lyra X, verglichen. Es wurden die Temperatur- sowie die Feldstärkeabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit beider Öle auch bei Tieftemperaturen festgestellt. Der Verlustfaktor ist ebenfalls temperaturabhängig. Elektrische Leitfähigkeit sowie der Verlustfaktor von FR3 sind höher als von Nytro Lyra X. Die Durchschlagsfestigkeit sinkt für beide Öle mit steigendem Elektrodenabstand und mit Zunahme des Messvolumens. Die Durchschlagsspannung ist für beide Öle bei Temperaturen über der Raumtemperatur vergleichbar. Für niedrige Temperaturen ist die Durchschlagsspannung von FR3 höher.

Investigation of Dielectric Behavior of Natural Ester Fluid and Mineral Oil at Sub-Ambient Temperature

This thesis investigates the dielectric behavior of the natural ester fluid Envirotemp FR3 and of the insulating liquid Nytro Lyra X at sub-ambient temperatures (up to -10°C). The temperature and electric field dependency of the electrical conductivity are determined using mentioned insulating liquids at sub-ambient temperatures. The loss factor is also depending on the temperature. The electrical conductivity as well as the loss factor of FR3 are higher than of Lyra X. The dielectric strength decreases for both liquids when increasing the gap and measuring volume. The breakdown voltage is comparable at temperatures above room temperature, for low temperatures the breakdown voltage of FR3 is higher.

Burkard, Björn Jonas

Stochastische Modellierung von Leistungszeitreihen an Umspannwerken in der Netzplanung

In dieser Arbeit werden drei Ansätze entwickelt, die zur Lastreihengenerierung für Umspannwerke im Hochspannungsnetz in der Netzplanung eingesetzt werden können. Im ersten Ansatz wird mithilfe von Messdaten anderer Umspannwerke ein neues Umspannwerk modelliert. Dahingegen sind die beiden anderen Ansätze nach dem „Bottom-Up“-Prinzip aufgebaut. Mit Standardlastprofilen und gemessenen Lastgängen wird untersucht, ob durch eine geeignete Aggregation ein Lastprofil des Umspannwerkes erzeugt werden kann. Mithilfe von Netzberechnungen wurden die Auswirkungen auf die maximalen Leitungsauslastungen analysiert. Dabei hat sich gezeigt, dass mit allen Modellen lediglich geringe Abweichungen in den Leitungsauslastungen auftreten.

Stochastic Modeling of Substation Load Profiles for Grid Planning

In this master thesis three different approaches for the modelling of substation loads in grid planning are developed. The first approach uses measured load data of other substations to provide load time series for new substations. In contrast to this, the other approaches are developed as bottom-up methods. Standard load profiles and

measured load profiles are aggregated to form synthetic load profiles for new substations. The different approaches are evaluated using power flow calculations and the differences in the line loadings are analyzed. Results show that all approaches cause only a little difference in the maximum line loading.

Eitler, Moritz

Verhaltensbasiertes MOSFET Modell für transiente EMV Simulationen

Die folgende Masterarbeit befasst sich mit der Modellierung von MOSFETs zur Simulation von leitungsgebundenen Störungen eines KFZ-Pulswechselrichters. Hierzu wird ein Siliciumcarbid MOSFET mit 1.2 kV Sperrspannung, genauer das Modell SCT2080KE der Firma RohmTM untersucht. Mittels statischen Messungen werden die parasitären Halbleiterkapazitäten sowie der charakteristischen Strom-Spannungs-Kennlinien des MOSFETs ermittelt. Basierend auf diesen Messdaten wird ein Simulationsmodell entwickelt das die Schaltflanken des MOSFETs im Doppelpulstest und im 3-phasigen Betrieb des Pulswechselrichters sehr gut nachbildet. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die parasitären Kapazitäten sowie der Sättigungsbereich des MOSFETs für die Simulation von leitungsgebundenen Störungen von großer Bedeutung sind, während das Diodenverhalten sowie der quadratische Bereich keinen Einfluss haben

Behavioural MOSFET Model for Transient EMC Simulations

The following master thesis investigates a MOSFET model used in time-domain EMI simulation for conducted emissions caused by an automotive inverter. The device under test is the SCT2080KE model produced by RohmTM, a silicon carbide MOSFET with 1.2 kV breakdown voltage. First, static measurements of the voltage depending semiconductor capacities and the output characteristics of the device are measured. Based on these measurements a simulation model is developed which accurately reproduces the switching behavior of the MOSFET in the double-pulse test as well as in the normal operation of the inverter. A sensitivity analysis shows that a good model requires accurate modeling of the voltage depending capacities and the saturation area of the IV-curves, while the behavior of the body diode and the square area of the IV-curves can be neglected.

Engelbrecht, Sophia

Spannungsregelung in Multiterminal-HGÜ-Netzen

Der Netzentwicklungsplan schlägt HGÜ-Verbindungen vor, um Leistung aus Erneuerbaren Energien aus dem Norden in den Süden Deutschlands zu transportieren. In Zukunft besteht die Möglichkeit zum Zusammenschluss zu einem DC-Netz. Diese Arbeit untersucht die Spannungsregelung von DC-Netzen, um diese stabil zu betreiben. Zur Regelung der Spannung in einem erlaubten Spannungsband werden verschiedene Regelungsarten vorgestellt. Diese Regelungsarten umfassen unter anderem die Margin- und die Droop-Regelung. Für die Parametrisierung dieser Regelungen werden verschiedene Möglichkeiten untersucht. Für die Droop-Regelung wird ein Optimierungsverfahren beschrieben. Ein DC-Netzmodell wurde in Simulink auf-

gebaut. Verschiedene Simulationen zeigen die Funktionsweise der Regler in diesem DC-Testnetz.

Voltage Control in Multiterminal HVDC Grids

The “Netzentwicklungsplan” proposes HVDC connections transporting power from renewable energies from North to South Germany. In the future, it will be possible to merge them into a DC grid. This paper explores the voltage control for a stable operation of the grid. To control the DC voltage without leaving an allowed voltage range different types of control will be presented. This control types include margin control and droop control. Diverse possibilities of parameterizing are analyzed. An optimization method for droop control is described. A DC grid model was constructed in Simulink. Simulations show the basic operation of the controller in this DC test grid.

Früh, Heiner

Entwicklung einer Simulationsumgebung zur Analyse von Spannungshaltungsmaßnahmen in der Niederspannung

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen verschiedener innovativer Methoden zur Spannungshaltung im Niederspannungsnetz miteinander verglichen. Um eine detaillierte Bewertung zu ermöglichen, werden probabilistische Ansätze unter Berücksichtigung von Prognoseszenarien mit sehr hohen Erzeugungsleistungen und mittels zeitreihenbasierten, probabilistischen Netzplanungsansätzen ausgewertet. Zusätzlich wird die Berechnungszeit durch Einsatz einer linearisierten Lastflussberechnungsmethodik optimiert. Eine Fehlerabschätzung dieser Linearisierung wird ebenfalls durchgeführt. Ein besonderer Fokus der Arbeit liegt beim modularen Aufbau der Simulationsumgebung, welcher eine gute Erweiterbarkeit für zukünftige Arbeiten bietet. Die Ergebnisse zeigen, dass regelbare Ortsnetztransformatoren bei richtiger Dimensionierung die Spannungsprobleme im Niederspannungsnetz vollständig lösen können. Im betrachteten Netzmodell werden die Leitungsbelastungen unter diesen Umständen zur kritischen Netzgröße.

Development of a Simulation Environment for the Analysis of Voltage Control Mechanisms in Low Voltage Grids

This master thesis presents a comparison of different innovative voltage control mechanisms for low voltage grids. Probabilistic methods are used for a detailed analysis of the voltage control mechanisms. Future scenarios with high penetration of renewable energy sources are considered. Additionally, the calculation time is optimized by using a linearization of the power flow equations. A particular emphasis is placed on the modular design of the simulation environment. Results show that the tap changer of the transformer is the most efficient solution for voltage control, when dimensioned correctly. Under these circumstances, line loading becomes the new critical value for the network.

Jandt, Anika

Modellierung und Regelung von Diesel-Synchrongeneratoren in Mikronetzen

In der Arbeit werden Modelle von Diesel-Synchrongeneratoren inklusive ihrer Regelung entwickelt, um das transiente Verhalten des Generators im Mikronetz zu analysieren. Dazu werden zunächst die generelle Modellbildung der einzelnen Komponenten vorgestellt und Kriterien für die Spannungs- und Drehzahlreglerauslegung erörtert. Zur Parametrierung der Regler kommen zwei unterschiedliche Werkzeuge von Matlab zum Einsatz: Sisotool und Response Optimization. Die Implementierung verschiedener Dieselgenerator-Modelle kleiner Leistungsklasse auf Niederspannungsebene im alleinstehenden Betrieb mittels Matlab/Simulink ist die Grundlage für die Analyse des transienten Verhaltens bei Lastsprüngen. Simulationen des Generators im Verbund mit weiteren Erzeugern wie beispielsweise Wechselrichter im Mikronetz zeigen, dass sich die Spannungs- und Frequenzhaltung dadurch deutlich verbessert.

Modeling and Control of Diesel Synchronous Generators in Microgrids

In this thesis, models of diesel synchronous generators including their control system are developed with the objective of analyzing the transient response of such generators in microgrids. First we investigate single components and determine criteria for the voltage and speed control system. In order to establish the optimal parameter setting of the controllers, two different tools from Matlab are used: sisotool and response optimization. The basis for the analysis of transient responses at load changes will be the implementation of small standalone diesel generators at low voltage level using Matlab/Simulink. Simulations of the diesel generator in combination with additional distributed generators such as inverters show improvements in the stability of both voltage and frequency.

Kaufmann, Franz

Entwicklung eines dreiphasigen Zustandsschätzers mit und ohne Betrachtung des Neutralleiters in Python

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden zwei Algorithmen für eine dreiphasige Zustandsschätzung vorgestellt. Dabei werden im zweiten Algorithmus Äquivalenzmessungen verwendet, um eine Berücksichtigung des Neutralleiters zu ermöglichen. Zu Beginn dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur dreiphasigen Zustandsschätzung und der benötigten dreiphasigen Netzbetriebsmittel geschaffen. Im darauffolgenden Kapitel wird der Aufbau und die Entwicklung dreiphasiger Netzmodelle in Python vorgestellt. Die Netzmodelle orientieren sich dabei an dem verwendeten Format eines für Python bereitgestellten Zusatzpakets. Im Anschluss werden Struktur und Aufbau der beiden Algorithmen vorgestellt und abschließend im letzten Kapitel validiert.

Development of a Three-Phase State Estimator with and without Consideration of the Neutral in Python

In the context of this master thesis two algorithms of a threephase state-estimation shall be presented. These algorithms will be implemented. Furthermore equivalent measurements will be used in the second algorithm in order to consider the neutral

conductor. In the first section of this master thesis the theoretical basics of three-phase state-estimation shall be presented as well as the required equipment. After that the format and development of the three-phase grid model will be presented. At the end the structure and format of both algorithms shall be presented, as well as a validation of both algorithms.

Kohlmann, Fabian

Integration des Netzampelkonzepts in die Verteilnetzplanung für Mittelspannungsnetze

Neue Ansätze in der Verteilnetzplanung sollen dazu beitragen, erneuerbare Energien künftig effizienter in die Energieversorgung zu integrieren. Durch die Berücksichtigung von Marktmechanismen bereits bei der Netzplanung soll der notwendige Netzausbau im Vergleich zu konventionellen Planungsmethoden auf ein volkswirtschaftlich finanzierbares Maß reduziert und eine Überdimensionierung der Netze vermieden werden. Die Integration von Marktmechanismen erfolgt in der Netzplanung durch Anwendung des Netzampelkonzepts des BDEW. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll die Betriebsweise eines elektrischen Verteilnetzes der Mittelspannungsebene anhand von Netzdaten einer Untersuchungsregion unter Berücksichtigung der Netzampellogik in einer Simulationsumgebung nachgebildet werden. Zudem sollen Auswirkungen auf den Planungsprozess für Verteilnetze analysiert und die durch Marktmechanismen generierten Effizienzpotentiale identifiziert werden.

Integration of Grid Traffic Lights Concept into Medium Voltage Network Expansion Planning

New approaches in the planning of distribution grids are supposed to help integrate renewable energies more efficiently. The costs for necessary grid expansions should see a reduction if market mechanisms are considered. Therefore, the grid traffic light concept of the BDEW is used. During the course of this work, the mode of operation of an electric distribution grid of medium voltage shall be simulated by using the network data of a selected region of study and by considering grid traffic light logic. Additionally, impacts on the planning process of distribution networks should be analyzed and the efficiency potential generated through market mechanisms should be identified.

Ma, Yan

Untersuchung der Gasentstehung bei Blitzentladungen in Transformatorisolierrflüssigkeiten bei variabler Temperatur

In speziellen Anwendungen wie beispielsweise Windparkplattformen werden Transformatoren stark belastet, woraus sich höhere Temperaturen des Isoliersystems als im klassischen Falle ergeben. Wegen des begrenzten Flammpunkts von Mineralöl werden Ester als Isolieröle in Hochtemperaturtransformatoren eingesetzt. Für den Betrieb des Transformators ist es wichtig, das Gasungsverhalten der Ester unter Berücksichtigung beeinflussender und auslösender Faktoren für eine korrekte Zustandsbeurteilung besser abzuschätzen. In dieser Masterarbeit wird die Gasentstehung bei Blitzentladungen in natürlichem Ester und auch als Vergleich in Mineralöl

bei variabler Temperatur untersucht. Die ersten Durchschlagsversuche werden bei 60 °C und 80 °C unter einem bestimmten Energieniveau durchgeführt.

Investigation of Gas Generation during Lightning Discharges in Transformer Insulation Fluids at Variable Temperature

For special applications such as wind farm platforms, transformers are subjected to heavy loads resulting in higher temperatures of the insulation system than in the usual case. Because of the limits of the flame point of mineral oil, esters are used as insulating oil in high-temperature transformers. It is important to estimate the gassing behavior of the esters taking into account influencing factors for a correct state evaluation. This thesis investigates the gas generation by lightning discharges in natural esters compared to mineral oil at variable temperatures. First breakdown experiments are conducted at 60 °C and 80 °C at a certain energy level.

Maier, Markus

Automatisierter Vergleich des notwendigen Netzausbaus auf Hochspannungsebene unter Berücksichtigung verschiedener Planungsmethoden mit Spitzenkappung

Automated Comparison of the Grid Enforcement on High Voltage using different Methods of Curtailment of RES

Mayer, David

Einflussfaktoren auf die langfristige Ausbauplanung von Übertragungsnetzen und Auswirkungen auf die zukünftige Netzstruktur eines Übertragungsnetzes Factors influencing the long-term Expansion Planning of Transmission Networks and their Impact on the future Network Structure

Maier, Markus

Automatisierter Vergleich des notwendigen Netzausbaus auf Hochspannungsebene unter Berücksichtigung verschiedener Planungsmethoden mit Spitzenkappung

Um den Netzausbau möglichst wirtschaftlich zu gestalten, dürfen Verteilnetzbetreiber ihren Netzplanungen Spitzenkappung zugrunde legen. Dies erlaubt die Abregelung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen um bis zu 3 Prozent der Jahresenergie. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Spitzenkappungsmethoden entwickelt und untersucht. Simulationen ergeben, dass durch die deutlich aufwendigere dynamische Methode mehr Leitungsüberlastungen vermieden werden können. Im zweiten Teil der Arbeit werden die Auswirkungen der Spitzenkappung auf den Netzausbaubedarf analysiert. Dazu wird eine Methode entwickelt, welche automatisiert aus einem Katalog von Ausbaumaßnahmen diejenigen auswählt, die dazu führen, dass gerade alle Leitungsüberlastungen möglichst kosteneffizient behoben werden. Durch die Berücksichtigung von Spitzenkappung sinkt der Investitionsbedarf für den Netzausbau deutlich.

Automated Comparison of the Grid Enforcement on High Voltage using different Methods of Curtailment of RES

Distribution network operators can base their network planning on curtailments to ensure an economic expansion. This allows curtailing the power of wind turbines and photovoltaics up to 3 % of the annual produced energy. Two different curtailment methods are developed and investigated throughout this master thesis. Simulations show that the more complex dynamic method can avoid more line overloads. Additionally, a method is developed that automatically selects network expansion measures out of a catalog which correct all line overloads as cost-efficient as possible. Curtailment of generation reduces the investment requirements for network expansions significantly.

Miller, Markus

Nachbildung eines elektrischen Strommarktes unter Einbeziehung der Netzstruktur

Die Arbeit beinhaltet den Aufbau eines Strommarktmodells für das Szenario B 2024 des Netzentwicklungsplans 2014 unter Einbeziehung eines vereinfachten Netzes. Das Strommarktmodell soll einen optimalen Kraftwerkseinsatz für das ganze Jahr nach dem Unit-Commitment bestimmen und dabei die Stromgestehungskosten niedrig halten. Hierfür wird das Optimierungsproblem mithilfe des Mixed-Integer-Linear-Programmings implementiert und mit CPLEX gelöst. Zudem ist das Modell erweitert worden, damit die Einhaltung eines bestimmten Speichervolumens der Pumpspeicherwerke, der Betrieb der HGÜ-Strecken, die Initialisierungsleistungen und die leistungsunabhängige Ein- und Ausschaltung der Kraftwerke berücksichtigt werden kann. Abschließend ist das Strommarktmodell getestet und mit den Simulationsergebnissen bewertet worden.

Representation of the Electricity Market including the Network Topology

The work includes building an electricity market model under inclusion of a simplified grid. The electricity market model should determine an optimal power plant utilization for the whole year after the unit commitment and keep thereby the electricity production costs low. Therefore, the optimization problem is implemented with the aid of the mixed-integer-linear-programming and solved with CPLEX. In addition, the model has been extended so that the operation of the HVDC lines, a specific storage volume of the pumped-storage power plants, the initialization power and the power-independent switching off and on of the power stations would be taken into account. Finally, the electricity market model has been tested and evaluated with the simulation results.

Müller, Denis

Entwicklung und Aufbau eines kapazitiven Spannungssensors zur Untersuchung von VFT in GIS

Für die elektromagnetische Störfestigkeit von Schutzsystemen in Schaltanlagen sind vor allem systemeigene Störquellen wie Leistungsschalter und Trennschalter von Bedeutung. Diese erzeugen transiente Vor- und Rückzündungslichtbögen, die kapa-

zitiv auf die elektronischen Schutz- und Steuergeräte einwirken. Die Wahrscheinlichkeit für eine unzulässige Beeinflussung steigt mit der Amplitude und der Spannungsänderungsrate auf der Primärseite. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Messsystem entwickelt, das eine Messung der transienten Spannungsverläufe mit Spitzenspannungen bis 200 kV und einer Bandbreite von 100 MHz ermöglicht. Das System besteht aus einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler und einem Impedanzwandler. Es ermöglicht die Beobachtung der Ausbreitung von Wanderwellen in der Schaltanlage und die Evaluation von Dämpfungsmaßnahmen.

Design of a Capacitive Voltage Sensor for the Investigation of VFT in GIS

For the electromagnetic immunity in switchgear, circuit breakers and disconnectors are the most important sources of disturbances. These generate transient pre-ignition and restriking arcs which transfer (capacitively) to the secondary equipment and may cause interference to the protection functions. The probability of interference increases with the amplitude and voltage gradient on the primary side. In the context of this work a measuring system was developed which allows a measurement of the transient voltage curves with peak voltages up to 200 kV with bandwidth up to 100 MHz. The system consists of a damped capacitive voltage divider and an impedance converter. It allows the observation of the propagation of traveling waves in the substation and the evaluation of mitigation measures.

Passow, Daniel

Optimierung einer phasensynchronen Ansteuerung für einen Vakuum-Leistungsschalter.

Bei Schalthandlungen an Vakuumleistungsschaltern können transiente Vor- und Rückzündungslichtbögen auftreten, die (kapazitiv) auf die Sekundärtechnik einkoppeln und potentiell z.B. die Funktion der elektronischen Schutz- und Kontrolleinheiten stören. Das Auftreten dieser Zündphänomene ist von der Phasenlage von Strom bzw. Spannung zum Zeitpunkt der Schalthandlung abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher für Laboruntersuchungen eine Schalteransteuerung entwickelt, die eine Synchronisation der Kontaktbewegung auf die Phasenlage der Primärgröße erlaubt. Dadurch können die Auswirkungen von wechselnden Lasten oder von Filterbeschaltung auf die erzeugten Störgrößen untersucht werden.

Optimization of a Phase-Synchronous Control for a Vacuum Circuit Breaker

During switching operations on vacuum circuit breakers, transient pre-ignition and restriking arcs may occur which transfer (capacitively) to the secondary equipment and may cause interference to the protection functions. The occurrence of these ignition phenomena depends on the phase angle of current or voltage at the time of switching operation. In this work, a circuit breaker control unit was developed which allows a synchronization of the contact movement to the phase angle of the primary voltage and current. This allows the effects of changing loads or filter circuitry to be examined for the generated disturbances.

Salzer, Martin

Analyse historischer Messdaten als Basis für Pseudomessdaten in der Zustandsschätzung

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten zur Bereitstellung von Pseudomesswerten zur Verwendung in Zustandsschätzungen ermittelt und verglichen. Bei Pseudomesswerten handelt es sich um Werte die die vorhandenen Messwerte soweit ergänzen, dass das zu untersuchende System durch die Methode der Zustandsschätzung beobachtbar wird. Anhand des Vergleiches der Pseudomesswerte mit Messwerten wird beurteilt, wie gut die Pseudomesswerte diese in ihrem Charakter nachbilden. Das Wissen über die Güte der Nachbildung ist nötig, damit die korrekte Gewichtung der Pseudomesswerte bei der Zustandsschätzung gewählt werden kann.

Analysis of Historical Measurement Data as Basis for Pseudo Measurements in State Estimation

In this thesis possibilities for the provision of pseudo measurements for the usage in state estimation are established and compared. Pseudo measurements are values that are added to the measured data to accomplish the observability by the method of state estimation. By comparing the pseudo measurements with measurements an evaluation of the goodness of replication of the measured values characteristics is done. The knowledge about the goodness of replication is needed for choosing the right weighting for the pseudo measurements in the method of state estimation.

Schulte, Benedikt

Entwicklung eines Biogasanlagenmodells für Netzwiederaufbausimulationen

In dieser Arbeit wird ein Biogasanlagenmodell in der Simulinkumgebung entwickelt, um zu überprüfen, ob ein Netzwiederaufbau zukünftig auch aus dem Niederspannungsnetz durchgeführt werden kann. Das erstellte Modell, bestehend aus einem BHKW und Synchrongeneratormodell, wird zuerst nach der aktuellen VDE Netzregelung implementiert. Verschiedene Netzfehler sollen dabei helfen zu zeigen, welche technischen Änderungsmaßnahmen notwendig sind, um zukünftig einen Inselnetzbetrieb aufrecht zu erhalten. Der Inselnetzbetrieb ist die Grundvoraussetzung für einen anschließenden Netzwiederaufbau. Es zeigte sich, dass der Inselnetzbetrieb und ein Netzwiederaufbau mit einer Biogasanlage möglich sind. Die Hauptschwierigkeit stellt allerdings der Beginn der Inselnetzbildung dar, wenn eine zu große Einspeisung ins Mittelspannungsnetz vorhanden ist. Hierfür müsste die Erzeugungsleistung der Biogasanlage gedrosselt werden.

Development of a Model of a Biogas Power Plant for Grid Restoration Simulations

In this project a model of a biogas power plant is developed, to simulate a grid restoration from a low voltage grids. The model consists of an engine and a synchronous generator model and is firstly simulated with the VDE grid standards. The results of different fault responses are used to find out, which changes in the grid control are necessary, to make the grid stand alone able. The stand alone ability is the fundamental property for grid restorations. The results after the control changes showed, that a stand alone ability and a grid restorations from a low voltage grid is possible.

However the biggest problem are the transients which are occur at the beginning of the stand alone ability caused by a too high medium voltage grid feed. This problem can be solved by throttling the biogas power plant.

Shao, Zhongsheng

Untersuchung der Ausbreitung von Spaltgasen in natürlichen Estern

Während des Betriebs ölgefüllter Transformatoren treten verschiedene sich im Öl lösende Fehlergase auf. Fehlergassensoren können verwendet werden, um die Gasentstehung zu überwachen. Diese Sensoren sollten an einer Stelle montiert sein, an welcher möglichst aufschlussreich Veränderungen im Gasgehalt gemessen werden können. Hierzu müssen verschiedene Einflüsse auf die Entstehung und Verteilung der Fehlergase berücksichtigt werden. Diese Arbeit untersucht die natürliche Verteilung und Ausbreitungstendenz verschiedener Fehlergase und vergleicht die Ergebnisse der Einspeisung und Messung von Fehlergasen an verschiedenen Probestellen im Tank.

Investigation of the Distribution and Spread Tendency of Fault Gases in Natural Ester Liquids

During the operation of oil-filled transformers, different fault gases dissolved in the transformer oil can emerge. Fault gas sensors can be used to monitor gas generation and should be located in a suitable place where the measuring data represents spreading of fault gas in the tank correctly and exactly. Different mechanisms influencing spreading of gases need to be considered. This work aims to study the natural distribution and spread tendency of fault gases generated in oil by comparing the results of different extraction points and different gases.

Straub, Timo

Automatisierter Betrieb eines VSC HGÜ Multiterminalnetzes

Diese Arbeit verfolgt das Ziel eine automatisierte Regelung für ein multiterminales HGÜ-Netz zu entwickeln, die auf den Spannungswinkeln im AC-Netz basiert. Das HGÜ-Netz soll abhängig der aktuellen Netzsituation das AC-Netz entlasten oder die Gesamtverluste minimieren. Mit zuvor errechneten K-Faktoren lassen sich die optimalen Leistungswerte für das HGÜ-Netz abhängig von den Spannungswinkeln an den Konverterstationen berechnen und so das AC-Netz unterstützen. Der Algorithmus ist im Regionenmodell für Deutschland und einem vermaschten HGÜ-Overlay-Netz in einer Jahressimulation angewendet worden. Durchweg findet eine deutliche Entlastung aller AC-Leitungen statt und die Auslastungen der AC-Leitungen sind nach der Optimierung in einem unkritischen Betriebspunkt.

Automated Operation of a Multiterminal HVDC VSC-Grid

The aim of this work is to develop an automated control system for a multiterminal HVDC VSC-grid, which is based on the voltage angle differences. The HVDC-grid should unload the AC lines or reduce the total losses of the system depending on the current network situation. The optimum HVDC power values to support the AC grid can be calculated depending on previously calculated K-factors and the voltage

angles. The algorithm is tested in the regional model for Germany and a meshed overlay HVDC-network in a simulation of a year. At all times, a significant relief of all AC lines takes place and the loadings of all AC lines are in a suitable operating area after the optimization

Streubel, Tim

„Bad Data“-Detektion und Identifikation

In dieser Arbeit wird die Implementierung eines „Bad Data“-Detektions- und Identifikationsüberwachungssystem für einen Verteilnetz-Zustandsschätzer beschrieben. Das Ziel des Überwachungssystems ist die kontinuierliche Analyse, der vom Zustandsschätzer verarbeiteten Messwerte und die Detektion, Identifikation sowie Beseitigung erkannter Messfehler. Die Präsenz von Messfehlern wird dabei durch den Chi-Quadrat-Test ermittelt. Falls die Präsenz von fehlerbehaftete Messwerten festgestellt wird, werden die „Bad Data“-Identifikationsalgorithmen initialisiert, um die Messfehler zu lokalisieren. Neben den konventionellen „Bad Data“-Detektions- und Identifikations Algorithmen wird eine neue Methode vorgestellt, die Messwert- und Messfehlerverteilungen überwacht. Dieser Ansatz wird mithilfe eines künstlichen Neuronalen Netzwerks, das als Klassifizierer agiert, realisiert.

Bad Data Detection and Identification

In this thesis the implementation procedure of a bad data detection and identification monitoring system for a distribution level state estimator is described. The objective of the system is to continuously analyze the processed measurements of the state estimator in order to detect, identify and remove erroneous measurements. The presence of bad data is detected by the Chi Squared Distribution Test. In case bad data is detected, the bad data identification algorithms are initialized to locate and remove the revealed faulty measurements. Aside from the conventional bad data detection and identification methods, a new approach of monitoring the measurements and measurement residuals distribution by an artificial neural network is implemented.

Stütze, Daniel

Analyse von Verfahren zur dynamischen Spannungsregelung von stromeinprägenden VSC-Umrichtern

Analysis of Methods for the Dynamic Voltage Support of Current Controlled VSC Converters

Wenger, Philipp

Partikelbewegung bei koaxialer Elektrodenanordnung in SF₆ unter hoher Gleichspannung

In dieser Masterarbeit werden Bewegungen elektrisch leitfähiger, frei beweglicher Partikel in SF₆-isolierten koaxialen Elektrodenanordnungen unter Gleichspannungsbeanspruchung untersucht. Hierfür wird ein geeigneter Messaufbau entwickelt. Anhand von UHF und akustischen Messungen können die verschiedenen Bewegungs-

formen charakterisiert werden. Dazu wird das akustische Signal, das die Partikel bei Kontakt mit der Kapselung erzeugt, mit einem Piezo-Körperschallsensor erfasst. Parallel wird das UHF-Signal der Teilentladungen, die durch die lokale Feldstärkeerhöhung an den Partikelspitzen entstehen, aufgezeichnet. Zusätzlich stützen sich die Untersuchungen auf Auswertungen einer Videoaufzeichnung. Die Untersuchungen zeigen, wie sich verschiedene Sprungbewegungen zwischen Innenleiter und Kapselung oder Sprünge an einer Elektrode sowie Firefly bzw. Schweben anhand der Signalmuster unterscheiden.

Movement of Particles in Coaxial Electrode Arrangement in SF₆ at high DC Voltage

This master thesis determines with the movement of free, conducting particles in SF₆-insulated coaxial electrodes at HVDC conditions. For this purpose, a proper test setup is developed. Acceleration- and UHF-sensors are mounted on the enclosure to record particle signaling movement and partial discharge signals (PD) to determine different types of movement on the basis of acoustic and PD pattern. Additionally, the evaluation relies on video records. Movement pattern such as bouncing back and forth between the electrodes, bouncing on just one electrode, as well as firefly and hovering are characterized due to the combination of the parameters.

Wolpert, Adrian

Untersuchung und Klassifikation von TE-Zeitsignalen im UHF-Bereich

Teilentladungen in Transformatoren führen zu fortschreitender Schädigung des Isolationssystems. Die Messung im ultrahochfrequenten Bereich (UHF) stellt eine Methode dar, diese Teilentladungen zu detektieren. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich und der Klassifizierung von unterschiedlichen Teilentladungsimpulsen im UHF-Bereich. In verschiedenen Messaufbauten wurden Teilentladungen künstlich erzeugt. Die dabei abgestrahlten Signale wurden mittels eines UHF-Sensors gemessen. Ziel war es, die Unterschiede der differierenden Teilentladungsursachen anhand des UHF-Signals zu separieren. Anschließend ist eine Klassifizierung von unterschiedlichen Teilentladungsquellen anhand eines erfassten UHF-Signals möglich. Durch eine Zerlegung in ihre Frequenzanteile können einzelne Signale verglichen und ihrer TE-Quelle zugeordnet werden.

Investigation and Classification of PD-Time Signals in UHF Range

Partial discharges in transformers result in a proceeding deterioration of the insulation system. The measurement in the ultrahigh frequency range (UHF) is a possible method of detecting these discharges. This master thesis deals with the comparison and classification of different partial discharge impulses. In different test setups, partial discharges have been generated artificially. The signals were measured via UHF-sensors. The goal is to represent the differences of various partial discharges on the basis of UHF signals. Afterwards a classification of different partial discharge sources with the help of UHF signals is possible. Based on an analysis of the frequency spectrum, the signals can be compared and assigned to their sources.

Zhang, Chi

Untersuchung von Vorentladungen in alternativen Transformatorisolierrflüssigkeiten

Natürliche Ester werden zunehmend in Transformatoren eingesetzt. In dieser Arbeit werden Vorentladungsphänomene in natürlichem Ester und Mineralöl bei Blitzstoßspannung untersucht. Nynas Nytro Lyra X und Envirotemp FR3 werden als Isoliermedien eingesetzt. Alle Versuche werden mit einer relativen Ölfeuchtigkeit unter 12 % durchgeführt. Das Messverfahren basiert auf der ASTM D3300. Über Durchschlagsversuche werden die Durchschlagsverhalten der Isolationsflüssigkeiten bei verschiedenen Feld- und Elektrodenkonfigurationen verglichen. Bei Variation der angelegten Spannung werden verschiedene „Ausbreitungs-Modes“ beobachtet, auf deren Grundlage Korrelationen zwischen Ladung und Streamergeschwindigkeit hergestellt werden.

Investigation of Pre-Breakdown Phenomena in alternative Transformer Insulating Liquids

This thesis mainly discusses the streamer phenomena in isolation liquids under impulse voltage. Natural ester liquids are more and more applied in transformers. Lyra X and FR3 are used in these experiments with a relative humidity below 12% and with the measuring procedure based on ASTM D3300. Breakdown behavior of the two isolation liquids is compared under different homogeneities of the electrical field and electrode configurations. According to the applied voltage, transitions between modes will be observed and correlations will be established on the basis of charge and streamer velocity.

Ziegler, Wilhelm

Implementierung eines neuronalen Netzes für die Klassifikation von Teilentladungsmustern

Aufgrund der volatilen Natur von Teilentladungen sollte der Zustand eines Betriebsmittels und seiner Isolation permanent überwacht werden. Eine Möglichkeit ist, die Daten als Phasenaufgelöste Teilentladungsmuster (engl. PRPD Pattern) darzustellen, die anschließend von Experten interpretiert werden können. Für eine permanente Überwachung ist es nötig, solche TE-Muster automatisiert auszuwerten. Dazu wird in dieser Arbeit ein neuronales Netz zur Mustererkennung implementiert. Das entwickelte System erreicht bei Labordaten eine Erkennungsrate von 100% bei einer TE-Quelle und 30% bei zwei überlagerten TE-Quellen. Das System kann Daten in Echtzeit klassifizieren und eignet sich für eine permanente Überwachung von Betriebsmitteln.

Implementation of a Neural Network for the Classification of Partial Discharge Patterns

Due to the volatile nature of partial discharges, the state of an energy engineering equipment should permanently be monitored. One possibility is to display the data as phase-resolved partial discharge patterns (PRPD patterns) which can be interpreted by experts. For permanent monitoring, it is necessary to automatically evaluate such PRDP patterns. To this end, a neural network is implemented for the recognition of

PD patterns. The developed system achieves a detection rate of 100% for laboratory data with one PD source and 30% for two PD sources. The system can be used to classify data in real time and is well suited for permanent monitoring of energy engineering equipment.

