

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.....	16
4.	PROMOTIONEN.....	47
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	64
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	68
5.2	ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS	94
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	146
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	158
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	165
8.	PRÜFEINRICHTUNGEN	167
9.	LAGEPLÄNE.....	169

1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, mit dem vorliegenden Jahresbericht 2018 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Das Jahr 2018 war nicht nur im Rahmen der Energiewende in Deutschland sondern auch aus weltweiter Perspektive ein wichtiges Jahr in Bezug auf den Klimaschutz. Zum einen wurden wichtige Entscheidungen auf der globalen Ebene im Rahmen der COP24 getroffen, die eine bessere Erfassung und Kontrolle der Treibhausgasemissionen ermöglichen. Zum anderen wurden in Deutschland durch die ausgesprochenen Fahrverbote die Weichen für die Zukunft im Verkehrssektor gestellt, um Emissionen insbesondere in den Großstädten zu verringern. Diese beiden Meilensteine haben auch einen unmittelbaren Einfluss auf die Energiewende. Die zu erwartende Zunahme von Elektrofahrzeugen, die mit elektrischer Energie geladen werden müssen, und der in Deutschland diskutierte Kohleausstieg bei der Stromerzeugung führen zu grundlegenden Herausforderungen, die neue Fragestellungen u.a. für die Wissenschaft mit sich bringen.

Das Jahr 2018 war ein erfolgreiches Jahr auch für unser Institut. Zum einen haben wir im Dezember im Rahmen einer konsortialen Abschlussveranstaltung mit der Teilnahme von hochrangigen Vertretern des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Herr Minister F. Untersteller), des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Herr Staatssekretär T. Bareiß), der Bundesnetzagentur (Herr Dr. Sasse) sowie des Projektträgers Jülich (Herr Dr. W. Rolshofen) unser Verbundvorhaben „grid control“ erfolgreich beenden können. Zum anderen ist z.B. unser neues Projekt FELSEN (Flexible Energieversorgung in Logistikzentren zur Erbringung von Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen) erfolgreich angelaufen, in dem wir die Thematik der Flexibilisierung von Logistikzentren unter Einbeziehung der Elektromobilität betrachten.

Das Interesse an den Themen Energiewende, Elektromobilität, Netzausbau und Smart Grid-Lösungen ist auch bei den Studierenden weiter ungebrochen. 100 studentische Arbeiten wurden 2018 am IEH durchgeführt, wieder ein sehr erfreuliches Ergebnis. Auch dieses Jahr konnten wir unseren Studierenden die Inhalte der Lehrveranstaltungen im Rahmen einiger Exkursionen mit Einblicken in die Praxis nahebringen. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Gastgebern herzlich bedanken.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir wieder auf ein sehr gelungenes Jahr zurückblicken. Neben fünf abgeschlossenen Dissertationen von Dr.-Ing. Mohammad Djamali (*Thermisches Monitoring von Leistungstransformatoren*), Dr.-Ing. Markus Fischer (*Risikoorientierte Instandhaltung von Leistungstransformatoren basierend auf einem regel- und fallorientierten Inspektionsverfahren*), Dr.-Ing. Pascal Wiest (*Probabilistische Verteilnetzplanung zur optimierten Integration flexibler dezentraler Erzeuger und Verbraucher*), Dr.-Ing. Manuel Wild (*Zweiseitige Teilentladungsmessung zur Zustandsbewertung langer Energiekabel*) und Dr.-Ing. Philipp Hillenbrand (*Simulation*

der Störemissionen von Traktionsinvertern im Komponententest nach CISPR 25) dokumentieren 45 Veröffentlichungen unsere Forschungsaktivitäten. Viele unserer Veröffentlichungen können Sie auch auf unserer Institutshomepage finden:

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

Im Frühjahr haben wir zusammen mit verschiedenen Herstellern wieder das Stuttgarter Hochspannungssymposium zum Thema „*Innovationen für die Netze von morgen*“ in der Filderhalle in Leinfelden durchgeführt. Hervorragende Referenten und der traditionell gute Ruf dieser im zweijährigen Turnus stattfindenden Veranstaltung führten 250 Teilnehmer hauptsächlich aus den Bereichen Energieversorger und Hersteller nach Stuttgart. Auf Grund der zahlreichen Nachfragen werden wir das Stuttgarter Hochspannungssymposium am 10./11. März 2020 wieder im gleichen Rahmen durchführen. Vom 12. bis 14. November 2018 fand in Berlin unter unserer wissenschaftlichen Leitung die Fachtagung „Hochspannungstechnik“ statt, ein etabliertes Forum für Experten und Anwender zu allen Gebieten der Hochspannungstechnik. Eine sehr hohe Anzahl von interessanten Beiträgen und die Fachaussteller zeigten anschaulich aktuelle Entwicklungen und passgenaue Detaillösungen in der Energietechnik. Mit 330 Teilnehmern ist es die größte Fachtagung zur Hochspannungstechnik in Deutschland.

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

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

Stuttgart, im Januar 2019

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

PREFACE

Dear friends!

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

2018 was an important year for the global fight against climate change. In Germany the energy transition is making progress. In Katowice the United Nations Climate Change Conference COP24 adopts globally applicable decisions for climate action which enable a better measurement and control of greenhouse gas emissions. In Germany the imposed driving ban, which aimed to achieve emission reduction especially in big cities, paved the way to tomorrow's transport sector.

These two milestones directly affect the energy transition. To cope with the effects of the expected rise of electric vehicles, charged with electric energy, and the planned phase-out of coal-fired power plants in Germany, there are a number of key challenges that have to be faced and strategies need to be developed. That also includes scientific and academic research.

2018 was also an important and successful year for our institute. On the one hand our joint research and development project in the field of green energies "grid control" was successfully completed. Minister and high-level representatives joined our closing meeting in December 2018 at our institute: Franz Untersteller, Minister of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector, Thomas Bareiß, Parliamentary State Secretary at the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Dr. Sasse from the Federal Network Agency and Dr. W. Rolshofen from the Project Management Organization Jülich.

On the other hand a new project FELSEN (Flexibility in the supply of energy of logistic centers to provide ancillary services) has set off to a good start. In the project we examine the flexible usage of logistic centers taking into account e-mobility.

The students remain highly interested in themes concerning the change of the energy sector, the expansion of the grids and smart grid solutions. 100 scientific works have been completed at our institute, again a very positive result. Various excursions offered the students excellent opportunities to gain an insight into everyday practice. Once again we would like to thank all partners for their support.

In the research field we look back on another very successful year. In addition to five finished dissertations by Dr.-Ing. Mohammad Djamali (*Thermal Monitoring of Power Transformers*), Dr.-Ing. Markus Fischer (*Risk-oriented Maintenance of Power Transformers Based on a Rule- and Case-oriented Inspection Method*), Dr.-Ing. Pascal Wiest (*Probabilistic Distribution Grid Planning for Optimized Integration of Flexible Distributed Generation and Consumption*), Dr.-Ing. Manuel Wild (*Two-sided Partial Discharge Measurement for Condition Monitoring of long Power Cables*) and Dr.-Ing. Philipp Hillenbrand (*Simulation of Electromagnetic Emissions Caused by*

Traction Inverters in a CISPR25 Component Level Test Setup), 45 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>

In spring we organized once more the Stuttgart High Voltage Symposium with the subject “*Innovations for the grids of tomorrow*” together with different manufacturers at the Filderhalle in Leinfelden. Excellent speakers and the traditional good reputation of this event, which takes place every two years, lead 250 participants from the sector of energy suppliers and manufacturers to Stuttgart. Due to numerous demands we will prepare another Stuttgart High Voltage Symposium on 10 to 11 March 2020 in the same context. In Berlin from 12 to 14 November 2018, we had the honour to act as chairman of the High Voltage Technology Colloquium. It is an established forum for experts and operators from all fields of High Voltage Technology. A very high number of interesting speeches and exhibitors vividly showed current developments and custom-fit detailed solutions in energy technology. This is the biggest technical meeting of High Voltage Technology in Germany where 330 participants attended.

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

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

Our best wishes accompany you in 2019.

Stuttgart, January 2019

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail:	Telefon / phone:
	<code>vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de</code>	+49 (0)711-
	<code>firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de</code>	
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>	-685-68061
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	M. Sc. Benjamin ADAM	-685-69198
	M. Sc. Manswet BANKA	-685-67868
	M. Sc. Jonas BERTELMANN	-685-69195
	M. Sc. Chandra Prakash BEURA (ab 2.7.2018)	-685-69152
	M. Sc. Matthias BUCHNER	-685-67838
	M. Sc. Daniel CONTRERAS	-685-69193
	M. Sc. Simon EBERLEIN	-685-67857
	M. Sc. Adrian EISENMANN	-685-67867
	M. Sc. Heiner FRÜH	-685-69151
	M. Sc. Daniel GROß	-685-67875

M. Sc. Stephanie HÄGELE	-685-67858
M. Sc. Manuel HAUG (ab 1.2.2018)	-685-60832
M. Sc. Smitha KARAMBAR	-685-69194
Dipl.-Ing. Christoph KATTMANN (bis 27.3.2018)	
M. Sc. Saeed KHANDAN SIAR	-685-67809
M. Sc. Ouafa LARIBI	-685-69197
M. Sc. Markus MILLER	-685-67869
M. Sc. Denis MÜLLER	-685-69199
M. Sc. Daniel PASSOW	-685-69165
M. Sc. Jan SCHABEL (ab 14.5.2018)	-685-67874
M. Sc. Michael SCHÜHLE	-685-69142
M. Sc. Tim STREUBEL	-685-69167
M. Sc. Christian SUTTNER	-685-69164
M. Sc. Mehran TAHIR	-685-67855
M. Sc. Farzaneh VAHIDI (z.Zt. beurlaubt)	
M. Sc. Philipp WENGER	-685-69177
M. Sc. Pascal WIEST	-685-69196

Sekretariat /

Secretary:

Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:

Janja SCHULZ -685-67870

Annette GUGEL -685-67880

Hochspannungslabor Ostfildern:

Konstanze LINS -685-69175

(-3412075)

Buchhaltung /

Accounting:

Nicole SCHÄRLI -685-67876

Technische Angestellte /

Technical Staff:

Muhammed ACAR, *Auszubildender* -685-67847

Can AKGÜL, *Mechaniker* -685-67847

Erwin BECK, *Mechanikermeister* -685-67847

Lothar EHINGER, *Elektromeister* -685-61526

Timon GOLD, *Zentralwerkstattleiter* -685-67847

Daniel HARTICH, *Mechaniker* -685-67847

Michael HERDTLE, *Mechaniker* -685-69161

Edona KUQI, *Mechanikerin* -685-67847

Benedikt LUSINSKY, *Auszubildender* (ab 1.9.18) -685-67847

Hartmut RÖNISCH, *Elektrotechniker* -685-67856

Christian WÖLZLEIN, *IT-Systemkaufmann* -685-67863

Gastwissenschaftler /

Visiting scientists:

Dr. Wilfred FRITZ, Kapstadt, Südafrika -685-67889

Prof. Dr. Tankut YALCINÖZ -685-69159

Dr. Satoru MIYAZAKI, CRIEPI, Japan (bis 30.6.2018)

M. Sc. Takahiro UMEMOTO, Mitsubishi (bis 14.3.2018)

M. Sc. Jinchao DU, Chongqing, China (bis 30.9.2018)

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

Elektrische Verbundsysteme

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

DIPL.-ING. T. RUDOLPH

Diagnostik und Schutz elektrischer Netzkomponenten

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Vortragsübungen für Studierende zu wechselnden Themen*

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

DR.-ING. K. PAPAILIOU***Hochspannungsfreileitungen***

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

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

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

3.2 PRAKTIKA

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Grundlagenpraktikum

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik im 2. Semester. Auch Studierende der Technikpädagogik mit Schwerpunkt Elektrotechnik sowie Lehramtsstudierende im Fach Naturwissenschaft und Technik nehmen teil.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

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

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

Fachpraktikum „Hochspannungstechnik“

Das Fachpraktikum „Hochspannungstechnik“ für Bachelor umfasst z.Zt. Versuche mit folgenden Inhalten:

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

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

Fachpraktikum „Hochspannungstechnik“ bzw. „Energieübertragung“

Für Masterstudierende werden die Fachpraktika in Form kleiner Projekte durchgeführt.

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Praktikum im Studiengang „Erneuerbare Energien“

Das Institut bietet im gleichnamigen Bachelorstudiengang einen Praktikumsversuch an, der die Auswirkungen von Wirk- und Blindleistungsflüssen im Verteilnetz auf die Spannungshaltung verdeutlicht. Weiter wird der Wirkungsgrad eines PV-Wechselrichters bei verschiedenen Betriebspunkten bestimmt.

Außerdem liegt die Gesamtorganisation dieses Praktikums, bei dem sieben Institute verschiedener Fakultäten mitwirken, in unserer Hand.

3.3 EXKURSIONEN

8. Februar 2018, ganztätig:

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

16. Mai 2018, ganztätig

Besichtigung des Kernkraftwerks Neckarwestheim der EnBW Kernkraft GmbH mit Diskussion aktueller Fragen zur Energiepolitik und –versorgung im Rahmen der Vorlesung „Elektrische Verbundsysteme“

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Masterarbeiten vom 1.11.2017 bis 31.10.2018:

Blum, Christian

Aufbau der Simulated Power-Hardware-in-the-Loop Modelle für ein Smart-Grids-Labor

Dem Aufbau eines Smart Grids Labors am Institut geht eine detaillierte Betrachtung in der Softwareumgebung MATLAB®/Simulink® voraus. Das dem Smart Grids Labor zugrunde gelegte Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Konzept wird dabei virtuell als Simulink®-Modell abgebildet. Anhand des erstellten virtuellen PHIL-Modells erfolgt eine Untersuchung hinsichtlich der Stabilität und Genauigkeit der Simulationsumgebung im Smart Grids Labor. Einleitend wird das PHIL-Konzept vorgestellt, und Besonderheiten bei der Modellierung von PHIL-Systemen werden erläutert. Nach der detaillierten Beschreibung des Simulink®-PHIL-Modells wird abschließend das Systemverhalten präsentiert.

Preparation of Simulated Power-Hardware-in-the-Loop Models for a Smart Grids Laboratory

Prior to the realization of a smart grids laboratory at the institute a detailed examination of the envisioned installation will be carried out by using MATLAB®/Simulink®. The Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) concept of the laboratory is, therefore, virtually implemented as a Simulink® model. The resulting model is the basis for the analysis of the stability and accuracy of the smart grids laboratory simulation environment. Initially the PHIL-concept will be presented, a detailed description of the Simulink® PHIL-model is then followed by the demonstration of the systems behavior concluding the thesis presented.

Cui, Yuchen

Parameterbestimmung zur transienten Modellierung von Scheibenwicklungen

Die Analyse eines Transformators bei transienten Vorgängen erfordert eine präzise Modellierung der Wicklung und die genaue Darstellung der erforderlichen Modellparameter. Diese Arbeit stellt einen neuen Weg vor, der auf einer Kombination von analytischen und FEM-Methoden basiert und sich zur Berechnung der frequenzabhängigen Parameter (R, L und C) von Transformatorwicklungen verwenden lässt. Zu diesem Zweck wird ein detailliertes Modell von Transformatorwicklungen entwickelt. Die Modellparameter werden numerisch mit FEM berechnet, wobei der Einfluss der Frequenz einschließlich Skin- und Proximity Effekten berücksichtigt wird. Zur Validierung wird die Übertragungsfunktion des FEM-Modells berechnet und mit der bei einem experimentellen Aufbau mit FRA gemessenen Übertragungsfunktion verglichen.

Parameter Estimation of a Transient Model for Transformer Disk Windings

The transient analysis of a transformer requires an accurate modelling of the transformer and representation of its parameters. This research presents a new approach based on the combined analytical and FEM methods for the calculation of frequency

dependent parameters (R, L and C) of transformer windings. For this purpose, a detailed turn-based model of transformer continuous disc windings is developed and the frequency-dependent parameters of the model are calculated numerically with FEM considering the influence of frequency including the skin and proximity effects. In order to validate the FEM model, the transfer function of the model is calculated and compared with the transfer function measured from an experimental setup by using FRA.