Zoll, Jens

Erkennung und Korrektur von Fehlern in Lastzeitreihen durch Mustererkennung

Detection and Correction of Errors in Load Time Series by Pattern Recognition

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 1.11.2016 bis 31.10.2017:

NAME	THEMA
Ben Khalifa, Farah	Untersuchung des Kriechdurchschlags in alternativen Öl-Papier-Isolierungen. Investigation of Creep Breakdown in alternative Liquid-Solid-Insulation.
Bender, Marcus (*)	Analyse und Bewertung von Flexibilitätsoptionen und deren systemtechnische Einbindung im deutschen Energiesystem. Analysis and Assessment of Flexibility Options and their Systematic Integration into the German Energy System.
Benz, Jan (*)	Entwurf eines Simulationsmodells für leitungsgebundene Emissionen eines DC/DC-Wandlers. Development of a Simulation Model for Conducted Emissions caused by a DC/DC-Converter.
Bertelmann, Jonas (*)	Entwicklung eines Hochvolt VHF/UHF Impulsgenerators. Development of a High Voltage VHF/UHF Pulse Generator
Bobka, Silke (*)	Evaluation des Einsatzes einer rollenübergreifenden Speichernutzung im Niederspannungsnetz. Evaluation of Role Comprehensive Storage Usage in Low Voltage Grids.
Bühler, Laura	Untersuchung des dielektrischen Verhaltens natürlicher Esterflüssigkeit und Mineralöls bei Tieftemperaturen. Investigation of dielectric Behavior of Natural Ester Fluid and Mineral Oil at sub-ambient Temperature.
Cui, Yuchen (*)	Kurzschlussströme in Netzen mit hohem Anteil dezentraler Erzeuger. Short-Circuit Currents in Power Systems with high Share of Distributed Generation.
Dahlke, Chris (*)	Bewertung der Auslegung von Batterie-Pufferspeichern in Abhängigkeit des Nutzungsverhaltens einer Ladestation mit limitiertem Netzanschluss. Evaluation of the Design of Battery Storage Systems as a function of the Usage Behavior of a Charging Station with limited Grid Connection.

NAME	THEMA
Deß, Tobias (*)	Entwicklung eines Prototyps zur Berechnung der Freigabequoten zur Erprobung eines Netzampelkonzepts. Development of a Prototype for the Calculation of the Release Rates for Testing a Network Traffic Concept.
Dimitrov, Momchil	Entwicklung und Optimierung eines TE-Monitoringsystems. Development and Optimization of a Partial Discharge Monitoring System.
Ehmann, Leopold (*)	Aufbau und Validierung von Simulationsmodellen für Flexible AC Transmission Systems (FACTS). Preparing and Validation of the Simulation Models for Flexible AC Transmission Systems (FACTS).
Exner, Carmen (*)	Einfluss von Speichersystemen auf den Netzausbau im Niederspannungsnetz. Effects of Storage Systems to Grid Expansion in Low Voltage Grids.
Fang, Yuan (*)	Untersuchungen zum Einfluss von Partikeln auf die elektrische Leitfähigkeit der Isolierflüssigkeiten. Influence of Particle Content of Specimens on Conductivity of Insulating Liquids.
Fischer, Markus (*)	Entwicklung und Validierung eines Transientenrekorders für für Impulsprüfsysteme. Development and Validaton of a transient Recorder for Impulse Test Systems.
Friedmann, Tobias (*)	Blitzstoßuntersuchung an einem Transformatormodell. Lightning Impulse Study using a Transformer Model.
Friedsam, Benjamin (*)	Modellierung einer Erdschlusslöschspule auf Basis des Virtual-Air-Gap-Effekts. Modelling of a Petersen coil using the Virtual-Air-Gap Effect.
Gädke, Patrick (*)	Vergleich von iterativen und linearisierten probabilistischen Lastflussmethoden. Comparison of iterative and linearized probabilistic Power Flow.
Haag, Marvin (*)	Potentialanalyse für den Einsatz von MS/NS-Transformatoren mit natürlichem Esteröl. Use of natural Ester Liquid in Distribution Transformers.
Heider, Anya (*)	Qualitative und quantitative Bewertung der Flexibilität von Übertragungsnetzen. Qualitative and quantitative Assessment of Power System Flexibility.
Hu, Xiaoqi (*)	Entwicklung eines PV-Anlagenmodells für Transienten- und Netzwiederaufbau-Simulationen im Niederspannungsnetz. Developing a Model of a PV-Module for Transients and Grid Restoration Simulations in Low Voltage Grids.
Huang, Peng (*)	Implementierung unterschiedlicher Lernverfahren für die Klassifikation von TE-Mustern. Implementation of different learning Algorithms for Classification of PD-pattern.

NAME	THEMA
Hühn, Nina (*)	Modellierung eines Phasenschiebertransformators zur simulationsbasierten Prüfung eines Differentialschutzrelais. Model Development of a Phase-Shift Transformer for a Differential Current Relay Test based on Simulations.
John, Christoph (*)	Untersuchungen zur Notwendigkeit redundanter Sammelschienendifferenzialschutzsysteme in Umspannwerken. Studying the Need for redundant Busbar Differential Protection Systems in Substations.
Kaiser, Nils (*)	Anwendung von Speichertechnologien zur Netzausbaureduzierung im Hochspannungsnetz. Application of Storage Technologies for Reduction of Grid Reinforcement in Hoch Voltage Grids.
Klößner, Maximilian	Vergleich von Isolationsverstärkern für die Konstruktion eines einphasigen Spannungsqualitätsmessgerätes. Comparison of Isolation Amplifiers for the Construction of a Single Phase Power Quality Measurement Device.
Kramer, Mathias (*)	Automatisierte Bestimmung von Koronaeinsetz- und Aussetzspannungen fester Störspitzen auf Erdseite in SF6. Automated Measurement of Corona Inception and Extinction of LV Protrusions in SF6.
Kruglov, Aleksei (*)	Modellierung und Regelung von Wechselrichtern. Modeling and Control of Inverters.
Ledri, Matteo (*)	Parametrische Filter-Simulation von Gleichtaktdrosseln. Parametric Filter Simulation of Common-Mode Chokes.
Löffler, Pirmin	Entwicklung und Aufbau eines Epsteinrahmens zur Messung magnetischer Eigenschaften bei Gleichstrombeeinflussung. Development and Construction of an Epstein Frame for Measuring Magnetic Properties with DC Influence.
Martens, Yannik (*)	Simulation von Benchmark-Fällen zur Unterstützung der Überarbeitung der britischen Richtlinie zur Kurzschlussberechnung G74. Simulation of Benchmark Cases for the Revision of the British Guideline G74 for the Calculation of Short-Circuit Currents.
Mei, Man (*)	Studie über das Ölleitfähigkeitsverhalten bei Beanspruchung mit Gleich- und Wechselspannung. Investigation on the Correlations between AC and DC Conductivity of Insulating Liquid.
Meyer, Wendelin (*)	Eingangsdatenoptimierung für die lastflussbasierte Kapazitätsberechnung. Input Parameter Optimization for the Load Flow based Capacity Calculation.
Montowski, Franz (*)	Untersuchungen zur Wiederholbarkeit der elektrischen Leitfähigkeitsmessung an verschiedenen Isolierölen. Investigation on Reproducibility of electrical Conductivity Measurements on different Insulating Liquids.

NAME	THEMA
Orozco, Camilo (*)	Analyse und Simulation einer energiesensitiven Produktionsplanung basierend auf Spannungsabweichungen im Netz. Analysis and Simulation of an Energy Sensitive Production Planning System based on Voltage Deviations in the Grid.
Pan, Chengwei (*)	Blitzstoßmessungen an alternativen Transformatorisolerflüssigkeiten. Lightning Impulse Measurements at alternative Transformer Insulation Liquids.
Rettler, Philipp (*)	Blitzstoßprüfung an alternativen Isolierflüssigkeiten. Lightning Impulse Measurement on alternative Insulation Liquids.
Riegert, Tim	Entwicklung eines Messaufbaus zur Teilentladungsmessung von Luftblasen in Öl. Development of a Measurement Setup for PD Measurements of Air Bubbles in Oil.
Ripholz, Felix	Messung von Teilentladungen für eine Fehlertypen-Datenbank. Measurements of Partial Discharge for a Database of Fault Types.
Schabel, Jan (*)	Untersuchung des hochfrequenten Übertragungsverhaltens von Strom- und Spannungssensoren. Investigation of the High Frequency Transmission Behavior of Current and Voltage Sensors.
Scheit, Florian (*)	Analyse und Optimierung von Übertragungsnetzen mit geomagnetisch induzierten Strömen. Impact Analysis and Mitigation Strategies of geomagnetically induced Currents in Transmission Grids.
Schleicher, Bastian (*)	Vergleich von Methoden zur Berechnung von PV-Leistung und Einfluss der Schätzfehler auf die Netzspannung. Comparison of Methods to calculate PV-power and Impact of Estimation Errors on the Grid Voltage.
Schleißinger, Patrick (*)	Aufbau und Validierung von Netzmodellen für Echtzeitsimulationen. Preparation and Validation of Power Grid Models for Real Time Simulations.
Schmalfeld, Kerstin (*)	Inselnetzermethoden für dezentrale Erzeuger im Verteilnetz. Islanding Detection for decentralized Generators in Distribution grids.
Schnaars, Julia (*)	Dynamische Spitzenkappung in der Netzplanung von Niederspannungsnetzen. Dynamic Curtailment within Low Voltage Distribution Grid Planning.
Schön, Andrea (*)	Engpassmanagement mit Einsatz von Flexibilitäten in Verteilnetzen. Congestion Management in Distribution Grids using Flexibilities.

NAME	THEMA
Sheng, Qiming	Thermohydraulische Untersuchung einer Transformatorwicklung mittels CFD. Thermo-hydraulic Investigation of a Transformer Winding Model using CFD.
Singer, Stefan	Erweiterung eines Berechnungsprogramms zur Kurzschlussberechnung nach G74. Enhancement of the Short-Circuit Current Calculation in Accordance to G74.
Straub, Adrian	Stochastische Modellierung von Lastprofilen für Elektromobilität. Stochastic Load Profile Modeling for electric vehicles.
Tews, Alexander (*)	Inbetriebnahme einer elektrischen Schaltung zur Messung kleiner Ströme bei der Leitfähigkeitsmessung der Isoliersysteme. Test and Validation of a Setup for low Current Measurements of Insulations Systems.
Urban, Martin	Untersuchungen über die Einflüsse des Feuchtegehalts auf die Ölleitfähigkeit. Investigation on the Influence of the Moisture Content on Oil Conductivity.
Vincenz, Dominik (*)	Entwicklung einer FPGA basierten sechsphasigen Inverter Ansteuerung zur Reduzierung von Gleichtakt-Störströmen. Development of a FPGA based Six Phase Inverter Control Unit to reduce Common-Mode Disturbance Currents.
Wagner, Bertin (*)	Implementierung eines Optimierungsverfahrens zur Berechnung des aggregierten Flexibilitätsbereichs von Verteilnetzen. Implementation of an Optimization Model for the Calculation of the aggregated Flexibility Area of Distribution Grids.
Wang, Tianhua (*)	Wechselspannungsuntersuchungen gealterter Transformatorisolierrflüssigkeiten. AC Breakdown Study of aged alternative Transformer Insulating Liquids.
Wen, Qin (*)	Dielektrische Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen für HGÜ-Anwendungen. Dielectric Modeling of Oilpaper Insulation Systems for HVDC Applications.
Wolf, Thomas (*)	Automatisierte Optimierung eines passiven Gleichtaktfilters zur Entstörung eines Traktionsinverters. Automated Optimization of a Passive Common-Mode Filter to reduce Interference of an Automotive Traction Inverter.
Wolpert, Adrian (*)	Untersuchung der Zersetzung von Isolierölen bei stehendem Lichtbogen. Investigation of the Decomposition of Insulation Liquids under electric Arc.

NAME	THEMA
Xu, Yuheng (*)	Untersuchung alternativer Transformatorisolerflüssigkeiten unter Blitzstoßbelastung. Investigation of alternative Transformer Insulating Liquids under Lightning Impulse.
Zepf, Sebastian (*)	Untersuchung einer passiven EMV Filtertopologie für Traktionsinverter. Investigation of a Passive EMC Filter Circuit for Automotive Traction Inverters.
Zhang, Yang (*)	Untersuchung des Abstrahlverhaltens von Teilentladungsquellen im UHF Bereich. Analysis of Emission Characteristics of PD-sources in the UHF Range.

4. PROMOTIONEN

▪ **Auswirkungen von Power-to-Heat in elektrischen Verteilnetzen**

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr. rer. pol. Wolf Fichtner

KIT

Tag der mündlichen Prüfung:

23.05.2017

Aufgrund des zunehmenden Ausbaus erneuerbarer Energien wird die Stromerzeugung zunehmend volatil. Hierdurch steigt der Bedarf an flexibel einsetzbaren elektrischen Verbrauchern deutlich. Vor diesem Hintergrund wird die elektrische Bereitstellung von Wärme im Gebäudebereich und deren Potential als verlagerbare Last zunehmend diskutiert. Es wird davon ausgegangen, dass bereits 2030 deutlich über die Hälfte aller Neubauten mit elektrischen Wärmepumpen beheizt werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mögliche Anwendungsfälle für ein Lastmanagement mit Wärmepumpen im Sektor der privaten Haushalte zu identifizieren, ein gekoppeltes, elektrisch-thermisches Gesamtmodell zu erarbeiten und mit diesem die einzelnen Anwendungsfälle zu untersuchen. Die daraus resultierenden Simulationsergebnisse machen deutlich, dass sich Wärmepumpen sehr gut für ein Lastmanagement einsetzen lassen – wird der Wärmebedarf für Warmwasser zusätzlich berücksichtigt auch im Sommer. Hierbei können sowohl aus der Perspektive eines einzelnen Anlagenbetreibers, eines Energielieferanten sowie auch eines Netzbetreibers nennenswerte Vorteile realisiert werden. Es wird in diesem Zusammenhang die Empfehlung ausgesprochen, den Netzzustand bei der Optimierung zu berücksichtigen. Zwar führt dies zu einer geringfügigen Verschlechterung des jeweiligen Optimierungsziels, jedoch kann eine fehlende Berücksichtigung des Netzzustandes zu einer erheblichen Mehrbelastung bis hin zu einer Überlastung des elektrischen Netzes führen.

▪ **Impacts of Power-to-Heat in Electrical Distribution Grids**

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

Due to the ongoing installation of renewable energy sources, the provision of electrical energy becomes increasingly volatile. Hence, the demand for flexible electrical loads grows considerably. In this respect, the electrical provision of heat within the building sector alongside with its potential to be implemented as a flexible load is of

growing interest. It is expected that more than 50% of all new buildings will be equipped with electrical heat pumps by 2030. The objective of this work is to identify possible use cases for a load management with heat pumps within the sector of private households, to elaborate a coupled, electrical-thermal simulation model and to investigate the aforementioned use cases with this model. Simulation results reveal that heat pumps are a very good option for load management – if the energy demand for hot water is also considered, even throughout the summer period. By doing so, load management with heat pumps can be beneficial for single operators, energy suppliers as well as power grid operators. In this context, the recommendation is given to consider the electrical power grid already during optimization. Although this results in minor setbacks regarding the respective optimization target, the neglect of these power grid constraints can lead to significant additional stress or even overload for the electrical power grid.

▪ **Automatisierte Betriebsführung von HGÜ-Verbindungen in einem synchronen Verbundsystem**

Dipl.-Ing. Katharina Frey

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Rudion

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann

TU Ilmenau

Tag der mündlichen Prüfung:

27.07.2017

Der Ausbau des Übertragungsnetzes im Zuge der Energiewende beinhaltet den Bau mehrerer HGÜ-Verbindungen vom Norden Deutschlands in den Süden. Im Gegensatz zu Drehstromleitungen kann der Leistungsfluss der HGÜ-Verbindung direkt vorgegeben werden. Deshalb wird in dieser Arbeit der automatisierte Betrieb der HGÜ-Verbindungen untersucht, die sich innerhalb eines synchronen Verbundsystems befinden.

Zunächst wurden vier Einzelkonzepte entwickelt, die unterschiedliche Zielfunktionen umsetzen. Ein Konzept minimiert die Auslastung im AC-Netz. Ein weiteres Konzept entlastet gezielt einzelne AC-Leitungen, falls es zu Überlastungen kommt. Das dritte Konzept optimiert die Betriebskosten, indem die Übertragungsverluste minimiert werden und das vierte Konzept beeinflusst den Leistungsfluss über die Kuppelleitungen, um Übertragungskapazität für den Strommarkt bereit zu stellen. Während des Netzbetriebs soll das Betriebsführungskonzept automatisiert die Zielfunktion anpassen. Deshalb werden im zweiten Schritt ganzheitliche Betriebsführungskonzepte entwickelt, die sowohl die Auslastung der AC-Leitungen begrenzen, als auch die Verluste minimieren. Das erste Konzept „Leistungsband mit Fahrplan“ basiert auf einem Referenzfahrplan und beinhaltet auch das Einzelkonzept zur Minimierung der

Verluste. Das zweite ganzheitliche Konzept „Leistungsband mit minimaler und maximaler Leistung“ verwendet ebenfalls ein Leistungsband, dieses wird jedoch in Abhängigkeit des aktuellen Netzzustandes ermittelt. Das dritte Konzept „Winkeldifferenz Gewichtungsfaktoren“ verknüpft die beiden Konzepte zur Minimierung der Auslastung des AC-Netzes und zur Minimierung der Verluste über Gewichtungsfaktoren.

Die entwickelten Konzepte werden anhand einer Netzstudie an einem aggregierten deutschen Netzmodell des Jahres 2024 durchgeführt. Die dazugehörigen stündlichen Eingangsdaten der Erzeugung und Last werden mithilfe einer Kraftwerkseinsatzplanung berechnet. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Netzstudie mithilfe von Indizes bezüglich der Leitungsauslastung, der Verlustminimierung, der notwendigen Informationen, den notwendigen Netzberechnungen und ihrer Transparenz bewertet. Hierbei zeigt sich, dass das Konzept „Leistungsband mit minimaler und maximaler Leistung“ und das Konzept „Winkeldifferenz Gewichtungsfaktoren“ sehr gut auf Änderungen im Netz reagieren. Das Konzept „Leistungsband mit Fahrplan“ setzt dagegen die Verlustminimierung besser um. Die wenigsten Eingangsdaten und Netzberechnungen benötigt das Konzept „Winkeldifferenz Gewichtungsfaktoren“.

- **Automated Control of HVDC Connections Embedded in a Synchronous Network**

Dipl.-Ing. Katharina Frey

The expansion of the German transmission network in the course of the energy turnaround involves the construction of several HVDC connections from the north of Germany to the south. In contrast to three-phase lines, the system operator can set the power flow of the HVDC connection directly. Therefore, this work investigates the automated operation of the HVDC links, which are embedded in a synchronous network.

At first, four individual concepts were developed which implement different target functions. One concept minimizes the loading in the AC grid. A second concept relieves specific AC lines in the case they are overloaded. The third concept optimizes operating costs by minimizing transmission losses and the fourth concept influences the power flow over the interconnecting lines of two grid regions to provide transmission capacity for the electricity market.

During the grid operation, the operational management concept should automatically adapt to the target function. Therefore, in the second step, holistic management concepts are developed, which limit both the loading of the AC lines as well as minimize the losses. The first concept "Leistungsband mit Fahrplan" is based on a reference timetable and also includes the individual concept for minimizing the losses. The second holistic concept "Leistungsband mit minimaler und maximaler Leistung" also uses a power band, but this is determined depending on the current grid state. The

third concept "Winkeldifferenz Gewichtungsfaktoren " links the two concepts for minimizing the loading of the AC grid and minimizing the losses via weighting factors.

The developed concepts are carried out on the basis of a network study on an aggregated German network model of the year 2024. The corresponding hourly input data for the generation and the load are calculated with a unit commitment and dispatch algorithm. Subsequently, the results of the network study are evaluated using indices regarding line loading, loss minimization, the necessary information, the necessary network calculations and their transparency. The concept "Leistungsband mit minimaler und maximaler Leistung" and the concept "Winkeldifferenz Gewichtungsfaktoren" react very well to changes in the network. On the other hand, the concept "Leistungsband mit Fahrplan" better implements loss minimization. The concept of "Winkeldifferenz Gewichtungsfaktoren" requires the least amount of input data and network calculations.

- **Optimization of Unit Commitment and Economic Dispatch in Microgrids Based on Genetic Algorithm (GA) and Mixed Integer Linear Programming (MILP)**

M. Sc. Mohsen Nemati

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. M. Braun

Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung:

12.10.2017

Energy management system (EMS) applications of modern power networks like microgrids have to respond to a number of stringent challenges due to current energy revolution. A high penetration level of renewable energy sources could cause operation difficulties in power networks, with regard to predictability of the renewable generation, the correlation between generation and demand, as well as voltage and frequency stability. Near-optimal resource dispatch tasks in microgrids - namely, the unit commitment and economic dispatch problem - must be handled with specific regard to the addition of new resource types (i.e. battery storage devices and distributed generators etc.) and the adoption of novel modeling considerations. By taking into account the possible ancillary services in microgrids (e.g. peak shaving, reactive power optimization and loss minimization etc.) and high level of flexibility and participation capacity of microgrids in energy market, their EMS has to incorporate such applications more intelligently in order to enhance the supply quality.

In addition, due to the comprehensive changes concerning the distribution grid structure (e.g. the so-called multi cell grid), new policies and objectives should be fulfilled via microgrids' EMS. At the same time achieving a variety of goals - which are in some cases in conflict with each other - in different microgrids requires a universal

and a multi criteria/objective optimization tool. Many efforts have been made for developing such sophisticated EMSs; however, few of them have the ability of considering the different perspectives of network operation in the optimization process and in different networks with many objectives, constraints and decision criteria.

Four main contributions of this thesis are as following:

Firstly, this thesis aims to model different relevant microgrid components at steady state. The models contain the technical, economic and ecological characteristics of the different distributed energy resources and battery storage systems. In scope of this work, a new aging model of a Lithium Ion battery based on an event-driven aging behavior has been introduced and implemented in the EMS.

Secondly, after a theoretical investigation of the potential optimization methods, an improved real-coded GA has been developed to schedule the unit commitment and economic dispatch (active and reactive power) of microgrid units. In the proposed genetic algorithm method, both network restrictions (voltages and equipment loadings) and unit constraints have been considered, and minimization of the operation, aging and pollutant treatment costs have been formulated into the multi-objective functions.

Thirdly, an enhanced MILP based method has been applied to solve the unit commitment and economic dispatch problems. The proposed approach is able to attempt different pre-developed strategies for fixing the potential voltage and loading violations in the grid via active and reactive power readjustments, while simultaneously deriving optimized dispatchable distributed generators, renewable energy sources and battery storage system schedules.

Ultimately, the developed GA-based and MILP-based optimizers have been applied to the predefined microgrid model under different operation policies.

- **Optimierung der Fahrpläne von Generatoren und Speichersystemen in Mikronetzen mit Hilfe genetischer Algorithmen und gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung**

M. Sc. Mohsen Nemati

Die Energiemanagementsysteme (EMS) moderner Stromnetze, zu denen Mikronetze zählen, müssen aufgrund der aktuellen Entwicklung auf eine Reihe von Herausforderungen reagieren. Die Optimierung des Komponentenbetriebs in Mikronetzen (Unit Commitment und Economic Dispatch) muss unter Berücksichtigung neuer Netzkomponenten (z. B. Batteriespeichersysteme, dezentrale Generatoren usw.) und der Einführung neuer Modellierungsaspekte behandelt werden. Unter Berücksichtigung möglicher Netzdienstleistungen in Mikronetzen (z. B. Peak-Shaving, Blindleis-

tungsoptimierung, Verlustminimierung etc.) und der hohen Flexibilität und Partizipationskapazität von Mikronetzen im Energiemarkt muss ihr EMS die genannten Anwendungen intelligent umsetzen, um die technischen Möglichkeiten eines Mikronetzes voll auszuschöpfen. Darüber hinaus sollten aufgrund der umfassenden Änderungen in der Verteilnetzstruktur (z. B. das sogenannte Multi-Zellen-Netz) neue Strategien und Ziele durch das EMS von Mikronetzen erfüllt werden. Da diese Ziele in verschiedenen Mikronetzen im Widerspruch zueinander stehen können, wird zur Umsetzung ein universelles multikriterielles Optimierungstool benötigt.

Die Hauptbeiträge dieser Arbeit sind die folgenden:

Im ersten Schritt werden unterschiedliche relevante Mikronetz-Komponenten im stationären Zustand modelliert. Die Modelle enthalten die technischen, ökonomischen und ökologischen Merkmale der verschiedenen dezentralen Energieerzeuger und Batteriespeichersysteme. Im Rahmen dieser Arbeit wurde im EMS ein neues Alterungsmodell einer Lithium-Ionen-Batterie eingeführt, das auf einem ereignisgesteuerten Alterungsverhalten basiert. Darüber hinaus wurden verschiedene interne und externe Marktmodelle der Mikronetze eingeführt und in die Optimierungsalgorithmen integriert.

Anschließend wurde nach einer theoretischen Betrachtung möglicher Optimierungsmethoden ein verbesserter Realzahl-kodierter genetischer Algorithmus entwickelt, um den Erzeugereinsatz und den Economic Dispatch (Wirk- und Blindleistung) von Mikronetz-Steuerungen zu optimieren. In dem vorgeschlagenen genetischen Algorithmus wurden sowohl Netzrestriktionen (zulässiges Spannungsband und Betriebsmittelauslastung) als auch Einheiteneinschränkungen berücksichtigt und eine Minimierung des Betriebskosten, der Alterung und der Schadstoffemissionen in die Multicriteria-Funktionen formuliert.

Im weiteren Verlauf wurde eine verbesserte gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (MILP) angewandt, um das Problem des Unit Commitment und des Economic Dispatch zu lösen. Der vorgeschlagene Ansatz wendet verschiedene vordefinierte Strategien an zur Lösung der potentiellen Spannungs- und Belastungsverletzungen im Netz durch Wirk- und Blindleistungsregelungen unter gleichzeitiger Ableitung optimierter flexibel verteilter Generatoren, erneuerbarer Energieerzeuger und Batteriesysteme.

Zuletzt wurden die entwickelten GA-basierten und MILP-basierten Optimierungsmethoden auf das vordefinierte Mikronetz-Modell bei verschiedenen Betriebsmodi angewendet.

- **Impact and Chances of Electric Mobility on German Low Voltage Distribution Grids**

Dipl.-Ing. Gerhard Walker

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. N. Parspour

Tag der mündlichen Prüfung:

13.10.2017

With continuously increasing numbers of electric vehicles on German roads, distribution system operators are looking at options for integrating them into low voltage grids. This thesis highlights how electric vehicles show strong localization as they attract a certain customer base. These hot spots are especially critical to stable grid operations as they can cause a large accumulation of charging power on small grid segments.

In order to gain a better understanding of how electric vehicles will affect German low voltage distribution grids, a detailed investigation was conducted into the grid region operated by the Netze BW. Based on the German National Electric Mobility Development Plan a model was derived which allows insights into which regions will witness the highest electric vehicle dissemination. With this model a probabilistic simulation environment based on the Monte Carlo Method and a driving pattern model was designed. This model delivered information on expected electric vehicle distribution levels throughout the grid region operated by the Netze BW and therefore allowed the identification of hot-spots. By assessing driving, distance, and arrival patterns the model also allowed the deduction of grid planning tools for distribution system operators. This included both grid planning principles and tools for grid development plans, which were made available to the Netze BW. Furthermore, an analysis of the load situation expected at secondary substation transformers throughout the critical regions was conducted to identify those with a high probability of overload.

As no load data was available for individual feeders and to obtain a transferable simulation environment all low voltage feeders operated by the Netze BW were analyzed using a clustering method. Feeder type clusters were identified and reference feeders determined. These reference feeders allowed a representable calculation of grid conditions. By applying these reference feeders to the simulation model for electric vehicles, it was possible to determine the impact of the added load on each cluster type. This allowed a view on which feeder constellations are less suited for higher levels of electric vehicle adoption rates. By application of the Monte Carlo Method it was possible to assign probabilities to overload and under voltage events, allowing the distribution system operator access to information for a detailed grid development plan.

Based on the insights gained from the analysis performed on the grid region of the Netze BW and the electric vehicle simulation models a new approach for an intelli-

gent charging infrastructure was designed. For this, a field test was implemented. Within this field test, prototypes of a three-phase charging infrastructure with the ability to simulated charging cycles were developed and installed. By addressing the various problems which are caused by electric vehicles, a set of controllers was developed which allow charging infrastructure to minimize its own effect on the distribution grid. This included a controller to match the phase load of the charging cycle to the phase voltage levels. Thus, it was possible to minimize the voltage drop during charging and increase phase symmetry. Furthermore, existing reactive power controllers were upgraded to allow a decentralized adaptive reactive power management. Finally, demand side management controllers were implemented to reduce the chance of simultaneously charging electric vehicles and to supply frequency response reserve. Most importantly, this was accomplished with minimal effect on the customer experience. To optimize the controllers, models were created in both MatLab® Simulink® and PowerFactory®. This allowed an independent verification of the approaches, both on a simulation level and under real life conditions in the field test.

The results of this thesis represent a comprehensive view on the impact of electric mobility on German low voltage distribution systems and, based on those impacts, an approach for intelligent charging infrastructure to maximize the chances for such an infrastructure. By developing detailed distribution and driving models for electric vehicles, a complete analysis of the current grid structure operated by the Netze BW was possible. As a direct result, tools for the grid planning process were proposed. Finally, a list of recommendations for the major participants of the electric vehicle integration was drawn up. With application of this list, electric vehicles can be integrated into low voltage distribution grids at minimal cost.

- **Folgen und Chancen der Elektromobilität für deutsche Niederspannungsverteilnetze**

Dipl.-Ing. Gerhard Walker

Durch die stetig zunehmende Anzahl an Elektrofahrzeugen in Deutschland sehen sich die Verteilnetzbetreiber gezwungen, ihre Planungsgrundsätze und Zielnetzplanungen anzupassen. Besonders durch die starke lokale Häufung von Elektrofahrzeugen in einigen wenigen Regionen kann es schnell zu Engpasssituationen im Verteilnetz kommen.

Um zu verstehen, wie sich die Elektromobilität auf die Niederspannungsverteilnetze auswirkt, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der Netze BW GmbH folgende Untersuchung erarbeitet. Zunächst wurde für Baden-Württemberg ein Model zur Prognostizierung der Elektrofahrzeugverteilung erstellt. Dieses Model stützt sich auf die Zielszenarien des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität, sowie ver-

schiedene Einflussfaktoren wie z.B. die Einkommensstruktur und die allgemeine Bevölkerungsdichte. Basierend auf diesem Verteilungsmodell wurden die Netzregionen der Netze BW auf die Auswirkungen der Elektromobilität hin untersucht. Für die Untersuchung der Netzgebiete wurde eine probabilistische Simulationsumgebung basierend auf der Monte Carlo Methode und ein Fahrtenmodell für Elektroautos entwickelt. Hieraus wurden dann Werkzeuge für die Erstellung der Planungsgrundsätze und die Zielnetzplanung abgeleitet und der Netze BW zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurde eine Analyse der Transformatoren in besonders kritischen Regionen durchgeführt.

Zur Ermittlung des Spannungs- und Lastverhaltens von Ladevorgängen und um eine übertragbare Simulationsgrundlage zu generieren, wurden alle Niederspannungsstränge der Netze BW mit Hilfe eines Clusteransatzes untersucht und Referenzstränge gebildet. Durch dieses Verfahren war es möglich repräsentative Niederspannungsstränge zu identifizieren. Zusammen mit der Simulationsumgebung und den neuen Planungsgrundsätzen war es nun möglich, kritische Strangkonstellationen zu identifizieren und Netzentwicklungsvorschläge abzuleiten. Durch den probabilistischen Simulationsansatz waren Aussagen über die Wahrscheinlichkeiten bestimmter Szenarien möglich. Des Weiteren wurden aus diesen Erkenntnissen Planungsprämissen und Werkzeuge für die Zielnetzplanung abgeleitet.

Die Analyse der Niederspannungsnetze und das Erstellen der Planungsgrundsätze lieferten wichtige Einblicke in die verschiedenen Probleme, die sich bei einer erhöhten Durchdringung von Elektrofahrzeugen ergeben. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde im zweiten Schritt ein Feldversuch implementiert, für welchen Prototypen einer intelligenten Ladeinfrastruktur entwickelt wurden. Für diese Prototypen wurde ein Paket von dezentralen Regler-Konzepten entwickelt, welches es der Ladeinfrastruktur erlaubt, ihren eigenen Einfluss auf das Verteilnetz zu minimieren. Dies beinhaltet einen Regler zur Phasenausgleichsbelastung, welcher seine Ladeleistung asymmetrisch entgegen der Phasenspannungen auf die Außenleiter aufteilt. Auch das Thema des Lastmanagements wurde durch ein dezentral agierendes Regelkonzept ohne nennenswerte Negativauswirkungen auf den Kunden adressiert. Bestehende Blindleistungsregelkonzepte wurden weiterentwickelt, um einen dezentral optimierten Einsatz zu ermöglichen. Auch ein Beitrag der Ladeinfrastruktur zur Regelleistungsbereitstellung war Teil der Regler. Für die Optimierung der Regler wurden sowohl MatLab® Simulink® als auch PowerFactory® Modelle passend zu den Prototypen entwickelt. Alle Konzepte wurden separat, sowohl in den Simulationsmodellen als auch im Feldtest, validiert und in die Prototypen implementiert.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine Analyse der kritischen Netzgebiete der Netze BW sowie die notwendigen Daten für eine Anpassung der Planungsgrundsätze mit Blick auf die Elektromobilität. Des Weiteren wurde anhand von Prototypen im Netz ein Ansatz für eine intelligente, dezentrale Ladeinfrastruktur, welche in der Lage ist, Ladevorgänge mit minimalen Auswirkungen auf das Verteilnetz durchzuführen, entwickelt. Hierbei wurden die einzelnen Probleme der Verteilnetze aus der vorhergegangenen Untersuchung der Netzregion der Netze BW adressiert. Auf Basis der

Referenznetze, der Simulationsmodelle und des Feldtestes konnten die Auswirkungen der Regler detailliert untersucht werden. Abschließend wurde eine Liste mit Empfehlungen an die Hauptteilnehmer des Markthochlaufes der Elektromobilität erstellt, mit welchen eine möglichst reibungslose Netzintegration von Elektrofahrzeugen sichergestellt werden soll.

- **Probabilistische Modellierung dezentraler Energieanlagen und Sekundärtechnik für die Verteilnetzplanung**

Dipl.-Ing. Kilian Dallmer-Zerbe

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. P. Schegner
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung (TU Dresden): 05.05.2017

- **Aspekte zur Integration stationärer und mobiler Batteriespeicher in die Verteilnetze**

Dipl.-Ing. Martin Uhrig

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung (KIT): 07.07.2017

- **Reliability of Transmission Networks: Impact of EHV Underground Cables & Interaction of Offshore-Onshore Networks**

M. Sc. Bart W. Tuinema

Doctoral committee member: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung (TU Delft): 23.11.2017

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. Zu einem Schwerpunkt hat sich in den letzten Jahren die Teilentladungs-(TE)-Messtechnik entwickelt. 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, des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Spannungsfestigkeit und die Untersuchung der Ausbreitung und Dämpfung von Very Fast Transients in GIS.

RESEARCH ACTIVITIES

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

High Voltage Engineering

At our institute we develop and improve *measurement techniques* for the measurement of high amplitude impulse voltages and transient electromagnetic fields. In the last years 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

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren ein wichtiger Schwerpunkt. Zunächst standen die Erzeugung und Messung elektromagnetischer Feldimpulse mit extrem hohen Amplituden und sehr kurzen Anstiegszeiten im Fokus, wie sie zur NEMP- oder LEMP-Nachbildung und für die Simulation von Trennerschaltungen in SF₆-Anlagen nötig sind.

Die aktuellen Forschungsarbeiten sind im Bereich der Automobil-EMV angesiedelt. Mittels Korrelationsbetrachtungen zwischen den im Automobilbereich üblichen Komponentenmessverfahren und den EMV-Messungen an Gesamtfahrzeugen wird untersucht, wie durch Messungen an einzelnen Fahrzeugkomponenten (z. B. Steuergeräten) auf das spätere Verhalten dieser Komponenten im Fahrzeug geschlossen werden kann. Eine weitere Arbeit befasst sich mit der EMV von Fahrzeugbordnetzen. Die zahlreichen elektrischen Aggregate und dabei insbesondere elektrische Antriebsstränge können neuartige impulsförmige Störgrößen aussenden, die von den bisherigen EMV-Prüfverfahren nicht abgedeckt werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Störgrößen zu erfassen und zu klassifizieren und neue Messtechnik zu entwickeln, mit deren Hilfe diese sporadisch auftretenden Störgrößen im Fahrzeug sicher und ohne wesentliche Störbeeinflussung aufgezeichnet werden können.

Electrical Power Supply / Smart Grids

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

Most relevant topics on this field are:

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

Electromagnetic Compatibility

Since many years the field of „Electromagnetic Compatibility“ has been one of the most important activities. In the beginning of this work we started with the generation and measurement of electromagnetic field impulses with extreme high amplitudes and very short rise times. The aims have been the simulation of NEMP, LEMP and the simulation of circuit breaker operations in GIS.

Recent EMC research works concentrate on the automotive EMC. One topic is the correlation between full vehicle and single component EMC emission measurement procedures. The main aim is to estimate the emission behavior of a single component in the car which is not yet available in an early state of its development. Another topic deals with the EMC of automotive electric power networks. Due to novel high power electric devices, especially in electric vehicles, it is possible that new impulsive disturbances occur on the electric power supply of the vehicle. These impulsive disturbances may cause new disturbing potential which isn't covered by the actual EMC susceptibility standards. The aim of this work is to detect and classify these new impulsive disturbances and also to develop new measurement tools for a convenient recording of these sporadic impulses in the automotive power network with as less coupling disturbances as possible.

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

▪ **Klassifikation von Teilentladungsquellen anhand ihrer PRPD-Muster**

M. Sc. Benjamin Adam

Die Zustandsbewertung von Betriebsmitteln ist ein wichtiges Thema in der Energietechnik. Ein wichtiges Kriterium ist der Zustand des verwendeten Isoliermediums. Die Messung von Teilentladungen (TE) hat sich als übliche Methode zur Beurteilung von Isolierstoffen etabliert. TE werden unter anderem in gasisolierten Schaltanlagen, Kabeln, Transformatoren oder Motorwicklungen gemessen.

Heute sind verschiedene TE-Messmethoden verfügbar. Neben der häufig eingesetzten elektrischen Messung nach IEC 60270 werden auch neue Verfahren wie die ultrahochfrequente Messung (UHF) oder die akustische Messung eingesetzt. Besonders die UHF-Methode ermöglicht einfache Messungen während des Betriebs (online / onsite). Das führt zu einem Trend weg von kurzen einzelnen Messungen, hin zu kontinuierlichem Monitoring. Dadurch wird eine langfristige Beurteilung des Betriebsmittels möglich.

Um ein vollständiges Bild über den Zustand der Isolation zu erhalten, soll die Art der Fehlerquelle bestimmt werden. Typischerweise werden TE durch ihre charakteristischen Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Muster unterschieden. Zwar helfen Analysetools bereits bei der Interpretation dieser Muster, für ein Langzeitmonitoring ist es aber notwendig, die Auswertung vollständig zu automatisieren.

Eine automatische Analyse erfordert eine zuverlässige Mustererkennung. Ein zweistufiger Ansatz für die automatische Erkennung wird im Folgenden präsentiert: Für die Mustererkennung und Klassifikation müssen zunächst aus den Messwerten und weiteren, daraus abgeleiteten Informationen aussagekräftige Merkmale extrahiert werden. Dafür werden unterschiedliche Extraktionsverfahren z.B. auf Labormessungen mit bekannten Fehlertypen angewandt. Im zweiten Schritt wird ein Klassifikator mit Merkmalsvektoren aus den bekannten Fehlerquellen trainiert. Der trainierte Klassifikator kann nun genutzt werden, um unbekannte TE anhand ihrer Merkmalsvektoren zu identifizieren.

In diesem Jahr wurden neue Klassifikationsmöglichkeiten mit Hilfe neuronaler Netze oder der Analyse von UHF-Signalen getestet. Beide Verfahren zeigen gute Ergebnisse, müssen aber noch ausführlicher untersucht werden. Eine Datenbank an typischen TE-Mustern wurde erstellt. Es steht eine Datensammlung aus knapp 200 Messungen unterschiedlicher TE-Fehlerquellen bereit. Diese können genutzt werden, um neue Klassifikationsmodelle zu trainieren und zu testen. Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

- **Classification of Partial Discharge Sources by their PRPD Patterns**

M. Sc. Benjamin Adam

Condition assessment of high voltage equipment is concerned essential for grid reliability. One key criteria is the actual condition of transformer's insulation. Measurement of partial discharges (PD) has been established as a standard method for the assessment of insulation materials. PD occur in gas-insulated systems, cables, transformers and generator stator or rotor windings.

Today different PD measurements methods are available. Apart from the standardized electric measurement method specified in IEC 60270, also new measurement methods find their way into diagnosis and monitoring, e.g. ultrahigh frequency (UHF) method for radiated PD measurement or acoustic methods. Especially the UHF method provides an easy measurement during service (online / onsite) which led to a trend from temporary diagnosis measurements to long-term, continuous asset surveillance.

The specific type of PD driven defects needs to be determined in order to obtain a comprehensive view of the insulation condition. Typically, PD are discriminated by their characteristic Phase Resolved PD (PRPD) patterns. In most cases, discrimination is performed manually by experts which is well suited for temporary diagnosis whereas the continuous approach of equipment assessment requires a fully automated analysis and discrimination of PD defects.

Automated analysis requires reliable pattern recognition. A twostep approach for automated recognition is presented in the following: Firstly, meaningful features have to be extracted from the obtained PD data and derived information. Therefore, different extraction methods can be applied e.g. to laboratory measurements with known PD sources. Secondly, classifiers are trained by specific vectors consisting of the derived features from each known PD source. The trained classifiers can be used to identify unknown PD by their feature vectors.

In this year new classification possibilities, with the help of neural networks and analysis of UHF-signals, were tested. Both techniques show good results but need further research. A database of PD patterns was established. A collection of almost 200 measurements of different PD sources is available. They can be used to train and test new classification methods.

Financial support by the "German Research Foundation – DFG" is gratefully acknowledged.

▪ Untersuchung des Kriechdurchschlags entlang einer Öl-Pressboard-Grenzfläche in natürlichem Ester und Mineralöl

M. Sc. Stephanie Hägele

Natürliche Esterflüssigkeiten werden zunehmend in Leistungstransformatoren eingesetzt, insbesondere wenn Wasserschutz- und Brandschutzvorschriften im Vordergrund stehen.

Sie weisen eine vergleichbare dielektrische Festigkeit wie Mineralöl im homogenen und leicht inhomogenen Feld auf. Allerdings bestehen Unterschiede zwischen den beiden Isolierflüssigkeiten in ihren elektrischen Eigenschaften. Die verschiedenen Verhältnisse der Permittivitäten der flüssigen und festen Isoliermedien sorgen an Oberflächen für eine Verschiebung der elektrischen Feldverteilung im Isolationsystem eines Transformators. Diese Studie untersucht den Kriechdurchschlag entlang einer Öl-Papier-Grenzfläche in Mineralöl und in natürlichem Ester. Hochdichtes Pressboard wird hierfür imprägniert und vorbereitet, um in einem Aufbau mit vertikalem Elektrodenabstand für Wechselspannungsprüfungen eingebaut zu werden. Das Pressboard wird an einer Elektrode mit passgenau abgerundeten Schlitzern befestigt (Fig. 1). Besondere Aufmerksamkeit wird darauf gelegt, Ölkeile zu vermeiden. Die Tests werden mit trockenem Öl mit einer relativen Feuchte kleiner 12 % durchgeführt. Mittelwerte, 2-%-Stehspannungen und Standardabweichungen werden bestimmt und verglichen. Die Ergebnisse der Auswertungen (Fig. 2) zeigen eine leicht verringerte mittlere Durchschlagsspannung des natürlichen Esters verglichen mit Mineralöl (90 %).

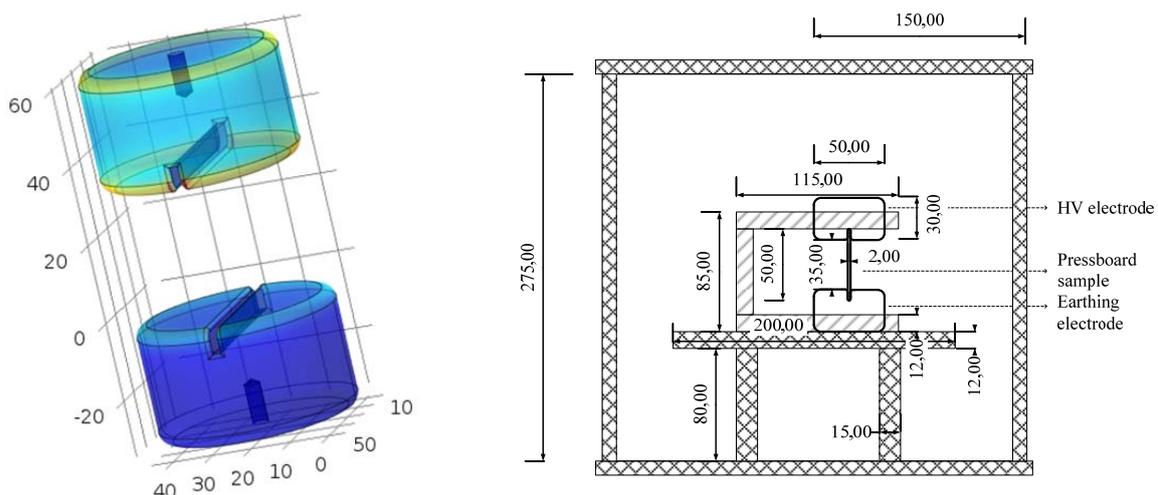


Fig. 1: Elektroden und gesamter Aufbau in der Messzelle (Maße in mm).
Electrodes and principal setup in the test cell (dimensions in mm).

▪ **Investigation of Interfacial Surface Creep Breakdown at Oil-Pressboard Interfaces in Natural Ester Liquid and Mineral Oil**

M. Sc. Stephanie Hägele

Natural ester liquids are increasingly established in power transformers, especially if the water protection and prevention of fire hazard in operation region are in focus. Ester liquids show a dielectric strength comparable to mineral oil in homogeneous and slightly inhomogeneous fields. Nevertheless, differences exist between natural ester liquids and mineral oils in terms of electrical properties. The different ratios of liquid and solid insulation materials' permittivities at interfaces cause a shift in the electric field distribution within the insulation system of a transformer. This study investigates the creep breakdown along an oil-paper interface at a defined oil gap in natural ester liquid and mineral oil. A high-density pressboard sheet is impregnated and prepared giving a vertical electrode gap for AC creep breakdown test setup. Pressboard is fixed within one rounded electrode at the upper end and within one rounded electrode at the lower end (see Fig. 1). Special care is taken in the electrode design to avoid / minimize possible oil wedges in the setup. Tests are conducted with dry oil at a relative moisture content of less than 12 % of saturation. Breakdown mean values, 2 % withstand values and standard deviations are compared. The breakdown results show slight differences between the insulation liquids: The mean breakdown voltage of natural ester liquid is 90 % of the one of mineral oil (see Fig. 2).

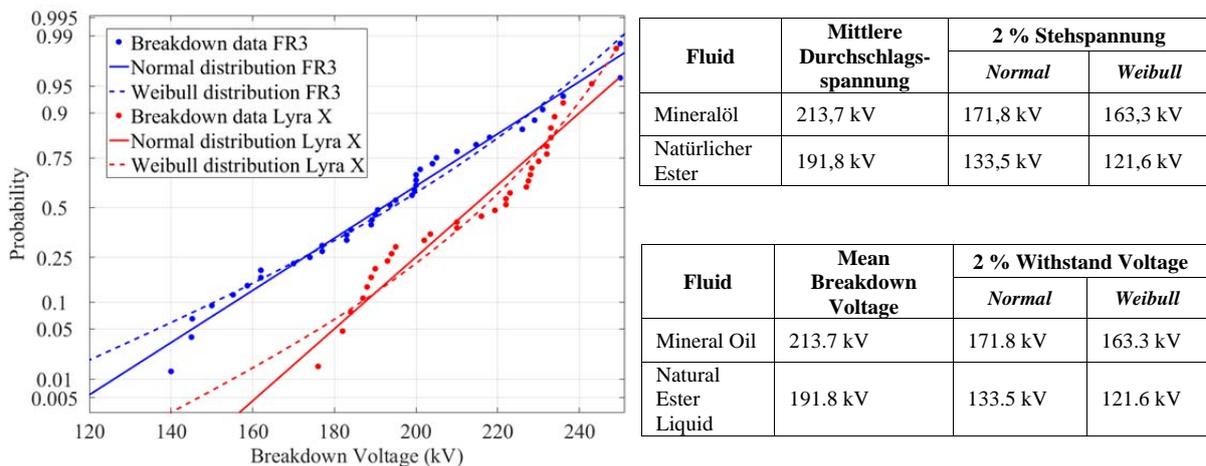


Fig. 2: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Durchschlagsdaten der Flüssigkeiten (links) und Durchschlagskennzahlen (rechts). Probability plots of breakdown data of investigated insulation liquids (left) and breakdown voltages (right).

▪ Einsatz natürlicher Ester in Verteiltransformatoren

M. Sc. Stephanie Hägele

Natürliche Ester, auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Isolierflüssigkeiten, werden zunehmend als Alternative zu konventionellem Mineralöl in Verteiltransformatoren diskutiert und verwendet. Vorteilige Eigenschaften in Bezug auf Brandschutz und Umweltverträglichkeit sind ein wesentlicher Grund. Frühere Untersuchungen der elektrischen Eigenschaften zeigen, dass natürliche Ester und Mineralöl vergleichbare Durchschlagsfestigkeit in homogenen und leicht inhomogenen elektrischen Feldern besitzen, hingegen wurden bei natürlichen Estern im Vergleich zu Mineralöl verringerte Durchschlagsfestigkeiten in stark inhomogenen Feldern gemessen. In den letzten Jahren wurden viele Studien durchgeführt, welche natürliche Ester und Mineralöl hinsichtlich der bekannten Prüfmethode untersuchten. Ziel dieser Studie ist es, im Rahmen eines Pilotprojektes der Netze BW GmbH verschiedene Experimente mit starker Isolationsbeanspruchung zweier verschiedener natürlicher Ester und eines Mineralöles zusammen zu bringen, um „Grenzbedingungen“ des Betriebs für natürliche Ester zu untersuchen: Unterschiede in der chemischen Struktur natürlicher Ester, die für eine im Vergleich zu Mineralöl erhöhte Viskosität sorgen, sind beispielsweise ein Grund für Untersuchungen des Verhaltens bei tiefen Temperaturen, bei denen Esterflüssigkeiten nicht mehr flüssig sind. Untersuchungen ausgewählter Ölkennzahlen nach mehrfacher Abkühlung unter den Stockpunkt und folgender Wiedererwärmung sind ein weiterer Aspekt der Tieftemperaturuntersuchungen. Ein Teil der Ergebnisse der Tieftemperaturuntersuchungen sind in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt. Die mittlere Durchschlagsspannung natürlicher Ester ist im Vergleich zu Mineralöl bei tiefen Temperaturen nicht vermindert.

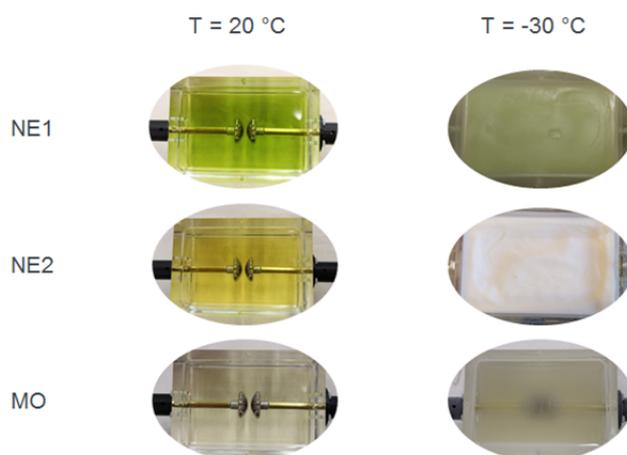


Fig. 1: Natürliche Ester und Mineralöl bei Raumtemperatur und bei -30°C.
Natural ester liquid and mineral oil at room temperature and at -30°C.

▪ **Use of Natural Ester Liquids in Distribution Transformers**

M. Sc. Stephanie Hägele

Natural ester liquids, insulating liquids based on renewable resources, are increasingly discussed and used as an alternative to conventional mineral oil in distribution transformers. Advantageous behavior in terms of fire safety and environmental sustainability is an essential reason. Former investigations of dielectric properties indicate that natural ester liquid and mineral oil show comparable dielectric strength in homogeneous and slightly inhomogeneous fields. However, lower dielectric strength in extremely inhomogeneous electric fields was found for natural ester liquid. In the last years, many studies compared natural ester liquid to mineral oil in the commonly used test procedures for dielectric strength. This study is a part of a field test of Netze BW GmbH and puts together different experiments of high levels of insulation stress for two different natural ester liquids in comparison to mineral oil to find out “boundary conditions” for natural ester liquid: Different chemical structure of natural ester liquid leading to higher viscosity is for example a reason that makes one think of how a natural ester filled distribution transformer behaves at a cold start where the liquid is not liquid anymore or whether multiple cold starts effect selected oil numbers. A part of the results for low temperature investigations are shown in Fig. 1 and Fig. 2. The mean breakdown voltage of natural ester liquid at low temperatures is not lower than the one of mineral oil.

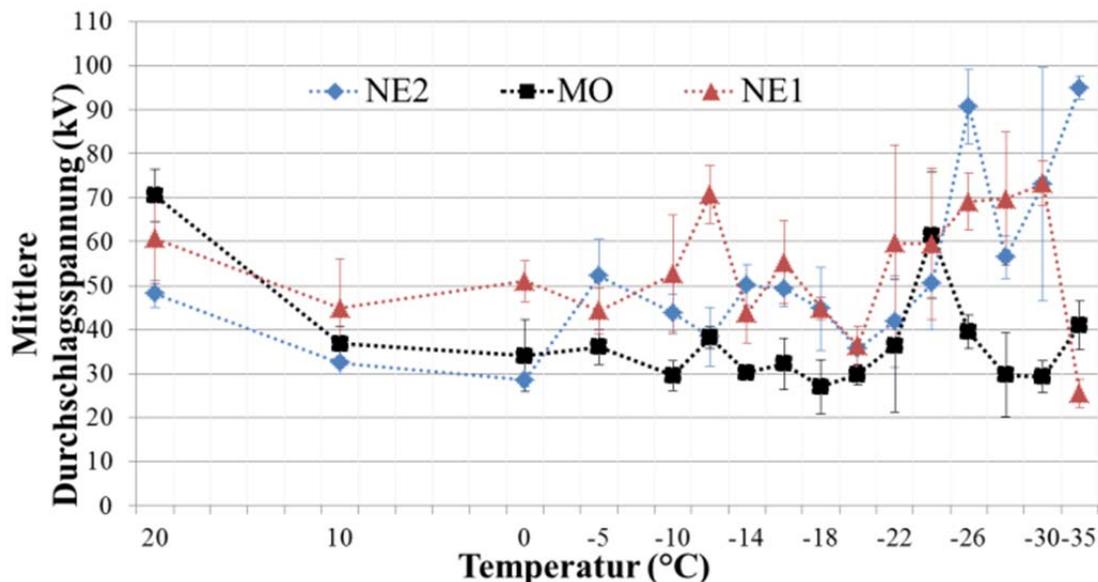


Fig. 2: Mittlere Durchschlagsspannungen der untersuchten Isolierflüssigkeiten über der Temperatur.
 Mean breakdown voltage of investigated insulating liquids over temperature.

▪ **Thermische Alterung von Silikonen in Mineralöl**

M. Sc. Smitha Karambar

Silikone werden aufgrund ihrer hervorragenden thermischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften häufig bei Freiluftisolatoren von Hochspannungsanlagen verwendet. In dieser Forschungsarbeit werden Silikone auf ihre Anwendung in mit Mineralöl gefüllten Hochspannungsgeräten untersucht. Die Zuverlässigkeit eines elektrischen Betriebsmittels hängt von der Qualität seiner Isolierung ab. Daher ist es wichtig, die Eigenschaften von Silikonen in Mineralöl zu untersuchen.

Um den Einfluss von Silikonen auf Mineralöl festzustellen, werden beschleunigte thermische Alterungstests durchgeführt. Dabei werden drei Arten von Silikonen untersucht: isolierendes Silikon, leitfähiges Silikon und Silikone mit leitfähigen und isolierenden Schichten. Zum Vergleich wird auch eine Pressboard-Probe unter den gleichen Bedingungen gealtert.

Die drei Silikon-Arten sowie das Pressboard werden für eine Dauer von 15, 30 und 45 Tagen in Mineralöl bei einer Temperatur von 130°C gealtert. Nach der Alterungsperiode werden Mineralöl und Feststoff-Materialien auf ihre dielektrischen Eigenschaften untersucht.

Mineralöl wird auf seinen Wassergehalt, den Verlustfaktor, die Durchschlagspannung und die gelösten Gase begutachtet. Die Feststoffisolierung wird auf ihren Wassergehalt untersucht.

Der Wassergehalt von Mineralöl und Feststoffisolierung wird mit einem Karl Fischer Titrator gemessen. Der Wassergehalt im Öl nach der Alterung variiert je nach den im Alterungsprozess enthaltenen Feststoff-Materialien. Wenn die Feuchtigkeit im Mineralöl steigt, dann sinkt die Durchschlagspannung und der Verlustfaktor ($\tan \delta$) steigt. Mineralöl mit leitfähigem Silikon zeigt den höchsten Wassergehalt, den höchsten Verlustfaktor und die niedrigste Durchschlagspannung, wobei der Wassergehalt in dem Pressboard im Vergleich mit alle anderen Feststoff-Isoliermaterialien höher war. Dieses Verhalten zeigt sich bei allen Alterungsdauern.

Die gelösten Gase werden mit dem Siemens Sichromat 2-8 Gaschromatograph gemessen. Mineralöl, das während der Alterung Pressboard enthielt, zeigt die höchste Menge entflammbarer Gase im Vergleich mit Mineralöl, das Silikon enthielt.

Weitere Untersuchungen zur Durchschlagspannung von Feststoff-Materialien werden am Institut durchgeführt.

■ **Thermal Aging of Silicone Rubber in Mineral Oil**

M. Sc. Smitha Karambar

Silicone rubbers are extensively used in high voltage equipment as outdoor insulators due to their excellent thermal, mechanical and chemical properties. Meanwhile, in this research, silicone rubbers are investigated for their application in high voltage equipment containing mineral oil. The reliability of an electrical equipment depends upon the performance of its insulation. Hence, it is important to study and predict the performance of silicone rubber in mineral oil.

In order to determine the influence of silicone rubber on mineral oil and vice-versa, accelerated thermal aging tests are carried out. Three types of silicone rubbers namely, conductive silicone, insulated silicone and silicone rubber containing conductive and insulating layers are considered in this research. As a reference, also a pressboard sample is aged under similar conditions.

Each type of silicone rubber and the reference sample are individually aged in mineral oil at a temperature of 130°C for 15, 30 and 45 days. After completion of each aging period, mineral oil and solid insulation materials are investigated for their dielectric properties.

Mineral oil is examined for its moisture content, dissipation factor, breakdown voltage and dissolved gases. Whereas, solid insulation is investigated for its moisture content.

The moisture content in mineral oil and solid insulation is measured using a Karl Fischer Titrator. The moisture content in oil after aging varies depending on the solid insulation material it contained during the aging process. As the moisture increases in mineral oil, a decrease in the breakdown voltage and an increase in dissipation factor ($\tan \delta$) is noticed. Mineral oil containing conductive silicone rubber exhibits the highest moisture content, the highest dissipation factor and the lowest breakdown voltage. Whereas, moisture content in Pressboard insulation is higher than in any other solid insulation material. This behavior is noticed for all aging durations.

Dissolved mineral oil aged with solid insulation materials are measured using a Siemens Sichromat 2-8 Gas Chromatograph. Mineral oil containing the pressboard during aging exhibits the highest combustible gas contents as compared to the mineral oil which contained silicone rubber.

Further investigations on the breakdown voltage of solid insulations are being carried out at the institute.

▪ **Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren mittels CFD**

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Leistungstransformatoren werden seit über hundert Jahren in der Energieversorgung verwendet. Da die Lebensdauer eines Transformators sehr oft durch die Lebensdauer seiner Papierisolation bestimmt wird und diese durch thermische Beanspruchung altert, kommt einer guten thermischen Auslegung des Transformators eine große Bedeutung zu.

Dazu bedarf es zuverlässiger Berechnungsverfahren, um die Temperaturverteilung innerhalb eines entworfenen Transformators nachzurechnen und - falls erforderlichen Entwurf in Richtung einer besseren Temperaturverteilung, mit weniger hohen Temperaturspitzen, zu korrigieren. Die optimale Auslegung des Kühlsystems ist wichtig, um thermische Schäden zu vermeiden.

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zeigen im Fall von pumpengetriebenem Ölumlaufl (OD-Kühlung) hohe Reynolds Zahlen. Zudem wird die Verteilung der Strömung auf die einzelnen horizontalen Ölkanäle zwischen den Wicklungsscheiben zunehmend ungleichmäßig und entsprechend auch die Temperaturverteilung in der Wicklung.

Die Geometrie der Transformatorwicklung besteht aus drei Passagen von mehreren horizontalen Kanälen, die voneinander getrennt sind. Die horizontalen Kanäle verbinden die inneren und äußeren vertikalen Kanäle. Das Kühlfluid kann in unterschiedlichen Strömungsregimen im Transformator fließen. Dies wird beeinflusst durch das jeweilige Transformator Kühlkonzept (OD- oder ON-Kühlungsart) und von der Belastung des Betriebsmittels. In jedem Fall ist die allgemeine Strömungsrichtung des Öls entlang der Wicklung von unten nach oben. Aktuelle Konstruktionsberechnungen basieren auf der Annahme, dass alle horizontalen Kanäle durchströmt werden.

Die Geometrie des 3D-Wicklungsmodells ist in Fig. 1 gezeigt. Es ist erkennbar, dass jeder Durchgang der Wicklung aus 6 Kanälen und 6 Scheiben besteht. Insgesamt besteht der Versuchsaufbau aus drei Passagen (mit 0 bis 2 bezeichnet). Damit ergeben sich insgesamt 18 Scheiben und 18 Kanäle. Die weiteren Scheiben am unteren und oberen Ende der Wicklung sind für eine korrekte Nachbildung der Randbedingungen vorgesehen und gehen nicht in die Simulation mit ein.

Fig. 2 zeigt die Geschwindigkeitsverteilungen des Wicklungsmodells für die numerische 3D-Berechnung bei verschiedenen Ölströmungen. Bei einer Variation der Ölströmung zwischen 18 kg/s und 3 kg/s ist deutlich erkennbar, dass der Unterschied zwischen den Ölverteilungen von der Ölströmung abhängt.

▪ **Thermal Modelling of Power Transformers with CFD**

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Power transformers have been used in energy supply for more than hundred years. Since the endurance of a transformer is mostly determined by the toleration of its solid insulation –i.e. the paper- which ages under the strong influence of its thermal load, a complete thermal design of the transformer is of great importance. To enable this, reliable calculation methods are required to recalculate the temperature distribution within a designed transformer and if necessary to revise the design into the direction of a better temperature distribution with less high temperature peaks. In this context, the optimal design of the cooling system in addition to its proper operation is necessary to avoid operating failures and thermal damages. The results of the CFD-simulations indicate that in the range of high Reynolds-numbers, as it is to expect for pump driven oil circulation (OD-cooling). Furthermore, the flow distribution on the particular horizontal oil channels between the winding discs gets increasingly unequal and in consequence of that also the temperature distribution within the winding.

The geometry of the winding is composed of a set of several horizontal channels, which separate the discs from each another. These horizontal channels connect the inner and outer vertical channels to each other. The cooling fluid can flow in different flow regimes, depending on the particular transformer design such as the OD-cooling or the ON-cooling types, and the operating conditions. In any case, the general flow direction of the oil is from the bottom of the winding to the top. The geometry of the winding model is shown in Fig. 1.

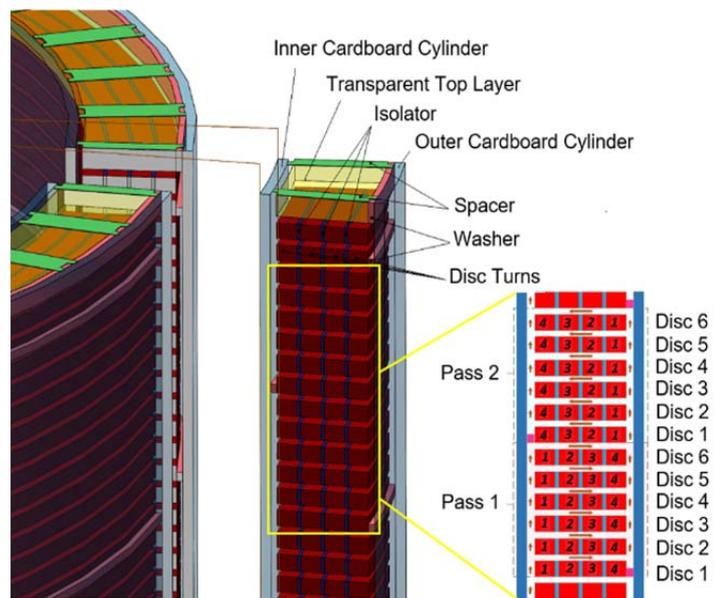


Fig. 1: Wicklung und Abstandshalter mit periodischem Kühlkanalsystem.

Basic winding design and alignment of spacers creating symmetrical sections with periodic cooling channel system.

It can be seen that each pass of the winding is made of 6 channels and 6 discs and there are then three main passes with also 6 channels named pass 0 to pass 2, giving a total of 18 discs and 18 channels. The two remaining channels and discs are post-conditioning discs which are not considered in the results.

Bei niedrigem Öldurchsatz tritt die maximale Fließgeschwindigkeit im unteren Bereich auf. Bei höherem Öldurchsatz verschiebt sie sich nach oben. Für eine gegebene Scheibenverlustverteilung ist die Temperatur des aus den horizontalen Kanälen austretenden Öls umgekehrt proportional zur Ölgeschwindigkeit.

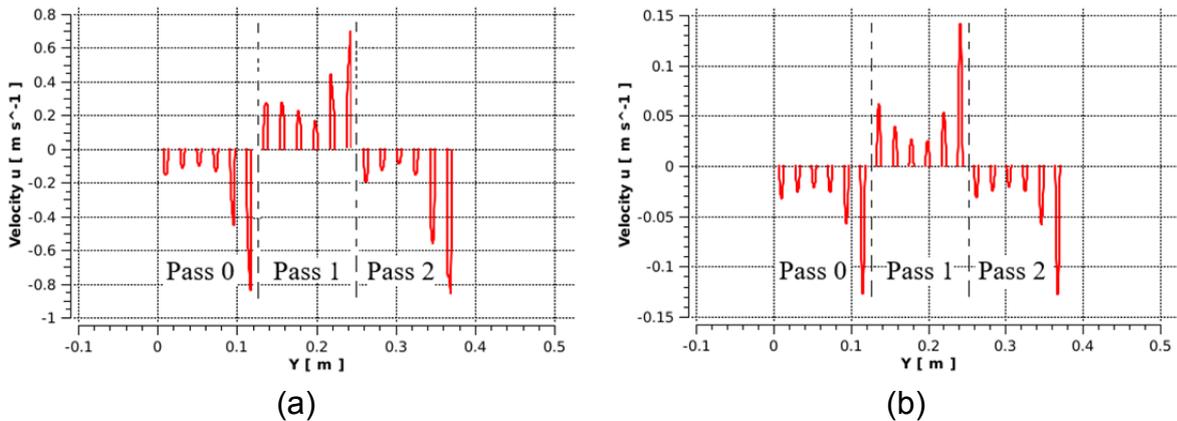


Fig. 2: Geschwindigkeitsverteilung in den horizontalen Kanälen der Passage 2 als Ergebnis einer 3D-Simulation.

a) bei 18 kg/s Ölfluss.

b) bei 3 kg/s Ölfluss.

3D numerical results of velocity distributions in the horizontal channels within the winding in pass 2.

a) Velocity distribution for 18 kg/s.

b) Velocity distribution for 3 kg/s.

Fig. 3 zeigt die gemessenen sowie die 2D- und 3D-CFD-simulierten Leitertemperaturen bei verschiedenen Massenströmen, 80°C Öltemperatur am Modelleintritt und einer gleichmäßigen Verlustleistung von 8 W je Leiter. Die Übereinstimmung zwischen Messung und der 3D-Simulation kann für diesen Fall als gut bewertet werden. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung liegen bei wenigen Kelvin, und auch das qualitative Profil der Temperaturverteilung stimmt überein.

Die Lage des Heißpunkts ist stark abhängig vom numerischen Modellierungsansatz. Es ist ersichtlich, dass bei einer Erhöhung der Ölströmung von 3 kg/s auf 18 kg/s die Temperatur des Heißpunktes im 2D-Modell stärker erhöht wird als im 3D-Modell. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Massenstrom durch die horizontalen Kanäle zu den vertikalen Kanälen von der Druckdifferenz zwischen beiden Seiten verursacht wird. Darüber hinaus kann ein Niederdruckbereich, der in der Nähe der Scheibe erzeugt wird, einen Teil des Öls ansaugen, das dann in den zweiten horizontalen Kanal strömt und von dort in den ersten Kanal zurückfließt. Statt eines kontinuierlichen Stroms nach oben wird so ein umgekehrter Strom nach unten erzeugt. Besonders in der 2D-Simulation kann dieses Strömungsverhalten eine signifikante Überhitzung der unteren Wicklungsscheibe verursachen.

The results of the CFD simulations indicate an uneven flow distribution on the horizontal oil channels between the winding discs and consequently the temperature distribution get increasingly unequal within the winding. Fig. 2 shows the oil velocity profiles in the horizontal channels. As it can be seen, the magnitude of the flow rate through the channels has an influence on the oil distribution in the channels. For the low oil flow rates, the maximum share of the oil occurs in the lower part of the pass, whereas for increasing winding flow rate the maximum velocity moves to the upper region of the passes. For a given disc loss distribution, the temperature of the oil exiting the horizontal ducts is inversely proportional to the oil velocity.

Fig. 3 depicts the measured 2D and 3D CFD simulated temperature gradients at different mass flows, inlet oil temperature 80°C and uniform power dissipation equivalent to 8 W for each conductor. The agreement between measurement and 3D simulation is rather good. The differences in temperature between 3D simulation and measurements are at a few Kelvin and also the qualitative profile of the temperature distribution is the same in both cases.