Dahlke, Chris

Modellentwicklung im Umfeld eines elektrischen Industrienetzes unter Berücksichtigung von Power Quality Faktoren

Bauteile mit nichtlinearer Kennlinie verursachen harmonische Oberschwingungen, welche das Netz negativ beeinflussen. In dieser Arbeit wird deshalb eine Methode zur Ermittlung der harmonischen Einflüsse eines Verbrauchers auf das Netz vorgestellt. Neben der Messung von harmonischem Strom und Spannung am PCC wird die harmonische Impedanz des Netzes zur Ermittlung der Einflüsse benötigt. Dazu werden insgesamt 6 Methoden mit unterschiedlichen Ansätzen zur Bestimmung der Netzimpedanz vorgestellt. Zur Validierung der Methoden werden Fallstudien unter unterschiedlichen Bedingungen sowie mit verschiedenen Testumgebungen durchgeführt. Dabei soll unter anderem auch ein Modell des Forschungsgebäudes des ARENA2036 e.V. mit Matlab-Simulink aufgebaut und entwickelt werden.

Power Grid Modeling in Industrial Environment considering Power Quality Factors

Components with nonlinear characteristics cause harmonics, which have a negative influence on the grid. This paper presents a method for determining the harmonic influences of a customer on the grid. Besides the measurement of the harmonic current and voltage at the PCC, a harmonic impedance of the grid is required to determine the influences. Six methods with different approaches for determining the harmonic impedance of the network are presented. To validate the methods, case studies are conducted under different conditions and in different test environments. Thus, a model of the ARENA2036 e.V. research building with Matlab-Simulink is to be established and developed.

Deß, Tobias

Entwicklung einer Evaluationsmethodik des Netzausbaubedarfes im (n-1)-Fall der zeitreihenbasierten Netzplanung

Development of an Evaluation Method for Network Enhancement Requirements in the (n-1) case in the time-series-based Network Planning

Ehmann, Leopold

Segmentierung und Klassifizierung von Spannungsqualitätsproblemen

In dieser Arbeit wurden verschiedene Erkennungsalgorithmen untersucht, mit welchen in Kurvendaten und RMS-Werten Spannungsqualitätsprobleme erkannt und

identifiziert werden können. Dazu ist der erste Schritt eine Segmentierung der Daten. Hierbei werden verschiedene Varianten betrachtet. Im Anschluss werden charakteristische Features gewonnen, die im Klassifikator genutzt werden, um die Störungsart zu bestimmen. Der Klassifikator ist dabei als regelbasiertes Expertensystem ausgelegt. Bei Untersuchungen von synthetischen Daten mit unterschiedlichen Störungsarten und Ursachen konnten gute Erkennungsraten erreicht werden. Insbesondere Events von kurzer Dauer sind in RMS-Daten allerdings schwer erkennbar. Die Validierung der Erkennung erfolgte mit Messungen an einer Elektroladesäule.

Segmentation and Classification of Power Quality Issues

In this work different detection algorithms are examined which can recognize and identify power quality problems in wave data and RMS-values. For this purpose segmentation of the data is the first step. Several different methods are considered. Features get extracted from the measurements, which can be used in the classification, in order to determine the disturbance type. A rule-based expert system is used as the classifier. The analysis of synthetic data with different disturbance types and causes results in good recognition rates. But especially events of short duration cannot be easily detected in RMS-values. Validation of the recognition ability was carried out with measurement data from charging stations for electric vehicles.

Exner, Carmen

Implementierung eines Programms zur vorausschauenden Planung von Wartungsarbeiten an Energiekabeln

In dieser Masterthesis wird ein Programm entwickelt, das Empfehlungen zur Kabelerneuerung auf Basis der Lasten und einigen Temperaturmessungen erstellt. Mithilfe eines Modells zur thermischen Alterung wird das thermische Kabelalter berechnet. Das Programm lernt anschließend den Zusammenhang zwischen dem thermischen Kabelalter, der Kabelbelastung und den Kabelparametern. Dadurch werden Prognosen des thermischen Alters von Kabeln ohne Temperaturmessungen ermöglicht. Abschließend werden alle Kabel entsprechend des berechneten oder prognostizierten thermischen Alters geordnet und eine Empfehlung erstellt, welche Kabel in der nächsten Planungsperiode ausgetauscht werden sollen. Eine vollständige Kenntnis über alle angeschlossenen Lasten und Erzeuger ist dabei nicht notwendig.

Implementation of a Predictive Maintenance Engine for Power Cables

In this thesis a cable replacement engine is developed based on load patterns and few cable temperature profiles. A thermal ageing model computes the cable lifetime and the engine learns the correlation between expected lifetime and both loading pattern and cable properties. With this approach, predictions of lifetime of cables without temperature measurements become possible. Eventually, all cables are ranked regarding on their calculated or predicted thermal age, and recommendations are made which cables should be replaced in the upcoming planning period. A

complete knowledge of all connected loads and photovoltaic installations is not necessary.

Friedmann, Tobias

Entwurf und Aufbau einer Ölaufbereitungsanlage

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Planung und Konstruktion einer Anlage zur Aufbereitung von Isolierölen. Die Öle werden durch den Aufbereitungsprozess getrocknet, entgast und filtriert. Die Anlage ist so konstruiert, dass ölartunabhängig Aufbereitungsvorgänge durchgeführt werden können. Nach Fertigstellung der Anlage werden damit natürliche Ester aufbereitet. Die Ölaufbereitungsanlage funktioniert nach dem Prinzip der Vakuumtrocknung unter Zugabe von Wärmeenergie. Das Trocknungsergebnis der höchsten Güte der konstruierten Anlage wird bei einer Durchflussrate von einem Liter pro Stunde bei einem Unterdruck von ca. 1 mbar und einer Öltemperatur von 65°C erreicht. Die Ölfeuchte wird um 90,7 % reduziert.

Design and Installation of an Oil Treatment Plant

The objective of this work is the planning and construction of a plant for the processing of insulating liquids. The oils are dried, degassed and filtered by the treatment process. The oil treatment plant works on the principle of vacuum drying with the addition of thermal energy. The drying result of the highest quality of the constructed plant is achieved at a flow rate of one liter per hour at a negative pressure of about 1 mbar and an oil temperature of 65°C. Oil moisture is reduced by 90.7 % compared to untreated natural ester liquid.

Friedsam, Benjamin

Entwicklung eines Modells des Wirkleistungs-Frequenzzusammenhangs im kontinentaleuropäischen Verbundsystem und Untersuchungen zum Frequenzverhalten

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Modell des summarischen Wirkleistungs-Frequenzzusammenhangs im kontinentaleuropäischen Verbundsystem entwickelt. Anschließend wird das Modell verwendet, um den Einfluss unterschiedlicher Charakteristika der Aktivierung von Sekundärregelleistung (SRL) auf das Frequenzverhalten zu untersuchen. Das Modell verwendet als Eingangsdaten Zeitreihen des Area Control Errors verschiedener europäischer Übertragungsnetzbetreiber. Anhand historischer Zeitreihen, einem rechnerischen Ansatz und statistischer Verfahren wird eine Parameteridentifikation durchgeführt. Das Modell macht eine qualitative Bewertung verschiedener Charakteristika in Bezug auf Frequenzqualität möglich. Es wurde nachgewiesen, dass eine Erhöhung der Aktivierungszeit der SRL negative Auswirkungen auf die Frequenz hat.

Development of a Model of the Power-Frequency-Correlation in the Continental European Power Grid and Investigations of Frequency Behavior

In this thesis, a model of the summary power-frequency-correlation of the continental European power grid is developed. Afterwards the model is used to investigate the influence of different characteristics of activation of automatic Frequency Restoration

Reserves (aFRR) on frequency behavior. As input data, the model uses time series of the area control error of various European transmission system operators. Based on historic time series, an arithmetical approach and statistical methods, the identification of model parameters is carried out. The model enables the qualitative assessment of the characteristics regarding frequency quality. Thus, an increase in the full activation time of the aFRR shows negative effects of the frequency quality.

Gädke, Patrick

Aggregation von Flexibilitätsbereichen in MS/HS-Netzen mit linearer Optimierung

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Aggregation aller Flexibilitäten in einem Verteilnetz über mehrere Spannungsebenen entwickelt. Mit Hilfe einer linearen Optimierung wird die maximal verfügbare Flexibilität unter Berücksichtigung der netzbedingten Restriktionen für den Leistungsfluss erreicht. Anschließend wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem der Flexibilitätsbereich eines Netzes als Flexibilität eines übergeordneten Netzes betrachtet werden kann. Auf diesem Weg können die Flexibilitäten von Stromnetzen unabhängig voneinander betrachtet werden, was sich positiv auf Konvergenzverhalten und Rechengeschwindigkeit auswirkt. Abschließend werden die Abweichungen der Flexibilitätsbereiche zwischen schrittweiser und nicht schrittweiser Berechnung des Flexibilitätsbereiches dargestellt.

Aggregation of Flexibility Areas in HV/MV Grids using Linear Optimization

This thesis shows a method to aggregate the active and reactive power flexibilities in a distribution power grid. A linear optimization algorithm finds the maximal flexibilities in all directions on the PQ-plane, while considering grid restrictions. Additionally, procedures to calculate the flexibility range of power grids that span over multiple voltage layers are researched. A method to calculate multiple grid levels independently is provided. This improves the optimization convergence and processing time. Finally, the difference between calculating different grids independently and at the same time is shown.

Haag, Marvin

Entwicklung und Verifizierung eines Verfahrens zur Prognose des Blindleistungshaushaltes im Rahmen des Betriebsplanungsprozesses

Development and Verification of a Process for Predicting the Reactive Power Budget within the Framework of the Operational Planning Process

Hach, Felix

Implementierung eines probabilistischen Spannungsqualitätsprofilgenerators einer Elektroladesäule

In dieser Arbeit wurde ein Spannungsqualitätsprofilgenerator erstellt, mit dem auf Basis von historischen Daten der Einfluss einer Elektroladesäule auf die Spannungsqualität probabilistisch abgeschätzt werden kann. Für die Erstellung der Profile wurden Markov-Ketten verwendet. Mit den erstellten Profilen können die

auftretenden Werte der Größen, für die die Profile erstellt wurden, sehr gut abgeschätzt werden. Um die Rechenzeit zu minimieren, können die zu einem Zeitpunkt maximal auftretenden harmonischen Ströme durch eine Kombination von für die Anzahl gleichzeitig ladender Elektrofahrzeuge erstellten Profilen und den harmonischen Messdaten abgeschätzt werden. Für die harmonische Spannung ist das Abschätzen der maximalen Werte mit dieser Methode nicht möglich, da der Einfluss der Netzimpedanz auf die harmonischen Spannungen größer ist als der Einfluss der angeschlossenen Elektrofahrzeuge. Um die maximalen harmonischen Spannungen abschätzen zu können, müssen für jede harmonische Spannung Profile erstellt werden. Die Wahrscheinlichkeit für die durch die Ladesäule verursachten Transienten kann ebenfalls anhand der für die Anzahl gleichzeitig ladender Elektrofahrzeuge erstellten Profile abgeschätzt werden.

Implementation of a Stochastic Power Quality Load Profile Generator for an Electrical Vehicle Charging Station

In this work a stochastic power quality load profile generator was implemented. To predict different variables, historical measurement data is used to create profiles of the chosen variable. The harmonic currents and voltages emitted by the charging station can be predicted with the generated profiles. To avoid excessive calculation time, the maximum harmonic currents can be estimated on the basis of the profiles created for the number of simultaneously charging electric vehicles. These profiles are also utilized for the estimation of the probability of occurrence of transients.

Haun, Christian

Optimierung der Speicherdimensionierung zur Netzentlastung

Optimized Dimensioning of Storage Systems to Reduce Grid Overload

Haug, Manuel

Aufbau und Modellierung eines induktiven KFZ-Ladesystems zur Analyse von EMV-Eigenschaften

Die Arbeit befasst sich mit induktiven Ladesystemen für elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge unter dem Aspekt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Die leistungsführenden Komponenten des Ladesystems weisen Streugrößen auf, die zur Ausbreitung von unerwünschten Störströmen beitragen. Dabei wird vor allem die Einkopplung von Gleichtakt- und Gegentaktstörgrößen auf die elektronischen Komponenten der Fahrzeugseite während des Ladevorgangs betrachtet. Im Rahmen dieser Arbeit werden messtechnische und simulative Grundlagen geschaffen, um die möglichen Streugrößen der energieübertragenden Schnittstelle des Ladesystems zu charakterisieren und die damit auftretenden Störgrößen abzuschätzen.

Development and Modeling of an Inductive Charging System for the Analysis of EMC-Properties

This master thesis determines inductive charging systems for electrically powered vehicles considering its electromagnetic compatibility (EMC). The high-power components of an inductive charging system provide parasitic stray capacitances,

which contribute to the propagation of disturbances. In particular the coupling of common-mode and differential-mode disturbances to the vehicle's electronic components is considered. Basic measurement and simulation techniques are used to distinguish potential stray capacitances of the power transmission interface and to estimate occurrent disturbance currents.

Heider, Anya

Optimierung der Regelparameter dezentraler Energieanlagen mittels künstlicher Intelligenz

Die vorliegende Arbeit dient der Optimierung der Regelparameter dezentraler Erzeuger in Mikronetzen. Zu diesem Zweck werden verschiedene evolutionäre Algorithmen implementiert, die die Eingangswerte und Platzierung der entsprechenden Elemente in Simulink-Modellen verbessern. Die Programmierung ist dabei möglichst generisch gestaltet, sodass unterschiedliche Modelle nach vorher festgelegten Gesichtspunkten optimiert werden können. Die implementierten Algorithmen werden anhand dreier Benchmark-Funktionen verbessert und getestet, da die Simulationen der Modelle rechen- und zeitintensiv sind. Es zeigt sich, dass der Insel Genetische Algorithmus, bei dem die Optimierung in mehreren Teilpopulationen mit regelmäßigem Austausch des besten Individuums stattfindet, die zuverlässigste Konvergenz ins globale Optimum herbeiführt.

Control Optimization of Distributed Energy Resources using Artificial Intelligence

This thesis introduces different evolutionary algorithms for the improvement of control parameters of distributed energy resources in microgrids. The implementation allows the optimization of parameters and the placement of microgrid elements in various Simulink power system models. The implemented algorithms are tested and tuned using three benchmark functions as the evaluation of the models comes at a high computational cost. The island genetic algorithm proves to be the most reliable optimization method. It conducts the evolutionary strategies on islanded subpopulations which exchange their best individuals on a regular basis.

Hu, Xiaoqi

Spannungshaltung durch Flexibilisierung der Blindleistung auf Basis Linearer Optimierung in Verteilnetzen

Diese Masterarbeit behandelt ein Optimierungsmodell auf Basis der linearen Programmierung im Bereich Flexibilität der Blindleistung der dezentralen Lasten und Erzeugungsanlagen, um die Spannungshaltung im Verteilnetz zu realisieren.

Die wachsende Anzahl der erneuerbaren-Energie-Anlagen führt zu der fortschreitenden Energiewende in Deutschland, und stellt den Netzbetreibern vor vielseitige Herausforderungen. Demgegenüber stehen viele Lösungsansätze und Betriebskonzepte um eine hohe Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Alternative zum konventionellen Netzausbau werden die modernen Netztechniken zunehmend wichtiger, insbesondere lohnt sich Smart-Grid-Technologie langfristig. Die Flexibilität der einzelnen Anlagen im Verteilnetz dient zukünftig der Systemdienstleistung. Die

optimale Nutzung der Flexibilität der Blindleistung kann einen Beitrag zu Spannungshaltung im Verteilnetz leisten.