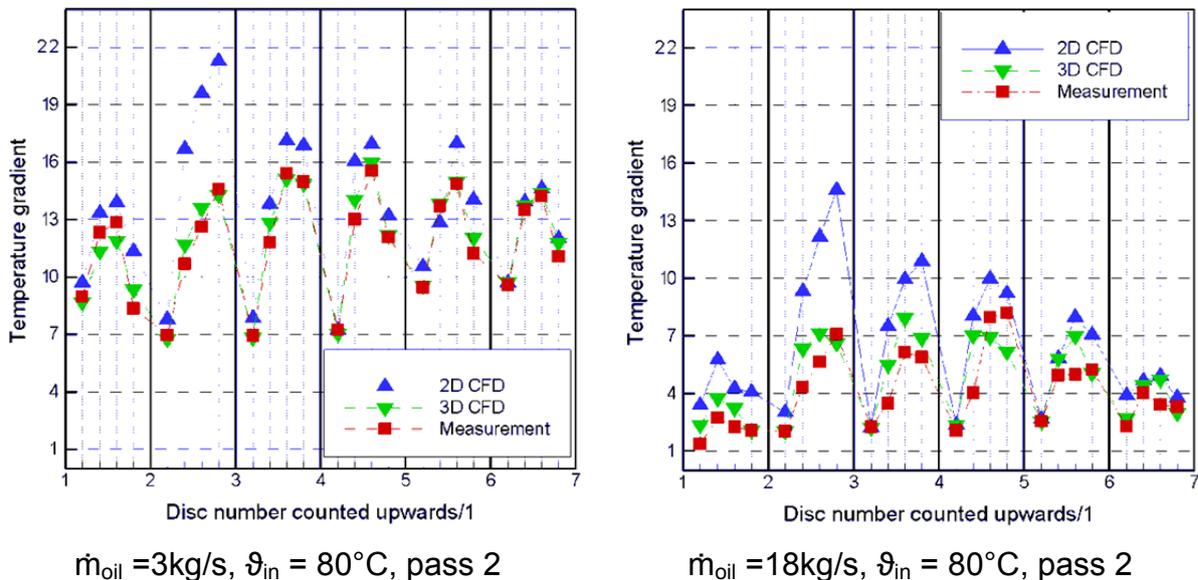


Fig. 3: Vergleich der gemessenen Temperaturgradienten mit numerischen 2D- und 3D-CFD-Ergebnissen.

Comparison of the measured temperature gradients with numerical 2D and 3D CFD results.

In addition, the location of the hot spot strongly depends on the numerical modeling approach. It is clear that the mass flow will pass through the horizontal ducts to the other vertical duct due to the pressure difference between the two sides. Moreover, a low-pressure region generated near the washer may suck a part of the oil flowing in the second horizontal duct and redirect it toward the first duct (instead of letting it flow upwards); thus creating an inverse flow. In the 2D modeling approach, this flow behavior can cause a significant overheating of the bottom disc which sometimes becomes the hottest disc in the winding.

▪ Zustandsüberwachung von Kabelstrecken durch integrierte Sensoren in Kabelmuffen

M. Sc. Daniel Passow

In der Übertragungsnetzebene ist der Ausfall von Übertragungstrecken zum Erhalt der Versorgungssicherheit zu vermeiden. Für die Energieübertragung mittels Hochspannungskabeln ist der Einsatz von Kabelmuffen als Verbinder zwischen den einzelnen Kabelstücken unumgänglich. Um die Ausfallwahrscheinlichkeit zu reduzieren ist es notwendig, die Wartung von Kabelsystemen durch Zustandsüberwachung vorhersagbar zu machen. Dafür eignen sich Kabelmuffen als zentrale Punkte innerhalb einer Kabelstrecke, die mittels Sensoren Messdaten in Bezug auf den Isolationszustand, Auslastungsfaktor sowie die thermischen Beanspruchungen der Kabelstrecke bereitstellen. Für die Beurteilung des Isolationszustands ist eine empfindliche Messung der in der Kabelstrecke auftretenden Teilentladungen (TE) notwendig.

Eine herkömmliche Methode für das TE-Monitoring von Kabelstrecken stellt die Messung der im Kabelschirm fließenden Ausgleichsströme mit Hilfe einer Stromzange dar. Der Nachteil dieser Methode besteht in der fehlenden elektrischen Schirmung und einem erhöhten Rauschlevel. Als Alternative wird die Messung der auftretenden TE mittels eines in der Kabelmuffe integrierten kapazitiven Belags untersucht (siehe Fig. 1).

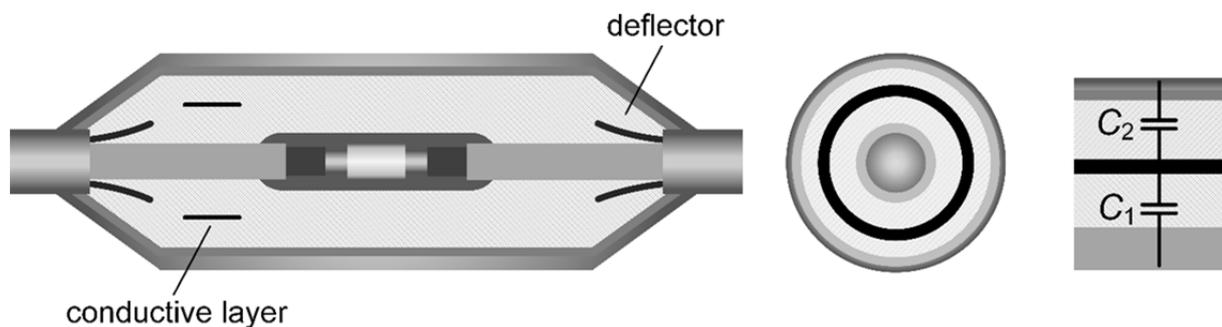


Fig. 1: Kabelmuffe mit im Isoliermedium integrierten kapazitiven Koppelbelag zur TE-Messung.

Joint with an integrated capacitive layer for PD-measurement inside of the insulation material.

Aufgrund der Lage zwischen Innenleiter und Kabelschirm ist eine effektive elektrische Schirmung gegeben. Die Empfindlichkeit der Messung hängt zum einen von dem kapazitiven Teilverhältnis ab, das bei Betrachtung der Kabelstrecke als System mit verteilten Parametern zu ermitteln ist. Zum anderen spielt auch der Abstand zum Ursprungsort der TE eine Rolle, da die frequenzabhängige Kabeldämpfung zu einer Verformung der TE-Impulse führt.

▪ **Condition Monitoring of Cable Transmission Lines through Integrated Sensors in Joints**

M. Sc. Daniel Passow

To ensure a secured power supply with high voltage transmission grids it is important to avoid failures of the high voltage components. Electrical power transmission through high voltage cables requires the interconnection of the different cable sections by a joint. In order to reduce the system failure rate, a predictive maintenance by condition monitoring is crucial. To achieve a good condition monitoring for a cable section, dense measurement data is required. Therefore the best suitable position for a measurement sensor is a cable joint based on the design related cyclic reappearance in a cable transmission line. Key parameters for the condition monitoring of a cable section are insulation condition, electrical load factor as well as the thermal load factor. To generate information about the insulation condition of a cable section also partial discharges (PD) are measured.

A common approach to PD monitoring is the measurement of the shield currents with a high frequency current transformer. However, this type of measurement has a high susceptibility to noise due to the absence of an electrical shield and therefore insufficient sensitivity. To achieve a higher sensitivity this research focuses on the PD measurement with an integrated sensor. Fig. 1 shows an additional conductive layer inside the insulation material, thus using capacitive coupling.

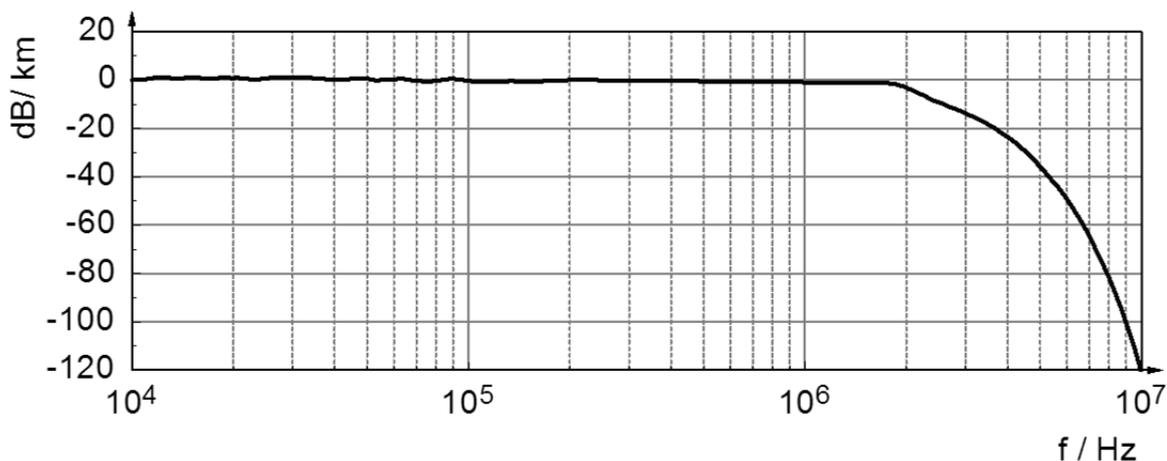


Fig. 2: Frequenzabhängige Kabeldämpfung in dB/km.
Frequency-dependent cable attenuation.

With the position between the conductor and the shield an effective electrical shielding to the sensor exists. The sensitivity of the system depends on the capacitive voltage divider, calculated by considering the cable section in distributed parameters as well as the distance from the PD source.

Fig. 2 zeigt die frequenzabhängige Kabeldämpfung, welche außerhalb des nach IEC 60270 genormten Messbereichs drastisch zunimmt und als selektives Merkmal für die Lokalisation des TE Ursprungsorts verwendet werden kann. Die eigentliche TE-Lokalisation soll mittels der in der kompletten Kabelstrecke verteilten, zeitlich synchronisierten Muffensensorik durch die Ermittlung der Laufzeitdifferenz durchgeführt werden. In Fig. 3 ist das Prinzip des verteilten Messsystems sowie die messbare Laufzeit dargestellt. Der Laufzeitunterschied ergibt sich aus der Differenz der beiden Aufzeichnungszeitpunkte. Bei bekannter Streckendifferenz zwischen den beiden Messpunkten kann die TE-Quelle lokalisiert werden.

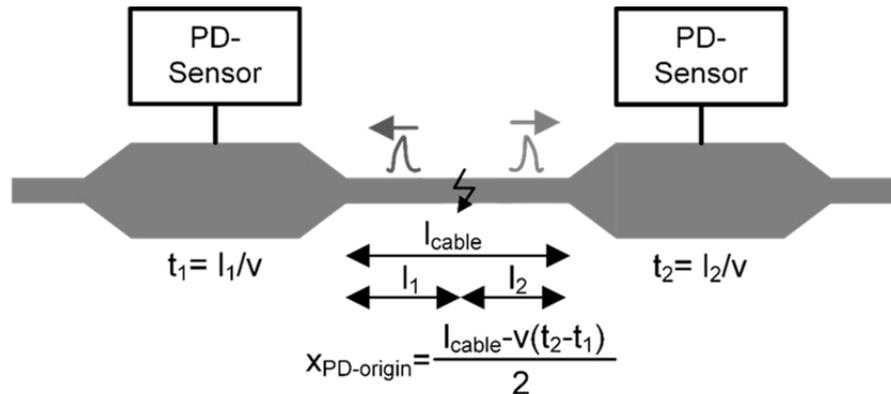


Fig. 3: Verteiltes TE-Messsystem zur Ermittlung des Fehlerorts.
Distributed PD measurement system for localization of PD-origin.

Neben der Messung der Teilentladungen zur Beurteilung des Isolationszustands der Energiekabelstrecke ist die Messung der Temperaturverteilung innerhalb der Kabelstrecke notwendig. Damit können Alterungserscheinungen der Kabelstrecke bei ungleichmäßigem Temperaturverlauf erkannt werden. Das Prinzip der Temperaturmessung basiert auf einer Anzahl von Temperatursensoren, die auf der Außenhülle außerhalb des feldgesteuerten Bereichs der Kabelmuffe angebracht sind, siehe Fig. 4. Für eine Beurteilung der Temperatur innerhalb der Muffe und der gesamten Kabelstrecke wird ein möglichst genaues thermisches Modell der Kabelmuffe benötigt. Ebenso muss der Temperaturgradient beim Übergang von der Kabelstrecke in die Kabelmuffe berücksichtigt werden. Je genauer das thermische Modell ist, desto weniger Sensoren zur Temperaturmessung werden benötigt. Mit den aufgezeichneten Messdaten kann ein sich abzeichnender Defekt frühzeitig erkannt und somit die Ausfallwahrscheinlichkeit von Kabelstrecken reduziert werden.

Due to the frequency-dependent cable attenuation, the original PD pulse shape changes while propagating through the cable. Fig. 2 shows the frequency-dependent cable attenuation which is growing rapidly outside the frequency range defined by IEC 60270. Therefore the pulse deformation is an additional parameter for locating the PD origin. To locate the origin of the partial discharge the propagation delay between two measurement points has to be calculated. Fig. 3. shows the principle of the distributed measurement systems with the propagating waves and the calculated PD origin.

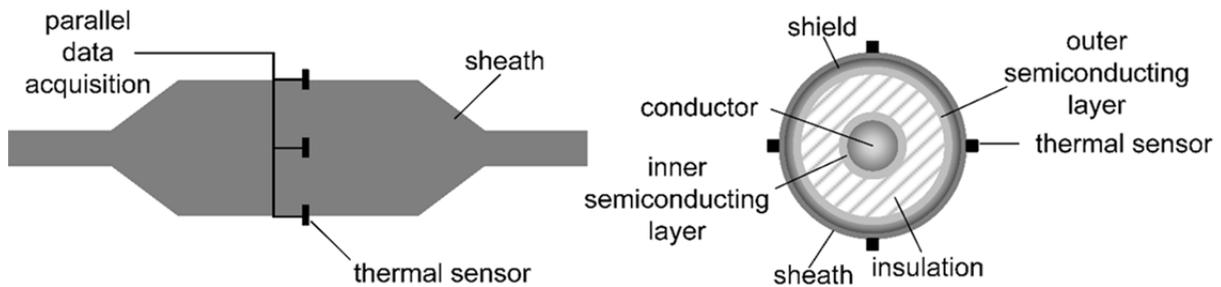


Fig. 4: Kabelmuffe mit symmetrisch verteilten Temperatursensoren zur Messung der Manteloberflächentemperatur.

Joint with temperature sensors distributed symmetrically for measuring the sheath temperature.

Besides monitoring the insulation condition, the temperature distribution in the cable is of interest to monitor ageing processes and the load factor of the different cable sections. Fig. 4 shows the positioning of the temperature sensors outside of insulation area on top of the joint sheath. To estimate the temperature inside of the joint an accurate thermal model of the joint is required. If the thermal model is accurate, the required number of thermal sensors will decrease. With the generated measurement data, looming failures can be predicted and timely maintenance is possible. This results in a lower failure rate, increasing the availability of electrical power.

▪ Einfluss von parasitären Gleichströmen auf induktive Stromwandler

M. Sc. Michael Schühle

Weltweit kommen bei der Erzeugung, dem Transport und Verbrauch von elektrischer Energie Wechselfeldspannungen und -ströme zum Einsatz. Mithilfe von Transformatoren konnte so bereits sehr früh in der Entwicklung unserer Stromnetze Energie auf eine höhere Spannung transformiert werden, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Obwohl unsere heutigen Stromnetze überwiegend Drehstromnetze sind, kommt es vor, dass zusätzliche - parasitäre - Gleichströme durch die Betriebsmittel fließen.

Es gibt mehrere Ursachen für Gleichströme in Hoch- und Höchstspannungsnetzen. Neben sogenannten GICs (Geomagnetically Induced Currents), welche auf Naturphänomene zurückzuführen sind, gibt es auch vom Menschen gemachte Ursachen, wie z.B. Korrosionsschutzanlagen, bei denen es zu einem Gleichstrom durch andere technische Anlagen kommt. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass auch die in Deutschland geplanten HGÜ-Strecken (Hochspannungsgleichstromübertragung) als mögliche Ursache in Frage kommen können.

Durch den zusätzlichen Gleichstrom, welcher durch die Betriebsmittel fließt, kann es zu einer Beeinflussung des Betriebsmittelverhaltens kommen. Speziell zeigt sich dies bei induktiven Betriebsmitteln wie Transformatoren, Drosseln und Wandlern.

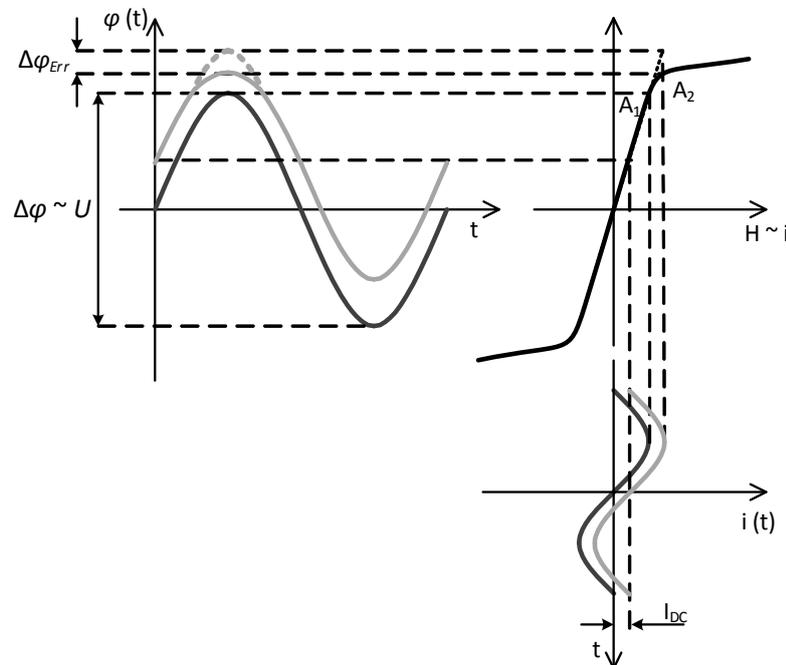


Fig. 1: Auswirkungen von Gleichstrom auf Eisenkerne bei Sättigung.
Impact on magnetic cores due to direct current during saturation.

▪ **Influence of Parasitic Direct Currents on Inductive Current Transformers**

M. Sc. Michael Schühle

Typically the worldwide power grids use alternating voltages. Voltages easily can be transformed, therefore the AC system became more popular than the direct current (DC) system. So today we use AC high voltage networks to transfer the generated power from the power plants to the loads. But it is possible, that a parasitic direct current is flowing through a high voltage transmission line and thereby through all connected high voltage equipment.

One reason for a parasitic DC is a phenomenon called ‘Geomagnetically induced current’ (GIC) which is caused by interferences between solar activities and the earth’s magnetic field. However, there are also human made DC currents. A common use case for DC currents in conjunction with grounded electrodes are cathodic corrosion protection systems. Another human made DC current is brought about high voltage direct current (HVDC) systems in close proximity to AC systems, like on hybrid transmission lines. This is a present scenario in the network development plan of Germany.

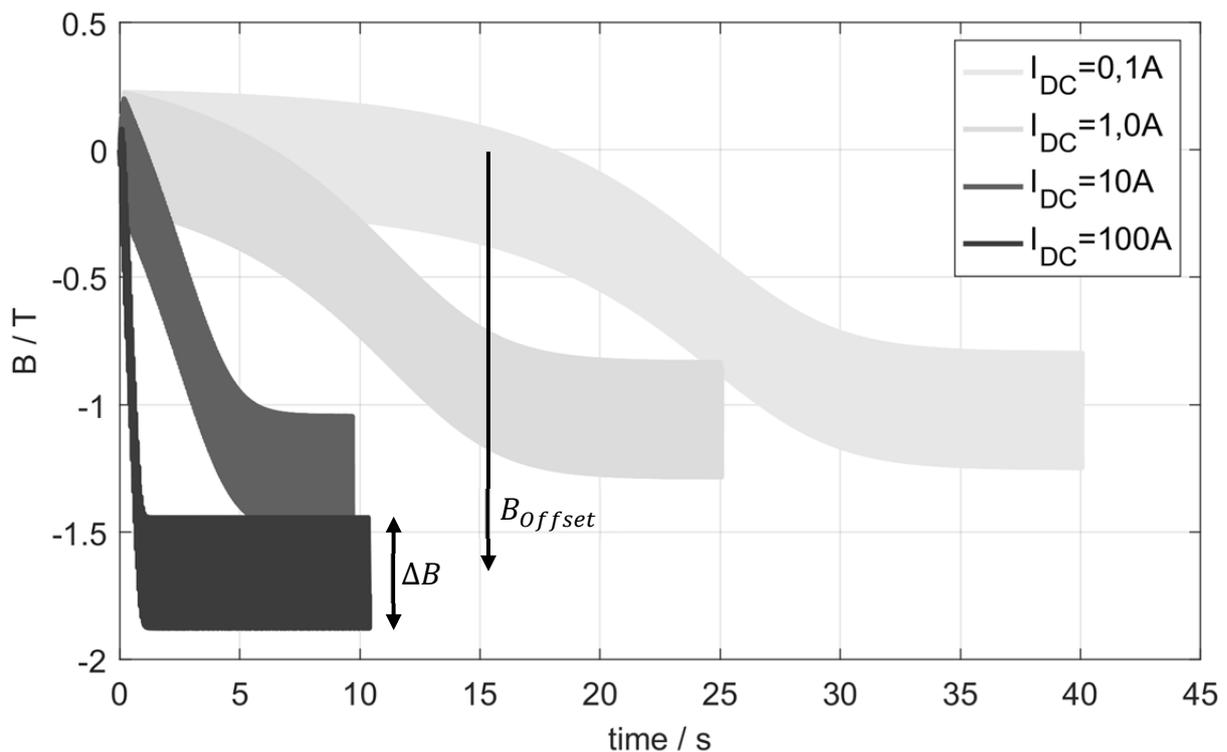


Fig. 2: Einfluss von parasitärem Gleichstrom auf die magn. Flussdichte im Eisenkern.
Influence of parasitic direct current on magnetic flux density in iron cores.

Fig. 1 veranschaulicht den Einfluss der Sättigung bedingt durch die Verschiebung des magnetischen Flusses. Da bei Stromwandlern, im Gegensatz zu klassischen Transformatoren, der Strom als feste eingeprägte Größe vorgegeben ist, kommt es durch die Verschiebung des Arbeitspunktes statt der typischen Sättigungsströme zu einem Fehler $\Delta\varphi_{Err}$ bei der Magnetisierung des Eisenkerns. Dieser Fehler beeinflusst das Übertragungsverhalten des Stromwandlers und führt zu einem kurzzeitigen Messfehler.

Fig. 2 zeigt den direkten Einfluss des Gleichstroms auf den magnetischen Fluss (die Flussdichte) innerhalb des Eisenkerns. Die Gleichströme in einem Bereich von $I_{DC} = 0,1 A - 100 A$ resultieren in einer zunehmenden dauerhaften Verschiebung B_{Offset} . Der Peak-to-peak-Wert der oszillierenden Flussdichte ΔB ist für alle Kurven identisch und zeitlich konstant.

Beim Vergleich der Einschwingvorgänge in Fig 2 zeigen sich für kleinere Gleichströme größere Zeitkonstanten als für größere Gleichströme. Dadurch kommt es bei kleineren Gleichströmen erst nach einer gewissen Verzögerung zu Messabweichungen.

Die in Fig. 2 gezeigten Kurven beziehen sich auf einen Messkern innerhalb eines Stromwandlers ohne Luftspalt. Im Gegensatz dazu verfügen Wandlerkerne für Schutzzwecke meist über einen Luftspalt. Die effektive Reluktanz des Luftspalts ist dabei um ein Vielfaches größer als die des Eisenkerns. Die Verschiebung B_{Offset} und die Amplitude des magnetischen Flusses ΔB lassen sich hierdurch deutlich reduzieren.

Der Einfluss eines parasitären Gleichstroms wird im gleichen Maße verringert, und eine maßgebliche Beeinflussung des Schutzwandlers kann für kleinere Gleichströme $I_{DC} < 10 A$ nahezu ausgeschlossen werden.

The additional direct current in inductive assets with iron cores results in a shift of the magnetic flux in the core. Fig. 1 shows the principal behavior of the magnetic flux and electric current with and without the presence of a parasitic DC at a current transformer. Due to the saturation effects of the core the sinusoidal flux curve will be distorted. The deformation results in a measurement error at the secondary side of the current transformer.

Fig. 2 shows the development of the magnetic field density during the influence of increasing direct currents $I_{DC} = 0,1 A - 100 A$. The oscillating amplitude ΔB is the same for all curves and for all time steps. The shift of the magnetic flux depends on the amplitude of the parasitic DC.

The transient oscillation of the magnetic shift is also influenced by the amplitude of the DC current. With higher DC currents the time constant decreases and a stable status is achieved earlier. Conversely, this means that measurement errors based on a small DC current appear with a delay of various seconds up to minutes.

The curves showed in Fig. 2 are based on a simulation of a measurement current transformer without an air gap.

On the other hand protection current transformers often have an additional air gap inside the core. The air gap results in a distinctly decreased oscillating amplitude ΔB and a decreased magnetic shift B_{Offset} .

The influences of a parasitic DC current on protection transformers with air gap is reduced in the same range and therefore the measurement error for parasitic DC current $I_{DC} < 10 A$ is close to zero.

- **High Frequency Modeling of Transformer Windings for Interpretation of Frequency Response Analysis (FRA) of Power Transformers**

M. Sc. Mehran Tahir

Power transformers are one of the major and key apparatus in electric power systems. Such transformers can suffer failures due to multiple stresses and aging. Thus, assessment of condition and diagnostic techniques are of great importance for improving power network reliability and service continuity. Several techniques are available to diagnose the faults within the power transformer. Frequency response analysis (FRA) method is a powerful technique for diagnosing transformer winding deformation and several other types of problems that are caused during manufacture, transportation, installation and/or service life. Previous contributions in the FRA topic has led to the standardization of the measurement procedure. Nowadays, the main efforts focus on the interpretation of the FRA results to reach a reliable algorithm for assessing the mechanical condition of the transformer windings.

This contribution proposes a high frequency model of transformer winding considering the frequency dependence of the parameters (R, L and C) by taking into account the non-uniform current distribution and skin/proximity effects. In the proposed approach, the FRA traces are derived directly from the windings FEM model. A sinusoidal voltage source is connected to the winding model similar to the reality to sweep the frequency in the corresponding range. Then, the FRA trace is derived by measuring the voltages at the winding terminals, analogous to the sweep frequency response analysis. Afterward, different kinds of mechanical deformations can be implemented in the windings to determine their effects on the FRA. Moreover, it is possible to model the mechanical deformations which are difficult to be converted into variations in circuit elements. The same dimensions of the test setup are taken to model the windings in detail. Fig. 1 demonstrates the real and simulated model of windings. The HV winding is a disc winding with 60 discs and 11 turns in each disc. However, the LV winding is a helical winding with 24 turn and 12 parallel conductor in each turn. Fig. 2 (a) represents the measured and simulated results for the healthy state of the single disc winding. The results prove the accuracy of the model in the frequency range up to 1 MHz. Both the measured and simulated results for the healthy state of the HV and LV windings are demonstrated in Fig. 2 (b) and (c) for end-to-end-measurements, open circuit and short-circuit respectively. The results presented prove that the model responses are in good agreement with the experimental measurements.

There are some resonance frequency and magnitude mismatches between the simulation and the measurement but it does not impair the application regarding the FRA interpretation. Implementing different mechanical and electrical deformations in the model and comparing the results with real measurements are the next steps in developing the applications of the proposed model.

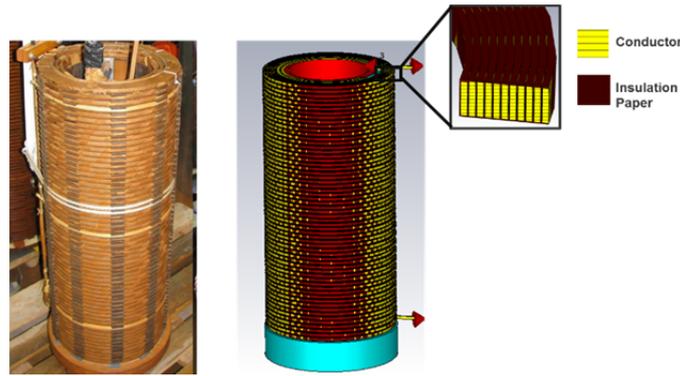


Fig. 1: Experimental and simulated model of HV and LV windings

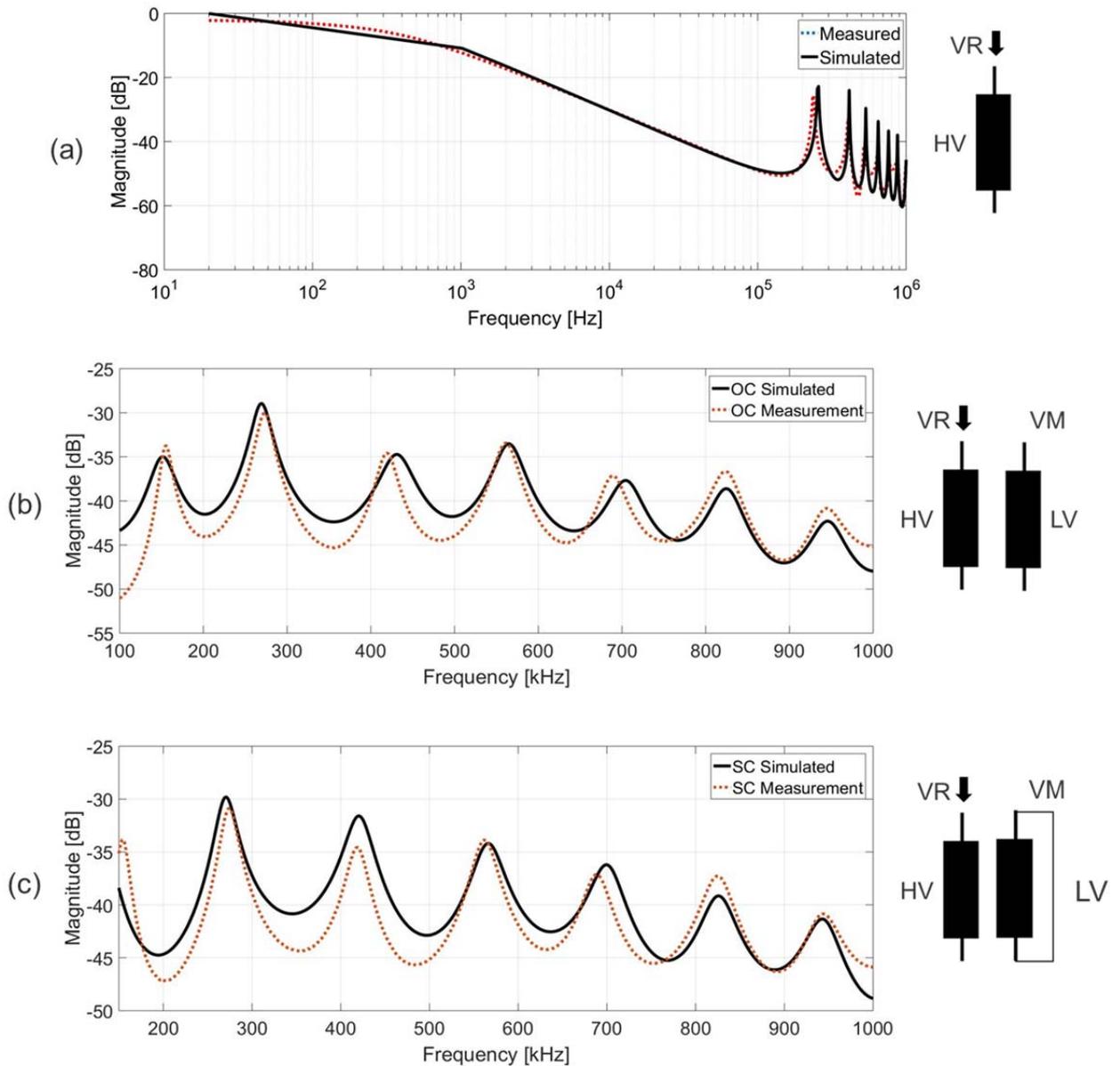


Fig. 2: Comparison of measured and simulated frequency responses of windings
 (a) Single HV disc winding, end-to-end-measurement
 (b) HV and LV winding model, open circuit measurement
 (c) HV and LV winding model, short circuit measurement

▪ Untersuchungen über die Einflüsse der Säurezahl auf die elektrische Leitfähigkeit von Öl und Pressboard

M. Sc. Farzaneh Vahidi

Der Einfluss von Säuren auf die elektrische Leitfähigkeit von Mineralöl Nyas Lyra X und Isolieröl Envirottemp FR3 wurde untersucht. Außerdem wurde die Leitfähigkeit von mit diesen Ölen imprägniertem HD-Pressboard beobachtet. Vorbereitet wurden diese Proben durch sorgfältiges Abmessen der benötigten Menge Öl und Säure. Anschließend wurde die Säure in das jeweilige Öl gemischt. Zudem wurde das bereits erwähnte Pressboard normgerecht getrocknet und anschließend mit den vorbereiteten Proben imprägniert. Die hergestellten Proben wurden durch einen Säuretitrator auf ihre tatsächliche Neutralisationszahl untersucht. Anschließend wurde die elektrische Leitfähigkeit mittels der PDC-Methode ermittelt. Dabei kommt ein Verfahren zum Einsatz, welches eine Polarisationsphase und eine Depolarisationsphase enthält. Diese Methode für die Bestimmung der Leitfähigkeit von Öl dauert eine Stunde und besitzt keine Depolarisationsphase. Bei Pressboard besitzt das Verfahren beide Phasen, die jeweils drei Stunden dauern. Die dabei gemessenen Stromverläufe wurden anschließend verwendet, um die Leitfähigkeit nach der Stromdifferenzenmethode zu berechnen. Der Einfluss der Säurezahl auf die Langzeitleitfähigkeit von Mineralöl und natürlichen Ester ist in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt.

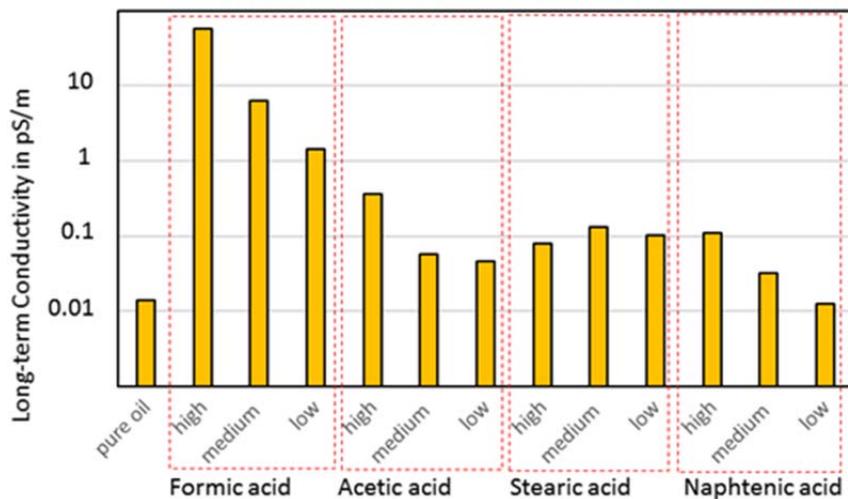


Fig. 1: Einwirkung der Säurezahl auf die Langzeitleitfähigkeit von Mineralöl bei $T=30\text{ °C}$ und $E=500\text{ V/mm}$.
Variation of long-term conductivity depending on acids concentrations in artificially prepared mineral oil samples at $T=30\text{ °C}$ and $E=500\text{ V/mm}$.

▪ **Electrical Conductivity of Oil and Oil-impregnated Pressboard dependent on Aging Byproducts**

M. Sc. Farzaneh Vahidi

One of the parameters, which has an influence on the electrical conductivity, is the aging of solid and liquid insulations. During operation time of converter transformers, there is a normal degradation of the insulation materials. Aging byproducts like various acids increase the electrical conductivity of the system. This can lead to a variation of the field distribution over the operation time of the converter transformer. In this contribution, the influence of different carboxylic acids on electrical conductivity of oil and impregnated pressboard is investigated. Two different insulating liquids, Nynas Nytro Lyra X and Envirotemp™ FR3™, were used in this investigation. Five different carboxylic acids in three concentrations were investigated in this approach. The amount of acid was calculated in order to reach a total acid number of 0.1, 0.3 and 0.5 as measured with potentiometric titration. The pressboard sheets were dried and immersed into prepared high-grade mineral oil and Envirotemp™ FR3™ natural ester samples with specific acid concentrations based on the standard. The results compare the effects of adding different amounts of hydrochloric acid to mineral oil and natural ester liquid during electrical conductivity measurement. The conclusion illustrates different behavior of electrical conductivity comparing short and long-chain acids content of specimens. Fig. 1 and Fig. 2 show the variation of the long-term conductivity for mineral oil and natural ester depending on acid concentrations in artificially prepared samples.

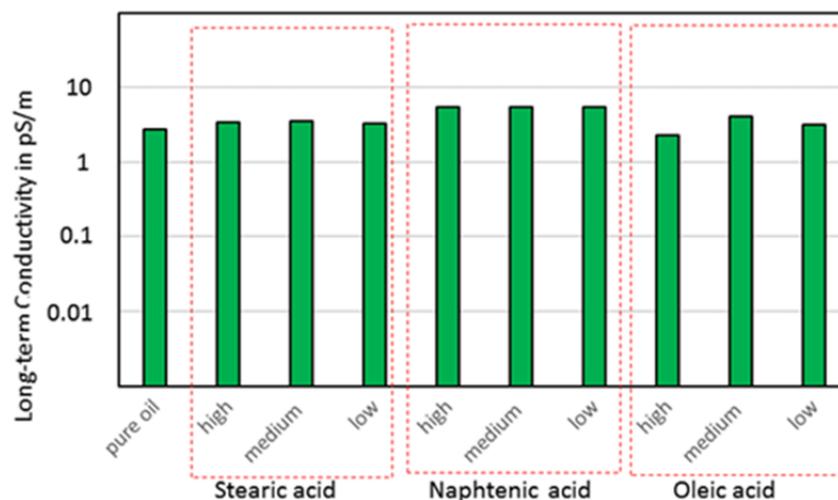


Fig. 2: Einwirkung der Säurezahl auf die Langzeitleitfähigkeit von natürlichen Ester bei T=30°C und E=500 V/mm.

Variation of long-term conductivity depending on acids concentrations in artificially prepared natural ester samples at T=30°C and E=500 V/mm.

▪ **Teilentladungen in SF₆-isolierten Anlagen bei Gleichspannungsbelastung**

M. Sc. Philipp Wenger

Der zuverlässige Einsatz elektrischer Betriebsmittel der Hochspannungstechnik setzt ein dauerhaft beständiges Isolationssystem voraus. Teilentladungen (TE) führen zum Zusammenbrechen eines kleinen Teils der Isolationsstrecke über einen sehr kurzen Zeitraum. Sie können die Isolation in einem schleichend fortlaufenden Prozess derart schädigen, dass es zum Ausfall des betroffenen Betriebsmittels kommt.

Ursache für Teilentladungen ist die lokale Erhöhung der elektrischen Feldstärke an scharfen Kanten und exponierten Spitzen oder die lokale Verringerung der elektrischen Festigkeit beispielsweise durch Lufteinschlüsse in festen oder flüssigen Isoliermedien. In gasisolierten Schaltanlagen (GIS) werden lokale Feldstärkeerhöhungen vor allem durch Metallpartikel verursacht, die während der Fertigung, der Montage aber auch während des Betriebs, z.B. durch Schalthandlungen, in die Anlage gelangen.

Leitfähige Defekte in Form von frei beweglichen Partikeln und festsitzenden Störspitzen emittieren abhängig von ihren geometrischen Eigenschaften und äußeren Bedingungen elektromagnetische Signale. Die zeitlichen Abstände und Amplitudenwerte der Einzelimpulse können Rückschlüsse auf die Form und Größe des Defekts geben.

Die messtechnische Erfassung und Charakterisierung von TE in AC-GIS ist in der IEC 60270 normativ verankert. Die für Wechselspannung gültigen Messmethoden und Auswerteverfahren lassen sich jedoch nur bedingt auf Gleichspannungsanwendungen übertragen. Für HGÜ-Systeme existieren bis heute keine standardisierten Methoden um unterschiedliche Teilentladungsquellen zu detektieren und zu identifizieren. Neben der bereits früh etablierten elektrischen Teilentladungsmessung stehen Messsysteme mit UHF- und akustischen Sensoren sowie die optische Erfassung der TE (z.B. mit einer Hochgeschwindigkeitskamera) zur Verfügung.

Das Ziel des Forschungsprojektes ist die zuverlässige Zustandsbewertung der Isolation von GIS bei hohen Gleichspannungen hinsichtlich aktiver TE durch feste Störspitzen und frei beweglicher, leitfähiger Partikel. Der Fokus soll auf der korrekten messtechnischen Erfassung der Störstellenemissionen und der Bewertung geeigneter Auswerteverfahren liegen. Dazu sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Messmethoden für den jeweiligen Defekt gegeneinander abzuwägen. Als Bewertung dienen die Empfindlichkeit, Selektivität und Störunempfindlichkeit des Messsystems. Darüber hinaus soll festgestellt werden, in wie weit sich die gemessenen Parameter hinsichtlich ihres Informationsgehalts und Korrelation zur TE-Quelle unterscheiden.

- **Partial Discharge in SF6-insulated Systems at DC Stress**

M. Sc. Philipp Wenger

Reliable use of high-voltage electrical equipment requires a permanently stable insulation system. Partial discharges (PD) lead to the breakdown of a small part of the insulation section over a very short period of time. The insulation may be damaged in a creeping continuous PD process in such a way that the affected equipment fails.

PD is caused by the local increase of the electric field strength at sharp edges and exposed tips or the local reduction of electrical strength, for example due to voids in solid or liquid insulating media. In gas-insulated switchgear (GIS), the local field strength is increased by metal particles which are generated during manufacture, during assembly but also during operation, e.g. by switching operations.

Conductive defects in the form of freely moving particles and fixed protrusions emit electromagnetic signals depending on their geometric properties and external conditions. Time lag between consecutive pulses and their amplitude values can give conclusions about the shape and size of the defect.

The metrological detection and characterization of PD in AC-GIS is specified in IEC 60270. However, the measuring and evaluation methods valid for AC voltage cannot be transferred to DC voltage applications directly. For HVDC systems there are still no standardized methods to detect and identify different partial discharge sources. In addition to the already standardized electrical PD measurement, measuring systems with UHF- and acoustic sensors as well as systems with optical detection of the PD (e.g., by a high speed camera) are available.

The aim of the research project is the reliable condition assessment of the isolation of GIS at high DC voltages with respect to active PD caused by fixed protrusions and freely moving, conductive particles. The focus is on the correct metrological recording of the impurity emissions and the evaluation of suitable evaluation methods. For this purpose, the advantages and disadvantages of the separate measuring method for the respective defect should be weighed against each other. The evaluation is based on the sensitivity, selectivity and immunity to interference of the measuring system. In addition, it should be determined to what extent the measured parameters differ with regard to their information content and correlation to the PD source.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

▪ Forschungsprojekt „grid-control“

Laufzeit: Juli 2015 – Juni 2018

Im Forschungsprojekt „grid-control“ wird in einem Konsortium von insgesamt 9 Partnern aus Industrie und Wissenschaft ein Gesamtkonzept für zukunftsfähige Stromnetze erforscht. Die Förderung des Forschungsprojekts erfolgt durch die Initiative „Zukunftsfähige Stromnetze“ und ist Teil des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung. Das Ziel ist die Ausgestaltung eines Zusammenspiels der Verbraucher und neuartiger Prosumenten, des Energiemarktes und des Verteilnetzbetreibers (VNB). Hierfür wird die Koordination von Netznutzung und dezentraler Erzeugung in kritischen Situationen, die Bereitstellung von Systemdienstleistungen, die Netzplanung sowie die Überwachung des Netzzustandes untersucht.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Themenschwerpunkte des IEH im Forschungsprojekt „grid-control“ sind die Zustandsschätzung und probabilistische Netzplanung. Mithilfe der Zustandsschätzung soll im Projekt ein System entwickelt werden, das die erforderliche Beobachtbarkeit mit einem Minimalmaß an benötigter Sensorik bewerkstelligen soll. In Fig. 1 ist das Konzept zur Einbindung der Zustandsschätzung unter Berücksichtigung der Messdatenerfassung und Messdatenverwaltung durch VNB dargestellt. Die erfassten Messdaten werden dem VNB zur Verwaltung übergeben und anschließend die benötigten Daten dem Zustandsschätzer zur Verfügung gestellt. Auf Basis der Messdaten wird dann der Systemzustand ermittelt und visualisiert. Aktuell werden im Rahmen des Projektes Methoden zur optimalen Platzierung von Messgeräten auf Mittel- und Niederspannungsebene entwickelt.

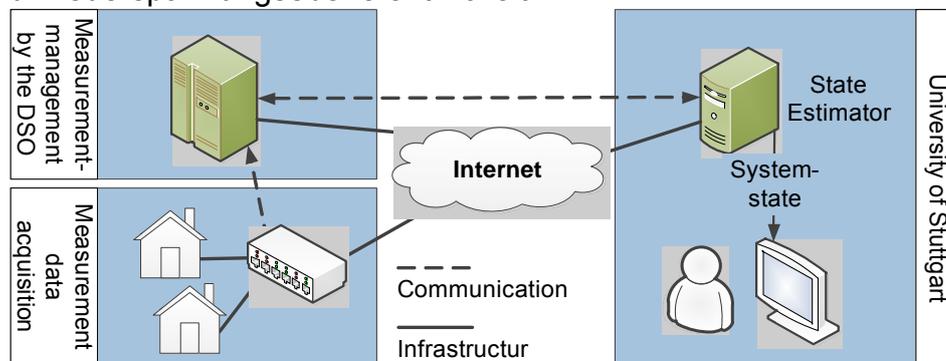


Fig. 1: Konzept zur Einbindung der Zustandsschätzung.
Concept of embedding the state estimation

- **Research Project “grid-control”**

Period: July 2015 – June 2018

The research topic of “grid-control” is an overall concept for future-compliant electric power systems. The consortium consists of 9 partners of industry and science. The research project is sponsored by the 6.



energy research program “future-compliant electric power systems” of the German federal government. The objective is the arrangement of interactions between consumer or new prosumer, energy market and distribution system operator. Therefore, the coordination of the grid components and decentral generation, the provision of ancillary services, network expansion planning and state estimation is investigated.

The main emphasis of IEH in “grid-control” is the state estimation and probabilistic network expansion planning. The observability of the power system is investigated in the research project by using a minimal number of sensors. Fig. 1 shows the concept of the integration of the state estimation in consideration of measurement data acquisition and measurement data management by the DSO. The recorded measurement data will be turned over to the DSO for the management process. Afterwards the necessary data will be sent to the state estimator. Based on the measurement data the system state will be determined and visualized. In compliance with the project, methods for an optimal meter placement in medium- and low-voltage grids are currently developed.

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

▪ **Forschungsprojekt „CALLIA“**

Laufzeit: Juli 2016 – März 2019

CALLIA zielt darauf ab, Erkenntnisse über Technologien und Konzepte zu gewinnen, welche die Kompatibilität von Erneuerbaren Energien im Verteilnetz unterstützen. Das Konsortium besteht aus 13 Partnern aus Industrie bzw. Wissenschaft in Deutschland, Belgien, Österreich und der Türkei.



CALLIAs Ziele leiten sich aus den Aufgaben der europäischen “Energy 2020 strategy: towards a low carbon economy” ab, indem die Integration von Erneuerbaren Energien durch eine flexiblere, direkte Abstimmung zwischen den Verteilnetzen verbessert wird. Lösungen (Modelle, Kommunikationsmöglichkeiten und Werkzeuge) für eine vertikale intra-VNB-Energiehandels-Wertschöpfungskette „Prosument – Aggregator – Verteilnetzbetreiber (VNB)“ werden für den inter-VNB-Leistungshandel ausgearbeitet.

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

In Rahmen diesem Projekt wurden am IEH Methoden zur Aggregation von Flexibilitäten in Verteilnetzen untersucht. Ziel dieser Methoden ist die Potenzialanalyse der Nutzung von Flexibilitäten als Systemdienstleistungen, wie z. B. Engpassmanagement oder Spannungshaltung. In der HiL-basierten Simulationsumgebung werden Netzmodelle der beteiligten VNB mit lokalen Flexibilitäten modelliert. Das Netzmodell wird mit multiagentenbasierter Steuerarchitektur gekoppelt, um zu untersuchen, wie die entwickelte Marktkonzepten die elektrischen Netze beeinflussen können.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project “CALLIA”**

Period: July 2016 – March 2019

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



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

During the project, methods for the aggregation of flexibilities in distribution grids were researched at the IEH. The aim of these methods is the analysis of the potential use of flexibilities as system services, such as congestion management or voltage control. In the HiL-based simulation environment, network models of the involved DSOs are modeled and coupled with local flexibilities. A multiagent-based architecture will be designed to control the local flexibilities, in order to investigate how the developed market concepts can affect electrical networks.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Laufzeit: September 2016 – Dezember 2018

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



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

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

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

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

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

Period: September 2016 – December 2018

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

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

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

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

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

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



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

▪ **Forschungsprojekt „C/sells“**

Laufzeit: Januar 2017 – Dezember 2020

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



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

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- **Research Project “C/sells”**

Period: January 2017 – December 2020

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



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

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

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

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

Laufzeit: April 2017 – März 2020

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

Dafür wird u.a. das in der Forschungsfabrik ARENA2036 installierte Monitoring-System 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

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

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

Period: April 2017 – March 2020

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

The main tasks are as follows:

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

▪ Multiagenten basierter Betrieb eines Verteilnetzes

M. Sc. Manswet Banka

Mit der Energiewende werden immer mehr steuerbare Anlagen mit relativ kleiner Leistung am Verteilnetz angeschlossen. Obwohl das Gesamtpotential der Anlagen bezüglich des Einflusses auf Stabilität des Netzes nicht unterschätzt werden darf, scheint deren zentrale Koordination wegen der Menge der zu bearbeitenden Daten nicht mehr möglich.

Eine vielversprechende Lösung des Problems sind dezentrale Steuerungssysteme, die auf Multiagentenarchitektur basieren. In diesem Konzept ist für die Steuerung einer Anlage, wie z.B. PV, Batteriespeicher, steuerbare Last, etc., jeweils ein Agent zuständig. Der Agent kann je nach Bedarf direkten Kontakt mit anderen Agenten auf unterschiedlichen Ebenen der Struktur aufnehmen, weshalb deutlich weniger Daten zentral gesammelt und bearbeitet werden müssen. Am IEH wurde das Konzept mit Hilfe einer Control-Hardware-in-the-Loop (CHiL) Simulationsumgebung umgesetzt (siehe Fig. 1).

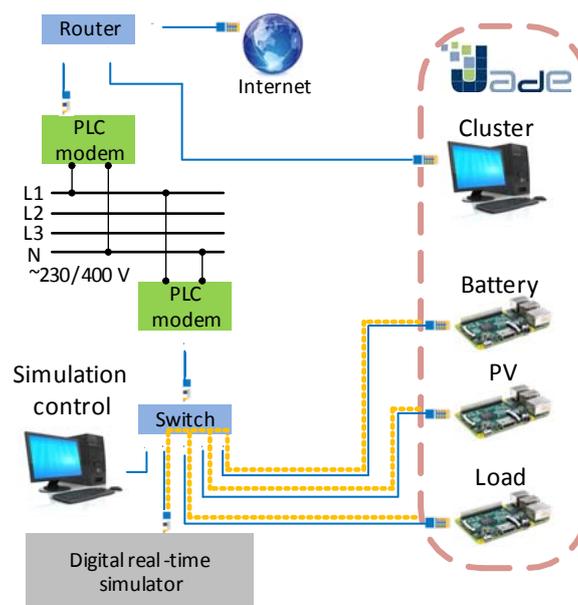


Fig. 1: Struktur der CHiL-Simulationsumgebung.

The structure of the implemented CHiL simulation environment.

Zur CHiL Umgebung gehören neben dem digitalen Netzsimulator auch Einplatinencomputer, auf denen die Agenten implementiert sind sowie die Kommunikationsinfrastruktur. Die Multiagentenarchitektur besteht aus einem Koordinator-Agenten und Anlagenagenten, die Steuer- und Zustandssignale mit den im Simulator modellierten Anlagen austauschen. Der Koordinator-Agent bekommt eine Wirkleistungsvorgabe für sein aggregiertes Portfolio vom Markt.

- Multi-Agent Based Operation of a Distribution Grid**
M. Sc. Manswet Banka

The renewable energy sources paradigm in electric power system drives departure from fossil fuels towards renewables, and more and more small devices are connected at the distribution level. The aggregated influence on the power system stability of these small devices should not be underestimated, though its centralized coordination seems to be technically not feasible.

A promising solution of the problem are control systems which are based on the multi-agent architecture. In this concept an agent is responsible for the control of each controllable device like a PV, battery storage system or flexible load. The agents can communicate directly with other agents at the same or different levels of the architecture requiring information or control actions. At IEH such a concept was implemented using Control Hardware in the Loop (CHiL) environment (Fig. 1).

Besides the digital simulator the CHiL environment includes also single-board computers, where the agents run, and the communication infrastructure. The multi-agent architecture consists of a cluster coordinator agent and device agents. They exchange state and control signals with the modeled devices. The coordinator agent receives active power set points from a market for its aggregated portfolio and, based on the current operation points of the devices, finds the optimal set points for the coming market period (Fig. 2).

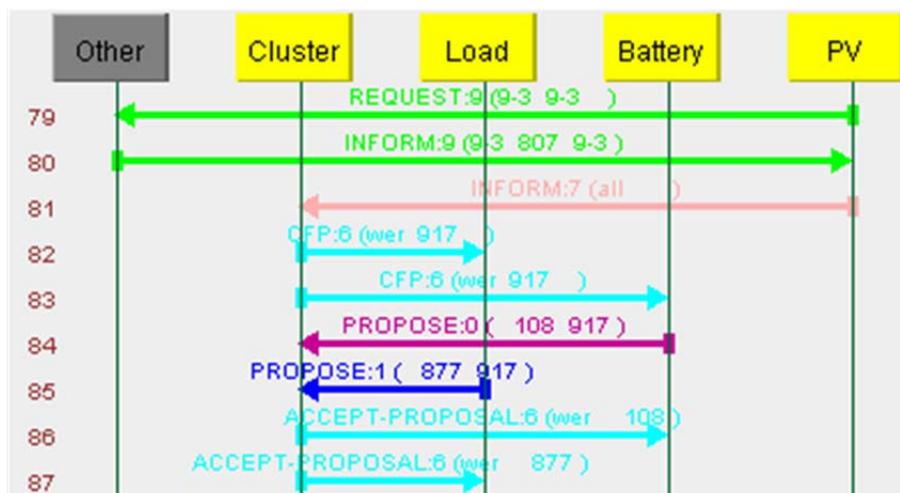


Fig. 2: Agenten-Kommunikation bei der Suche nach neuen Sollwerten.
 Negotiation process between agents during search for new set points.

Basierend auf den Betriebspunkten der Anlagen führt er eine Optimierung durch, um die neuen Sollwerte zu finden (siehe Fig. 2).

Der Informationsaustausch zwischen den Agenten erfolgt mit der Agent Communication Language (ACL) und in der physikalischen Schicht von kommerziellen Geräten, die den G3-PLC Standard der Power Line Communication Technologie unterstützen. Die Modelle der Anlagen beinhalten Modbus/TCP Treiber, um mit den entsprechenden Anlagenagenten kommunizieren zu können.

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass sich Multiagentensysteme für die Anwendung in Verteilnetzen eignen. Die entwickelte Simulationsumgebung ermöglicht die Untersuchung und Bewertung der Logik solcher Systeme sowie praktische Aspekte der eingesetzten IKT.

The information exchange between agents is performed using Agent Communication Language (ACL) and the physical layer of commercial devices which implement the G3-PLC standard of the Power Line Communication.

The models of the controllable devices include Modbus/TCP driver for the purpose of communication with the proper device agent.

The performed simulations show that the multi-agent systems are suitable for the controlling schemes in distribution grids. The developed simulation environment allows investigation and evaluation of the logic of such systems as well as practical aspects of used ICT.

- **Aufbau eines SmartGrid-Labor zur Untersuchung des Verhaltens von Microgrids**

M. Sc. Matthias Buchner

Microgrids sind ein vielversprechendes Konzept für die zukünftige Energieversorgung, da sie die Komplexität des Netzes verringern und die Integration von Erneuerbaren Energien vereinfachen. Ein Microgrid ist eine lokale Gruppierung von Energieerzeugern und Verbrauchern, die unter normalen Bedingungen mit dem Versorgungsnetz verbunden ist und synchron betrieben wird. Es hat aber die Möglichkeit unabhängig vom Versorgungsnetz als eigenständiges Inselnetz betrieben zu werden, wenn es die physischen oder wirtschaftlichen Bedingungen erfordern. Um den fehlerfreien Betrieb von Microgrids im Energienetz gewährleisten zu können müssen neuartige Regelungs- und Sicherheitskonzepte entwickelt werden.

Am IEH wird dazu ein SmartGrid-Labor für Hardware-in-the-Loop-Tests aufgebaut, das zur Untersuchung des Verhaltens von Microgrids dienen soll. Dabei werden einzelne Anlagen (Wechselrichter, Generatoren, elektrische Lasten, auch Sekundärtechnik, z.B. Schutzgeräte) als Hardware im Labor installiert und betrieben (siehe Fig. 1), welche in den unterschiedlichsten Szenarien auf die Tauglichkeit für den Inselnetzbetrieb überprüft werden sollen. Mit Hilfe des SmartGrid-Labors soll eine Bewertung der Stabilität von Regelalgorithmen, die Untersuchung des Inselnetzbetriebs sowie die Überprüfung von Schutzkonzepten für Microgrids vorgenommen werden, wobei ein besonderes Augenmerk auf den transienten Vorgängen beim Übergang zum Inselnetzbetrieb und bei der Resynchronisation liegt.

Um die Komponenten und Algorithmen unter realen Bedingungen untersuchen zu können, dient ein Linearverstärker in Kombination mit einem Opal-RT Echtzeitsimulator als Netzemulator. Dies erlaubt, verschiedenste Ausgangsszenarien wie der Ausfall eines Kraftwerks oder die fehlerhafte Prognose von Erneuerbaren Energien zu simulieren. Ein von einem Asynchronmotor angetriebener Synchrongenerator dient als netzbildende Synchronkaskade. Sie gibt Spannung und Frequenz vor, an denen sich die netzspeisenden Elemente orientieren. Über einen Umrichter lassen sich Frequenz und Spannung variieren, wodurch auch asynchrone Resynchronisationsvorgänge analysiert werden können. Mit einem Wind- und einem PV-Simulator lassen sich die Auswirkungen erneuerbarer Energieerzeuger auf die Betriebsweise und Stabilität von Microgrids untersuchen. Dabei werden die PV-Module von einer DC-Quelle simuliert, welche es erlaubt beliebige UI-Kennlinien von Photovoltaikmodulen nachzubilden. Durch den Vier-Quadrantenbetrieb der dynamischen Last kann das Microgrid je nach den Bedürfnissen des Versuchsszenarios kapazitiv, induktiv oder rein ohmsch belastet werden.

▪ **Development of a SmartGrid Laboratory to investigate the Behaviour of Microgrids**

M. Sc. Matthias Buchner

Microgrids are regarded as a promising concept for the future energy supply, since they are designed to reduce the complexity of the grid and simplify the integration of renewable energies. A microgrid is a local grouping of energy producers and consumers that is connected to the grid and operated synchronously under normal conditions. However, it has the possibility to be operated as an islanded network independent of the supply network if physical or economic conditions will require. In order to ensure the fault-free operation of microgrids in the energy network, novel control and safety concepts must be developed.

In order to be able to investigate these future challenges of network operation, a SmartGrid laboratory for hardware-in-the-loop tests will be set up at the IEH to investigate the behavior of microgrids. Individual systems such as inverters, generators, electrical loads and secondary technology, such as protective devices, are installed and operated as hardware in the laboratory (see Fig. 1) which is to be tested for suitability for stand-alone operation in a wide variety of scenarios. The SmartGrid laboratory will be used to evaluate the stability of control algorithms, to study off-grid operation and to examine the protection concept for microgrids, with particular attention to transient processes during transition to off-grid operation and resynchronization.

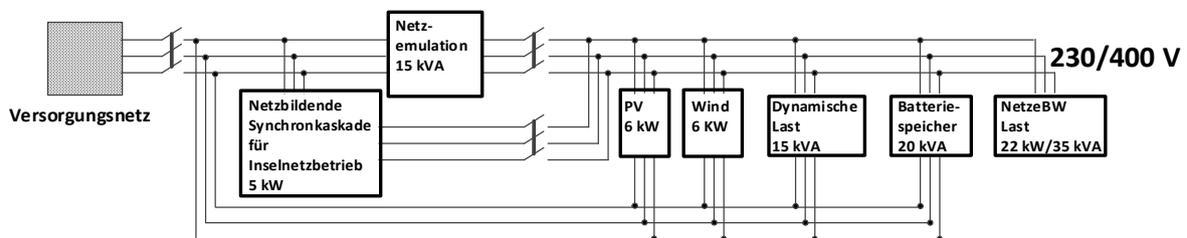


Fig. 1: Schematische Darstellung des SmartGrid-Labors.

Schematic representation of the SmartGrid laboratory.

In order to be able to examine the components and algorithms under real conditions, a linear amplifier in combination with an Opal-RT real-time simulator acts as a network emulator. This makes it possible to simulate various initial scenarios such as the failure of a power plant or the incorrect forecasting of renewable energies. A synchronous generator driven by an asynchronous motor serves as a network-forming synchronous cascade which determines the voltage and frequency at which the network feeding elements orient themselves. A frequency and voltage variation is possible via an inverter, allowing asynchronous resynchronization processes to be analyzed. Using a wind and PV simulator, the effects of renewable energy sources on the operation and stability of microgrids can be investigated. The PV modules are simulated by a DC source which allows the simulation of any UI curves of photovoltaic modules.

Dabei besteht die Möglichkeit, in den verbleibenden zwei Quadranten flexibel in das Versuchsnetz zurückzuspeisen. Zudem lässt sich die Leistungsaufnahme der einzelnen Phasen der dynamischen Last frei einstellen. Dadurch lassen sich die Auswirkungen einer unsymmetrischen Belastung einzelner Phasen auf die Betriebsweise der verbleibenden Komponenten, die Spannungsqualität und die Stabilität des Microgrids untersuchen. Der Batteriespeicher soll neben der Möglichkeit zur Netzbildung hauptsächlich eine netzunterstützende Funktion übernehmen. Durch diverse Regelungs- bzw. Steuerungsmöglichkeiten wie der gezielten Entnahme und Einspeicherung von Energie kann Störungen entgegen gewirkt werden.

Due to the 4 quadrant operation of the dynamic load, the microgrid can be subjected to capacitive, inductive or resistive loads depending on the requirements of the test scenario. So it is also possible to flexibly feed back into the test network in the remaining two squares. In addition, the power consumption of the individual phases of the dynamic load can be freely adjusted. In this way, the effects of asymmetric loading of the individual phases on the operation of the remaining components, the voltage quality and the stability of the microgrid can be investigated. In addition to the possibility of grid forming, the battery memory is to have a mainly grid supporting function. Disruptions can be counteracted by various control options such as the targeted extraction and storage of energy.

▪ **Flexibilitätsschätzung in aktiven Verteilnetzen**

M. Sc. Daniel Contreras

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

Die Forschung konzentriert sich auf die Weiterentwicklung von Methoden, die es den Netzbetreibern ermöglichen, den Status des Netzes zu kommunizieren, ohne ihre Netzwerktopologie veröffentlichen zu müssen. Der betrachtete Ansatz beinhaltet die Aggregation der globalen Flexibilität eines Verteilnetzes an einem einzigen Verknüpfungspunkt zum ÜNB. Es wurde ein lineares Optimierungsproblem definiert, bei dem alle Netzbeschränkungen berücksichtigt werden. Die Aggregationsmethode berücksichtigt jede einzelne Flexibilität in den betrachteten Verteilnetzen, wie z.B. dezentrale Erzeugungseinheiten, Speichersysteme oder steuerbare Lasten. Während des Aggregationsprozesses werden die Netzbeschränkungen beachtet. Dies ermöglicht die Bewertung der Auswirkungen, die durch die Verwendung von flexiblen Ressourcen an bestimmten Punkten des Netzes im Netz verursacht werden. Eine solche Formulierung des Problems erfordert detaillierte Kenntnisse der Netzwerktopologie, was eine zusätzliche Herausforderung darstellt. Eine schematische Darstellung des Aggregationskonzepts ist in Fig. 1 dargestellt.

▪ **Flexibility Estimation in Active Distribution Grids**

M. Sc. Daniel Contreras

The enormous increase in the installation of distributed energy resources (DER) in the medium and low voltage power grids forces distribution grid operators (DSO) to change the way how they operate their grids. The traditional “fit-and-forget” approach is being replaced by an active role where grid operators require knowing more precisely the status of the grid. Most DER are capable of providing certain levels of flexibility to the grid, either through local controllers or through a centralized control. This flexibility provision is expected to be used to help DSOs to cope with grid issues, such as congestion management or voltage control. An optimal allocation of these flexibilities requires improving the communication and coordination between grid operators (especially between DSOs and TSOs). In the case of Germany, each one of the four TSOs needs to work together with more than a hundred different DSOs connected to their control zone. Such a scenario increases the difficulty for the participants to achieve legitimate levels of coordination. Different frameworks for TSO-DSO coordination, defining roles and responsibilities, have been proposed, but the fact that grid operators are in many cases reluctant to share details of their grid makes most of these schemes impractical.

This research focuses on the further development of methods that would allow grid operators to communicate the status of the grid without having to expose their grid topology. The considered approach involves the aggregation of the global flexibility of a distribution grid at a single interconnection point to the transmission grid. A linear optimization problem was defined where all grid constraints are considered. The aggregation method considers single flexibility providing units (FPU) as the input. Any decentralized generating unit, storage system or controllable load that can provide flexibility to an electrical grid can be considered as a FPU. This allows evaluating the effects caused in the grid by the use of flexible resources located at specific points of the grid. Such a formulation of the problem requires a detailed knowledge of the grid topology, adding an additional challenge that needs to be faced. A schematic representation of the aggregation concept is shown in Fig. 1.

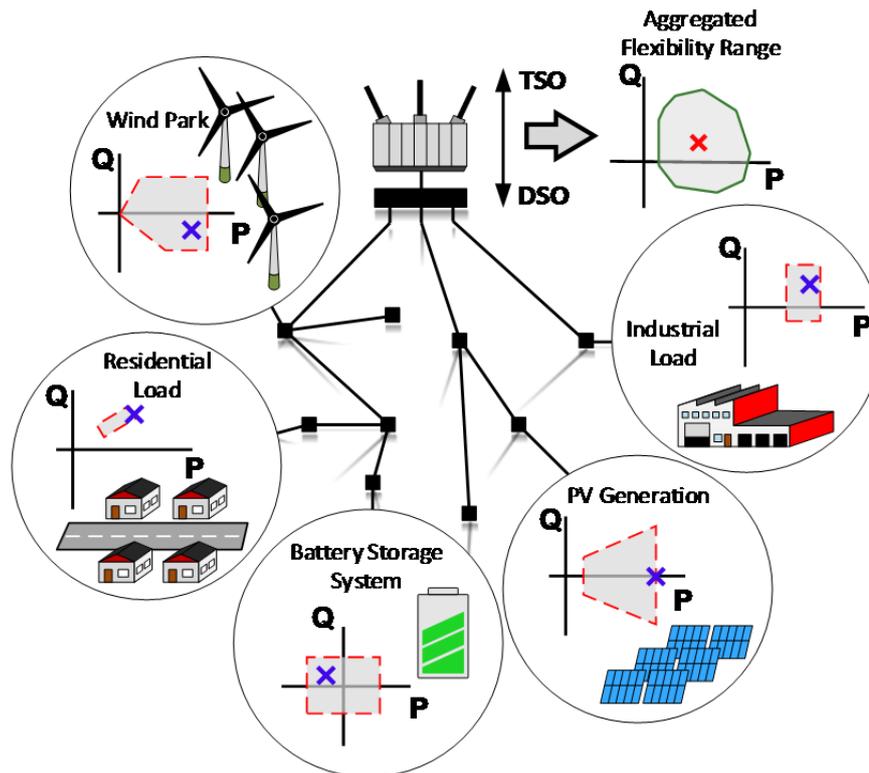


Fig. 1: Schematische Darstellung des Aggregationsalgorithmus im Verteilnetz.
Schematic representation of the aggregation algorithm applied to a distribution grid.

Als Ergebnis erhält man PQ-Flexibilitätsdiagramme des Netzes. Sie zeigen mögliche Betriebspunkte, die das gesamte Netz ohne Verletzung seiner Einschränkungen einnehmen kann. Die Netzverluste beeinflussen diese Ergebnisse. Die Informationen können von Netzbetreibern gemeinsam genutzt werden (unter Berücksichtigung eines Bottom-up-Ansatzes). Sie helfen ihnen, ihre Entscheidungsmechanismen zum Betrieb des Netzes zu verbessern. Durch eine Linearisierung der dem Lastfluss zugrunde liegenden Gleichungen kann die Rechenzeit des Algorithmus drastisch verkürzt werden, während die Genauigkeit beibehalten wird. Die für ein städtisches 20-kV-Verteilungsnetz erhaltenen Ergebnisse zeigt Fig. 2.

Die entwickelte Methode hat viele praktische Anwendungen, die zur Verbesserung einer ÜNB-VNB-Koordination beitragen. Sie kann dem ÜNB helfen, den Effekt einer Aktivierung von Flexibilitäten innerhalb der VNB-Netze (z.B. durch Frequenzregelung) zu bewerten. Die Auswirkungen eines Flexibilitätsmarktes können beobachtet werden, indem Marktergebnisse als Einschränkungen in das OPF-Modell aufgenommen werden. Einige dieser Eigenschaften werden im Projekt CALLIA erforscht.

The expected result is a PQ flexibility chart of the grid which shows the feasible operation points that the entire grid can achieve without violating its constraints (grid losses are considered). This information can be shared between grid operators (considering a bottom-up approach) and help them to improve their decision-making mechanisms on how to operate the grid. By linearizing the grid equations, the computation speed of the algorithm can be drastically increased while maintaining the accuracy. The results obtained for a 20 kV urban distribution grid are shown in Fig. 2.

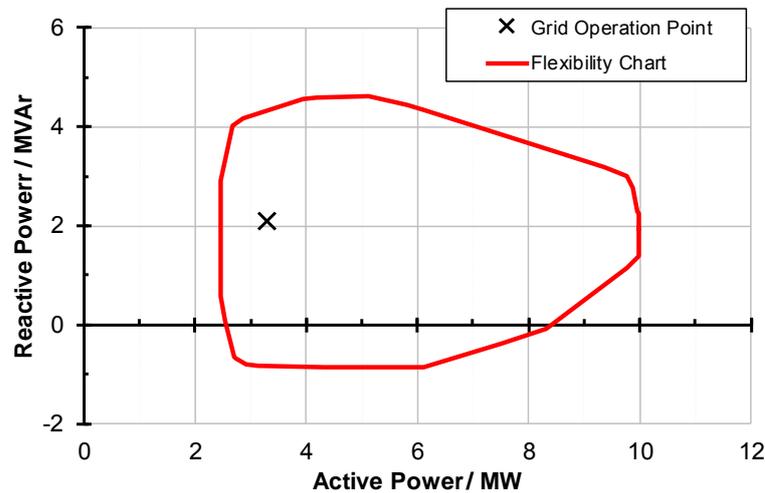


Fig. 2: Aggregierter Flexibilitätsbereich eines 20-kV-Verteilnetzes.
 Aggregated flexibility chart of a 20 kV distribution grid.

The developed method can have many practical applications which may 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 one 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. Some of these characteristics are under research within the CALLIA project.