Voltage Control with Use of Flexible Reactive Power through Linearized Optimization in Distribution Grids

This master thesis deals with an optimization model based on linear programming in the field of the reactive power's flexibility of the distributed loads and generators, to realize the voltage stability in distribution grid. The growing number of the renewable energy plants results in the progressing energy revolution in Germany and now the grid operator face diverse challenges. On the other hand, there are many solutions and operating concept are given to guarantee a greater supply reliability. The modern grid technology as an alternative to the conventional grid expansion is becoming increasingly important, particularly worth the smart grid technology over the long term. The flexibility of the individual plant in distribution grid will serve as the system service in the future. And the optimal utilization of the reactive power's flexibility can contribute to a better voltage stability in distribution grid.

Hühn, Nina

Modellbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse des Speichereinsatzes zur Netz-entlastung

Diese, in Kooperation mit der Firma OMICRON electronics GmbH durchgeführte Forschungsarbeit, untersucht die Möglichkeit der simulationsbasierten Schutzprüfung eines Differentialschutzrelais. Differentialschutzrelais werden eingesetzt um die Sicherheit von Transformatoren und im speziellen von Phasenschiebertransformatoren zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wird ein Modell eines Phasenschiebertransformators entwickelt und anhand dessen, die Funktion zweier Differentialschutzrelais getestet. Die Implementierung in die OMICRON Software RelaySimTest ermöglicht die experimentelle Verifizierung des Modells.

Economic analysis of Battery operation in order to reduce the load on power grid

This research, carried out in cooperation with the company OMICRON electronics GmbH, examines the possibility of the simulation-based protection testing of a differential relay. Differential relays are used to ensure the safety of transformers and, in particular, phase shifter transformers. For this purpose, a model of a phase shifter transformer is developed and the function of two differential relays is tested. The implementation in the OMICRON software RelaySimTest allows the experimental verification of the model

Hümmler, Bruno

Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator

In dieser Arbeit wird das Standard-Modell einer Windkraftanlage in Matlab/Simulink mit doppelt gespeister Asynchronmaschine für Stabilitätsuntersuchungen normgerecht vereinfacht. Dazu wird die Leistungseinspeisung anstatt über eine separate Modellierung von Generator und Wechselrichtern durch eine den gesamten Anlagen-

strom ausgebende Stromquelle realisiert. Die Arbeit beschreibt die dazu notwendigen Änderungen an Modell und Anlagenregelung. Mithilfe von Simulationen wird das entstandene vereinfachte Anlagenmodell verifiziert. Außerdem wird der Einfluss der getroffenen Vereinfachungen auf das Anlagenverhalten analysiert und bewertet. Zusätzlich wird für die Windkraftanlage eine Frequenzregelung umgesetzt, um netzstützend auf Lastsprünge reagieren zu können. Der Einfluss dieser Regelung auf die Netzfrequenz wird ebenfalls simulativ untersucht und beurteilt.

Modeling and Control of Wind Power Plants with Doubly-Fed Induction Generator

This thesis simplifies the existing model of a wind power plant with a double-fed induction generator in compliance with international standards for stability analysis. To this end, the models of the generator and the power converters are merged into a single current source. The thesis describes the necessary modifications to model and control. Simulations verify the developed model and quantify the impact of the simplifications on the power plant behavior. In addition, a frequency control is implemented in order to support the grid during load fluctuations. The impact of that control on the grid frequency is examined and evaluated.

Jaksch, Mathias

Charakterisierung von Transistorkennlinien und Erstellung eines MOSFET-Modells mit Hilfe einer Doppelpulsmessung und eines Parameterfits

FEM-Schaltungssimulationen sind bei der Entwicklung von elektrischen Komponenten ein hilfreiches Werkzeug. Die Modellierung von aktiven Bauteilen wie MOSFETs stellt dabei eine große Herausforderung dar, da viele Größen nicht direkt an den Anschlüssen des Bauteils messbar sind. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Methode zur Erstellung von MOSFET-Modellen mit Hilfe einer Doppelpulsmessung und eines Parameterfits. Dazu soll eine Platine zur Doppelpulsmessung aufgebaut und in einer FEM-Umgebung simuliert werden. Unter Zuhilfenahme von Daten aus Messungen und Simulationen sollen Algorithmen entwickelt werden, welche relevante Parameter für die Verwendung in einem ersatzschaltbildbasierten Modell eines MOSFETs berechnen.

Characterization of Transistor Curves and Creation of a MOSFET Model using Measurements from a Double Pulse Test and Curve Fitting Tools

FEM-based circuit simulations are a helpful tool in the development of electrical components. The modeling of active components like MOSFETs is challenging since many parameters cannot be measured directly from the terminals of the device. This thesis is concerned with the characterization of transistor curves and the creation of MOSFET models using measurements from a double pulse test and curve fitting tools. To accomplish this thesis, a double pulse test bench will build up and simulated in an FEM environment. Algorithms, which calculate the relevant parameters, will be developed and a MOSFET model using these parameters will build up.

John, Christoph

Dezentrale Regelung von Wechselrichtern in Mikronetzen

In dieser Arbeit werden verschiedene Regelungen auf Basis der Droop-Regelung für Niederspannungswechselrichter getestet. Mit diesen Wechselrichtern soll ein Mikronetz betrieben werden. Außer den Wechselrichtern sind keine weiteren Einspeiser im Netz vorhanden. Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der Blindleistungsverteilung zwischen parallelen Wechselrichtern sowie dem dynamischen Verhalten bei Lastsprüngen. Der Anspruch an die Regelungen ist dabei, dass keine aktive Kommunikation innerhalb des Mikronetzes erforderlich ist. Deshalb stellt die Basis der untersuchten Regelungen die Droop-Regelung dar. Diese Regelung soll mit adaptiven virtuellen Impedanzen und adaptiven Ergänzungen der Droop-Gleichungen erweitert werden.

Distributed Control of Inverters in Microgrids

This thesis deals with the optimization of droop-controllers for inverters in microgrids. Various wireless control strategies are compared. The conventional droop-controller causes unequal power sharing for the reactive power between parallel converters. Therefore, the proposed controllers in this work improve the reactive power distribution and feature enhanced dynamic stability during load fluctuations. The conventional droop-controller is modified using adaptive virtual impedance or adaptive droop parameters. Finally, a short overview for the results of this study is given.

Kaiser, Nils

Validierung synthetischer Lastprofile mittels Lastflussrechnungen im Mittel- und Niederspannungsnetz

In der vorliegenden Masterarbeit wird die Genauigkeit von synthetisch erstellten Lastprofilen für Verbrauchern im Verteilnetz analysiert. Die verwendeten synthetischen Modellierungsverfahren sind die Methode der Markov-Ketten und die der linearen Regression. Die Jahresprofile für Haushalte und Landwirtschaftsbetriebe werden einem Mittel- und einem Niederspannungsnetz zugeordnet. Es werden daraufhin linearisierte Lastflussrechnungen durchgeführt. Die synthetischen Lastflussergebnisse in Gestalt von Spannungen und Leitungsauslastungen werden analysiert und mit den Ergebnissen unter Verwendung realer Lastprofile zweier Modellregionen verglichen. Im Vergleich zu den zur synthetischen Modellierung verwendeten realen Lastprofilen bilden die synthetischen Profile die realen Lastflussergebnisse lediglich im Mittelspannungsnetz gut nach. Die Analyse der nicht zur Modellierung verwendeten Netzregion sollte in der weiteren Forschung mit einer größeren Anzahl an Messdaten wiederholt werden.

Validation of Synthetic Load Profiles with Load Flow Calculations in a Medium and Low Voltage Grid

In the present master thesis, the accuracy of synthetic built load profiles for consumers in distribution grids is analyzed. The used synthetic modeling processes are the method of Markov chains and the method of linear regression. The yearly profiles for households and for agricultural consumers are assigned to a medium and low voltage grid. Furthermore, linearized load flow calculations are executed. The

synthetic results in the shape of voltage values and line loadings are analyzed comparing them to results using real load profiles of two model regions. If compared to the real load profiles used for the synthetic modelling process, the synthetic profiles well reproduce the real load flow results only in the medium voltage grid. The investigation for the second grid region not used for the modelling process should be repeated by using a higher number of measurements for further research

Kessler, Daniel

Machine-Learning-Konzept zur Klassifizierung von Power Quality Störfällen

Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines Algorithmus zur Klassifikation von Power Quality Störfällen in der Energieversorgung. Sowohl hochaufgelöste Daten wie auch RMS-Daten werden verwendet. Hochaufgelöste Daten ermöglichen die Darstellung der reinen Spannungskurve. RMS-Daten werden durch die abschnittsweise Berechnung des Effektivwertes von hochaufgelösten Daten erzeugt. Diese Daten werden mit den Algorithmen für die diskrete Wavelet-Transformation und die diskrete Kurzzeit-Fourier-Transformation vorverarbeitet. Daraus extrahierte statistische Features bilden die Grundlage für das Training eines Neuronalen Netzes. Dieses Netz klassifiziert in Echtzeit Daten verschiedener Messstellen und Phasen. Das System ist in der Lage, zwischen 14 unterschiedlichen Störfällen aus der Norm IEEE Std 1159 zu unterscheiden.

Machine Learning Concept for Classification of Power Quality Events

This thesis proposes the creation of an algorithm for the classification of power quality events in the power supply. This thesis uses both high-resolution and RMS data. The high-resolution data enables the representation of the pure voltage curve. RMS data is generated by sectionally calculation the RMS value of high-resolution data. These data are pre-processed using the discrete wavelet transform and discrete short-time Fourier transform algorithms. Extracted statistical features form the basis for the training of a neural network. This network classifies data from different measuring points and phases in real time. The system can differentiate between 14 different events from the IEEE Std 1159 standard.

Khalili, Maryam Aniya

Laboratory Simulation of Cosmic Dust Impact Detection by Cassini Spacecraft

Kidane, Natnael Marvin

Clustering von Spannungsqualitätsproblemen

Diese Thesis befasst sich mit neuen Ansätzen für eine effizientere Überwachung der Versorgungsqualität (engl. Power Quality PQ). Es wurde ein System entwickelt, welches in der Lage ist die großen Mengen an Daten zu verarbeiten, welche gebraucht werden um qualifizierte Aussagen über das Verhalten von Verbrauchern in einem Netz, wie es zum Beispiel Ladesäulen für Elektrofahrzeuge darstellt, treffen zu können. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines ersten generellen Ansatzes

für die Verarbeitung und Vereinfachung von Power Quality Messdaten, sowie deren fortlaufende Verbesserung.

Clustering of Power Quality Disturbances

This thesis deals with new approaches on Power Quality Monitoring (PQ). Therefore, a system was developed to handle the great amount of data, needed to make qualified statements about the behaviour of consumers in a network of extraction points e.g. charging poles for electric vehicles. The aim of this work is to provide a first general approach on simplifying and handling power quality measurement data, in order to build a continuous optimization.

Köhler, Nico

Implementierung und Analyse von Modellen zur Berechnung der Strombelastbarkeit von Freileitungen

Die vorliegende Arbeit präsentiert die Auswirkungen eines zeitreihenbasierten Freileitungsmonitorings unter Einbezug von Wetterdaten anhand eines Netzmodells. Es sollen Übertragungskapazitäten durch Wettergegebenheiten erhöht werden, um den Netzausbau zu reduzieren. Hierfür wurden die Modelle zur Bestimmung der Strombelastbarkeit nach CIGRE und IEEE analysiert und aufgebaut. Damit ist die Berechnung der Strombelastbarkeit sowohl im statischen als auch im quasidynamischen Fall möglich. Die daraus erhaltenen Daten wurden anschließend an einem realen Netzmodell angewendet. Der Einbezug von wetterabhängigen Strombelastbarkeiten aus den Modellen führt zur Reduzierung der überlasteten Leitungen im Netzmodell. Damit zeigt diese Arbeit den Nutzen und das Potential eines zeitreihen- und wetterbasierten Freileitungsmonitorings.

Implementation and Analysis of Models for Determination of Current Rating of Overhead Lines

This paper presents the effect of a time-based monitoring of overhead lines with use of weather data based on a network model. It is intended to increase transmission capacities due to weather conditions to reduce grid construction. Therefore, the CIGRE and IEEE models for determining the current rating were analyzed and implemented. This enables the calculation of the current rating in a static and quasidynamic environment. Afterwards, the data obtained were applied to a real network model. Considering the weather depending current ratings from the models leads to a reduction of the overloading lines at the grid. Consequently, this work shows the potential of a time- and weather-based monitoring.

Kotzel, Lena

Entwicklung und Aufbau eines hybriden EMV-Filters

Aktuelle Trends im Hochvoltbordnetz von elektrischen Fahrzeugen führen zu neuen Herausforderungen hinsichtlich der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten. Die Arbeit befasst sich daher mit der Entwicklung und dem Aufbau eines hybriden EMV-Filters zur Reduzierung der Gleichtaktströme im Hochvoltsystem. Nach einer Vorauswahl von Kompensationsmethoden

und der Definition von Strukturen des passiven Filterteils wird zusätzlich eine aktive Komponente integriert. Anhand von Simulationen wird die Filterdämpfung prognostiziert und bewertet. Um die Simulationsergebnisse zu validieren und die Funktionsfähigkeit des Filters sicherzustellen, wird ein Hardwareaufbau realisiert. Mit dem Filter werden Vergleichsmessungen an einem Testaufbau eines Hochvolttraktionssystems angestellt.

Development and Assembly of a hybrid EMI-Filter

Current trends in the high-voltage cable harness in electrical vehicle are leading to new challenges regarding the electromagnetic compatibility (EMC) of different components. This master thesis therefore targets the development and construction of a hybrid EMC filter for the reduction of common-mode disturbances in automotive high-voltage systems. After a pre-selection of compensation methods and the definition of structures of the passive filter part, an additional active component is integrated. The filter attenuation is predicted and evaluated on the basis of simulations. In order to validate the simulation results and ensure the functionality of the filter, a hardware structure is implemented. The filter is used to perform comparative measurements on a test setup of a high-voltage traction system.

Kramer, Matthias

Messung und Simulation von transienten Entladungsvorgängen in gasisolierten Schaltanlagen

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 kapazitiv auf die elektronischen Schutz- und Steuergeräte einwirken. Die Wahrscheinlichkeit für eine unzulässige Beeinflussung steigt mit der Amplitude und der Spannungsänderungsrate auf der Primärseite. Ziel dieser Arbeit ist es, die transienten Ausgleichsvorgänge mit Blick auf die auftretenden Amplituden und Anstiegszeiten zu untersuchen. Hierfür werden Messungen an einer realen Schaltanlage in verschiedenen Schaltkonstellationen durchgeführt. Anschließend wurde ein Simulationsmodell erstellt und anhand der Messdaten verifiziert. Anhand des Modells wurden Parameterstudien durchgeführt, um ein Worstcase-Szenario für Spannungsänderungsrate und Amplitude zu ermitteln.

Measurement and Simulation of Transient Discharge Processes in Gas-Insulated Switchgear

For the electromagnetic immunity in switchgear, circuit breakers and disconnectors are the most important sources of disturbances. These generate transient pre-ignition and restrike 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. The aim of this work is to investigate the transient compensation processes with regard to the occurring amplitudes and rise times. For this purpose, measurements are made on a real switchgear in different switching constellations. Subsequently, a simulation model was created and verified based on the measured data. Based on the model,

parameter studies were performed to determine a worst-case scenario of voltage change rate and amplitude.

Lenz, Andreas

Ergebnisoptimierung und Benchmarking eines Machine-Learning-Prognose-Tools von Power-Quality-Kenngrößen in modernen Industrieumgebungen

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden drei Machine-Learning-Prognoseverfahren zur Vorhersage von Strom- und Spannungsverläufen im industriellen Umfeld getestet. Dabei werden, abgesehen von den Originaldaten, drei unterschiedliche Feature-Sets zur Prognose eingesetzt. Außerdem werden bis zu drei unterschiedliche Mehrschritt-Vorhersagetechniken eingesetzt und verglichen. Zum Einsatz kommen die k-Nächste Nachbarn Regression (kNNR), die Support Vector Regression (SVR) sowie die Random Forest Regression (RFR). Als Mehrschritt-Vorhersagetechnik kommen die direkte, die rekursive sowie die multi-output-Vorhersagetechnik zum Einsatz. In Bezug auf den Prognosefehler und die Zeitdauern liefert bei der SVR und kNNR die direkte Mehrschritt-Vorhersagetechnik das beste Ergebnis. Ausschließlich bei der RFR kann die rekursive Vorhersagetechnik den geringsten Fehler und die multi-output-Vorhersagetechnik die geringsten Zeitdauern erreichen.