▪ Regelung leistungselektronisch-gekoppelter Anlagen in Inselnetzen

M. Sc. Simon Eberlein

Durch den wachsenden Anteil an dezentralen Erzeugern im Verteilnetz ist es möglich, Teile des Netzes autonom, als vom Verbundnetz getrennte Inselnetze, zu betreiben. Diese Betriebsart ist beispielsweise dann erforderlich, wenn wegen Störungen die Versorgungssicherheit von Seiten des Verbundsystems nicht gegeben ist.

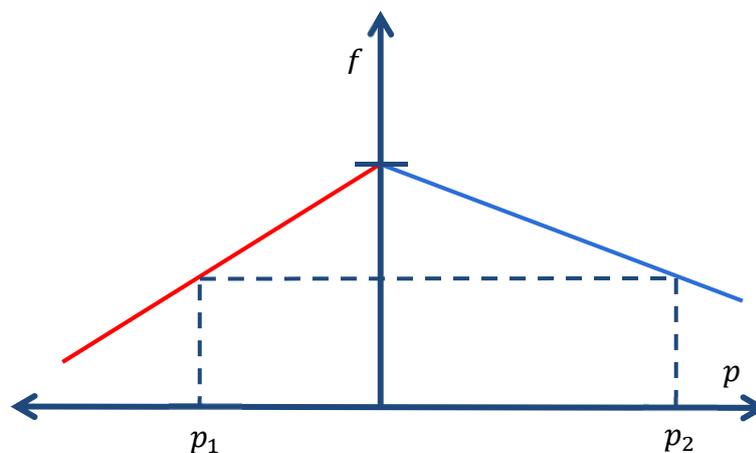


Fig. 1: Wirkleistungsaufteilung anhand von Droop-Koeffizienten.
Active power distribution according to droop coefficients.

Besonders kritische Systemzustände sind der Übergang zwischen Verbund- und Inselbetrieb und umgekehrt. Die dezentralen Erzeuger müssen ihre Regelung den Gegebenheiten des Inselbetriebes anpassen und das Inselnetz, ohne die stabilisierende Wirkung des Verbundnetzes, aufrechterhalten. Ein großer Anteil der dezentralen Erzeuger ist durch leistungselektronische Schaltungen an das Netz gekoppelt. Diese erlauben eine schnelle Regelung mit kleinen Zeitkonstanten. Nachteilig wirken sich jedoch deren geringe Überstromkapazitäten im Vergleich zu Synchrongeneratoren aus.

Zwei der am häufigsten in der Literatur zu findende Regelungen für durch Wechselrichter gekoppelte Anlagen in Inselnetzen sind die Droop-Regelung und die der virtuellen Synchronmaschine. Die Droop-Regelung ist der Primärregelung der Synchrongeneratoren von Großkraftwerken nachempfunden. Dabei wird eine Aufteilung der Wirkleistung zwischen den Anlagen erreicht, indem diese umgekehrt proportional zur Netzfrequenz geregelt wird.

- **Control of Power Electronic Devices in islanded Microgrids**

M. Sc. Simon Eberlein

Due to the growing share of distributed generators in the distribution system it became possible to operate parts of the system autonomously as islanded systems which are decoupled from the bulk power system. This operating mode is desired, for example, when there is a perturbation in the bulk power system and a secure supply cannot be guaranteed.

Critical operation modes are the transition between islanded and interconnected operation and vice versa. The distributed generators have to adjust their control to the islanded operation and to keep the grid stable without the stabilizing effect of the bulk power system. A large share of distributed generators is coupled to the grid through power electronic devices which allow for a fast control with low time constants. On the other hand, their low capacity for overcurrent compared to synchronous generators is a mayor disadvantage.

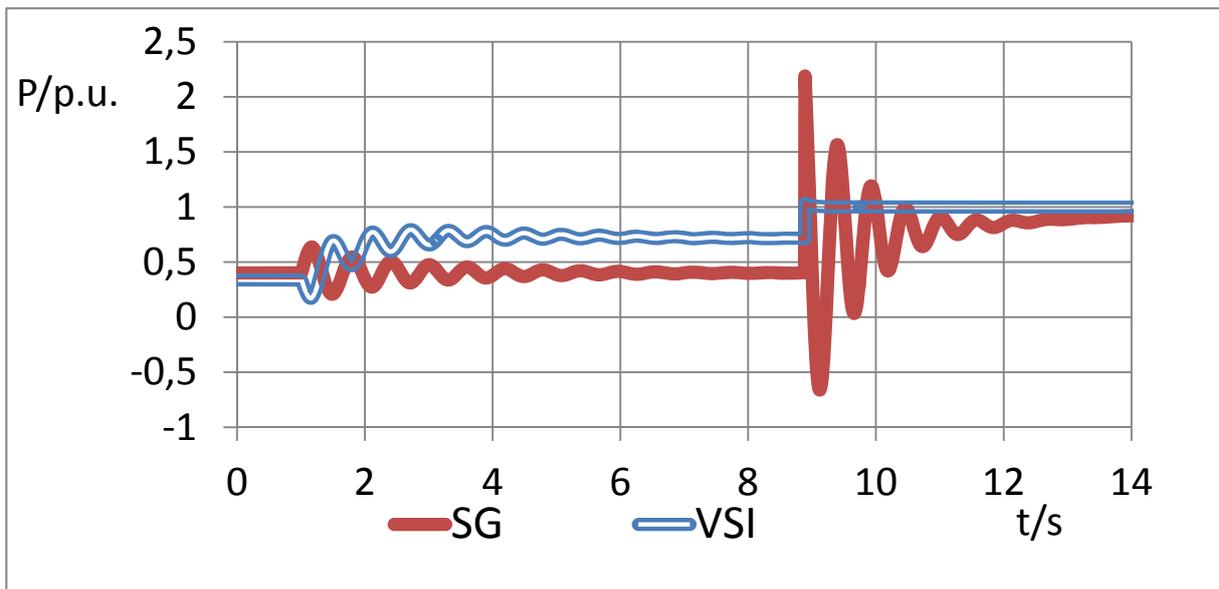


Fig. 2: Wirkleistungsverlauf bei der Synchronisation.
Active power during synchronization.

Two often found control strategies for power electronic coupled devices in islanded networks in literature are the droop control and the virtual synchronous machine control. The droop control replicates the primary control of synchronous generators of large thermal power plants.

Wie in Fig. 1 beispielhaft für zwei Anlagen dargestellt, wird so eine Aufteilung der Wirkleistung (x-Achse) anhand der Frequenz (y-Achse) und der Droop-Koeffizienten (Steigungen der Geraden), erreicht. Hierzu ist keine Kommunikation zwischen den Anlagen notwendig.

Eine virtuelle Synchronmaschine ist hingegen eine Anlage, die eine Synchronmaschine nachahmt. Es werden nicht nur die Primärregelung, sondern auch der mechanische Teil sowie Modelle höherer Ordnung für Stator und Rotor der Synchronmaschine berücksichtigt. Die Anlage verhält sich somit gegenüber dem Netz wie eine Synchronmaschine, stellt beispielsweise also auch Momentanreserve bereit. Ein weiterer Vorteil ist, dass für Synchronmaschinen entwickelte Regelkonzepte, z.B. Power System Stabilizer, auch für leistungselektronisch gekoppelte Anlagen verwendet werden können.

In Fig. 2 ist der Verlauf der Wirkleistung zweier Anlagen in einem Inselnetz während des Übergangs zum Verbundbetrieb dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 1\text{s}$ wird die Synchronisation der Spannungsfrequenz, -amplitude und des Winkels mit dem Verbundsystem eingeleitet. Zum Zeitpunkt $t = 9\text{s}$ haben sich die Spannungen ausreichend genau angeglichen, und der Koppelschalter zwischen beiden Netzen kann geschlossen werden. In dieser Simulation wurde absichtlich eine suboptimale Synchronisation der Netze in Form einer Abweichung der Spannungswinkel eingestellt, um Ausgleichsvorgänge zu provozieren. Es ist zu sehen, dass der Synchrongenerator (SG) aufgrund der Trägheit seines Rotors mit wesentlich stärkeren Schwingungen reagiert als der Wechselrichter (VSI), dessen Regelung wesentlich kleinere Zeitkonstanten aufweist.

Am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik wird erforscht, wie durch geeignete Regelung von Wechselrichtern die Schwingungen von Synchrongeneratoren gedämpft werden können. Hierzu eignet sich beispielsweise die bereits vorgestellte Regelung der virtuellen Synchronmaschine. Neben der Synchronisation ist weiterhin der Übergang vom Verbund- in den Inselbetrieb ein kritischer Vorgang, für welchen geeignete Regelungen entwickelt werden. Ziel ist es, für unterschiedliche Netztopologien und Spannungsebenen optimierte Regelalgorithmen zu entwickeln, die die Stabilität des Netzes in jedem Betriebspunkt garantieren.

The distribution of the active power supply between the units is accomplished by adjusting their active power inversely proportional to the grid frequency. As shown in Fig. 1, the active power (x-axis) is distributed depending on the frequency (y-axis) and the droop coefficient (gradient of the lines). No communication between the generators is needed for this type of control.

On the other hand, the virtual synchronous machine aims at imitating a synchronous machine. It incorporates not only the primary control but also the mechanical part and higher order models of stator and rotor. Hence, the generator interacts with the grid like a synchronous machine which means, for example that it has inertia. Another advantage is that control strategies used for synchronous machines, e.g. power system stabilizers, can also be used for power electronic coupled generators.

In Fig. 2 the active power of two generators during the transition between islanded and grid connected operation is shown. At $t = 1\text{s}$ the synchronization with the bulk power system of frequency, amplitude and angle of the voltage is started. At $t = 9\text{s}$ the voltages have sufficiently aligned and the circuit breaker between the two grids can be closed. In this simulation the synchronization is intentionally controlled to be flawed with mismatching voltage angles to provoke transients. It is observed that the synchronous generator (SG) due to its inertia exhibits much larger oscillations compared to the power electronic device (VSI).

The Institute for Power Transmission and High Voltage Technology researches control strategies for power electronic devices to dampen the oscillations of synchronous machines. A viable control strategy is for example the formerly introduced virtual synchronous machine. Besides the synchronization, the transition between interconnected and islanded operation is a critical procedure for which suitable control strategies have to be found. The aim is to implement optimized control strategies for different grid topologies and voltage levels which guarantee stability in every operating point.

- **PQ-Monitoring in industriellen, elektrischen Netzen mit Einspeisung aus Erneuerbaren Energien**

M. Sc. Adrian Eisenmann

Die Untersuchung der Versorgungsqualität (engl. Power Quality, kurz PQ) gewinnt mit der zunehmenden Durchdringung elektrischer Netze mit leistungselektronischen Komponenten an Bedeutung. Getragen von technischen Innovationen und Fortschritten in der Halbleitertechnik finden diese in immer mehr Anwendungsfeldern Einzug. Dies gilt sowohl für Verteilnetze als auch für industrielle Netzumgebungen.

Erneuerbare Energien spielen dabei durch die vermehrte Einspeisung, auch in niederen Spannungsebenen, eine wichtige Rolle. Zum Einen stellt deren Integration in das bestehende Netz durch die fluktuierende Einspeisung aus Sicht der Versorgungsqualität eine Herausforderung dar, zum Anderen bildet die zur Netzanknüpfung eingesetzte Wechselrichtertechnik selbst eine potentielle Störquelle.

Auch zur Maschinensteuerung eingesetzte Spannungssteller setzen beispielsweise meist schnell schaltende IGBTs oder Triacs zur Drehzahlsteuerung ein. Jeder Schaltvorgang eines solchen Ventils emittiert PQ-Störungen, die sich in Form von Spannungsabweichungen zeigen. Die Abweichungen in Frequenz, Amplitude, Form und Effektivwert vom idealen Sinus bei Nennspannung können zu erheblichen Problemen bis hin zu Schäden und Ausfällen an Maschinenteilen in industriellen Prozessketten führen. Fig. 1 stellt exemplarisch Spannungsabweichungen an einem Industrieroboter durch hohe Anlaufströme dar.

Um dem vorzubeugen und die Versorgungsqualität quantifizierbar zu machen, bedarf es daher einer detaillierten Spannungs- und Strommessung mit hochauflösenden Messinstrumenten. Deshalb wurde im Rahmen des Projekts VIPEEER ein PQ-Monitoringsystem in der Forschungsfabrik ARENA2036 installiert, um zukunftsweisende Technologien vermessen und analysieren zu können. Diese Daten sollen es ermöglichen, mathematische Modelle industrieller Verbraucher und Netzumgebungen zu entwickeln und die Versorgungsqualität als neue Prozessgröße in der Produktionsplanung zu etablieren.

■ PQ Monitoring in Industrial, Electrical Grids fed by Renewable Energy

M. Sc. Adrian Eisenmann

The investigation of Power Quality (PQ) is gaining importance with increasing penetration of electrical grids with power electronics. These are finding their way into more and more fields of application, led by technical innovations and advances in semiconductor technology. This applies to energy distribution grids as well as to industrial grids.

Renewable energies play a major role in this process by increasing their feed-in, even in lower voltage levels. On the one hand, their integration into the existing network poses a challenge for the PQ due to the fluctuating supply. On the other hand, the inverter technology itself, used for the grid connection, is a potential source of interference with regard to the PQ.

Regarding the field of machine control, there are also switching units in use e.g. for the purpose of voltage regulation. Each switching operation of such a valve emits interference which is reflected in form of voltage deviations. The deviations in frequency, amplitude, form and rms-value from the ideal sine wave at rated voltage can lead to considerable problems including damage and failures on machine parts in industrial processes. Fig. 1 illustrates the voltage deviations caused by the starting currents of an industrial robot.

In order to prevent this and to quantify PQ, a detailed voltage and current measurement with high-resolution measuring instruments is required. As part of the VIPEER project, a PQ monitoring system was installed in the research factory ARENA2036 in order to measure and analyze future-oriented technologies. These data should make it possible to develop mathematical models of industrial consumers and network environments and to establish PQ as a new process variable in production planning.

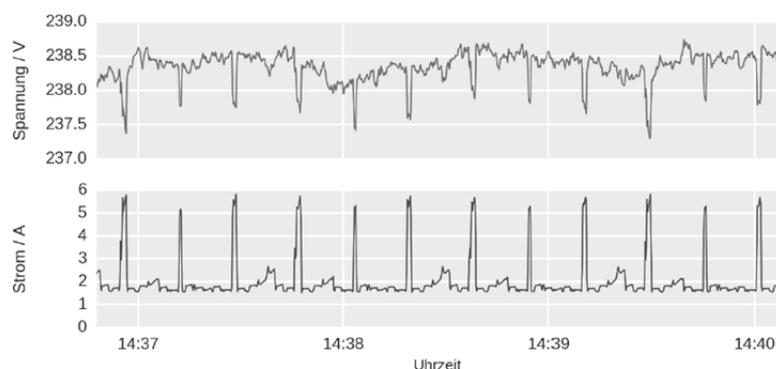


Fig. 1: Zyklischer Anfahrprozess eines Industrieroboters.
Cyclic start-up process of an industrial robot.

- **Bestimmung des optimalen Betriebspunkts von Flexibilitäten zum netzdienlichen Einsatz mittels Genetischer Algorithmen**

M. Sc. Heiner Früh

In den Verteilnetzen der Zukunft werden dezentrale Energieerzeugungsanlagen einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilisierung liefern müssen. Bereits heute gibt es bestimmte Betriebsmittel, die einen Teil ihres Betriebsbereichs frei einstellen können. Diese Flexibilitäten können vom Verteilnetzbetreiber zur Verbesserung des lokalen Netzbetriebs genutzt werden, beispielsweise zur Spannungshaltung.

Bei einer hohen Anzahl flexibler Betriebsmittel wird die Suche des optimalen Betriebspunkts jeder Flexibilität durch ein hochkomplexes, nichtlineares Optimierungsproblem beschrieben. Dabei müssen mehrere Randbedingungen berücksichtigt werden: Das Halten der Spannung in einem definierten Bereich und die Vermeidung von Betriebsmittelüberlastungen. Gleichzeitig sollen die Netzverluste minimiert werden. Zur Lösung derartiger nichtlinearer Optimierungsprobleme gibt es verschiedene Ansätze.

Im ersten Ansatz wird eine Lösung mittels so genannter Genetischer Algorithmen untersucht. Beim vorliegenden Problem entspricht ein Individuum einem möglichen Netzbetriebspunkt und definiert somit die Betriebspunkte aller Flexibilitäten. Die flexibel einstellbaren Parameter der einzelnen Flexibilitäten entsprechen den Genen dieser Individuen.

Genetische Algorithmen zeichnen sich durch eine gute Beeinflussbarkeit des Konvergenzverhaltens aus, was eine individuelle Anpassung an das oben beschriebene Optimierungsproblem ermöglicht. Fig. 1 veranschaulicht den iterativen Lösungsprozess von Genetischen Algorithmen.

Derzeit wird untersucht, welche Mutations- und Selektionsverfahren für das zu lösende Optimierungsproblem am besten geeignet sind. Ziel ist es, die Flexibilitäten in Echtzeit optimal ansteuern zu können, weshalb eine schnelle Konvergenz erreicht werden muss.

▪ **Finding the Optimal Operating Point of Flexibilities by means of Genetic Algorithms in order to stabilize Power Distribution Systems**

M. Sc. Heiner Früh

In the distribution grids of the future, distributed generation must contribute to the stabilization of the power system. Even today, there are certain resources in power systems that can freely adjust a part of their operating range. Distribution system operators may use these flexibilities to improve the local operating point.

The search for the optimal operating point of large amounts of flexibilities represents a highly complex, nonlinear optimization problem. Several boundary conditions must be taken into consideration: Maintaining the voltage in a defined range and avoiding overloading the grid utilities. At the same time, grid losses should be kept to a minimum. Several approaches for solving these kind of nonlinear optimization problems are being considered.

In a first approach genetic algorithms are being investigated. In the given problem, an individual corresponds to a possible combination of the operating points of all flexibilities within the considered distribution grid. The adjustable parameters of the individual flexibilities relate to the genes of these individuals.

Genetic Algorithms characterize by a good controllability of their convergence which allows specific adaptation to the optimization problem described above. Fig. 1 illustrates the iterative solution process of Genetic Algorithms.

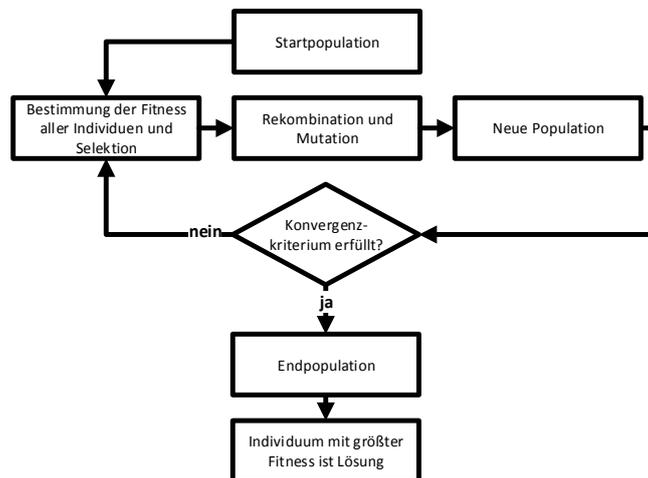


Fig. 1: Lösungsprozess von Genetischen Algorithmen.
Solving process of Genetic Algorithms.

It is currently being investigated which mutation and selection methods are most suitable for the optimization problem at hand. The goal is to be able to control the flexibilities optimally and in real time which is why rapid convergence must be achieved.

▪ **Parametrisierung stochastischer Lastprofilmodellierungs-Ansätze**

M. Sc. Daniel Groß

Im traditionellen Weg der elektrischen Energieversorgung war eine Lastabschätzung basierend auf Standardlastprofilen (SLP) vollkommen ausreichend für die Netzplanung und um einen sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten. Das Wissen über den detaillierten Lastverlauf individueller Verbraucher war nicht notwendig, da ein unidirektionaler Lastfluss im Netz vorhanden war, der auf Basis der SLP ausreichend genau abgeschätzt werden konnte. Durch die Zunahme an dezentralen Erzeugungsanlagen, wie bspw. durch erneuerbare Energien vor allem in den unteren Spannungsebenen des Verteilnetzes, wird der Lastfluss permanent multidirektionaler. DIN EN 50160 schreibt einen zuverlässigen und sicheren Netzbetrieb durch den Verteilnetzbetreiber vor, der bis dato unter anderem auf der Abschätzung durch SLP basiert. Wie jedoch in unterschiedlichen Untersuchungen gezeigt wurde, eignen sich SLP nicht, um die Volatilität aus Messdaten, wie bspw. von Smart Metern, ganzheitlich nachzubilden. Vor allem im Niederspannungsnetz ist eine probabilistische Analyse vorteilhaft, da in der Regel eine kleinere Anzahl an Nutzern nachzubilden ist. Basierend auf der Tatsache, dass der Lastfluss in zukünftigen Verteilnetzen nicht mehr als eindeutig angenommen werden kann, benötigt man daher eine detailliertere Vorhersage des Verbraucherverhaltens. Dafür wird der individuelle Lastverlauf im Detail benötigt, um insbesondere die maximale Leitungsauslastung sowie Spannungsprofile abschätzen zu können. Selbst wenn intelligente Messsysteme zukünftig mehr Messdaten zur Verfügung stellen können, stellt sich die Frage, ob dabei alle Haushalte erfasst werden, und wenn nein, wie diese nachzubilden sind.

Die Eigenschaften synthetischer Lastprofile, welche mittels einer Markov-Kette und einem autoregressiven Modell basierend auf einer linearen Regression erstellt werden, wurden bereits in einer früheren Arbeit untersucht. Die dort gezeigten Nachteile in Bezug auf die nicht korrekte Nachbildung der maximal auftretenden Leistungswerte oder auch der Jahresenergiemenge können einen negativen Einfluss auf Simulationsergebnisse oder auf das Nachbilden des aktuellen Systemzustandes haben. Diese Erkenntnisse wurden zum Anlass genommen, die erstellten synthetischen Profile dahingehend anzupassen. Die Korrektur der maximalen Leistungswerte sowie der Jahresenergiemenge der synthetischen Lastprofile wird dabei mittels eines Entnormierungsprozesses durchgeführt.

Eine Leistungs-Energie-Entnormierung (engl. Power-Energy-Denormalization (PED)) wird hierbei verwendet, um die maximalen Leistungswerte der synthetischen Profile auf einen vorgegebenen Leistungswert und eine jährliche Energiemenge anzupassen.

■ **Parametrization of Stochastic Load Profile Modeling Approaches**

M. Sc. Daniel Groß

In the traditional sense of electrical power supply, load prediction based on standard load profiles was totally sufficient for forecasting and to ensure a stable network operation management. The knowledge of the individual consumer behavior was not as essential given by the unidirectional load flow which made it plain to assume the needed load curve. Due to the increase of decentralized power generation, such as renewable energy sources (RES) especially in the lower voltage distribution grids, the load flow became progressively multidirectional. This development brings new challenges for the distribution system operators (DSOs) because of the more unpredictable residual load curves. The DIN EN 50160 standard implicates a reliable and safe operation of the distribution grids which is inter alia based on standard load profile forecasting. As shown in different investigations, standard load profiles are not sufficient to represent the measurement data of smart meters. Especially, in low voltage grids, a probabilistic analysis is profitable compared to the usage of standard load profiles because of the small number of consumers. Related to the fact that the load flow in future distribution grids can no longer be interpreted as unambiguously, a much more detailed forecast on individual consumer behavior is needed. Therefore, the individual load behavior has to be known in detail, especially in order to estimate the extremum values of resulting line loading and voltage profiles. Even if advanced metering systems will provide more data in the future it is questionable if all households will have a smart meter.

The properties of the synthetic load profiles generated by a Markov chain and an autoregressive model using linear regression were investigated in a previous contribution. The disadvantages shown there related to the non-accurate reproduction of maximum values or missing the annual energy consumption may have a negative effect on simulation results or reproducing the actual system state for the system operation and, therefore, need to be adapted. The adaption of the maximum values of the synthetic load profiles can be realized by a denormalization process.

A Power-Energy-Denormalization (PED) method can be used to correct the representation of the maximum values of the synthetic load profiles to a given value. Usually, the annual energy consumption of households is well-known. The presented PED method aims to calculate load profiles where the maximum power and the annual energy consumption is a degree of freedom and can be chosen by the user. Therefore, the PED is applied with two straight lines as shown in Fig. 1. Within the PED, the normalized synthetic load profile value on the x-axis of Fig. 1 is mapped using the piecewise linear characteristics to a power value in kW on the y-axis.

In der Regel ist der jährliche Energieverbrauch eines Haushaltes aus der Abrechnung des Energieversorgers bekannt. Die hier vorgestellte PED-Methode hat zum Ziel, Lastprofile zu berechnen, bei denen die maximal auftretende Last sowie der jährliche Energieverbrauch als Stellparameter vorgegeben werden können. Die PED-Methode basiert dabei auf zwei Geraden wie in Fig. 1 dargestellt. Dabei werden die normierten synthetischen Werte auf der X-Achse über eine stückweise lineare Charakteristik mit den Leistungswerten in kW auf der Y-Achse verknüpft. Beide Geraden werden über drei Punkte definiert, die in Fig. 1 markiert sind. Der linke Punkt liegt im Nullpunkt des Koordinatensystems. Der rechte Punkt wird durch das Maximum definiert, wobei der maximal auftretende Wert im synthetischen Profil mit dem gewünschten Maximum im entnormierten Profil verknüpft wird. Der mittlere Punkt in Fig. 1 wird verwendet, um die jährliche Energiemenge zu bestimmen. Er basiert auf der Bestimmung des arithmetischen Mittelwertes für P_{bend} .

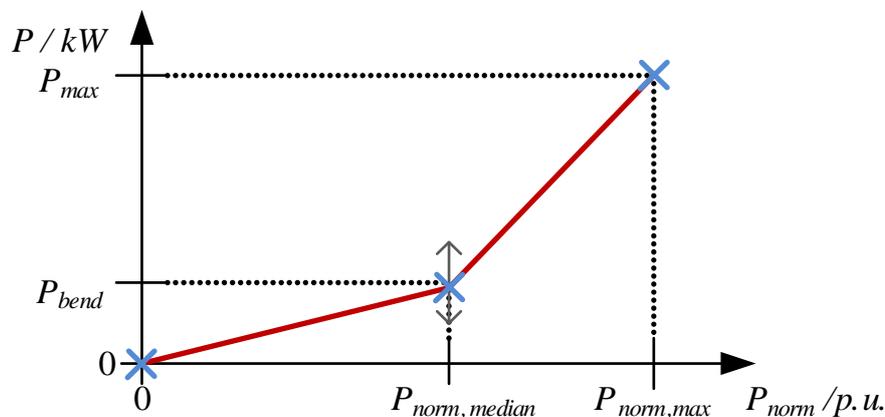


Fig. 1: Mechanismus zur Entnormierung synthetischer Lastprofile.
Scheme for the denormalization of synthetic load profiles.

Fig. 2 zeigt die Unterschiede der Maximalwerte des ausgewählten Haushaltes aus den originalen Messdaten zu dem synthetischen Profil entnormiert mit dem geforderten Maximalwert, sowie zum Lastprofil entnormiert über die PED-Methode. Auf der Abszisse ist die Zeit über einen Tag dargestellt und auf der Ordinate das Maximum der auftretenden Wirkleistungswerte in kW aus allen Zeitschritten im betrachteten Zeitraum. Dabei stellt die durchgezogene Linie die Maximalwerte aus den Messdaten, die gestrichelte Linie die Maximalwerte entnormiert mit dem geforderten maximalen Leistungswert und die strichpunktierte Linie die Maximalwerte entnormiert mittels der PED-Methode dar. Es ist zu erkennen, dass bei einer Entnormierung ausschließlich mit dem geforderten Maximalwert die auftretende maximale Leistung aus den Original-Messdaten (8,03 kW) nicht erreicht wird. Im Vergleich dazu liegt der maximale Leistungswert bei 4,5 kW. Die präsentierte Methode mittels PED dagegen korrigiert die Maximalwerte der synthetischen Lastprofile auf das gewünschte Maximum und passt darüber hinaus die jährliche Energiemenge des Lastprofils an.

As shown in Fig. 1, the two straight lines are defined by overall three points. The first point is the origin of the coordinate system which applies that zero consumption in the normalized synthetic load profile leads to the zero consumption in the denormalized profile. The right point is defined by the maximum. Here, the maximum value of the normalized synthetic load profile is mapped to the maximum absolute value. Therefore, it is defined that the maximum value occurs exactly at one time point of the considered time period (here one year). The third point in the middle of Fig. 1 is used to define the annual energy consumption. This point is calculated using the arithmetic mean value for P_{bend} which can be used to define the energy consumption.

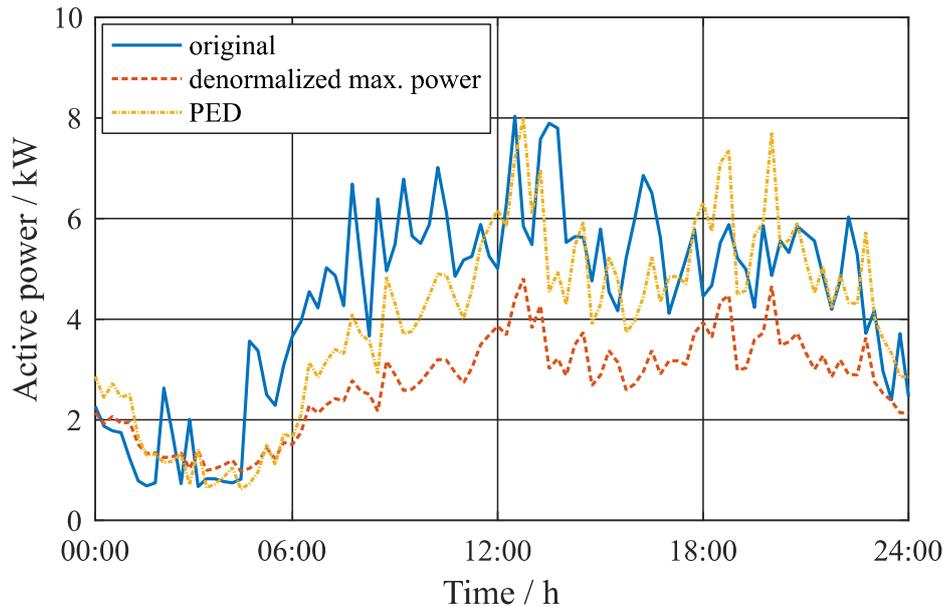


Fig. 2: Vergleich der Maximalwerte.
Comparison of the maximum values.

Fig. 2 illustrates the differences in the maximum values of the chosen household out of the original measurement data set, the denormalized synthetic profiles with the maximum power generated by the linear regression and the PED synthetic profiles adjusted by the process explained before. On the abscissa the time over one day and on the ordinate the maximum occurring active power value in kW over the time steps per day of all days in the time series is given. Thereby, the blue solid line shows the maximum values from the original measurement data, the orange dashed line the denormalized values of the synthetic profiles multiplied with the maximum active power value and the yellow dash dotted line the active power values after the PED with the maximum active power and the annual energy consumption. It can be seen that the denormalized values do not reach the maximum values (8.03 kW) of the original measurement data. Compared to that the maximum value appearing in the denormalized data is 4.5 kW. The presented PED method on the other hand corrects the maximum value of the synthetic load profiles to the maximum value and also adjusts the annual energy consumption.

▪ **Spannungsqualitäts-Monitoring bis 150 kHz**

Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Mit der Spannungsqualität (englisch Power Quality, kurz PQ) im Netz beschreibt man Abweichungen der am Abschlusspunkt eines Verbrauchers vorliegenden Spannungsform vom idealen Sinus bei Nennspannung. Im Einzelnen kann es Abweichungen bei der effektiven Spannungshöhe (RMS-Wert), der Frequenz und bei der Kurvenform (Harmonische) geben, die mit unterschiedlichen Kennwerten beschrieben werden und in der Norm EN 50160 mit Grenzwerten versehen sind. In dieser Norm gibt es jedoch starke Einschränkungen bei der Mittelwertbildung (10-Sekunden-Mittelwerte für die Frequenz, ansonsten 10-Minuten-Mittelwerte) und dem Frequenzbereich (bis maximal 2 kHz). Bedingt durch den verstärkten Einsatz von leistungselektronischen Komponenten treten aber auch Verzerrungen der Spannung im höheren Frequenz- und im kürzeren Zeitbereich auf.

Am IEH wurde deshalb ein PQ-Messgerät entwickelt, das eine Messung von Spannung und Strom (jeweils drei Leiter und Neutralleiter) bis 150 kHz erlaubt und 10-Perioden-Mittelwerte aufzeichnet. Damit kann die Spannung, aber auch der Strombezug einzelner Geräte hochgenau charakterisiert und das Störpotential von Anlagen und Geräten im laufenden Betrieb ermittelt werden.

Das System kommt bereits festinstalliert am Anschlusspunkt von mehreren Ladesäulen von Elektrofahrzeugen zum Einsatz und nimmt dort seit Juli 2016 kontinuierlich alle PQ-Parameter von drei Leitern und dem Neutralleiter in 10-Perioden-Mittelwerten auf.

Zusätzlich werden transiente Phänomene wie Überspannungen und Spannungseinbrüche mit 500 kS/s aufgezeichnet.

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Vermessung von Mittel- und Hochspannungsanlagen dar. Um die notwendige Bandbreite für eine Spannungsqualitätsmessung bis 150 kHz zu erreichen, kommen eigens entwickelte kapazitive Sensoren zum Einsatz, die eine sichere Messung bis zu 380 kV ermöglichen.

Das Ziel kommender Installationen ist es, einen kompletten vertikalen Pfad im deutschen Stromnetz zu vermessen, von der Niederspannung über die Mittel- und Hochspannung bis in die Höchstspannungsebene, um insbesondere Oberschwingungen in allen Netzebenen aufzuzeichnen.

- **Power Quality Monitoring up to 150 kHz**
Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Power quality (PQ) describes the deviation of the voltage at a customer connection point in the electric grid from the perfect sine at nominal voltage. These deviations can manifest in a variation in the effective voltage (RMS value), the frequency and the actual waveform, caused by harmonics which are described and limited by different indicators in the standard EN 50160. However, this standard only defines thresholds for 10-minute averages and only for harmonics up to 2 kHz. Renewable generators and power inverters can emit harmonics in a much higher frequency range.

At the IEH, a PQ measurement device that allows a measurement of voltage and current (3 phases + neutral) up to 150 kHz was developed. This enables a precise characterization of the voltage but also the current drawn by devices. The potential for conducted emissions can therefore be evaluated in ongoing operation.

The system is already installed and running at a connection point of multiple charging stations of electric vehicles. It records the parameters for all three phases and neutral in 10 period intervals.

Additionally, transients like over- and undervoltages are recorded with 500 kS/s.

A particular challenge is the measurement of medium and high voltage installations. In order to achieve the necessary bandwidth for a PQ measurement up to 150 kHz, specifically developed capacitive sensors are used, which allow a safe measurement up to 380 kV.

The goal of upcoming installations is the measurement of one complete vertical path in the German power grid, from the low voltage via the medium and high voltage up to the transmission grid in order to record harmonics in all voltage levels.

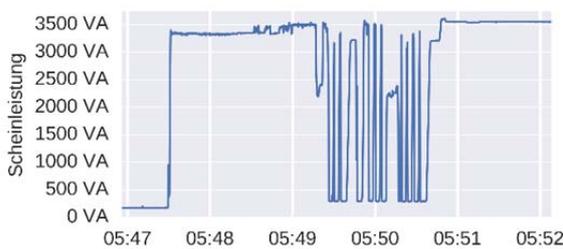


Fig. 1: Schnelle Lastschwankung.
Fast change in load.