Benchmarking and Result Optimization of a Machine-Learning Tool for forecasting Power Quality in modern industrial Environments

In this master thesis three Machine-Learning methods to forecast current and voltage in an industrial environment are applied. Therefore, apart from the original dataset three different feature-sets are used as input data. Moreover, three different multistep forecasting methods are compared. The three methods are k-Nearest Neighbors Regression (kNNR), Support Vector Regression (SVR) and Random Forest Regression (RFR). As multistep forecasting methods, the direct, the recursive and the multi-output method are applied. Regarding accuracy and the training / testing duration, the direct multistep forecasting method was most suitable for SVR and kNNR. For RFR, the recursive method led to the least error, while the multi-output led to a minimization of training and testing time.

Leppert, Julian

Entwicklung einer Bewertungsmethodik für einen effizienten automatisierten Netzausbau unter Einhaltung der (n-1)-Sicherheit

Die Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Methodik, die einen effizienten automatisierten Netzausbau bewertet. Diese Bewertungsmethodik ordnet, mithilfe der Ergebnisse der Ausfallanalyse, jeder Leitung im Netz eine Ausbaupriorität zu. Das erstellte Skript besteht aus einer Ausfallanalyse, die mittels AC Distribution Factors und AC Line Outage Distribution Factors realisiert ist, der Bewertungsmethodik und einem Expansionsteil, welcher anhand der Ausbauprioritäten entsprechend einer festgelegten Ausbaureihenfolge das Netz erweitert. Diese Programmblöcke werden wiederholt, bis ein (n-1)-sicherer Zustand erreicht ist. Es wurden mehrere Bewertungsmethodiken, die verschiedene Parameter

zur Ergebnisfindung verwenden, entwickelt und anhand der Effizienz der daraus folgenden Ausbaureihenfolgen bewertet.

Development of a Rating Methodology for efficient automated Network Expansion in Compliance with (n-1)-Security

The thesis develops a methodology that evaluates an efficient automated network expansion. This rating methodology assigns an expansion priority to each line in the network, using the results of the contingency analysis. The script consists of a contingency analysis by means of AC distribution factors and AC line outage distribution factors, the rating methodology and an expansion part which expands the network according to the expansion priorities based on a defined order of network expansion. These code blocks are repeated until a (n-1)-secure state is reached. Several rating methodologies using different parameters for gaining the expansion priorities were developed and evaluated based on the efficiency of the resulting expansion sequences.

Martens, Jannik

Entwicklung einer dreiphasigen Lastflussberechnung und deren Komponentenmodelle

Im Rahmen dieser Arbeit werden die dreiphasige Lastflussberechnung und die Komponentenmodelle von Betriebsmitteln thematisiert. Die Umsetzung der Berechnungen erfolgt in Python. Zunächst werden die Grundlagen zur dreiphasigen Lastflussberechnung und die Modellierung der Netzbetriebsmittel beschrieben. Anschließend wird der Aufbau und die Funktionsweise der in Python entwickelten dreiphasigen Lastflussberechnung vorgestellt. Anhand verschiedener realer Netzmodelle folgt schließlich die Validierung des umgesetzten Lastflussalgorithmus.

Development of a three-phase Load Flow Calculation and Component Models

This master thesis deals with the three-phase load flow calculation and the component models of network operating resources. These calculations are implemented in Python. At the beginning, the principles of the three-phase load flow calculation and the modelling of the network components are described. Subsequently the structure and the functionality of the three-phase load flow calculation are presented. On the basis of real network models, the validation of the implemented load flow algorithm finally follows.

Mashayekhi, Elaheh

Optimierung der Versorgungszuverlässigkeit im MS-Netz

Optimizing the Supply Reliability in MV Power Grid

Meyer, Wendelin

Modellbasierter Regelansatz für eine Erdschlusslöschspule mit virtuellem Luftspalt

Model-Based Controller Design for an Arc Suppression Coil with Virtual Air Gap

Neufeld, Alexander

Untersuchung des transienten Einschaltverhaltens bei asymmetrischer Zuschaltung dreiphasiger Transformatoren

Mit dem entwickelten Transformatormodell können asymmetrische Einschaltvorgänge in Bezug auf eine auftretende Überspannung untersucht werden. Dabei wird auch die Behandlung des Sternpunkts berücksichtigt. Der aufgrund der Motivation nachgebildete Vorfall kann im Zeitbereich nachgestellt und die Rahmenbedingungen für einen derartigen Überschlag ermittelt werden. Für den hier nicht geerdeten Transformator stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, um die nachgebildete Überspannung zu vermeiden, die im Einzelnen untersucht werden. Hierzu werden der Sternpunkt, Eigenschaften des Kernblechs und die Einschaltzeit herangezogen.

Investigation of Transients during asymmetrical Energizing of Three-Phase Transformers

The developed transformer model can be used to examine and intuitively point out serious and harmless switch-on processes with regard to an overvoltage, for grounded and ungrounded transformer star points. Because of the motivation the incident was modeled postponed and it was possible to determine the conditions for such a rollover. For the transformer that is not grounded here, various options are available to avoid the simulated overvoltage, which is examined in detail. For this the star point, properties of the core sheet and the switch-on time are used.

Ni, Huasong

Automatisierte Ermittlung von Jiles Atherton-Parametern

Das Jiles Atherton-Hysteresemodell ist ein mathematisches Modell, welches die Eigenschaften eines ferromagnetischen Materials beschreiben kann. In dieser Arbeit werden sowohl das klassische JA-Modell mit der magnetischen Feldstärke H als unabhängige Variable und das modifizierte JA-Modell mit der magnetischen Flussdichte B als unabhängige Variable benutzt. Der neue Algorithmus kann die nichtlinearen Probleme der Identifikation von JA-Parametern effizient lösen. Außerdem wird der Algorithmus weiter modifiziert, um noch höhere Effizienz und Genauigkeit zu erreichen. Mit diesem Algorithmus werden die Parameter in JA-Modell automatisiert berechnet, und die simulierte Kurve ist mit der gemessenen Hystereseschleife sehr gut angepasst.

Automated Identification of Jiles Atherton Parameters

The Jiles Atherton hysteresis model is a mathematical model which describes the properties of the ferromagnetic material. In this thesis, the classical JA-Model with H as the independent variable and the modified JA-Modell with B as the independent variable are introduced. Then the procedure of calculating the differential equation by Runge-Kutta method is presented. The new algorithm is efficient in solving the non-linear problems of identifying parameters. In addition, the algorithm is further modified to achieve even higher efficiency and accuracy. With this algorithm, the parameters in JA-Model can be automatically calculated, and the simulated curve is very well matched to the measured hysteresis loop.

Orozco, Camilo

Stochastische Optimierung der Energiekosten von Mikronetzen

Das Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung von Modellen zur Lösung von Optimierungsproblemen, die für die Planung und den Betrieb dezentraler Energieressourcen relevant sind, einschließlich dezentralisierte Energieerzeugungs- und Speichersysteme unter Unsicherheitsbedingungen.

Die Arbeit zielt auf die Identifizierung optimaler Strategien für das Management und den Betrieb des Stromnetzes, um die Energiekosten unter kurzfristigen Unsicherheiten zu minimieren, ab. Für das Optimierungsproblem wurden stochastische Programmiermethoden verwendet, um die Eigenschaft des Lastverbrauchs und der Produktion aus erneuerbaren Energiequellen zu berücksichtigen. Dieses Konzept wurde durch die Implementierung eines Modells in der AIMMS-Umgebung für die Analyse und Optimierung der Planung und des Betriebs eines Microgrids mit Photovoltaik-Arrays und Speichersystemen getestet.

Stochastic Optimization of Energy Cost in Microgrids

The topic of the Thesis is the development of models for the solution of optimization problems relevant to the planning and operation of distributed energy resources, including embedded generation and storage systems under uncertainties conditions.

The work is aimed at the Identification of optimal strategies of management and operation of the facility grid to minimize the energy cost incorporating the influence of short-term uncertainty. For the optimization problem were taken into account stochastic programming methods in order to meet the characteristic of load consumption and the production from renewable resources. The concept was tested through the implementation of a model in AIMMS environment for the analysis and optimization of the planning and operation of a Microgrid equipped with photovoltaic arrays, and storage systems.

Ren, Zewen

Implementierung einer automatisierten harmonischen Lastflussberechnung

In dieser Masterarbeit wird ein Algorithmus entwickelt, welcher die harmonische Lastflussberechnung ermöglicht. Dazu wird ein Programm in Python implementiert. Die Informationen der harmonischen Emissionen sollen durch das entwickelte Programm ausgegeben werden. Ein besonderer Fokus der Arbeit liegt auf dem Aufbau der harmonischen Modelle der Netzkomponenten. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen harmonischen Modellen werden diskutiert und deren Einflüsse auf das gesamte Netz werden ebenfalls untersucht. Um die Richtigkeit und die Genauigkeit des Programms zu prüfen, werden die Ergebnisse mit der Software „PowerFactory“ verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz der Kompensation zur Resonanz im Stromnetz führen kann. Die harmonischen Knotenspannungen hängen stark mit den harmonischen Impedanzen ab. Und es gibt ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem erzeugten harmonischen Strom der PV-Anlage und deren Leistung.

Implementation of an Automated Harmonic Load Flow Algorithm

This master thesis presents an algorithm to solve the harmonic load flow calculation problem. For this purpose, a program in Python is implemented. The information of the harmonic emissions should be the output of the developed program. A particular focus of the work is the development of the harmonic model of network components. The differences between the harmonic models are discussed and their influences on the grid are also examined. In order to check the correctness and the accuracy of the program, the results are compared with the results of the software "PowerFactory". The results show that the use of compensation can lead to resonance in the grid. The harmonic node voltages strongly depend on the harmonic impedances. And there is a non-linear relationship between the harmonic currents from the PV system and their power.

Schabel, Jan

Untersuchung von Methoden zur Störfestigkeitsprüfung von Schutzgeräten mit passiven Kleinsignalwandlern

In Schaltanlagen für Mittelspannung werden zu Schutz- und Messzwecken die Primärgrößen Strom und Spannung kontinuierlich überwacht. Als Schnittstelle zwischen den elektronischen Schutzgeräten und den Mittelspannungskreisen werden heute immer noch vorwiegend induktive Wandler mit Eisenkernen eingesetzt. Als Alternative sind seit einiger Zeit kernlose Kleinsignalwandler, auch Sensoren genannt, verfügbar. Die geringeren Signalstärken dieser passiven Kleinsignalwandler und die hohen Eingangsimpedanzen von Sensoreingängen, stellen veränderte Anforderungen an die Störfestigkeitsprüfung der entsprechenden Schutzgeräte. In dieser Arbeit werden die am Schutzgeräteeingang auftretenden Störgrößen während Schaltvorgängen bestimmt. Dabei wurden für die Störgrößen wichtige Parameter, wie die Leitungslänge oder der Einbauort variiert. Weiter wurde die digitale Signalverarbeitung im Schutzgerät durch eine Simulation nachgestellt. Es zeigt sich, dass die Signalverarbeitung maßgeblichen Einfluss auf die Störfestigkeit hat. Aus den gewonnenen Ergebnissen wird ein Worst-Case der auftretenden Störgrößen ermittelt. Darauf folgend werden die Störgrößen mit einem experimentellen Koppelnetzwerk nachgebildet. Dadurch können im Labor die Pegel realer Schaltstörgrößen nachgestellt werden.

Investigation of Methods for the Immunity Testing of Protective Devices in Applications with low-power Instrument Transformers

In medium-voltage switchgears a continuous monitoring of the primary current and voltage is required both for protection and metering tasks. As link between the intelligent electronic device (short IED) and the medium-voltage circuitry, commonly transformers with iron cores were used. Coreless low-power transformers, also called sensors, are available for some time now. Low signal levels and high impedance inputs demand changes in immunity testing of sensor-based protection relays. In this thesis the disturbances that occur during switching operations at the IED's sensor inputs were determined. In doing so vital parameters like cable length and installation location were varied. Furthermore, the digital signal processing in the IED was simulated. Thereby the big impact of the signal processing on the immunity becomes apparent. A worst case is identified with the gained results. Afterwards the

disturbances were reproduced with an experimental coupling network. As a result, levels of real switching disturbances can be reproduced for immunity testing in the lab.

Scheit, Florian

Dynamische Reduzierung von modernen Übertragungsnetzen

Das Ziel einer Netzreduktion ist es, ein großes Netzmodell für einen spezifischen Interessenfokus einer Untersuchung zu reduzieren, ohne die statischen und dynamischen Eigenschaften des Gesamtsystems zu verlieren. Durch die kleinere Systemgröße des reduzierten Netzes ergeben sich Verbesserungen in der Handhabbarkeit des Modells. Die äquivalenten Netzstrukturen ersetzen die originalen Komponenten des externen Netzes und ermöglichen somit die Weitergabe der Netzmodelle ohne die wettbewerbs- und sicherheitskritischen Informationen des Originalsystems.

Dynamic Reduction of Modern Transmission Systems

The objective of the network reduction is to reduce large network models for a specific point of interest (POI), without losing the static and dynamic influence of the reduced network parts. The reduced system offers an improved handling and performance due to its smaller size since the equivalent structures do not include the original models of the external system. Furthermore it is possible to exchange valid network data without passing the critical information of the original models to competitors.

Schleicher, Bastian

Automatisierte Ermittlung von Flexibilitätsparametern zum netzdienlichen Einsatz mittels Genetischer Algorithmen

Diese Arbeit beschreibt die Implementierung und Auswertung eines Genetischen Algorithmus (GA) zur Optimierung des Systemzustandes in einem Ortsnetz. Ziel der Optimierung ist eine Reduktion von Spannungsabweichungen, und Verlusten im Niederspannungsnetz. Hierfür können drei unterschiedliche Flexibilitätsoptionen eingesetzt werden: Wechselrichter, Batteriespeicher und regelbare Ortsnetztransformatoren. Zunächst wird eine Hyperparameterstudie für den GA durchgeführt, bevor dieser an unterschiedlichen Netz- und Flexibilitätsszenarien getestet wird. Der implementierte GA zeichnet sich vor allem durch seine hohe Effizienz aus, da in sehr kurzer Zeit nahezu optimale Flexibilitätswerte zum Erreichen eines guten Netzzustandes gefunden werden. Dies wird mittels einer Brute-Force-Methodik validiert.

Automated Determination of Flexibility Parameters for System State Optimization using Genetic Algorithms

This work describes the implementation and evaluation of a genetic algorithm (GA) for optimizing the system state of a low-voltage network. The aim of the optimization is to reduce voltage deviations and losses in the system. Three different flexibility options can be used for this purpose: inverters, batteries and controllable local network transformers. First, a hyper parameter study is carried out for the GA before it is

then tested on different network and flexibility scenarios. The implemented GA is characterized above all by its high efficiency, since in very short time almost optimal flexibility values are found in order to achieve a good network condition. This is validated using a brute force methodology.

Schmalfeld, Kerstin

Teilentladungsmuster frei beweglicher Partikel in SF6 unter negativer Gleichspannungsbeanspruchung

Fragestellungen über den Einsatz von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) im Gleichspannungsbetrieb rücken durch den Ausbau der Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) in den Fokus der Forschung. Eine Herausforderung stellt die Kontamination mit frei beweglichen, leitfähigen Partikeln dar, die die Isolationsfestigkeit senken. Im Rahmen dieser Arbeit werden Bewegungs- und Teilentladungsvorgänge an Partikeln in einer DC-GIS untersucht. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera und einem UHF-Teilentladungsmesssystem werden charakteristische Bewegungen der Partikel und das TE-Verhalten analysiert. Da herkömmliche Auswerteverfahren wie phase resolved partial discharge (PRPD)-Pattern auf den DC-Fall nicht anwendbar sind, wird das Verfahren der Puls-Sequenz-Analyse (PSA) eingesetzt, um charakteristische Merkmale der Partikel zu visualisieren.

Partial Discharge Pattern of free moving Particles in SF6 under negative DC Stress

Due to the expansion of high-voltage direct current (HVDC) transmission, issues concerning the use of gas-insulated switchgear (GIS) in HVDC operation are moving into the focus of research. A challenge is the contamination due to free moving particles, which reduce the insulation properties. In this work, the movement of and partial discharges (PD) due to particles in HVDC-GIS are investigated. Using a high-speed camera and a UHF partial discharge measurement system, characteristic particle movements and the related PD behavior is analyzed. Since conventional evaluation methods such as phase resolved partial discharge (PRPD) patterns cannot be used in HVDC operation, the method of pulse sequence analysis (PSA) is used to visualize characteristic particle properties.

Schnaars, Julia

Ermittlung und Bewertung von Spannungszeitreihen im 110 kV-Netz bei Verwendung verschiedener Regelkonzepte

In dieser Masterarbeit werden zwei Verfahren zur Optimierung der Spannungsregelung im Rahmen der zeitreihenbasierten Netzplanung untersucht. Als Stellglieder kommen hierbei Leistungstransformatoren mit Stufenregelung und Kompensationsdrosselspulen zum Einsatz. Die untersuchten Optimierungsmethoden zielen auf eine Minimierung der Blindleistungsflüsse zwischen Verteil- und Transportnetz sowie auf eine Minimierung der Leitungsverluste ab. Dabei muss das Einhalten des Spannungsbandes zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Die resultierenden Zeitreihen für die Sollspannungen der Stufenregelung und den Schaltzustand der

Drosselspulen dienen als Eingangsdaten für die Netzplanung, um einen sicheren und wirtschaftlich günstigen Netzbetrieb zu gewährleisten. Darüber hinaus wird das Potential der spannungsabhängigen Blindleistungsregelung von dezentralen Erzeugungsanlagen abgeschätzt.

Identification and Evaluation of Voltage-Time-Series in 110 kV-Grids using different Concepts of Controlling

In this thesis, two ways of voltage control will be optimized using tap changing under load-transformers and compensation choke in the context of time series based grid planning. The inspected optimization methods focus on minimization of reactive power flows between high voltage and transmission grid and minimization of active power losses in lines. In every time step the voltage needs to be in certain voltage limits. The resulting time series of the tap changer's voltage and choke's operation state serve as input data for grid planning to ensure a safe and reasonable system operation. In addition, the potential of reactive power control of renewable energy sources will be examined shortly.

Schön, Andrea

Modellierung von Photovoltaikwechselrichtern und Evaluierung von aggregierten Modellen im Hinblick auf die Power Quality

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Simulink-Modell für dreiphasige Wechselrichter entworfen. Dieses Modell besteht aus einer Photovoltaikanlage, einer Wechselrichtervollbrücke, einem Filter, einer Last- oder Netznachbildung und einem Messgerät. Mit diesem Modell wurde der Einfluss diverser Parameter auf das harmonische Spektrum des Wechselrichters analysiert. Anschließend wurde der Zusammenschluss mehrerer Wechselrichter untersucht und geprüft, welchen Einfluss dieser aggregierte Betrieb auf das harmonische Spektrum hat. Abschließend wurde das Simulink-Modell anhand von Messungen mit einem realen Wechselrichter validiert.

Modelling of Solar Inverters and Evaluation of aggregated Models with regard to Power Quality

Within the scope of this work a three-phase photovoltaic inverter was designed in Simulink. The model contains a photovoltaic array, an inverter bride, a filter, a load or a grid model and a measuring tool. Using this model, the effect of various parameters on the harmonic spectrum was analyzed. Furthermore, an aggregated model was studied to find out if aggregating several inverters has any effect on the harmonic spectrum. Finally, the inverter model was validated with the help of several measurements using a real inverter.

Seitz, Josefine

Sensitivitätsanalyse für den Speichereinsatz zur Netzentlastung

In dieser Arbeit wird eine Sensitivitätsanalyse für die Speichernutzung zur Vermeidung von Leitungsüberlastungen im Hochspannungsnetz durchgeführt. Zunächst wurde diese für den rein netzdienlichen Betrieb der Speicher durchgeführt. Hierbei

werden die Eingangsparameter, welche die Kosten beeinflussen, identifiziert. Anschließend wird der Einfluss der sich ändernden Eingangsparameter auf die Kosten der Speichertechnologien berechnet. Im zweiten Teil der Arbeit wird durch eine Sensitivitätsanalyse der Einfluss auf die Erlöse im markt- und netzdienlichen sowie im rein marktdienlichen Betrieb untersucht. Hier werden die Eingangsparameter ermittelt, die einen Einfluss auf die Erlöse haben. Anschließend werden die Erlöse für die Speicher an den Energiemärkten unter Berücksichtigung der sich ändernden Eingangsparameter berechnet.

Sensitivity Analysis of Energy Storage Systems in order to reduce the Load on Power Grids

In this thesis, a sensitivity analysis for grid supporting storage systems is realized. The first part of this thesis draws a sensitivity analysis for grid support only. Therefore the input parameters, that have an influence on the costs of the storage systems, are identified. Subsequently, the influence of the changing input data is examined. The second part considers the influence of the input parameters on the earnings by taking part in the energy market. Therefore, the input parameters that influence the outcome on the market for the storage systems are identified. The influence of the changing input parameters on the earning is subsequently analyzed by the use of an implemented script.

Stöckmann, Felix

Entwicklung und Implementierung eines künstlichen neuronalen Netzes zur Vorhersage von Strom- und Spannungsverläufen in industriellen Netzen mit unbekannter Netztopologie

In dieser Arbeit wird die Fähigkeit eines künstlichen neuronalen Netzes zur Vorhersage von Signalverläufen in sekundengenauer Auflösung untersucht. Ziel der Arbeit ist es, eine Kurzzeitprognose von Strom- und Spannungsverläufen für einen Netzanschlusspunkt eines industriellen Netzes mit unbekannter Netztopologie zu erstellen. In einer Sensitivitätsanalyse wird das Netz anhand einer verzerrten Sinusfunktion überprüft und in einer Hyperparametervariation eine geeignete Netzstruktur gefunden. Der entwickelte Algorithmus ist in der Programmiersprache Python geschrieben und zur Verringerung der Rechenlaufzeit in ein GPU-Processing eingebunden.

Development and Implementation of an Artificial Neural Network for the Prediction of Current and Voltage in industrial Networks with unknown Topology

The present thesis investigates in the design and implementation of a neural network algorithm to predict voltage and current gradients in unknown industrial grids. The aim is to create a short-term forecast to the second. In a sensitivity analysis the network is tested with a distorted sine function and a suitable network structure is found in a hyperparameter variation. The developed algorithm is written in the programming language Python and is integrated into a GPU-processing to increase the processing speed.

Tomaschko, Maximilian

Optimierter netz- und marktbetrieblicher Speichereinsatz zur Netzausbau-reduktion

In dieser Masterarbeit wird die Wirtschaftlichkeit der Speichertechnologien Li-Ionen, Power-to-Gas und Power-to-Heat als Alternative zum Netzausbau in der baden-württembergischen Region Ostalbkreis untersucht. Hierzu werden die Speicher in Leerlaufzeiten für eine wirtschaftliche Optimierung am Spot- sowie Regelenergie-markt eingesetzt, um die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem konventionellen Netzaus-bau zu erhöhen. Der kombinierte netzdienliche und wirtschaftliche Einsatz der Spei-cher wird in Python mit dem Optimierungstool Gurobi simuliert. Anschließend werden unter Anwendung der Annuitätenmethode die jährlichen Kosten und Erlöse der Spei-cher und des Netzausbaus im Ostalbkreis verglichen. Hierbei weist nur die Techno-logie Power-to-Heat mit einer Vermarktung am Sekundärregelleistungsmarkt eine positive Bilanz auf.

Optimized Grid- and Market-Supporting Operation of Energy Storage Systems as an Alternative to Grid Expansion

This thesis analyses the profitability of Li-Ionen-Batteries, Power-to-Gas and Power-to-Heat as an alternative to grid expansion in the region Ostalbkreis. For that, the sto-rage systems are offered on the Energy-Spot-Market and the Frequency-Control-Market. This improves the cost effectiveness in idle periods. The simulations in this thesis are based on the grid-model of the region Ostalbkreis in 2014, the forecast feed-in for 2020 and the planned grid expansions in 2014 for the year 2020. The regular annual costs of the storage systems less the yearly profit from market is compared with the annual payment of grid expansion. Only Power-to-Heat in combi-nation with the frequency-control-market has a positive result.

Torralba Díaz, Laura

Optimierung der Speicherplatzierung zur Entlastung des Verteilnetzes

In dieser Masterarbeit werden drei Algorithmen für die Ermittlung der optimalen Plat-zierung und Dimensionierung von Energiespeichern in Verteilnetzen entwickelt. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in dem Zeitintervall, in dem die linearen Optimie-rungen zur Minimierung der Speicherdimensionierung erfolgen. Es wird beobachtet, dass eine weitere Optimierungsmethode zur Ermittlung der optimalen Speicher-standorte erforderlich ist, falls in einer einzelnen linearen Optimierung nicht alle kriti-schen Tage berücksichtigt werden. Diese Schwierigkeit wird durch die Durchführung einer binären Partikelschwarmoptimierung überwunden. Zur Verbesserung der Effizi-enz dieser Methode wird ihre Anfangspopulation mittels eines Fuzzy-Logik-Algorith-mus erzeugt.

Optimization of the Placement of Energy Storage Systems for Reduction of Grid Overloading

In this thesis, three algorithms have been developed to determine the optimal place-ment and sizing of the storage facilities in power system distribution networks. The main difference between them lies precisely in the time interval considered in each linear optimization. It was observed that an additional optimization method is required

to determine the optimal storage locations if all the critical days were not taken into account in a single linear optimization. This difficulty was overcome by performing a binary particle swarm optimization. In order to improve the efficiency of this method, its initial population is generated using a fuzzy logic algorithm.

Vincenz, Dominik

EMV-optimierte Ansteuerung eines sechsphasigen Antriebsumrichters

Antriebsumrichter sind Hauptverursacher für leitungs- und feldgebundene Störungen in der Elektromobilität. Eine innovative Methode zur Reduzierung der Störungen basiert auf der Erweiterung des üblichen dreiphasigen Antriebsumrichters um drei weitere Phasen, in denen genau entgegengesetzte Störungen erzeugt werden, um die ursprüngliche Störung auszulöschen. Das Konzept basiert dabei auf gleichzeitig stattfindenden Schaltflanken. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Identifizierung von Schaltverzögerungen in einem existierenden Aufbau und der Minimierung dieser. Messungen zeigen eine Verbesserung der maximalen Störauslöschung von 45 dB auf 55 dB im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 MHz. Die Zusammenhänge zwischen Schaltverzögerungen und erzeugten Störungen werden mithilfe der EMV-Tafel erklärt.

EMC optimized Control of a Six-Phase Traction Inverter

Traction inverters can be identified as the main disturbance source in electric vehicles. An innovative method to decrease the disturbance is based on a six-phase traction inverter. The function of this concept requires high-simultaneous switching edges. This thesis deals with the identification of switching delays and their minimization. Measurements show an improvement of disturbance cancellation from 45 dB to 55 dB in the frequency range from 100 kHz to 3 MHz. In addition, correlations between switching delays and generated disturbances are explained and a minimalistic simulation model is created to evaluate impacts of switching delays and asymmetries.

Wagner, Bertin

Vergleich von Methoden zur Aggregation von Flexibilitätsangeboten unter Berücksichtigung von Netzengpässen

Diese Arbeit setzt sich mit Flexibilitäten in Verteilnetzen und deren Aggregation auseinander. Um am Strommarkt teilzunehmen, können Flexibilitäten von Aggregatoren gebündelt werden. Bei ungünstiger Aggregation kann dies jedoch zu Netzüberlastungen führen, die in der Fahrplanerstellung nicht vermieden werden können. Mit dem Flex-Offer Datenmodell werden verschiedene Aggregationsmethoden untersucht. Diese umfassen N-zu-1-Aggregationsmethoden, N-zu-M-Aggregation, die eine Gruppierung nach Ähnlichkeitskriterien verwendet, sowie die Constraint-Based Aggregation, welche die Vermeidung oben genannter Überlastungssituation von Grund auf anstrebt. Das Datenmodell und die Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit in Python implementiert und stehen für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

Comparison of Flexibility-Offers Aggregation Methodologies considering Distribution Grid Constraints

This thesis deals with flexibilities in distribution grids and their different aggregation methodologies. In order to gain access to energy markets, newly emerging market players like commercial aggregators conduct the pooling of small-scale flexibilities. However, when not properly aggregated, this can lead to grid congestions which cannot be avoided in the scheduling step. Using the Flexibility-Offer data model, which captures flexibilities in dimensions of time and active power amount, this work examines different aggregation strategies. These comprise N-to-1, N-to-M, and a dedicated constraint-based aggregation. The data model and aggregation methodologies were implemented in Python, allowing further research.

Wang, Tianhua

Alterungsverhalten von Bioölen und Mineralölen unter verschiedenen Spannungsbeanspruchungen im Vergleich

In dieser Masterarbeit wird das Alterungsverhalten von Bioölen und Mineralölen unter verschiedenen Spannungsbeanspruchungen untersucht. Das Mineralöl und der natürliche Ester werden verwendet, um das Alterungsverhalten bei verschiedenen Feldinhomogenitäten unter Feuchte- und Partikeleinfluss zu finden. Alle Messungen werden mit Wechselspannung und mit Blitzstoßspannung durchgeführt. Feuchten von 25 % und 30 % des natürlichen Esters und des Mineralöls werden für die Versuche gewählt. Bei der Partikelmessung wird eine Feuchte von 30 % benutzt. Einflussfaktoren auf die Entladungsentstehung und -ausbreitung bei beiden Spannungsformen werden bestimmt.

Ageing Behaviour of natural Ester Liquid and Mineral Oil under AC and Lightning Impulse

In this master thesis the aging behavior of natural ester liquids and mineral oils under different voltage types is investigated. Mineral oil and natural ester liquid is used to investigate the aging behavior at different field inhomogeneity under the influence of moisture and particles. All measurements are carried out under AC and lightning impulse. The humidity of natural ester liquid and mineral oil is set to 25% and 30%. Particle measurement uses relative moisture of 30%. Influencing factors for the initiation and propagation of discharges are determined.

Wang, Yifu

Klassifikation von Teilentladungen anhand ihrer Data Streams

Teilentladungen sind eine der Hauptursachen für Beschädigung von Isolierstoffen. Sie führen zu einer meist drastisch reduzierten Lebensdauer von Betriebsmitteln. Deswegen ist es wichtig, Teilentladungsprüfung durchzuführen, und die Ursache des Fehlers zu ermitteln. In dieser Arbeit wurde die Literatur recherchiert und Teilentladungen im Labor gemessen. Außerdem wurden einige Machine-Learning-Verfahren anhand gemessener sowie in der Datenbank bereits vorhandener Daten durchgeführt, um einen TE-Klassifikator zu trainieren. Schließlich wurden die Ergebnisse verschiedener Verfahren ausgewertet. Neben klassischen Verfahren zur

TE-Merkmalsextraktion wurden die kompletten Data Streams, inklusive der Mehrinformation aus zeitlicher Abfolge der TE-Impulse, betrachtet. Durch die Klassifikation mittels Machine-Learning werden Typen der Teilentladungen mit Hilfe ihrer gemessenen Daten erkannt.

Classification of Partial Discharges with their Data Streams

Partial discharges are one of the main causes of defects in isolating material. Thus, it is of importance to conduct partial discharge tests to find and to classify the existing partial discharges. In this work literature was researched and PD measurements were done in the laboratory. Furthermore machine-learning methods were tested on new measurements and old datasets provided by IEH. At last, the results of different trained classifier is compared and evaluated. This thesis realizes a classification of partial discharges with the help of their data streams. Types of partial discharges will be detected by means of machine learning based classification using the measurement data.