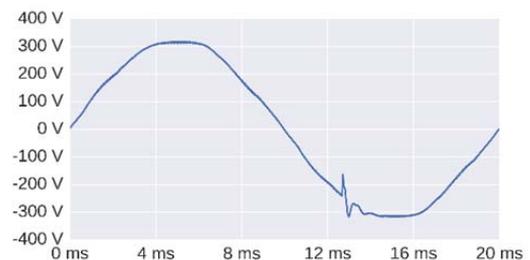


Fig. 2: Transiente Spannungsänderung.
Transient voltage change.

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

M. Sc. Ouafa Laribi

Im Zuge der Integration von erneuerbaren Energien im Netz kommt es immer häufiger zu kritischen Netzauslastungssituationen. Die klassische Lösung zur Netzentlastung ist der Netzausbau, welcher allerdings aufgrund der gesellschaftlichen Ablehnung schwer umsetzbar ist. In diesem Zusammenhang ist das Ziel des Forschungsprojektes NEOS, den Einsatz von Speichertechnologien im Verteilnetz als Alternative zum Netzausbau zu erforschen. Hierfür werden an einem realen Verteilnetz der Region Ostalbkreis (Fig. 1) folgende Fragestellungen untersucht:

- Inwiefern kann der Netzausbau durch Speichereinsatz reduziert werden?
- Mit welcher Kapazität und Leistung sollen die Speicher ausgelegt werden?
- Wie viele Speicher werden benötigt und wo müssen sie im Netz platziert werden?
- Welche Speichertechnologien sind für diesen Einsatz geeignet, und welche Akzeptanz herrscht dafür in der Bevölkerung?



Fig. 1: Hochspannungsnetz der Untersuchungsregion.
High voltage grid of the study region.

Hierbei ist das Ziel, eine optimale Dimensionierung der Speicher zu ermitteln, welche die Entlastung des Hochspannungsnetzes im Ostalbkreis unter Berücksichtigung des (n-1)-Sicherheitskriteriums erfüllt.

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

M. Sc. Ouafa Laribi

The increasing integration of renewable energies into the grid leads to overload problems on power lines. The 110 kV-grid of the region “Ostalbkreis” in the south-eastern part of Germany is affected by the high feedback of energy into the supplying grid. The grid expansion is a classical solution to overcome the overloading problem. Fig. 1 represents in green the planned line expansions in the high voltage grid in the region of “Ostalbkreis”.

This solution is yet not easily applicable due to the strong social protest in the region. In this context the aim of the research project NEOS is to examine the possibility of the employment of storage systems as an alternative to grid expansions in order to maintain the loading on power lines under the permitted limits. For this purpose the following issues are being examined:

- In which extent can the grid expansion be replaced through storage systems?
- Which capacity and power should the storage system have?
- How many storage systems should be employed and where?
- Which storage system technologies are suitable for this use and in which extent would they be accepted from the society?

The aim hereby is to determine the optimal size and placement of the storage system which enable a safe operation of the power lines taking into account the (n-1) safety criterion. Therefore, an optimization algorithm has been developed. It uses time series of power supply and load to calculate the optimal mode of operation for every storage system taking into consideration all the mentioned requirements.

The optimization problem minimizes the stored energy at every time iteration as follows:

$$\min\{E(t) = 0,25 \cdot P_{\text{stor}}(t) + E(t - 1)\} \quad (1)$$

where $E(t)$ is the stored energy at time iteration t , $P_{\text{stor}}(t)$ the storage power and $E(t - 1)$ the stored energy at the precedent time iteration.

This linear optimization problem is defined with respect to the constraints for the maximum allowed line loading $P_{L,\text{max}}$ and the relevant line outages such as:

$$\forall j \in \{1,2,\dots,N\}, -P_{Lj,\text{max}} \leq P_{Lj}(t) \leq P_{Lj,\text{max}} \quad (2)$$

Hierfür wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, welcher mit Hilfe von Zeitreihen für die Last und Einspeisungen und in Abhängigkeit der Überlastungen sowie den möglichen Leitungsausfällen im Untersuchungsnetz die optimale Speicherfahrweise berechnet. Daraus können dann die erforderlichen Speicherkapazitäten und -leistungen für die Dimensionierung sowie die optimalen Speicherstandorte ermittelt werden.

Fig. 2 stellt exemplarisch die Auswertung der Auslastung einer Leitung über ein Simulationsjahr ohne Speichereinsatz und mit Speichereinsatz dar. Ohne Speichereinsatz wird die 100%-Auslastungsgrenze der betrachteten Leitung überschritten. Dies ist auf die Auswirkung von relevanten Leitungsausfällen auf die betrachtete Leitung sowie auf die hohe Rückspeisung aus erneuerbaren Energien zurückzuführen. Die 100%-Auslastungsgrenze der Leitung kann, wie Fig. 2 (rechts) zu entnehmen ist, durch den Speichereinsatz eingehalten werden.

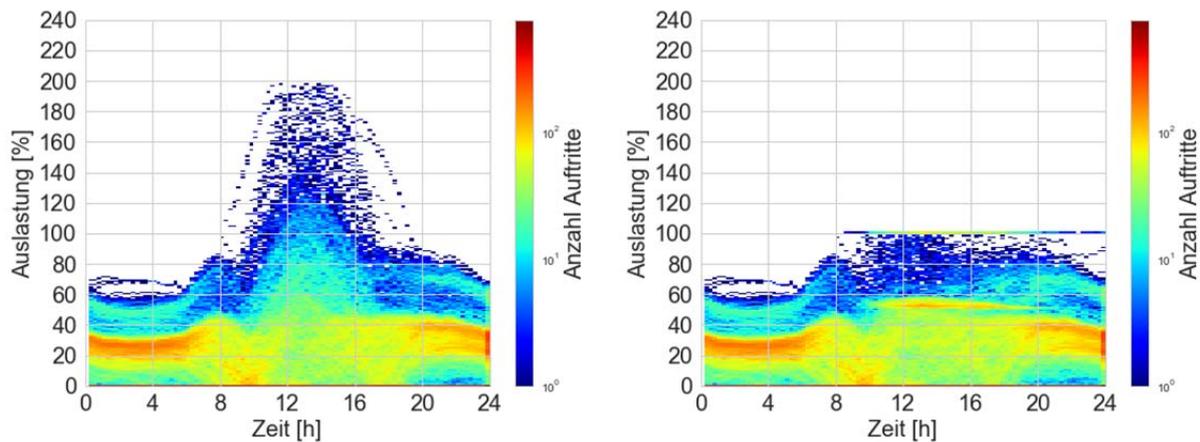


Fig. 2: Leitungsauslastung ohne (links) und mit Speichereinsatz (rechts).
Line loading without (left) and with operation of storage systems (right).

In einem weiteren Schritt wird die Entlastung des Hochspannungsnetzes durch den Einsatz der Speicher im unterlagerten Mittelspannungsnetz geprüft, um daraus mögliche Optimierungseffekte hinsichtlich der Speicherdimensionierung abzuleiten. Darüber hinaus sollen neben den technischen Untersuchungen auch marktgetriebene Speichereinsätze betrachtet werden, um die Wirtschaftlichkeit der Speicher zu optimieren. Abschließend sollen Planungsgrundsätze für den Speichereinsatz zur Netzentlastung abgeleitet werden.

whereby $P_{Lj}(t)$ is the power flow on line j at time iteration t for a total number of lines N . The assumed renewable energies in the simulation environment corresponds to prognoses for the installed energy until 2020. Based on the results of the optimization problem for the considered time period of one year, the required capacities, powers and placements of the storage systems will be hence derived.

In a further step, it is intended to examine the employment of storage systems in the middle voltage grid and its contribution in reducing the loading on the lines of the high voltage grid. Furthermore, it is intended to consider market-based approaches for the employment of the storage systems in order to enhance their profitability. Afterward, a planning guide line for storage system employment shall be derived based on the technical and economical examinations.

- **Berücksichtigung des Freileitungsmonitorings in der zeitreihenbasierten Netzplanung**

M. Sc. Markus Miller

Der zunehmende Einsatz von erneuerbaren Energien (EE) in den Verteilnetzen stellt die Netzbetreiber vor Herausforderungen, um die hohen installierten Leistungen der dezentralen Erzeugungsanlagen in das Energienetz zu integrieren. Dies führt dazu, dass die Übertragungskapazitäten der elektrischen Netze erhöht werden müssen. Nach der konventionellen Netzplanung erfolgt die Dimensionierung des Netzes mithilfe von zwei Auslegungsszenarien, dem Starklastfall und dem Rückspeisefall. Beim Starklastfall muss eine hohe Last bei niedriger Erzeugung versorgt und beim Rückspeisefall muss bei einer geringen Last die eingespeiste Energie abgeführt werden können. Aufgrund der Volatilität der EE können jegliche Kombinationen aus unterschiedlichen Lastsituationen und Einspeisungen von den dezentralen Erzeugungsanlagen auftreten, wodurch die Extremsituationen im Netz durch die beiden Fälle nicht mehr hinreichend abgebildet werden. Hierfür werden am IEH Verfahren entwickelt, die eine zeitreihenbasierte Netzplanung ermöglichen und die Volatilität der EE berücksichtigen.

Eine Lösung zur Entlastung des elektrischen Netzes bei einer Überlastung einzelner Leitungen ist der Netzausbau, bei dem vor allem Freileitungen eine entscheidende Rolle spielen. Diese Variante ist allerdings kostenintensiv und aufwändig in der Planung sowie aus genehmigungsrechtlicher Sicht. Zudem erfolgt die Auslegung der Freileitungen nach den Errichtungsvorschriften der DIN EN 30341, nach welcher der thermische Grenzstrom für einen statischen Auslegungsfall und eine maximal zulässige Leitertemperatur bestimmt wird. Die in dem Auslegungsfall definierten Szenarien für die Umgebungstemperatur, die Windgeschwindigkeit senkrecht zur Leiterachse und die Sonneneinstrahlung treten in der Realität nur selten auf, weswegen Übertragungsreserven aufgrund einer Kühlung des Leiterseiles bestehen, die mit einem Freileitungsmonitoring bestimmt werden können.

Am IEH werden deswegen Ansätze für die Betrachtung des Freileitungsmonitorings in der zeitreihenbasierten Netzplanung untersucht, um den Beitrag der Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf die Netzentlastung auswerten zu können. Hierfür werden entsprechende Modelle aufgebaut und mittels eines Klimamodells die Wettereinflüsse realistisch nachgebildet, um eine räumliche und zeitliche Korrelation mit den dezentralen Erzeugungsanlagen zu erhalten. Mit den daraus erhaltenen dynamischen Strombelastbarkeiten kann dann der Einfluss auf die (n-1)-Sicherheit des Netzes untersucht werden, die nach den gültigen Planungsrichtlinien für Hochspannungsnetze erfüllt werden muss. Abschließend soll das Freileitungsmonitoring als mögliche Ausbauvariante in der zeitreihenbasierten Netzplanung bewertet werden

- **Consideration of Overhead-Line-Monitoring in the Time-Series based Grid Planning**

M. Sc. Markus Miller

The increasing use of renewable energy sources (RES) in the distribution grids confronts the network operators with new challenges in order to integrate the high installed capacity of decentralized generation plants into the energy grid. This integration requires hence the expansion of the transmission capacities of the electrical networks. According to the conventional grid planning methods, the dimensioning of the grid is realized with the aid of two design scenarios, one for high load and one for reversed power flow. In the high load scenario, the load must be supplied at a low generation, and in the other scenario, the energy fed-in must be dissipated at a low load. Due to the volatility of the RES, any combination of different load situations and feed-in capacities from the decentralized generation plants can occur and lead to extreme situations in the network which are no longer adequately represented by the two cases. Therefore, the time-series-based network planning methods have been developed at the IEH in order to take into account the volatility of the RES.

A solution for relieving the electrical network in case of an overload of individual lines is the network expansion in which especially overhead lines play a crucial role. This alternative is cost-intensive, complex and complicated from a regulatory point of view. In addition, the design of the overhead lines according to the installation regulations of DIN EN 30341 is based on the thermal limit current for a static design case and the maximum allowed conductor temperature. The assumed dimensioning parameter such as the ambient temperature, the wind speed perpendicular to the conductor axis and the solar radiation occur in reality only rarely, so there are transmission reserves due to the cooling of the conductor. These transmission reserves can be determined with the overhead line monitoring.

In this context, approaches for the consideration of overhead line monitoring in time-series-based network planning are therefore being investigated at the IEH in order to evaluate the influence of the environmental conditions on the grid relief. For this purpose, appropriate models and meteorological effects are being simulated by means of real climate models in order to obtain a spatial and temporal correlation with the decentralized generation plants. The resulting dynamic current rating can then be used to investigate the influence on the (n-1)-safety of the network which must be realized in accordance with the valid planning guidelines for high-voltage grids. Finally, the overhead line monitoring should be evaluated as a possible alternative variant in the time-series-based network planning.

- **Entwicklung eines Monitoring- und Prognosesystems zur Bewertung der Spannungsqualität**

M. Sc. Tim Streubel

Die Versorgungsqualität (engl. Power Quality, PQ) ist eine komplexe Größe, die sich aus mehreren einzelnen Faktoren zusammensetzt. Jegliche Frequenz- oder Amplitudenabweichung von der idealen Sinusform von Strom und Spannung kann als Störung der Versorgungsqualität definiert werden. Netzbetreiber sind dazu verpflichtet, am Netzanschlusspunkt aller Kunden die Spannungsqualität nach den Grenzwerten der Norm DIN EN 510160 zu garantieren. Durch die zunehmende Verbreitung von leistungselektronisch gekoppelten Komponenten sowohl auf Verbraucher- als auch auf Erzeugerseite sind die Anforderungen an die Gewährleistung der Spannungsqualität im normgerechten Bereich deutlich erschwert worden. Insbesondere die Erzeugung und Propagation von harmonischen Oberschwingungen wirken sich kritisch auf die Spannungsqualität aus. Diese hochfrequenten Strom- bzw. Spannungsanteile können in Netzbetriebsmitteln zu zusätzlichen Verlusten, Erwärmung und Lärmemissionen führen und das Resonanzverhalten im Gesamtnetz beeinflussen.

Die kontinuierliche Überwachung und Prognose der Spannungsqualität wird daher für Verteilnetzbetreiber zukünftig deutlich an Stellenwert gewinnen. Im Rahmen des C/sells Forschungsprojektes „Verteilnetzautomatisierung“ soll ein Monitoringsystem für ein Niederspannungsnetz mit hoher Durchdringung von Erneuerbaren Energien implementiert werden. Dabei stehen neben der die Spannungsebenen übergreifenden Bewertung der Spannungsqualität auch die Ausbreitung und Erzeugung von hochfrequenten Oberschwingungen bis 150 kHz im Vordergrund.

Für die Messinfrastruktur werden Spannungsqualitätsmessgeräte an Photovoltaikanlagen, Haushaltslasten und am Transformator installiert. Anhand der akkumulierten Messdaten werden die Komponenten bezüglich ihres harmonischen Verhaltens modelliert und ihr Einfluss auf das Gesamtnetz (Resonanzverhalten) bestimmt. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt ist dabei die Schätzung der Spannungsqualität an diversen Netzknoten, basierend auf historischen Messdaten und den entwickelten Modellen. Mit den Ergebnissen soll ein besseres Verständnis der Ausbreitung und Überlagerung von Spannungsqualitätsproblemen ermöglicht werden. Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Untersuchung des Einflusses von hochfrequenten harmonischen Schwingungen auf die Kommunikationstechnologie PLC (Power-Line-Communication-Technologie).

- **Implementation of a Monitoring and Prediction System for Power Quality Assessment**

M. Sc. Tim Streubel

Power Quality is a complex parameter influenced by various factors in a power system. Any deviation from the fundamental frequency or amplitude of the ideal sinusoidal voltage or current waveform can be classified as a power quality disturbance. Grid operators are obligated to guarantee voltage quality within the boundaries of the EN 51060 standard. However, due to the increasing use of power electronics on both consumer and generator side, new challenges arise regarding power quality compliances. Especially the generation and propagation of current and voltage harmonics have a significant detrimental impact on power quality. Currents and voltages with higher frequencies can cause additional losses, heating and noise. Additionally, the resonance behavior of the system can be significantly influenced by harmonics.

Thus, continuous monitoring and prediction of power quality will become more important to distribution grid operators in the future. In the research project C/sells "Distribution Grid Automation" a monitoring system will be implemented for a low voltage power system with large penetration of distributed generation. A key aspect of the research project is the assessment of power quality over multiple power system levels and the generation and propagation of high frequency harmonics up to 150 kHz.

For the measurement infrastructure power quality meters are installed at photovoltaic systems, household loads and transformers. Based on the accumulated measurements the harmonic behavior of the components is modeled in order to evaluate their impact regarding the system resonance. Research with the emphasis on the power quality estimation utilizing the implemented models and historical data will be carried out. Based on the obtained results a better understanding of propagation and superposition of power quality disturbances is expected. Additionally, the impact of high frequency harmonics on the communication technology PLC (Power-Line-Communication) will be reviewed.

▪ **Anwendung der Spitzenkappung von erneuerbaren Energien in der Verteilnetzplanung**

M. Sc. Pascal Wiest

Durch den fortschreitenden Ausbau der erneuerbaren Energien wandelt sich das Verteilnetz vom passiven zum aktiven Netz. Das bedeutet, dass die hohe Erzeugungsleistung einerseits zu veränderten Lastflusssituation im Verteilnetz führt. Andererseits bietet die Steuerung der Erzeugungsanlagen neue Freiheitsgrade für den Betrieb der elektrischen Verteilnetze. Diese neuen betrieblichen Situationen müssen auch in der Planung berücksichtigt werden, um den hohen Anteil an erneuerbaren Energien in das Verteilnetz zu integrieren. Hierfür werden am IEH neue Verfahren, welche eine Verwendung von Zeitreihen und probabilistischen Methoden in der Verteilnetzplanung ermöglichen, erforscht.

Ein Beispiel eines neuen Freiheitsgrads stellt die Spitzenkappung von erneuerbaren Energien dar. Diese erlaubt den Netzbetreibern, nach einer Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) aus dem Jahr 2016, im Rahmen ihrer Netzplanung die prognostizierte jährliche Energie von Windenergie- und PV-Anlagen um 3% zu reduzieren. Somit soll ein bedarfsgerechter und wirtschaftlich zumutbarer Netzausbau ermöglicht werden. Das IEH beschäftigt sich in diesem Bereich mit der Fragestellung, wie die Spitzenkappung in die Netzberechnungen integriert werden kann.

Bei der Spitzenkappung wird grundsätzlich in pauschale Methoden, welche die Spitzen der Erzeugungsleistung kappen, und dynamische Methoden, welche die Spitzen der Leistungsflüsse kappen, unterschieden. Insbesondere in einem Hochspannungsnetz, das unter Anwendung der (n-1)-Sicherheit geplant wird, stellt die dynamische Spitzenkappung eine besondere Herausforderung dar. Am IEH werden hierfür Verfahren entwickelt, die auf Basis einer Linearisierung der Lastfluss- und Ausfallrechnung ermitteln, welche abgeregelte Leistung an welchen Netzknoten notwendig ist, um einen Leistungsfluss zu begrenzen.

In Fig. 1 sind die Ergebnisse einer Planungsstudie eines realen Hochspannungsnetzes dargestellt. Dabei zeigt der Boxplot auf der linken Seite die Leitungsauslastungen im (n-1)-Zustand ohne Spitzenkappung. Aufgrund der starken Zunahme der installierten Leistung von erneuerbaren Energien zeigt sich eine deutliche Überlastung, die Netzausbau zur Folge hätte. Die rechten Boxen zeigen die Ergebnisse mit einer dynamischen Spitzenkappung. Diese wurde auf Basis einer Heuristik umgesetzt, bei der sukzessive eine Leitung nach der anderen entlastet wird. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Methode in der Lage, die maximalen Leitungsauslastungen im (n-1)-Zustand auf die technische Grenze von 100% zu begrenzen. Ein Netzausbau wäre nicht erforderlich.

▪ Application of Renewable Energy Curtailment within Distribution Grid Planning

M. Sc. Pascal Wiest

The increasing installation of renewable energy sources leads to a change from passive to active grid. Therefore, new power flow situations occur and the control of these generation units leads to new degrees of freedom within the operation of distribution grids. Such operational aspects should be integrated in the distribution grid planning to optimize the integration of high shares of renewable energy sources. The IEH investigates new distribution grid planning methods based on the study time-series and the consideration of probabilistic approaches.

One example of these new degrees of freedom is the curtailment of renewable energy sources. After the revision of the German regulatory framework in 2016, distribution system operators are allowed to curtail up to 3% of the annual energy from wind turbines and photovoltaic units in order to reduce the costs of grid expansions. Therefore, one research topic of the IEH is the integration of curtailment in the distribution grid planning.

The curtailment is divided in static and dynamic methods. The first one limits the maximum power feed-in of generation units while the second one limits the maximum power flows. The consideration of (n-1) criterion in high voltage distribution grids is especially difficult to implement for the study of dynamic curtailment. Therefore, the IEH has developed a heuristic method to calculate the necessary reductions of power feed-in of a grid node in order to limit the power flow of a particular line. The method is based on the linearization of the power flow equations and contingency analysis.

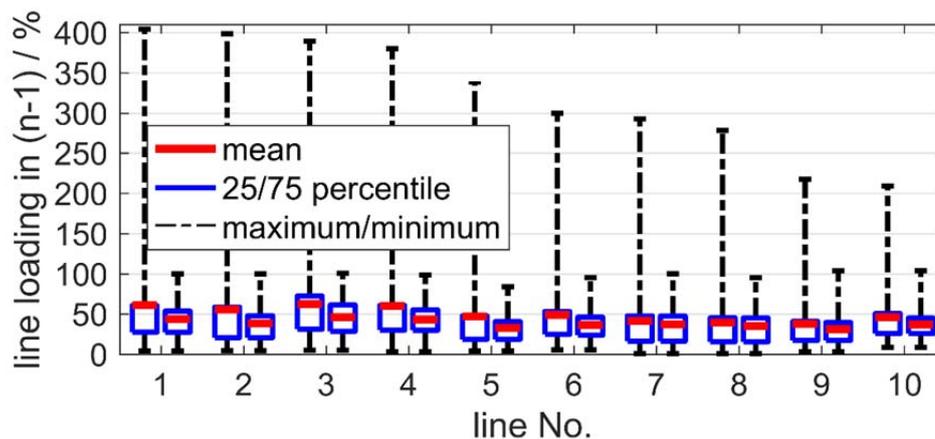


Fig. 1: Vergleich der Leitungsauslastung im (n-1)-Zustand ohne Spitzenkappung (linke Box) und bei dynamischer Spitzenkappung (rechte Box).
Comparison of line loading in (n-1)-state without curtailment (left box) and with dynamic curtailment (right box).

Um die abgeregelte Energie von erneuerbaren Energien so gering wie möglich zu halten, müssten die Leistungsflüsse bei der dynamischen Spitzenkappung auf einen Grenzwert geregelt werden. Um dies zu überprüfen, zeigt Fig. 2 die Leitungsauslastung im (n-1)-Zustand im zeitlichen Verlauf für zwei Tage. Wie sich am zweiten Tag zeigt, erfolgt eine zu starke Abregelung, wodurch zur Mittagszeit Leitungsauslastungen unter 100% auftreten. Diese zu starke Abregelung ist auf die Funktionsweise der Heuristik und die hohe Anzahl an Ausfallkombinationen zurückzuführen. Um dies zu verbessern, wird am IEH in diesem Bereich zukünftig an der Formulierung der dynamischen Spitzenkappung als Optimierungsproblem geforscht.

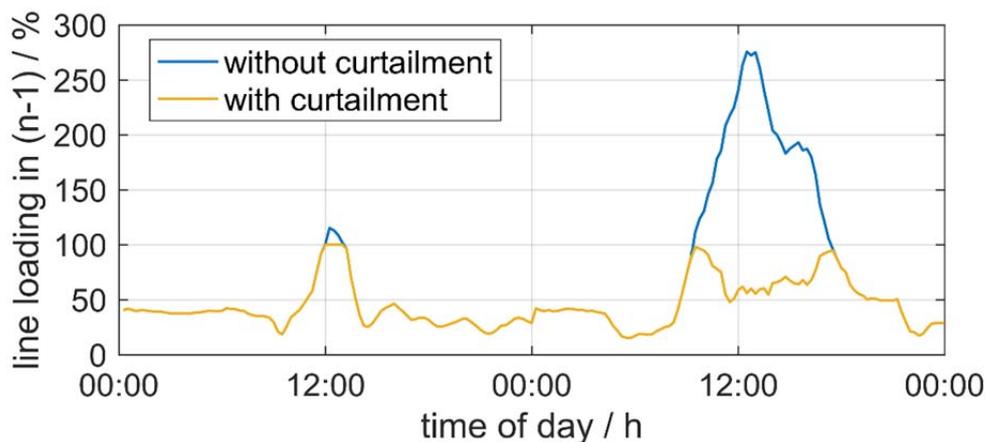


Fig. 2: Auslastung im (n-1)-Zustand von Leitung Nr. 1 für zwei beispielhafte Tage. Line loading in (n-1)-state for line No. 1 for two exemplary days.

Stellt man die abgeregelte jährliche Energie der reduzierten maximalen Leitungsauslastung gegenüber, so zeigt sich der Nutzen einer dynamischen Spitzenkappung. Wie Fig. 3 zeigt, müssen in der betrachteten Planungsstudie insgesamt 11,6% der Energie von erneuerbaren Energien abgeregelt werden, um eine Reduzierung der maximalen Leitungsauslastung von 400% auf 100% zu erreichen. Für diese hohe Reduzierung der maximalen Leitungsauslastung ist die abgeregelte Energie verhältnismäßig gering. Auffallend in Fig. 3 ist auch die starke Abnahme der abgeregelten Energie, wenn die maximale Grenze der Leitungsauslastung zunimmt. Insgesamt bietet daher die dynamische Spitzenkappung das Potential, bei Einsatz einer geringen abgeregelten Energiemenge den Netzausbau deutlich zu reduzieren.

Fig. 1 shows the results of a planning study of a real high voltage distribution grid. The boxes on the left show the line loadings in the (n-1)-state of the system without curtailment. There is a high increase of the installed capacity of renewable energy sources which results in line loadings above the technical limit of 100%. The right boxes show the results with dynamic curtailment based on a heuristic approach where the power flows are gradually reduced. As shown in Fig. 1, the maximum line loadings are limited to 100% and no grid expansion would be necessary.

The line loadings needed to be controlled to the technical limit in order to minimize the curtailed energy in the dynamic approach. Unfortunately, the line loadings are beneath the technical limit if the dynamic curtailment is active, as shown in the second day of Fig. 2. The reduction of the power feed-in is too high in this case which would lead to higher levels of curtailed energy. This is a weak spot of the heuristic approach since the number of outage combinations is too high. For a further improvement the investigation of an optimization technique would be necessary.

The curtailed annual energy, as shown in Fig. 3, demonstrates the effectiveness of the dynamic curtailment. In the presented planning study, only 11.6% of the annual energy from renewable energy sources is curtailed, reducing the maximum line loading from 400% to 100%. The curtailed energy is low compared to the high reduction of the line loading. Fig. 3 shows the strong decrease of the curtailed energy compared to the increase of the of the maximum line loading. The study shows that dynamic curtailment has a high potential to reduce necessary grid expansions.

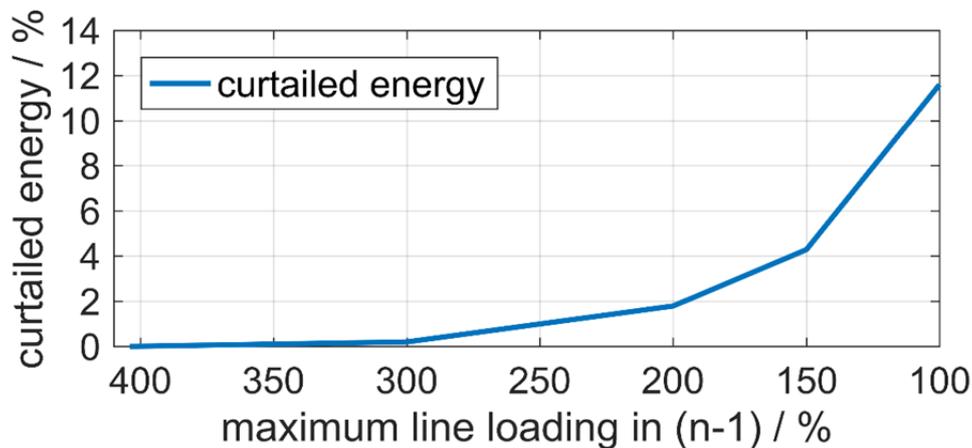


Fig. 3: Abgeregelte jährliche Energie für unterschiedliche maximale Leitungsauslastungen im (n-1)-Zustand.

Annual curtailed energy of the grid for different maximum line loadings in (n-1)-state.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

- **Vorhersage leitungsgebundener Störgrößen bei redundanten mehrphasigen Lenkantrieben in Kfz-Bordnetzen**

M. Sc. Jonas Bertelmann

Aufgrund der zunehmenden Anzahl von elektronischen Komponenten mit höheren Leistungsdichten in modernen Kfz stellt die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eine stetig wachsende Herausforderung dar. Die eingesetzte Leistungselektronik soll effizient betrieben werden, weshalb sehr steile Taktfanken eingesetzt werden. Die verkürzte Zeitdauer der Zustandsänderung bringt neben dem gewünschten Effekt der Effizienzsteigerung auch den negativen Effekt der Erzeugung von hochfrequenten Spektralanteilen.

Für die Entwicklung autonomer Lenksysteme ist eine Redundanz vorgeschrieben. Dazu wird der klassische dreiphasige Wechselrichter um mindestens drei weitere Phasen ergänzt und somit die Ausfallwahrscheinlichkeit minimiert. Neben diesem Vorteil kann der Einsatz von weiteren Halbleitern genutzt werden, um die Gleichtaktstörung, welche beim Schalten der Leistungsschalter entsteht, zu reduzieren. Dafür ist eine EMV-optimierte Ansteuerung vorgesehen.

Mithilfe der 3D-Simulationssoftware für elektromagnetische Anwendungsfälle von CST soll eine erste Abschätzung über die leitungsgebundenen Störungen gewonnen werden. Anhand dieser kann die optimierte Ansteuerung getestet und mögliche Variationen der Hardware untersucht werden. Der Aufbau ist in Fig. 1 zu sehen.

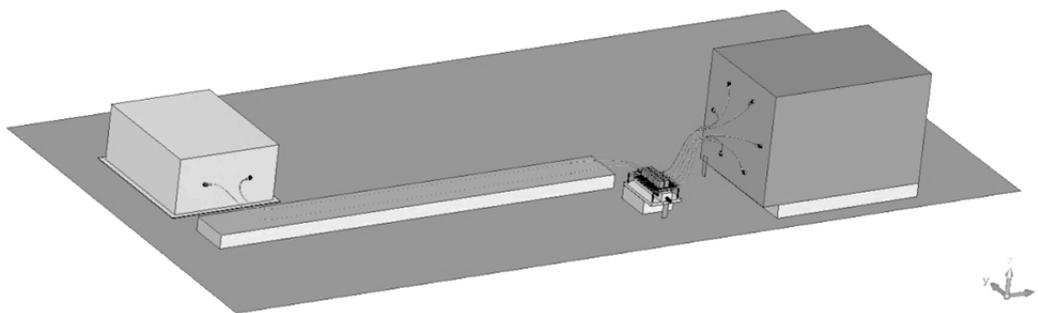


Fig. 1: Aufbau des CISPR 25 Prüfaufbaus in CST.
Structure of the CISPR 25 test setup in CST.

Neben der Simulation wird der gesamte Aufbau dem CISPR 25 Komponententest unterzogen. Durch dieses standardisierte Messverfahren lassen sich die berechneten Ergebnisse validieren und konkrete Rückschlüsse auf zukünftige Entwicklungen ziehen. In Fig. 2 ist der Messaufbau in einer EMV-Absorber-Halle zu sehen.

- **Prediction of Conducted Emissions in Redundant Multiphase Steering Systems in Vehicle Harness**

M. Sc. Jonas Bertelmann

Due to the increasing number of electronic components with higher power densities in modern vehicles, electromagnetic compatibility (EMC) is a growing challenge. The power electronics should be operated efficiently which leads to pulses with very high slew rates. In addition to the desired effect of increasing efficiency, there is also the negative effect of generating high-frequency spectrum components.

Redundancy is required for the development of autonomous driving systems. To this end, the conventional three-phase inverter is supplemented by at least three additional phases, thus minimizing the probability of failure. In addition to this advantage, the use of further semiconductors can be used to reduce common-mode disturbances caused by the switching of the power semiconductors. An EMC-optimized algorithm is provided for this purpose.

With the help of the 3D simulation software for electromagnetic applications of CST a first estimation of the conducted emissions is to be obtained. Based on this, the optimized control algorithm can be tested and possible variations of the hardware can be investigated. The structure is shown in Fig. 1.

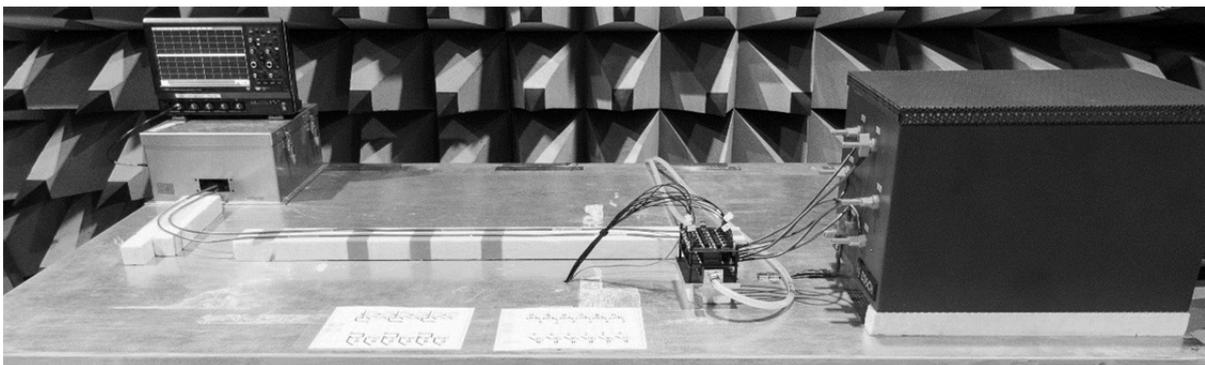


Fig. 2: Aufbau des CISPR 25 Prüfaufbaus in der EMV-Absorber-Halle.

Structure of the CISPR 25 test setup in the EMC anechoic chamber.

In addition to the simulation, the entire structure is subjected to the CISPR 25 component test. This standardized measurement method allows the calculated results to be validated and conclusions to be drawn about future developments. In Fig. 2, the measurement setup can be seen in an EMC anechoic chamber.

▪ Automatisierte Filteroptimierung basierend auf Störspannungssimulationen von Traktionsinvertiern

M. Sc. Denis Müller

Damit die leistungselektronischen Komponenten in Elektrofahrzeugen weiter verkleinert werden können, halten zunehmend Siliziumkarbid Leistungshalbleiter (SiC-MOSFET) Einzug in die Leistungselektronik. Vorteile dieser Halbleitertechnologie sind schnellere Schaltzeiten und dünnere Substrate, was zu wesentlich geringeren Schaltverlusten führt. Diese steiflankigen Schaltvorgänge stellen die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Leistungselektronik jedoch vor neue Herausforderungen. Um die vorgegebenen Grenzwerte einhalten zu können, wird ein höherer Filteraufwand notwendig. Diese Filterbaugruppen müssen daher ebenso kosten- und bauraumeffizient wie die Leistungselektronik gestaltet werden.