Wen, Qin

Entwicklung eines Modells zur Simulation von Vorentladungen in Isolierölen

Isolieröle spielen eine wichtige Rolle im Bereich der Energieübertragung. Sie werden etwa in Transformatoren und Kabeln zur Isolierung und Kühlung angewandt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein elektrothermisches hydrodynamisches Modell zu entwickeln, welches die Entstehung von Vorentladungen in Transformatorenölen unter Impulsbeanspruchung erklärt. Durch die Verwendung von Software zur numerischen Simulation können Parameter für verschiedene Geometrien eingestellt und das Modell bei Rechteckspannung und Stoßspannung simuliert werden. Mineralöl und natürlicher Ester werden als Untersuchungsmaterialien verwendet. Die Durchschlagsspannung der beiden Materialien bei verschiedenen Geometrien wird gesucht. Die elektrische Feldverteilung, Raumladungsdichte beim Durchschlag und Temperaturverteilung werden als Ergebnisse bei variablem Abstand erzeugt.

Development of a Model to simulate pre-breakdown Phenomena in insulating Liquids

The aim of the present work is to develop and implement an electro-thermal hydrodynamic model to explain the development of pre-discharges in transformer oils. By using Multiphysics software the parameters for the different geometries can be set and the model is simulated at rectangular pulse voltage and surge voltage. Mineral oil and natural ester fluids are used as test material. The corresponding breakdown voltages of the two materials are searched. The desired electric field distribution, the space charge density at breakdown and the temperature distribution are generated as results at a variable distance.

Wolf, Thomas

Teilentladungsverhalten umrichter gespeister Fahrzeugmotoren

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs stellt die Automobilindustrie vor neue Herausforderungen. Das Isolationssystem im Stator des Elektromotors muss den steigenden Anforderungen durch moderne SiC-Inverter und 800 V-Traktionssysteme

standhalten. Da die Lebensdauer des Antriebssystems eine der wichtigsten Qualitätskriterien für Elektrofahrzeuge darstellt, wird zunächst der Einfluss von Inverterparametern auf die Isolationsfestigkeit des Stators untersucht. Ein Indikator für ein unzureichendes Isolationsvermögen sind Teilentladungen (TE), weshalb deren Charakteristik unter Inverterbetrieb näher beschrieben wird. Außerdem wird ein simulativer Ansatz untersucht, der mittels elektrostatischer und frequenzabhängiger Simulation am CAD-Modell eines Motors Rückschluss auf die Isolationsfestigkeit des Stators geben soll. Zuletzt sollen erste TE-Messungen unter Wechselspannung eine erste Einschätzung der Isolationsfestigkeit liefern.

Partial Discharge Behaviour in Inverter-fed Electric Vehicle Motors

The electrification of vehicles results in new challenges for the automotive industry. The insulation system of the electric motor has to withstand the increasing demands of modern SiC-inverters and 800 V traction systems. The influence of inverter parameters on the insulation strength of the stator is investigated. Partial discharges (PD) are an indicator of insufficient insulation. Thus, their characteristics in inverter fed drives are described in detail. Furthermore, an approach to determinate the insulation strength via simulation is investigated. The simulation is based on a CAD model of an electric motor. Finally, PD measurements under alternating voltage are made to provide a first estimation of the insulation strength.

Yardimci, Baran

Bewertung verschiedener Fault-Ride-Through-Strategien

In der Vergangenheit mussten sich kleinere dezentrale Erzeugungsanlagen auch bei kurzen Einbrüchen der Netzspannung unverzüglich vom Stromnetz trennen. Durch die starke Verbreitung und den gewachsenen Anteil der kumulierten Leistung dezentraler Erzeugungsanlagen kann dies die Lage im Fehlerfall verschlimmern. Durch den Fault-Ride-Through (FRT) von dezentralen Erzeugungsanlagen soll ein großflächiger Verlust durch einen Dominoeffekt von vielen kleineren Erzeugern bei Fehlern im Übertragungsnetz verhindert werden. FRT beschreibt die Fähigkeit einer dezentralen Erzeugungseinheit, auch während eines Fehlers mit dem Netz verbunden zu bleiben und netzstützende Dienstleistungen zur Verfügung zu stellen.

Evaluation of various Fault-Ride-Through Strategies

The connection of decentralized generation plants to the electrical grid is usually done by an inverter interface. Due to the strong penetration of renewable energies into the electrical grid, a complete failure of these generation plants is not possible. Therefore in some European countries, grid codes have been revised and require inverters to be capable of fault-ride-through. If such an FRT strategy is implemented in the control structure of an inverter, it has the ability to ride through grid faults based on voltage sags and remain connected to the grid. At the same time during the grid fault the utility grid needs to be supported by injecting reactive current and reacting power. In the course of this, this work deals with the evaluation and modeling of such FRT strategies. In the present work, three FRT strategies were explained. This is followed by a simulation via Simulink to observe the behavior of the FRT strategies. For this unbalanced and balanced voltage sags were simulated. A discourse and a

comparison of the simulation results follow. Finally, in the smart grid laboratory at the IEH, a test rig for the investigation of a real inverter with FRT function is used. The same grid faults as in the simulation part of this work were simulated on the real inverter via a real-time-simulator.

Abgeschlossene Bachelor- sowie Forschungsarbeiten (*) vom 1.11.2017 bis 31.10.2018:

NAME	THEMA
Alsulaimani, Suhayb (*)	Applikation für eine objektive Interpretation von FRA-Daten zur mechanischen Bewertung von Leistungstransformatoren. Application for objective Interpretation of FRA Results for mechanical Assessment of Power Transformers.
Arteaga Garcia, Pablo	Entwicklung eines Strommesssystems für einen sechsphasigen Wechselrichter. Development of a Current Sense System for a Six-Phase Inverter.
Baronat, Lars	Design und Aufbau einer 50 kV DC-Spannungsquelle. Design and Setup of a 50 kV DC Voltage-Source.
Berguiga, Sarra	Untersuchung der Ölkennzahlen verschiedener natürlicher Ester nach Langzeitsättigung mit Sauerstoff. Investigation of oil numbers of different natural ester liquids after long-time oxygen saturation.
Binswanger, Annemarie (*)	Ermittlung der Potentiale von Flexibilitätsoptionen im Stadtgebiet Augsburg. Determining the Potential of Flexibility Options in the City of Augsburg.
Binz, Carsten (*)	Implementierung einer SVM zur Analyse von PQ-Messdaten. Implementation of a SVM to analyze PQ Measurement Data.
Bouguiba, Ghaieth	Dissolved Gas Analysis (DGA) of mineral oil thermally aged with silicone rubber.
Bozhkov, Yassen Stanislavov	Programmierung einer Python-Schnittstelle zur Ansteuerung einer DC-Quelle. Programming of a Python Interface for controlling a DC Source.
Braun, Florian	Entwicklung eines Doppelpulsmessaufbaus für Leistungshalbleiter. Development of a Double-Pulse Measurement Setup for Power MOSFETs.
Fichte, Richard (*)	Digitale Kommunikation für Hardware-in-the-Loop Simulationen. Digital communication for Hardware-in-the-Loop Simulations.
Frohnmaier, Jens (*)	Aufbau und Inbetriebnahme einer Messstrecke zur optischen und elektrischen Erfassung und Untersuchung von Vorentladungen unter Verwendung eines Photonenvervielfachers. Investigation of Optical Signal Emission of Pre-breakdown Phenomena using a Photomultiplier.

NAME	THEMA
Gerber, Malte(*)	Entwicklung eines drahtlosen Transmissionsfaktormessgerätes für den UHF Bereich. Development of a wireless UHF transferfactor measurement device.
Goldmann, Rafael	Simulation und Messung von Dreischenkeltransformatoren. Simulation and Measurement of three-limb-transformers.
Hach, Felix (*)	Netzanschlussbedingungen von Erzeugungsanlagen mit erneuerbaren Energiequellen in Südafrika - Kommentierung der Anforderungen bzgl. Oberschwingungen. Grid Code Compliance of renewable power plants in South Africa - Review of the requirements concerning harmonics.
Hollunder, Valerie (*)	Untersuchung der Vorteile eines priorisierten Roll-Outs intelligenter Messsysteme in Hot Spot-Regionen der Elektromobilität. Investigation of the Advantages of a prioritized Smart Meter Roll Out in Hot Spot Regions of Electromobility.
John, Lukas (*)	Aufbau eines virtuellen Kraftwerks mit Windenergieanlagen für eine Fahrplanumsetzung. Construction of a virtual Power Plant with Wind Energy Plants for the Implementation of Generation-Timelines.
Kamgang, Nick Steve	Auslegung und Topologievergleich von aktiven Gleichtaktfiltern basierend auf Schaltungssimulationen zur Störspannungsvorhersage. Design and Topology Comparison of active Common Mode Filters based on Circuit Simulations for Disturbance Voltage Prediction.
Kautz, Marius	Energy Harvesting zur autonomen Versorgung einer Messelektronik in Kabelmuffen. Energy Harvesting for autonomous Power Supply of Measurement Equipment in Cable Joints.
Köhler, Nico (*)	Automatisierte Methode zur Validierung von Netzmodellen. Automated Method for Validating of Network Models.
Kotzel, Lena (*)	Validierung der Skalierung von Mittelspannungsnetzberechnungen. Validation of the Scaling in Medium-Voltage Grid Calculation.
Kraft, Matthias (*)	Probabilistische Lastflussberechnung für nicht-radiale Niederspannungsnetze. Probabilistic Load Flow Evaluation for Low-Voltage Mesh Grids.
Lei, Lei (*)	Entwicklung einer Schnittstelle zur Erzeugung von zeitreihenbasierten Flexibilitätsskennfeldern. Development of an Interface for the Development of Time-Series based Flexibility Ranges.
Lenz, Andreas (*)	Entwicklung und Evaluierung einer Optimierungsstrategie zum Demand-Side-Management mit loser Rückkopplung. Development and Evaluation of an Optimisation Strategy for Demand-Side-Management with Feedback.

NAME	THEMA
Li, Bowen (*)	Thermohydraulische Untersuchung eines Transformatorwicklungsmodells mittels CFD. Thermo-hydraulic Investigation of a Transformer Winding Model Using CFD.
Liu, Liangjida (*)	Investigation of thermally aged mineral oil along with silicone rubber.
Malek, Ivan	Entwicklung einer Steuereinheit für PV-Wechselrichter über MODBUS TCP/IP. Development of a Controller Unit for PV Inverters using MODBUS TCP/IP.
Nalop, Alexander (*)	Inbetriebnahme und Vorbereitung eines Messplatzes für Impulsmessungen im Bereich Hochspannung. Commissioning and preparation of a test site for impulse measurements in the high voltage domain.
Neufeld, Alexander (*)	Entwicklung von universalen Hochfrequenzgehäusen. Development of universal High Frequency Housings.
Osaki, Torahiko (*)	Modellierung einer dynamischen Last und deren Verhalten beim Versorgungswiederaufbau. Modeling of the dynamic Load for the System Restoration Studies.
Osswald, Dominik (*)	Analysemethode für Elektroladeinfrastruktur zur Strategieentwicklung auf Basis von Nutzungsdaten. Analysis Method for suitable Infrastructure of electric Mobility Strategies based on real-life Experience.
Paret, Tobias (*)	Netzanbindung von Wind- und Solarparks in Argentinien. Grid Connection of Wind Farms and Solar Parks in Argentina.
Pohl, Lukas (*)	Entwicklung eines differenziellen Tastkopfes. Development of a Differential Probe.
Radloff, Marius (*)	Optimierung und Erweiterung eines Tools zur automatisierten Generierung von Smart-Grid-Testmodellen. Optimization and Extension of a Tool for automatic Generation of Smart Grid Models.
Redl, Christoph (*)	Zeitreihenerstellung für ein Mittelspannungsnetz. Time Series Generation for a Medium Voltage Grid.
Ren, Zewen (*)	Minimierung von Netzverlusten in Verteilnetzen durch den Einsatz von Flexibilitäten. Grid losses reduction in distribution grids through the use of flexibilities.
Sauter, Johannes	Generierung von Wetterprofilen für die dynamische Berechnung von Strombelastbarkeiten. Generation of Weather Profiles for the dynamic Calculation of Current Ratings.
Schlecht, Matthias (*)	Aufbau einer geregelten Ansteuerung eines Stelltransformators mit Strom- und Spannungsmessung. Construction of a Control-Unit on a variable Transformer with Current and Voltage Measurement.

NAME	THEMA
Schleicher, Bastian (*)	Vergleich von Methoden zur Berechnung von PV-Leistung und Einfluss der Schätzfehler auf die Netzspannung. Comparison of methods to calculate PV-power und impact of estimation errors on the grid voltage.
Schuler, Marc (*)	Nachbildung der digitalen Kommunikation in Smart Grid Modellen. Modeling of the digital Communication in Smart Grid Models.
Schweizer, Francis	Regelung und Synchronisation leistungselektronischer dezentraler Anlagen in Mikronetzen. Control and Synchronization Power Electronic Distributed Resources in Microgrids.
Sendelbach, Fabian	Untersuchung des Alterungs- und Temperaturverhaltens alternativer Transformatorisoliertflüssigkeiten. Investigation of Temperature and Ageing Behavior of alternative Transformer insulating Fluids.
Singer Stefan (*)	Erweiterung eines Berechnungsprogramms zur Kurzschlussberechnung. Enhanced short-circuit calculation in accordance to G74.
Stöckmann, Felix (*)	Entwicklung eines Human-Machine-Interfaces zur Umsetzung eines Demand-Side-Management-Konzeptes mit schwacher Rückkopplung. Development of a Human Machine Interface for a Demand Side Management System with Feedback.
Voß, Benjamin	WR-Modellierung für PQ-Untersuchungen. Power Inverter Modeling for PQ Investigations.
Walz, Kathrin(*)	Auswirkungen auf das Verteilnetz bei der Netzintegration von Schnellladeinfrastruktur an Autobahnraststätten. Study of the Effects of E-Mobility Fast-Charging Infrastructure in Distribution Grids.
Wiedmann, Nicole (*)	Synchrone Verbindung der deutschen und polnischen 110 kV-Netze vor Inselnetzbildung. Analysis of Synchronous Connection of the German and Polish 110 kV Grid before Islanding.
Wolff, Felix	Aufbau und Untersuchung eines Hochsetzstellers. Development and Investigation of a Boost Converter.
Zhu, Lianglong (*)	Grafische Benutzeroberfläche für Leistungstransformatoren mittels OpenFOAM. Graphical User Interface for Power Transformer using OpenFOAM.

4. PROMOTIONEN

■ Thermal Monitoring of Power Transformers

M. Sc. Mohammad Djamali

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichterin:

Prof. Zhongdong Wang, Manchester

Tag der mündlichen Prüfung:

29.01.2018

With the integration of the renewable energy-based power plants into power systems and due to their volatile nature, the overloading of transformers is inevitable because of economical reasons. Therefore, an accurate method should be used to determine the maximum loading capability of transformers under a specified ambient temperature. Loading capability of transformers depends strongly on their thermal conditions which can be investigated by means of a dynamic thermal model. During the overloading of transformers, it should be ensured that the transformer does not experience an accelerated thermal aging and that the whole cooling capacity of the transformer is available. Therefore, every effort toward monitoring of the cooling system and determining the loading capability is worthwhile.

In this dissertation, firstly, the state-of-the-art in the thermal modeling of transformers, their applications, and factors affecting their accuracy are provided. Afterwards, a thermal model for calculation of the top-oil temperature using an online monitoring system is proposed which uses different heat transfer phenomena, namely the natural and forced convection, the thermal radiation, the heat conduction, and the natural ventilation. Using thermal-electric analogy, these phenomena are connected to each other with consideration of their mutual impacts. Two variations of the model are proposed for indoor transformers.

Due to the simple structure of the model, it can be easily implemented and integrated into online monitoring systems. The developed top-oil temperature model is implemented into a monitoring system. Among the tasks of the proposed monitoring system are online parametrization of the embedded top-oil temperature model, after acquiring a specified number of measurements; the calculation of the top-oil and hot-spot temperatures, after parametrization; monitoring of cooling system; and determining the loading capability. The proposed model and developed system are validated using the data measured during normal operation of transformers with different cooling systems and different ratings. The results of validation show that the proposed model represents a good performance to calculate the characteristic temperatures of transformers.

Due to the reliability and the accuracy of the model, it can be used for monitoring of the cooling system and determining the loading capability. It is a matter of fact that during the overloading of transformers, the temperatures of the oil and windings are

near their maximum values. The cooling systems of transformers play vital roles to transfer the heat generated in the active parts of the transformer to the surrounding ambient. In this context, the monitoring of the cooling system is a crucial task. Two algorithms are proposed for this purpose which use a top-oil temperature model as their cores. The proposed algorithms are validated using the data measured during the normal and faulty operations of two transformers with ODAF and OFAF cooling systems. The results show that both algorithms are able to detect failures in the cooling system as soon as possible even if the failures are not severe. Provided that an accurate thermal model for calculation of the hot-spot temperature as well as a reliable online algorithm for monitoring of the cooling system are available, the maximum loading capability of transformers can be determined under specified environmental conditions. In this dissertation, a method for determination of the loading capability of transformers is provided which is a reverse procedure of the calculation of the hot-spot temperature. This procedure is an optimization problem which should be solved using the online monitoring system. This task takes, in some cases, one minute which should be performed parallel with other tasks. The time for completion of this task varies with the complexity of the top-oil temperature model and the micro-processor of the monitoring system.

However, the computational capability of monitoring systems is limited; hence, an alternative way should be provided for determination of the loading capability. Afterwards, the dependency of the loading capability on the ambient temperature is investigated. This dependency is an equation in form of a quadratic or linear equation for accurate determination of the loading capability and contains every information needed for this purpose. It is shown in this thesis that these equations can be used in an online monitoring system instead of forcing the monitoring system to solve an optimization problem under dynamic conditions. Both procedures have been applied on different types of transformers with different cooling systems in order to show the performance of the quadratic and linear equations.

■ **Thermisches Monitoring von Leistungstransformatoren**

M. Sc. Mohammad Djamali

Durch die Integration erneuerbarer Energien in die bestehenden Energienetze und deren volatilen Erzeugungsprofil gewinnt eine möglichst hohe Ausnutzung der Leistungstransformatoren an Bedeutung. Eine genaue Methode ist notwendig, um die maximale Belastbarkeit eines Transformators angesichts der aktuellen Umgebungsbedingungen zu ermitteln. Die Belastbarkeit von Transformatoren hängt stark von deren thermischem Zustand ab, welcher mittels eines dynamischen thermischen Modells beurteilt werden kann. Während der Überlastung von Transformatoren muss gewährleistet werden, dass sowohl der Transformator keine vorzeitige

thermische Alterung erfährt als auch die gesamte Kühlkapazität des Transformators zur Verfügung steht. Deswegen sind Beiträge zur Überwachung der Kühleinrichtung und zur Ermittlung der maximalen Belastbarkeit von Transformatoren von großer Bedeutung.

In dieser Arbeit wird zunächst der Stand der Technik vorgestellt. Dies enthält die thermische Modellierung, ihre Anwendungen und Einflussfaktoren. Anschließend wird ein thermisches Modell zur Berechnung der oberen Öltemperatur mittels eines Monitoringsystems vorgeschlagen. Das Modell zieht unterschiedliche Wärmeübertragungsphänomene in Betracht, nämlich die natürliche und erzwungene Konvektion, die thermische Strahlung, die Wärmeleitung und die natürliche Belüftung. Die bereits vorgestellten Phänomene werden mittels einer thermisch-elektrischen Analogie verbunden. Gleichzeitig werden ihre gegenseitigen Einflüsse berücksichtigt. Es werden zusätzlich zwei Variationen des vorgestellten Modells für Transformatoren in Gebäuden vorgeschlagen. Aufgrund der relativ einfachen Struktur der vorgeschlagenen Modelle können sie ohne großen Aufwand in Monitoringsysteme integriert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Modell zur Berechnung der oberen Öltemperatur hardware- und softwaremäßig implementiert und ein Monitoringsystem entwickelt. Das Monitoringsystem dient dazu, die obere Öltemperatur und die Heißpunkttemperatur möglichst genau zu berechnen und auf deren Basis den Zustand der Kühlanlagen zu überwachen und die maximale Belastbarkeit zu ermitteln. Anhand der während des normalen Transformatorbetriebs aufgenommenen Messdaten werden das entwickelte thermische Modell und das Monitoringsystem validiert. Die Ergebnisse der Validierung zeigen, dass das entwickelte Modell eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung der Temperaturen besitzt. Aufgrund der Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Modells ist es für das Monitoring geeignet.

Während der Überlastung eines Transformators kommen die Öl- und Wicklungstemperaturen an ihre Grenzen. Um die im Aktivteil des Transformators erzeugte Wärme an die Umgebung abzuführen, ist die Kühleinrichtung des Transformators von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang bietet die Überwachung der Kühleinrichtung die Möglichkeit, aufgetretene Fehler frühzeitig zu erkennen. In dieser Arbeit werden zwei Algorithmen zur Überwachung der Kühleinrichtung vorgeschlagen. Die beiden Algorithmen verwenden das thermische Modell als ihren Kern. Mittels der Messdaten werden die vorgeschlagenen Algorithmen validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden Algorithmen eine frühzeitige Erkennung von Fehlern der Kühleinrichtung ermöglichen.

Angenommen, dass sowohl ein genaues thermisches Modell zur Berechnung der Heißpunkttemperatur als auch ein Algorithmus zur Überwachung der Kühleinrichtung zur Verfügung stehen, lässt sich die maximale Belastbarkeit eines Transformators angesichts der aktuellen Umgebungsbedingungen ermitteln. So stellt diese Arbeit eine Methode zur Ermittlung der maximalen Belastbarkeit vor, welche der umgekehrte Prozess der Berechnung der Heißpunkttemperatur ist. Dieses Verfahren versteht sich als ein Optimierungsproblem, das in das Monitoringsystem implementiert

werden muss. Es werden auch im Rahmen dieser Arbeit der Zusammenhang zwischen der maximalen Belastbarkeit und der Umgebungstemperatur in Form einer linearen oder quadratischen Gleichung untersucht. Es wird gezeigt, dass diese Gleichungen das zeitaufwändige Optimierungsverfahren gut annähern.

■ **Risikoorientierte Instandhaltung von Leistungstransformatoren basierend auf einem regel- und fallorientierten Inspektionsverfahren**

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. M. Weyrich

Tag der mündlichen Prüfung:

31.01.2018

Im regulierten Markt besteht das Geschäftsmodell des Netzbetreibers darin, Dritten die zur Übertragung von elektrischem Strom notwendige Übertragungskapazität bereitzustellen. Die daraus erzielbaren Gewinne werden maßgeblich durch die Kosten aus Beschaffung und Betrieb der notwendigen Netzinfrastruktur beeinflusst. Insbesondere große Leistungstransformatoren mit Oberspannungen von mindestens 220 kV, wie sie in Transportnetzen eingesetzt werden, gelten als sehr kostenintensive Betriebsmittel, für die eine risikoorientierte Instandhaltungsstrategie lohnt.

In der vorliegenden Arbeit wird daher zunächst eine Größe hergeleitet, die Leistungstransformatoren hinsichtlich ihres Ausfallrisikos bewertet. Je höher das Ausfallrisiko eines Leistungstransformators, desto vordringlicher dessen Wartung oder gegebenenfalls auch dessen Instandsetzung. Die Risikogröße basiert auf der Wichtigkeit des Leistungstransformators einerseits und dem technischen Zustand des Leistungstransformators andererseits, wobei die Wichtigkeit den Schaden quantifiziert, der eintritt, wenn der Leistungstransformator ausfällt, und mit dem technischen Zustand die Wahrscheinlichkeit geschätzt wird, mit der der Leistungstransformator ausfällt. Die Wichtigkeit ihrerseits beinhaltet monetäre wie technische Schadensaspekte.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird eine neue Interpretationsvorschrift erarbeitet, mit der der Zustand eines Leistungstransformators anhand charakteristischer Muster im Isolieröl erkannt werden kann. Die neue Interpretationsvorschrift basiert auf Klassifikatoren, die durch hybride Expertensysteme modelliert werden. Als führendes System eines hybriden Expertensystems kommt ein Fuzzy-Inferenz-System vom Typ Takagi-Sugeno-Kang nullter Ordnung zur Anwendung, welches eine strukturelle Äquivalenz zu radialen Basisfunktionen-Netzen aufweist, wodurch das von den künstlichen neuronalen Netzen bekannte Trainingsprinzip auf das Takagi-Sugeno

Kang Fuzzy-Inferenz-System nullter Ordnung übertragen werden kann. Hierdurch können die zur Erkennung ablaufender Alterungs- und Verschleißprozesse notwendigen Wissensbasen zunächst durch Erfahrungswissen (regelbasiertes Wissen) modelliert und schließlich durch das in Einzelfällen steckende Wissen (fallbasiertes Wissen) im Rahmen eines Trainings weiter optimiert werden.

Das Training eines Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy-Inferenz-Systems nullter Ordnung verlangt eine standardisierte Produktionsregelbasis. Eine Standardisierung aber bewirkt, dass die zur Beschreibung eines Klassifikators notwendigen Produktionsregeln stark anwachsen, insbesondere im Falle von höherdimensionalen Klassifikatoreingangsräumen. In diesem Zusammenhang kann gezeigt werden, dass der Approximationsfehler bei Verwendung kosinusbasierter Zugehörigkeitsfunktionen besonders klein ausfällt, so dass die Zahl der Produktionsregeln minimiert werden kann.

Das regelbasierte Wissen zur Erkennung der Verschleißprozesse wird aus klassischen Gas-in-Öl Analysemethoden und das regelbasierte Wissen zur Erkennung von Alterungsprozessen aus der „Richtlinie zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln“ [DIN EN 60422, 2007] gewonnen. Als Trainingsdaten dienen gesicherte Fälle, das heißt Fälle, in denen der zu einer Gas-in-Öl Analyse gehörende Leistungstransformatorzustand im Vorfeld verifiziert werden konnte.

Die daraus hervorgegangenen Wissensbasen (bei der Gas-in-Öl Analyse eine pro klassischer Interpretationsmethode) werden anschließend zu einer Gesamtwissensbasis zusammengeführt. Hierdurch können Vorteile gegenüber einzelnen Wissensbasen sowohl im Hinblick auf die Anzahl erkennbarer Alterungs- und Verschleißprozesse als auch hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Vorhersage der Ausfallwahrscheinlichkeiten erreicht werden.

In einer abschließend durchgeführten Fallstudie werden sowohl die Interpretationsvorschriften für Alterungs- und Verschleißprozesse als auch die risikoorientierte Instandhaltung erprobt. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass die neue Interpretationsvorschrift ein großes Spektrum an Alterungs- und Verschleißprozessen zuverlässig zu erkennen vermag, dabei aber – im Gegensatz zu den klassischen Interpretationsvorschriften – keine binäre Eindeutigkeit vorgibt, wo tatsächlich auch keine existiert. Nicht zuletzt erweist sich die Visualisierung des Ausfallrisikos einer Leistungstransformatorpopulation in einem Risikodiagramm als vorteilhaft, um rasch die Risikoverteilung einer Leistungstransformatorpopulation zu erkennen und die Individuen in der richtigen Reihenfolge einer Instandhaltung zuzuführen.

■ **Risk-oriented Maintenance of Power Transformers Based on a Rule- and Case-oriented Inspection Method**

Dipl.-Ing. Markus Fischer

In a regulated market grid operators follow their business model by providing power carriage capacities to third parties. Earnings resulting from that business are decisively influenced by procurement and maintenance of the necessary power grid infrastructure. This applies in particular to large power transformers with a primary voltage of 220 kV and above, which are normally used in transmission power grids. They are known to be very expensive and thus worth to be maintained in a risk based manner.

Thus, this thesis develops at first a variable that assesses power transformer's risk of an outage. The higher the risk of an outage, the more urgent a power transformer needs to be maintained or repaired, respectively. The risk variable depends on power transformer's importance on the one hand and on the other on its technical condition, whereby the importance reflects the impact of an outage and the technical condition the probability of an outage. The impact itself can be of monetary or technical kind.

During further work, a new interpretation regulation will be developed that aims to determine the technical condition of a power transformer by recognizing characteristic patterns in isolation oil. The new interpretation regulation is based on classifiers which are modelled by hybrid expert systems. The leading part of the expert system is a type zero Takagi-Sugeno-Kang fuzzy-inference-system which is structural equivalent to radial basis function networks and therefore it is possible to adopt the training principle known from artificial neural networks to the type zero Takagi-Sugeno-Kang fuzzy-inference-system. Hereby, knowledge bases that detect aging and wearout processes are modelled first by rule-based knowledge and then they are further optimized by case-based knowledge through the appliance of an adequate training.

The training of a Takagi-Sugeno-Kang fuzzy-inference-system of type zero requires a standardized rule base. But the standardization process strongly increases the number of production rules that are needed for the description of a classifier – especially in case of a classifier with multidimensional input space. In such a case the usage of cosine-based membership functions can minimize the approximation error and therefore the number of required production rules.

The rule-based knowledge to detect wearout processes is obtained from classical interpretation regulations that belong to the dissolved gas analysis, while the rule-based knowledge to detect aging processes is derived from a directive called „Directive for supervision and maintenance of insulating mineral oil used in electrical equipment“ [DIN EN 60422, 2007]. Knowledge base optimizations are then achieved

by training with verified cases. That means cases in which the technical condition that belongs to a certain dissolved gas analysis has been confirmed in advance.

Subsequently, all resulting knowledge bases (in case of dissolved gas analysis one per classical interpretation regulation) are then aggregated into one comprehensive knowledge base. This leads to advantages over the single knowledge bases with regards to the amount of detectable aging and fault processes and also with regards to the reliability of the prognosis of outage probabilities.

Finally, in order to test the new interpretation regulations for aging and fault processes as well as in order to test the risk-based maintenance, a case study with meaningful examples is carried out. In this context one can observe that the new interpretation regulations detect a huge amount of aging and wearout processes. Thereby, the interpretation regulations do not pretend binary clarity (as classical interpretation regulations sometimes do) when there is actually none. Furthermore, it shows up to be advantageous to visualize power transformers' outage risk within a risk diagram. That is because the outage risk of individuals of such a population can thus be seen with ease and that is essential in order to maintain power transformers in the right order.

■ **Probabilistische Verteilnetzplanung zur optimierten Integration flexibler dezentraler Erzeuger und Verbraucher**

M. Sc. Pascal Wiest

Hauptberichter:

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

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried

KIT

Tag der mündlichen Prüfung:

14.02.2018

Die hohe Durchdringung an erneuerbaren Energien sowie deren zunehmende Flexibilisierung macht eine Veränderung der Verteilnetzplanung notwendig. Hierfür wird im Rahmen dieser Arbeit eine neue probabilistische, zeitreihenbasierte Methode zur Verteilnetzplanung entwickelt, die den heute angewandten deterministischen Ansatz ersetzen kann. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die notwendigen Veränderungen in den technischen Analysen der Verteilnetzplanung aufzuzeigen und am Beispiel eines Hochspannungsnetzes die notwendigen Modelle und Berechnungsmethoden zu entwickeln.