Ein Ansatz zur Entwicklung von Filtern stellt die Störspannungssimulation des Hochvoltbordnetzes dar. Über ein einfaches Ersatzschaltbild, wie in Fig. 1 dargestellt, kann in frühen Entwicklungsstadien die grundlegende Störcharakteristik des Traktionsinverters in guter Näherung bestimmt und die notwendige Filterbaugruppe abgeschätzt werden.

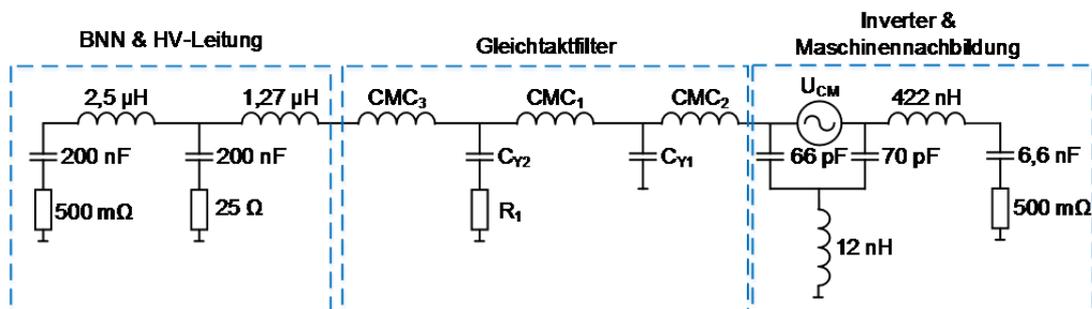


Fig. 1: Gleichtaktersatzschaltbild des Inverters mit Filter im Komponententest.
Common-mode equivalent circuit of inverter and filter at component test.

Durch Parametrierung mit aus einem Optimierungsalgorithmus gewonnenen Werten kann somit das Filter den notwendigen Anforderungen in kurzer Zeit angepasst werden. Für die Parametrierung der Filterelemente wurde in den auf Differential Evolution basierenden Matlab-Algorithmus eine Schnittstelle zu einer Spice-Simulation implementiert.

Zur Validierung des Algorithmus wurde ein optimiertes Filter aufgebaut und im Komponentenaufbau nach Fig. 2a vermessen. Die Messergebnisse zeigt Fig. 2b. Im Ausgangszustand sind Grenzwertüberschreitungen bis zu 40 dB zu sehen. Das optimierte Filter kann den Grenzwert einhalten, wodurch bewiesen ist, dass die automatisierte Filterauslegung anhand der Störspannungssimulation ein gutes Werkzeug zur ersten Dimensionierung im Prototypenstadium darstellen kann.

▪ **Automated Optimization of Filters based on Simulations of Disturbance Voltage**

M. Sc. Denis Müller

Silicon carbide power semiconductors (SiC-MOSFET) are increasingly being used in power electronics to further reduce the size of power electronic components in electric vehicles. Advantages of this semiconductor technology are faster switching times and thinner substrates which leads to significantly lower switching losses. These higher slew rates are causing new challenges to the electromagnetic compatibility (EMC) of power electronics. In order to fulfill the limits requirements, a higher effort for the filter design is required. The filter assemblies must, therefore, be designed as cost- and space-efficient as the power electronics.

One approach to the development of filters is to simulate the disturbance voltage of the high voltage network. With a simple equivalent circuit, in Fig.1, the basic disturbance characteristics of the inverter can be simulated in good approximations in an early stage of development and necessary filters can be included and estimated.

a)



b)

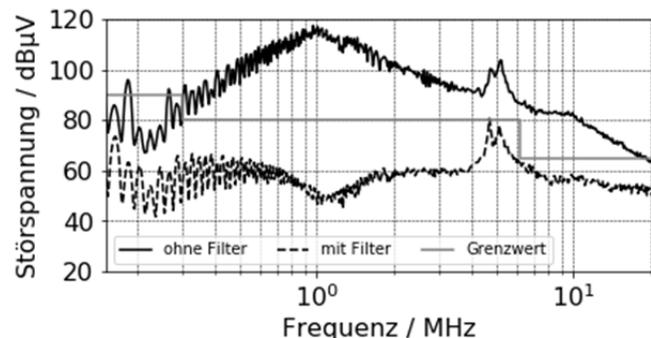


Fig. 2: a) Testaufbau nach CISPR 25.

b) Störspannung an der Bordnetznachbildung.

a) Test setup according to CISPR 25.

b) Disturbance voltage at LISN.

The filter can thus be adapted to the necessary requirements in a short time by parameterization with values obtained from an optimization algorithm. For the parameterization of the filter elements, an interface to a Spice simulation is implemented in the differential evolution based Matlab algorithm.

For the validation of the algorithm, an optimized filter was built up and included in the test setup according to Fig. 2a. The measurement results are shown in Fig. 2b. Without any filter, the measurement exceeds the standard up to 40 dB. The optimized filter can comply with the standard limits which shows that filter design based on disturbance voltage simulations can be a good tool for the first dimensioning of filter components in an early prototyping stage.

▪ Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen

M. Sc. Christian Suttner

Mittelspannungsschaltanlagen ermöglichen in Energieversorgungsnetzen eine Änderung der Netztopologie bzw. den selektiven Schutz des Netzes im Fehlerfall. Aufgrund der zunehmenden dezentralen Einspeisung werden Fehlerströme heute jedoch oft aus verschiedenen Quellen gespeist und können zudem je nach Einspeisesituation um mehrere Größenordnungen unterschiedlich ausfallen. Traditionelle Stromwandler haben nicht die erforderliche Dynamik, um in solchen Fällen ausreichend genau bzw. sättigungsfrei zu übertragen. Rogowski-Sensoren haben dagegen einen sehr großen Messbereich, sind kostengünstig, kompakt und in den meisten Anlagen nachrüstbar. Sie zeigen keine Sättigungseffekte, sind nicht anfällig für Ferroresonanz und haben nahezu keine Verluste.

Um die Elektromagnetische Verträglichkeit der Schutzgeräte sicherzustellen, sind für die analogen Eingänge genormte Prüfverfahren nach IEC 60255-26 vorgesehen. Diese sind jedoch für Strom- und Spannungswandler konzipiert und berücksichtigen aktuell noch nicht die besonderen Eigenschaften von Kleinsignalwandlern, wie z. B. Schirmung von Sensoren und Signalleitungen, potentialfreie Messung oder hohe Eingangsimpedanz.

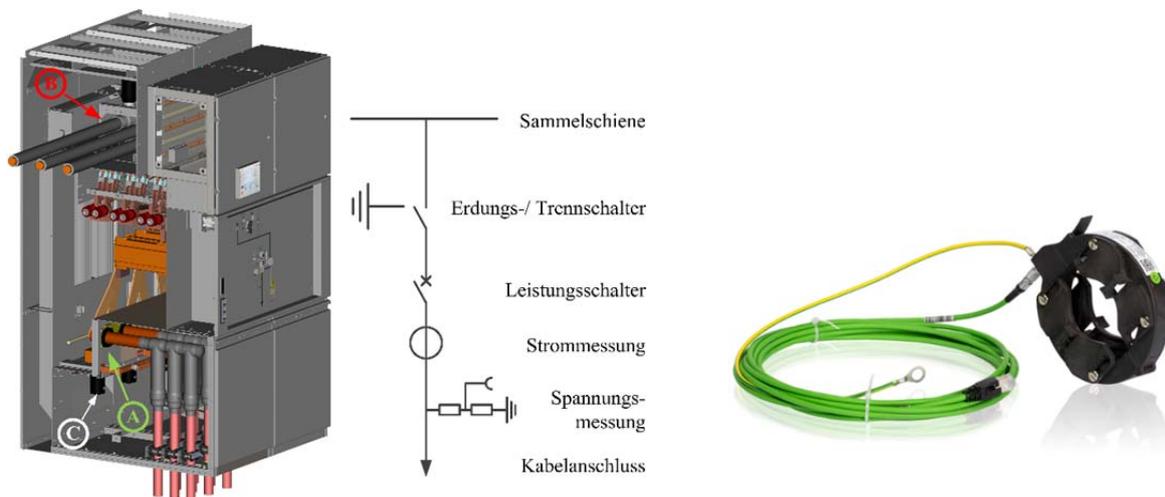


Fig. 1: Mittelspannungsschaltanlage (links) und Rogowski-Sensor (rechts).
Medium voltage switchgear (left) and Rogowski sensor (right).

Ziel der Forschungsarbeit ist es, umfassende Klarheit über die zu erwartenden Störpegel an analogen Sensoreingängen zu schaffen und daraus Konzepte zur Überprüfung und Sicherstellung der EMV abzuleiten. Hierfür werden an realen Schaltanlagen Messungen von Störpegeln während Schaltheftungen, bzw. bei hohem Oberwellenanteil im Strom vorgenommen und diese dann in einem möglichst einfachen Aufbau, bestehend aus Schutzgerät, Prüfgenerator und einem geeigneten Ankoppelnetzwerk nachgestellt.

▪ **Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switchgear**

M. Sc. Christian Suttner

In power supply networks, medium voltage switchgear allows a change in the network topology or the selective protection of the network in the event of a fault. Due to the increasing decentralized generation, fault currents are often fed from different sources and can also differ by several orders of magnitude depending on the generation. Traditional CT's do not provide the required dynamic range to keep up with those demands due to their limited accuracy and saturation effects. Rogowski sensors, on the other hand, have a very large measuring range, are cost-effective, compact and can be retrofitted in most systems. They do not show saturation effects, are not susceptible to ferroresonance and have almost no losses.

In order to ensure the electromagnetic compatibility of the protective devices, standardized test procedures according to IEC 60255-26 are provided for the analogue inputs. However, these are designed for current and voltage transformers and do not yet take the special properties of small signal converters into account, such as shielding of sensors and signal lines, potential-free measurement or high input impedance.

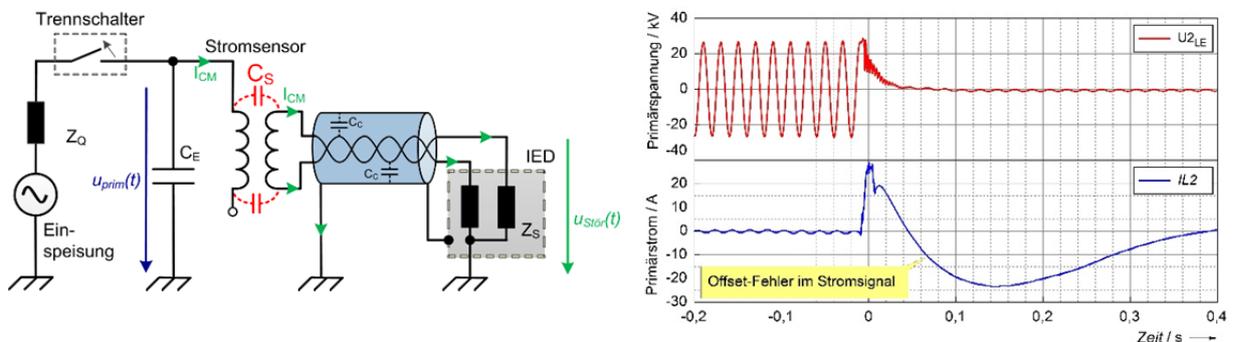


Fig. 2: ESB der Kopplung (links) und Störschrieb einer Schutz-Überfunktion (rechts).
Disturbance coupling (left) and record of protection malfunction (right).

The aim of the research work is to provide comprehensive clarity on the expected interference levels at analog sensor inputs and to derive concepts for the verification and assurance of EMC. For this purpose, measurements of interference levels during switching operations, or in the case of a high harmonic component in the current, are carried out on real switchgear assemblies, and these are then imbedded in a test setup as simply as possible, consisting of protective device, test generator and a suitable coupling network.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

S. Tenbohlen, C. Breuer, F. Devaux, R. Lebreton, N. Schmidt, T. Stirl
Evaluation of the thermal performance of transformer windings by numerical investigations and measurements.
Cigre Science and Engineering, Vol. 7, February, 2017

M. H. Samimi, S. Tenbohlen
Detection of transformer mechanical deformations by comparing different FRA connections.
International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 86, March 2017, pp. 53-60

M. Wild, S. Tenbohlen, E. Gulski, R. Jongen,
Basic Aspects of Partial Discharge On-site Testing of Long Length Transmission Power Cables.
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Issue 2, April 2017, pp. 1077-1087

S. Khandan, S. Tenbohlen, C. Breuer, R. Lebreton
Numerical Investigation of Fluid Flow and Temperature Distribution on Power Transformer Windings Using Open Foam.
19th International Conference on Computational Fluid Dynamics, ICCFD 2017, Berlin, May 21-22, 2017, Proceedings of the ICCFD, Paper No. 07.

S. Tenbohlen, N. Schmidt, S. Khandan, C. Breuer, R. Lebreton
Investigation of Thermal Behavior of an Oil Directed Cooled Transformer Winding.
IEEE Transactions on Power Delivery, published June 05, 2017, available online, DOI.10.1109/TPWRD.2017.27111786.

F. Vahidi, S. Haegele, S. Tenbohlen, K. Rapp, A. Sbravati
Study on Moisture Influence on Electrical Conductivity of Natural Ester Fluid and Mineral Oil.
Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA, June 11-14, 2017, Conference Proceedings, page 290-293

P. Wiest, S. Eberlein, K. Rudion, A. Probst
Comparison between Static and Dynamic Curtailment of RES in Probabilistic High Voltage Distribution Grid Planning.
24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Glasgow, Großbritannien, June 12-15, 2017, Paper No. 0048, S. 2169-2173

C. Kattmann, K. Rudion, S. Tenbohlen

Detailed Power Quality Measurement of Electric Vehicle Charging Infrastructure.
24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – CIRED,
Glasgow, UK, June 12-15, 2017, paper No. 0834

C. Kattmann, S. Tenbohlen

Visualization of Power Quality Data.

12th IEEE PES PowerTech Conference, June 18-22, 2017, Manchester, UK, paper ID
703, DOI: 10.1109/PTC.2017.7981158

D. Groß, P. Wiest, K. Rudion

Comparison of Stochastic Load Profile Modeling Approaches for Low Voltage Residential Consumers.

12th IEEE PES PowerTech Conference, June 18-22, 2017, Manchester, UK
DOI: 10.1109/PTC.2017.7981272

P. Wiest, K. Rudion, A. Probst

Optimization of Power Feed-In Curtailment from RES and its Consideration within Grid Planning.

12th IEEE PES PowerTech Conference, June 18-22, 2017, Manchester, UK
DOI: 10.1109/PTC.2017.7980801

S. Khandan, S. Tenbohlen, C. Breuer, R. Lebreton

CFD Study of Fluid Flow and Temperature Distributions in a Power Transformer Winding.

19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, UK,
June 25-29, 2017, Proceedings of the ICDL, Paper No. 1187

S. Haegele, F. Vahidi, S. Tenbohlen, K. Rapp, A. Sbravati

Investigation of Interfacial Surface Creep Breakdown at Oil-Pressboard Interfaces in Natural Ester Liquid and Mineral Oil.

19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), June 25-29, 2017,
Manchester, UK, paper No. 1242

F. Vahidi, S. Haegele, S. Tenbohlen

A Comparison of Oil-impregnated Pressboard Electrical Conductivity Behavior for Two Different High Density Pressboards.

19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), June 25-29, 2017,
Manchester, UK, paper No. 1328

F. Vahidi, S. Haegele, S. Tenbohlen, K. Rapp, A. Sbravati
Influence of Cellulose Contamination Level on Electrical Conductivity of Natural and Synthetic Ester Liquids Compared to Mineral Oil.

19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), June 25-29, 2017, Manchester, UK, paper No. 1268

N. Kaiser, P. Wiest, O. Laribi, K. Rudion
Evaluation of Energy-Storage for Reducing Grid Reinforcement in High Voltage Grids.

IEEE PESS Power and Energy Student Summit, 26.-29. Juni 2017, Nürnberg

T. Streubel, D. Groß, K. Rudion
Bad Data Detection and Identification in Distribution Power Systems.

IEEE PESS Power and Energy Student Summit, 26.-29. Juni 2017, Nürnberg

P. Wiest, D. Groß, K. Rudion, A. Probst
Rapid identification of worst-case conditions: improved planning of active distribution grids.

IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, Issue 9, July 2017, S. 2412-2417

M. Djamali, S. Tenbohlen
A validated online algorithm for detection of fan failures in oilimmersed power transformers.

International Journal of Thermal Sciences, Elsevier, Volume 116, 2017, pp. 224-233
DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.012

M. H. Samimi, S. Tenbohlen
FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 89, July 2017, pp. 115-125

M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni
Effect of Different Connection Schemes, Terminating Resistors and Measurement Impedances on the Sensitivity of the FRA Method.

IEEE Trans. On Power Delivery, Volume 32, No. 4, August 2017, pp. 1713-1720

S. Haegele, S. Tenbohlen, E. Junge, M. Konermann
Investigation of Low Temperature and Electric Stress Behaviour of Different Natural Ester Liquids.

20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017), August 28–September 01, 2017, Buenos Aires, Argentina, paper No. 643

P. Hillenbrand, M. Beltle, S. Tenbohlen, S. Mönch
Sensitivity Analysis of Behavioral MOSFET Models in Transient EMC Simulation.
International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe,
Angers, September 4-8, 2017, Session O_We_B2

P. Hillenbrand, M. Beltle, S. Tenbohlen, J. Hansen
Transient Co-Simulation of Electromagnetic Emissions caused by a SiC Traction Inverter.
International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe,
Angers, September 4-8, 2017, Session O_Th_C2, Paper ID 136

F. Vahidi, S. Tenbohlen, K. Rapp, A. Sbravati
Electrical Conductivity of Oil and Oil-impregnated Pressboard dependent on Aging Byproducts.
International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi City,
Japan, September 12-15, 2017, DOI: 10.23919/ISEIM.2017.8166589

S. Tenbohlen, M. Beltle, M. Siegel
PD Monitoring of Power Transformers by UHF Sensors.
International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi City,
Japan, September 12-15, 2017, DOI: 10.23919/ISEIM.2017.8088747

S. Tenbohlen, J. Jagers, F. Vahidi
Standardized survey of transformer reliability: On behalf of CIGRE WG A2.37.
International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi City,
Japan, September 12-15, 2017, DOI: 10.23919/ISEIM.2017.8166559

P. Hillenbrand, S. Tenbohlen, J. Hansen, W. Pfaff
EMV-Simulation der EMI eines Traktionsinverters in einer CISPR25 Messumgebung.
7. GMM Fachtagung „EMV in der Kfz-Technik“, Wolfsburg, 20.-21.09.2017,
Präsentation in Session 3: EMV von Elektrofahrzeugen

D. Groß, P. Wiest, K. Rudion, A. Probst
Parametrization of Stochastic Load Profile Modeling Approaches for Smart Grid Simulations.
IEEE International Conference on Innovative Smart Grid Technologies IEEE ISGT
Europe 2017, September 26-29, 2017, Torino, Italy, Paper No. 1150

P. Wiest, D. Groß, K. Rudion, A. Probst
Security-Constrained Dynamic Curtailment Method for Renewable Energy Sources in Grid Planning.
IEEE International Conference on Innovative Smart Grid Technologies IEEE ISGT
Europe 2017, September 26-29, 2017, Torino, Italy, Paper No. 1136

O. Laribi, P. Wiest, K. Rudion

Optimal Dimensioning and Operation of a Grid-Supporting Energy Storage System.
IEEE International Conference on Innovative Smart Grid Technologies IEEE ISGT Europe 2017, September 26-29, 2017, Torino, Italy, Paper No. 1393

C. Kattmann, M. Beltle, S. Tenbohlen

Kontinuierliche Messung und Auswertung der Spannungsqualität bis 150 kHz am Beispiel einer Ladestation für Elektrofahrzeuge.
Oberlausitzer Energie-Symposium 2017, 25.-26. Oktober 2017, Zittau

H. Früh, P. Wiest, K. Rudion

Bewertung der Spannungshaltungsmaßnahmen in Niederspannungsnetzen mittels probabilistischer Ansätze.
Internationaler ETG Kongress 2017, 28.-29. November 2017, Bonn, S. 19-24

D. Groß, P. Wiest, K. Rudion, L. Rupp

Konzept einer praktikablen, stabilen und übertragbaren Zustandsschätzung für Verteilnetze.
Internationaler ETG Kongress 2017, 28.-29. November 2017, Bonn, S. 87-92

P. Wiest, D. Groß, K. Rudion, A. Probst

Auswirkungen der Spitzenkappung von erneuerbaren Energien auf den Netzausbau im Hochspannungsnetz.
Internationaler ETG Kongress 2017, 28.-29. November 2017, Bonn, S. 75-80

S. Haegele, S. Tenbohlen, E. Junge, M. Konermann

Einsatz natürlicher Ester in Verteiltransformatoren.
Internationaler ETG Kongress 2017, 28.-29. November 2017, Bonn, Beitrag im Expertenforum 3 – HV & MV Netze

C. Suttner, W. Ebbinghaus, S. Tenbohlen

Transiente Störgrößeneinkopplung auf Schutzsysteme mit Kleinsignalwandlern in Mittelspannungsschaltanlagen.
Internationaler ETG Kongress 2017, 28.-29. November 2017, Bonn, Poster 3.14

P. Picher, S. Tenbohlen, M. Lachmann, A. Scardazzi, P. Pavel

Current state of transformer FRA interpretation.
Procedia Engineering, Volume 202, 2017, pp. 3-12

M. Nemati, M. Braun, S. Tenbohlen

Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming.
Applied Energy, Volume 210, January 2018, pp. 944-963
DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.007

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 9.-10.1.17 Joint Working Group C4.42/CIRED “Continuous assessment of low-order harmonic emissions from customer installations”, Utrecht, Teilnehmer: C. Kattmann
- 31.1.-1.2.17 Smart Grids Baden-Württemberg, 2. Jahreskonferenz von SmartGridsBW, Stuttgart
Prof. S. Tenbohlen, Prof. K. Rudion
- 20.2.17 Vorstandssitzung der Smart Grids Plattform Baden-Württemberg, EnBW Stuttgart, Prof. S. Tenbohlen
- 21.2.17 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, JWG D1/B3.57, Dresden, Prof. S. Tenbohlen, P. Wenger
- 21.3.17 Sitzung des VDE Ausschusses, 40. Sitzung K 122, Frankfurt.
Prof. S. Tenbohlen
- 28.-29.3.17 Sitzung der CIGRE-Arbeitsgruppe JWG A2/D1.51, Aachen, Prof. S. Tenbohlen
- 30.3.17 Sitzung des VDE ETG Fachbereichs V2, Frankfurt.
Prof. K. Rudion
- 31.3.17 Treffen des deutschen Arbeitskreises (DAK) CIGRE SC D1, Berlin.
Prof. S. Tenbohlen
- 6.4.17 Sitzung ETG-Vorstand mit Wissenschaftlichem Beirat, VDE, Frankfurt
Prof. S. Tenbohlen
- 18.-19.4.17 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, WG A2.57, Bad Honnef, Prof. S. Tenbohlen, M. Schühle
- 9.-12.5.17 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, WG A2.53 und 4th International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Pula, Kroatien,
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, M. Tahir
- 17.5.17 Vorstandssitzung der Smart Grids Plattform Baden-Württemberg, Prof. S. Tenbohlen
- 12.-15.6.17 CIRED 2017, Glasgow, UK,
Teilnehmer: S. Eberlein, C. Kattmann
- 18.-22.6.17 IEEE PES Powertech 2017, Manchester, UK,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, D. Groß, C. Kattmann, P. Wiest
- 25.-29.6.17 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, UK,
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, S. Hägele, S. Khandan, F. Vahidi
- 16.-21.7.17 2017 IEEE PES General Meeting (GM), Chicago, USA,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, D. Groß
- 28.8.-1.9.17 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017), Buenos Aires, Argentina,
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, S. Hägele

- 4.-8.9.2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Angers, France. Teilnehmer: P. Hillenbrand
- 12.-15.9.17 8th International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi City, Japan
Prof. S. Tenbohlen
- 20.-21.9.17 CIGRE JWG A2/D1.51 TF am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Stuttgart
Prof. S. Tenbohlen, M. Siegel, S. Coenen, S. Hoek, T. Linn, T. Brügger, S. Neuhold, J. Fuhr
- 20.-21.9.2017 7. GMM-Fachtagung EMV im Kfz, Wolfsburg,
Teilnehmer: M. Beltle, D. Müller, P. Hillenbrand
- 26.-29.9.17 IEEE ISGT Europe 2017, Turin,
Teilnehmer: D. Groß, O. Laribi, P. Wiest
- 1.-3.10.17 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, WG A2.53 und A2 Kolloquium, Krakau, Polen,
Prof. S. Tenbohlen, M. Tahir
- 9.10.2017 Smart Grids Gespräche zu E-Mobilität und Infrastruktur und Vorstandssitzung der Smart Grids Plattform Baden-Württemberg, Stuttgart, Prof. S. Tenbohlen
- 16.10.17 Zentrum für Energieforschung Stuttgart (ZfES), Klausurtagung der ZfES Vorstandsmitglieder, Stuttgart,
Prof. S. Tenbohlen
- 24.10.17 CIGRE/CIRED Informationsveranstaltung, Aschaffenburg,
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, D. Groß, P. Wiest
- 25.-26.10.17 Oberlausitzer Energie-Symposium 2017, Zittau,
Teilnehmer: M. Beltle, C. Kattmann
- 13.11.17 Gremiensitzung ETG FB Q2, VDE, Frankfurt,
Prof. S. Tenbohlen
- 16.-17.11.17 Joint Working Group C4.42/CIRED "Continuous assessment of low-order harmonic emissions from customer installations", Dresden,
Teilnehmer: C. Kattmann
- 28.-29.11.17 Internationaler ETG Kongress 2017, Bonn,
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Prof. K. Rudion, H. Früh, D. Groß, S. Hägele, C. Suttner, P. Wiest
- 30.11.17 Sitzung von ETG-Vorstand mit Wissenschaftlichem Beirat, Bonn,
Prof. S. Tenbohlen
- 4.12.17 Sitzung des Technischen Beirats Omexom, Wendlingen,
Prof. S. Tenbohlen

- 5.-6.12.17 Seminar zu Grundlagen der Hochspannungstechnik an der Technischen Akademie Esslingen,
Prof. S. Tenbohlen
- 11.12.17 6.Smart Grids Baden-Württemberg Kongress, Fellbach,
Prof. K. Rudion
- 11.-13.12.17 Seminar „Partial Discharge Measurement“, Teheran, Iran,
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 Freiluftantenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m ³ (B x L x H)
Spannungsteiler	gedämpft kapazitive Spannungsteiler bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)
E/H-Feldmeßsysteme	mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 500 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)
EMV-Prüf und Messgeräte	diverse ESD-Pistolen, LV- und HV- Bordnetz-nachbildungen (LISN) für nach CISPR 25 / automotive und nach CISPR 16. BCI-Zangen, Koppelzangen nach IEC 61000-4, Multifunktionsgeneratoren für Burst, Surge nach IEC 61000-4, versch. vektorielle Netzwerkanalysatoren, Breitbandmessempfänger 10 Hz-6 GHz. versch. Signalgeneratoren 9 kHz-6 GHz. Diverse Oszilloskope bis 3 GHz.
EMV-Absorberräume	10 m und 3 m Messabstand, mit Leistungsverstärkern, Monopole, Bikonische, UltraLog- und Hornantennen für 9 kHz bis 5GHz, Videoüberwachung über LWL für Störfestigkeit, TEM-Messzellen
Klimakammer	3 x 3 x 3 m ³ , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C
Einpolige 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 Ortungssysteme. Die Systeme unterstützen verschiedene Analyseverfahren.
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlagspannungsmessgerät, Gaschromatographen (Vakuumgasung- und Headspace), Ölaufbereitungsanlagen für Mineralöl und Bioester

Power Quality Analyzer

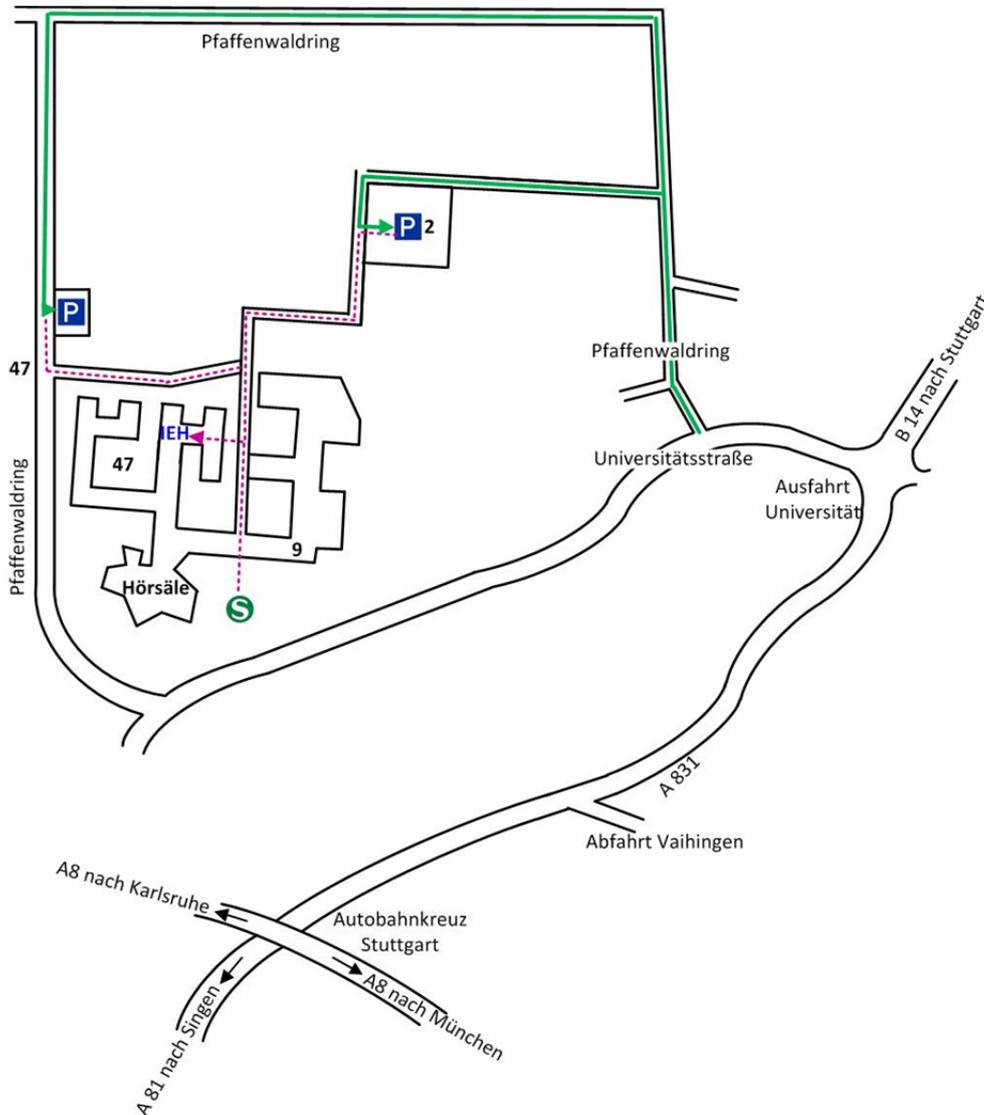
dreiphasige Strom- und Spannungsmessung bis zur 3000. Harmonischen (150 kHz), kontinuierliche Transientenerkennung mit 500 kS/s, Visualisierung auf Webseite

HiL-Simulator:

Hardware-in-the-Loop-Simulationen von elektrischen Energienetzen mit Einbindung von digitaler Kommunikation und Schutztechnik

9. LAGEPLÄNE

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

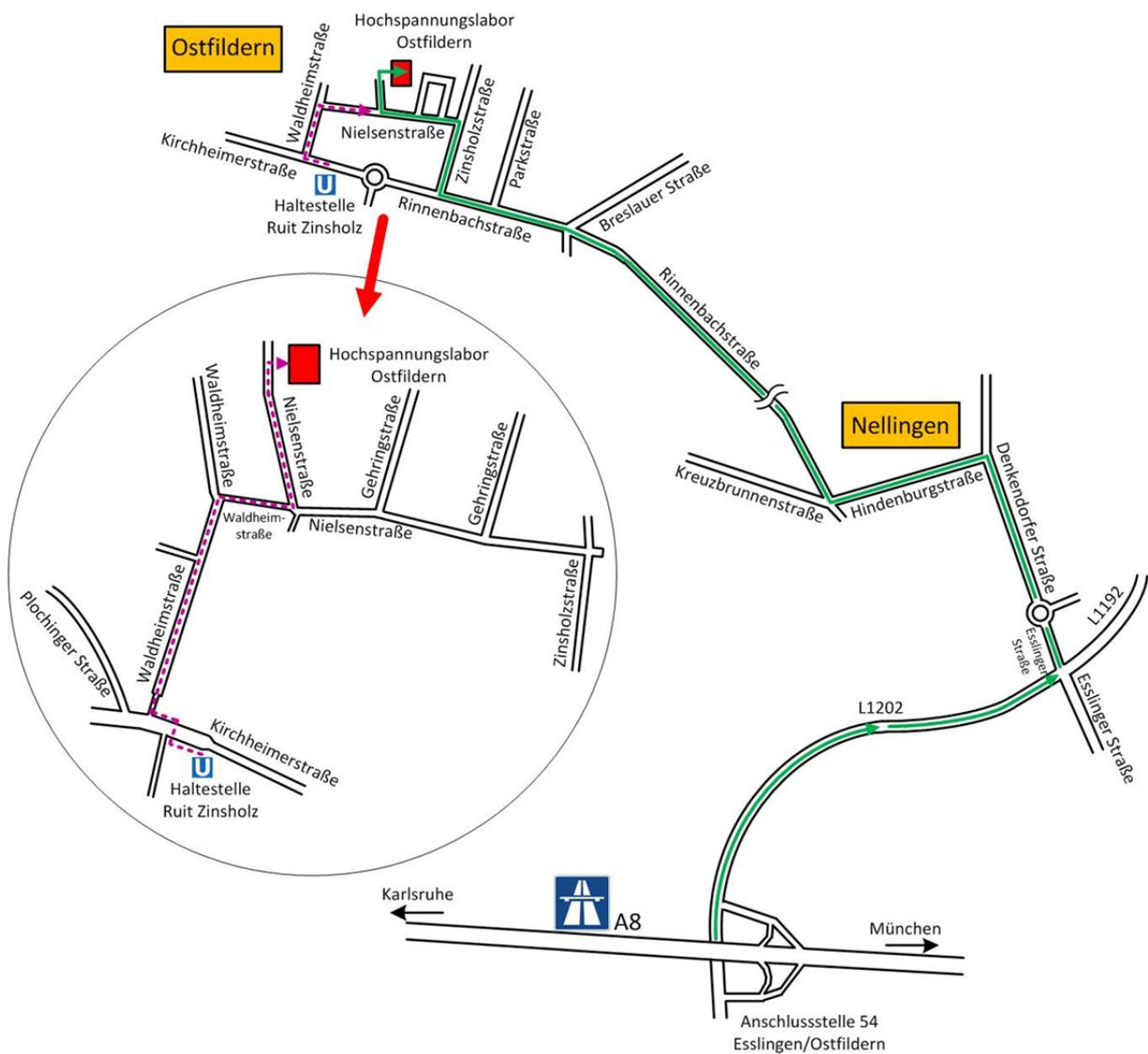


Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

S-Bahnen der Linien S1, S2 und S3

Haltestelle „Universität“, Ausgang „Universitätszentrum“

Lageplan
des Institutsteils Ostfildern (Hochspannungslabor)
Nielsenstr. 18, 73760 Ostfildern, Telefon: +49 (0)711 341 20 75



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

Stadtbahnlinien U7 und U8
Haltestelle „Ruit Zinsholz“
(ab Stuttgart Hbf 20 Minuten Fahrzeit)