Um die Netzbelastungen in der probabilistischen Verteilnetzplanung zu ermitteln, zeigt sich eine zeitreihenbasierte Monte Carlo Simulation als vorteilhaft, da damit neue Betriebskonzepte detailliert in der Netzplanung bewertet werden können. Der

damit einhergehende hohe Berechnungsaufwand kann mit einer Linearisierung der Lastfluss- und Ausfallanalyse reduziert werden. Die hierfür entwickelte Methode zeigt in den durchgeführten Analysen einen geringen Fehler von maximal 6 % bei der thermischen Grenzleistung der einzelnen Leitungen, bei gleichzeitiger Reduktion des Rechenaufwandes. Die notwendigen zeitreihenbasierten Eingangsdaten werden mithilfe von Klimamodelldaten und Messdaten modelliert. Als Beispiel für die Flexibilisierung der Erzeugung werden zwei Methoden zur dynamischen Spitzenkappung entwickelt und miteinander verglichen. Die Grundlage für die dynamische Spitzenkappung bildet die entwickelte Linearisierung der Lastfluss- und Ausfallanalyse. Die Verwendung eines Optimierungsmodells zeigt sich als vorteilhaft gegenüber einer heuristischen Einsatzreihenfolge, da dadurch die abgeregelte Energie minimiert werden kann.

Im Rahmen einer Planungsstudie eines realen 110 kV-Hochspannungsnetzes wird die entwickelte probabilistische Verteilnetzplanung mit der konventionellen Netzplanung verglichen. Dabei wird gezeigt, dass die geringe Anzahl an deterministischen Netzauslegungsfällen bei der konventionellen Netzplanung zu Unterdimensionierungen der Leitungen führen kann. Ebenfalls wird in dieser Fallstudie gezeigt, dass der Einsatz einer optimierten dynamischen Spitzenkappung den Ausnutzungsgrad der Verteilnetze erhöht und den notwendigen Netzausbau signifikant reduziert. Dabei ist es möglich, die Leitungslänge des notwendigen Netzausbaus um 67 % zu reduzieren, unter Einhaltung der technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Im gesamten Netzgebiet ist für diese Reduzierung des notwendigen Netzausbaus eine Abregelung von 1,32 % der erneuerbaren Energien erforderlich. Als Ergebnis dieser Arbeit steht ein Ansatz zur probabilistischen Verteilnetzplanung, welcher Fehldimensionierungen verhindern kann und die Möglichkeit bietet, Betriebskonzepte zur Reduzierung des Netzausbaus detailliert in der Netzplanung zu bewerten.

- **Probabilistic Distribution Grid Planning for Optimized Integration of Flexible Distributed Generation and Consumption**

M. Sc. Pascal Wiest

The high penetrations of renewable energy sources and an increasing flexibility of load and generation units leads to new demands within the distribution grid planning. Therefore, it is a new method for distribution grid planning developed based on probabilistic and time-series based calculations, which can replace today's deterministic approach. The aim of this work is to show the necessary changes in the planning process. Additionally, the necessary models and calculation methods have been developed for a high voltage distribution grid.

A time-series based Monte Carlo Simulation is beneficial for the calculation of the line loadings in the probabilistic distribution grid planning since network operation as e.g. dynamic curtailment can be modelled in detail. The high computational burden can be reduced by using a linearization of power flow calculation and contingency analysis. The developed new methodology shows a maximum relative error of 6 % in the rated line power flows. Time-series based input data is necessary for the probabilistic distribution grid planning which is modelled using climatic and measured data. Additionally, two methodology for dynamic curtailment are developed and investigated as an example for flexibility of generation. Therefore, the developed linearization of power flow calculation and contingency analysis are used. An optimization model for dynamic curtailment is beneficial compared to a heuristic approach since the curtailed energy can be minimized.

A planning study of a real 110 kV high voltage distribution grid is used to test the new probabilistic distribution grid planning method and to compare it with the conventional approach. The low number of deterministic load and generation scenarios in conventional planning leads to an undersizing of the lines. Additionally, the planning study shows that the optimized dynamic curtailment method significantly reduces the necessary grid expansion. Here, a reduction of 67 % of grid expansion is possible when curtailing only 1.32 % of the annual energy from renewable energy sources. The results of this work is a probabilistic distribution grid planning method that can prevent over or under dimensioned lines and is able to integrate operational concepts for the reduction of grid expansion.

■ **Zweiseitige Teilentladungsmessung zur Zustandsbewertung langer Energiekabel**

Dipl.-Ing. Manuel Wild

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. ten Brink

Tag der mündlichen Prüfung:

05.06.2018

Durch den vermehrten Einsatz von langen Kabelstrecken im Energieübertragungsnetz steigen die Anforderungen an die Prüftechnik. Heutzutage hat sich die Teilentladungsmessung als wertvolles Hilfsmittel zur Prüfung von elektrischen Betriebsmitteln durchgesetzt. Speziell bei Kabelstrecken im Mittel- und Hochspannungsbereich werden Teilentladungsprüfungen nach der Neuinstallation, Reparatur und zur Zustandsbestimmung im Betrieb eingesetzt. Die Dämpfung von Teilentladungsimpulsen, welche mit der Kabellänge zunimmt, hat einen erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Qualität der Teilentladungsmessung. Es steigt die Nachfrage nach neuen Prüfmethoden, welche diese Herausforderungen bewältigen.

Ein Ansatz, der in dieser Arbeit untersucht wird, beschäftigt sich mit der Erweiterung der einseitigen Auskopplung der Teilentladungen an Energiekabel. Bei dieser Technik befindet sich das Messsystem an einem Ende des Kabels. Dieses Messsystem besteht meist aus einem Koppelkondensator zum Auskoppeln der Teilentladungsimpulse aus dem unter Hochspannung befindlichen Kabel. Die hier vorgestellte Erweiterung verwendet ein zweites System, welches am anderen Kabelende die Teilentladungen misst. Diese sogenannte zweiseitige Teilentladungsmessung verringert die maximale Strecke auf die Hälfte, die ein Teilentladungsimpuls zurücklegen muss, bevor er das Messgerät erreicht. Durch diese Methode wird die Empfindlichkeit gesteigert, und Teilentladungen mit geringer Amplitude können zuverlässiger detektiert werden.

Mithilfe des Messsystems an der zweiten Kabelseite kann außerdem die Ortungsmöglichkeit der Fehlerstelle verbessert werden. Eine Fehlerstelle, die eine Teilentladung verursacht, erzeugt einen Impuls, der sich entlang des Kabels in beide Richtungen weg vom Fehlerursprung ausbreitet. Bei der einseitigen Messung wird die zeitliche Differenz ausgewertet, welche zwischen dem direkt eintreffenden Impuls und der Reflexion am offenen Kabelende entsteht. Durch diesen Wert und mit der Kenntnis der Kabellänge sowie der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Impulse kann der tatsächliche Fehlerort berechnet werden. Der Nachteil für diese Art der Lokalisierung besteht in der Notwendigkeit der Reflexion des Impulses am Kabelende. Vorteil der zweiseitigen Messung ist, dass der Impuls am Kabelende gemessen wird und die Reflexion sowie die Ausbreitung zurück zum Kabelanfang nicht mehr notwendig sind. Mit Messungen an verschiedenen langen Kabeln werden die Unterschiede zwischen ein- und zweiseitiger Messung deutlich.

Die zweiseitige Messung bringt neue Herausforderungen mit sich, welche ebenfalls als Teil dieser Arbeit untersucht werden. Die beiden Messstellen befinden sich an den Kabelenden und können bei langen Kabelstrecken mehrere zehn Kilometer voneinander entfernt liegen. Dies stellt ein Problem hinsichtlich der Steuerung des Messsystems und der Auswertung der Messdaten dar. Zum einen kann der Bediener nur an einem System direkt sein, zum anderen müssen die Messsignale zeitlich synchronisiert werden, um eine Laufzeitbestimmung für die Lokalisierung durchführen zu können. Das zweite Messsystem am entfernten Kabelende soll deswegen ferngesteuert werden. Hierfür wird ein Kommunikationssystem entwickelt, welches eine Datenübertragung über lange Kabelstrecken ermöglicht. Als Übertragungsmedium kommt das Energiekabel selbst zum Einsatz, da dieses ohnehin vorhanden ist und somit keine zusätzliche Infrastruktur notwendig wird. Hierfür werden verschiedenen Möglichkeiten zur Modulation der Datensignale untersucht. Eine große Herausforderung ist das Ein- und Auskoppeln der Signale auf ein unter Hochspannung befindliches Kabel. Zu diesem Zweck wird ein Hochspannungskoppelkondensator verwendet, der mithilfe eines angepassten Ankoppelnetzwerks die Daten von einem Modem auf das Energiekabel überträgt. Damit ist es möglich, dasselbe Kabel für die Datenübertragung zu verwenden, welches gleichzeitig der Hochspannungsprüfung unter-

zogen wird. Es wird anhand von Messungen gezeigt, dass die Übermittlung von Datensignalen über eine Distanz von mehreren zehn Kilometern möglich ist.

Eine weitere Herausforderung der zweiseitigen Teilentladungsmessung ist die zeitliche Synchronisation der Messdaten der beiden getrennt liegenden Messsysteme. Für diese Aufgabe wird ein GPS Modul eingesetzt, welches einen Zeitstempel erzeugen kann um die beiden Systeme zu synchronisieren. Messungen zeigen, dass die zeitliche Genauigkeit ausreichend ist, um eine Lokalisierung auf mehrere Meter genau durchführen zu können. Bei einem Energiekabel mit mehreren Kilometern Länge wird dadurch eine Genauigkeit kleiner als ein Prozent erreicht. Hierbei wird die untere Grenze der Genauigkeit durch die Impulsform der Teilentladungen begrenzt. Direkt am Entstehungsort der Teilentladung liegt die Anstiegszeit des Impulses bei wenigen Nanosekunden. Bereits nach einer kurzen Ausbreitungsstrecke von einigen Metern sind die hochfrequenten Anteile bereits so stark gedämpft, dass die Anstiegszeit im Bereich von einigen hundert Nanosekunden bis hin zu mehreren Mikrosekunden liegen kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Auswertung der zeitlichen Differenz im Anstieg der Impulsform die besten Ergebnisse liefert. Bei einer langsamen Anstiegszeit ist deshalb mit einem großen zeitlichen Fehler zu rechnen. Dieser Effekt stellt eine physikalische Grenze der Genauigkeit der Lokalisierung an langen Energiekabelstrecken dar.

Die Arbeit zeigt, dass die zweiseitige Teilentladungsmessung zusammen mit dem Einsatz der Datenübertragung über Energiekabel sowie der Synchronisierung mit GPS Möglichkeiten eröffnet, zuverlässigere und empfindlichere Teilentladungsmessungen durchführen zu können. Untersuchungen zur Teilentladungsausbreitung an langen Energiekabeln und deren Herausforderungen bei Vor-Ort-Messungen werden vorgestellt. Mithilfe eines Modells zur Simulation der Teilentladungsausbreitung kann die Veränderung von Teilentladungsimpulsen während der Ausbreitung im Energiekabel bestimmt werden. Die Arbeit zeigt außerdem ein neues Verfahren um die Teilentladungsmessung an Energiekabel empfindlicher zu machen. Hierfür wird ein Verfahren entwickelt, welches sich für die Datenübertragung über Energiekabel bei Vor-Ort-Messungen eignet. Insbesondere der Einsatz des Energiekabels selbst als Übertragungskanal verringert den Installationsaufwand bei Vor-Ort-Messungen erheblich und senkt damit den zeitlichen und finanziellen Aufwand.

■ **Two-sided Partial Discharge Measurement for Condition Monitoring of long Power Cables**

Dipl.-Ing. Manuel Wild

Due to the increased use of long cable lengths in the power transmission grid, requirements for testing technology are increasing. Nowadays, partial discharge measurement has become a valuable tool for testing electrical equipment. Especially

in the case of cable circuits in the medium and high voltage range, partial discharge measurements are used after the installation and repair as well for condition monitoring during operation. The attenuation of partial discharge pulses, which increases with the cable length, has a considerable influence on the reliability and quality of the partial discharge measurement. There is a growing demand for new test methods that meet this challenge.

One approach, which is investigated in this thesis, deals with the extension of the single-sided decoupling of the partial discharges out of the energy cable. In this technique, the measuring system is located at one end of the cable. This system usually consists of a coupling capacitor for decoupling the partial discharge pulses from the cable under high voltage. The expansion shown here uses a second system, which measures the partial discharges at the other end of the cable. This shows two-sided partial discharge measurement reduces the maximum distance to the half that a partial discharge pulse must pass before it reaches the measuring device. It is shown that this method increases sensitivity and allows partial discharges with low amplitude to be detected more reliably.

By using an additional measuring system at the second cable side, the location possibility of the fault location can also be improved. An isolation fault causing partial discharge, produce a pulse that propagates along the cable in both directions away from the fault origin. In the case of the single-sided measurement, the time difference between the directly arriving pulse and the reflection over the far cable end is evaluated. This value and the knowledge of the cable length as well as the propagation speed of the pulses can be used to calculate the actual fault location. The disadvantage for this type of localization is the need of the reflection of the cable end. The advantage of the two-sided measurement is the pulse at the cable end is measured and the reflection as well as the propagation back to the other cable side is no longer necessary. With measurements on cables of different lengths, the differences between single and two-sided measurements are pointed out.

The two-sided measurement leads to new challenges, which are also examined as part of this work. The two measuring systems are located at the cable ends and can be several tens of kilometers apart for long cable circuits. This is a problem with regard to the control of the measuring system and the evaluation of the measured data. On the one hand, the operator can only be directly at one cable end, on the other hand the measuring signals have to be synchronized in time in order to be able to perform a signal propagation time determination for the localization. The second measuring system at the remote end of the cable should be controlled remotely. For this purposes, a communication system is developed which allows data transmission over long cable lengths. As transmission medium the power cable itself is used, since it is already present and thus no additional infrastructure is necessary. Various possibilities for the modulation of the data signals are examined for this purpose. A great challenge is the coupling of the signals to a cable under high voltage. For this task, a high-voltage coupling capacitor has been used, which transmits the data from a modem to the power cable by means of an adapted coupling network. This makes it

possible to use the same cable for data transmission, which is simultaneously subjected to the high-voltage test. It is shown by means of measurements that the transmission of data signals over a distance of several tens of kilometers is possible.

The second challenge of the two-sided partial discharge measurement is the time synchronization of the measurement data of the two separately located measuring systems. For this task, a GPS module is used, which can generate a time stamp in order to synchronize the two systems. For an energy cable with several kilometers of length, an accuracy of less than one percent is achieved. In this case, the lower limit of the accuracy is limited by the pulse shape of the partial discharges. The rise time of the pulse is only a few nanoseconds at the point of origin of the partial discharge. Even after a short propagation distance, the high-frequency components are already strongly attenuated that the rise time can be in the range from a few hundred nanoseconds to several microseconds. Therefore, a high temporal error can be expected with a slow rise time. This effect is a physical limit to the localization accuracy at long power cable distances.

It can be summarized that the two-sided partial discharge measurement together with the use of the data transmission via power cables as well as the synchronization with GPS makes it possible to carry out more reliable partial discharge measurements. Investigations on the partial discharge propagation on long power cables and their challenges in on-site measurements are presented. A model for simulating partial discharge propagation can be used to determine the change in partial discharge pulses during propagation in the power cable. The work also shows a new method to make the partial discharge measurement on power cables more sensitive. In particular, the use of the power cable itself as a transmission channel considerably reduces the amount of installation required for on-site measurements and reduces the setup time and financial costs.

■ **Simulation der Störemissionen von Traktionsinvertern im Komponententest nach CISPR 25**

M. Sc. Philipp Hillenbrand

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. J. Roth-Stielow

Tag der mündlichen Prüfung:

09.11.2018

Die vorliegende Arbeit untersucht Modellierungsaspekte leitungs- und feldgebundener Störemissionen von Traktionsinvertern in einer Prüfumgebung nach der Norm CISPR 25. Es wird ein dreistufiger Simulationsansatz entwickelt, der für verschiedene Entwicklungsphasen adaptierbare Modelle unterschiedlicher Komplexität vor-

sieht. Die Simulationsansätze eignen sich, dank geringer Rechenzeit, für die Integration in Optimierungsalgorithmen.

Für die erste Modellstufe werden phänomenologische Ersatznetzwerke entwickelt, die Gleich- und Gegentaktstörungen getrennt voneinander modellieren. Alle Modellbestandteile werden vollständig aus messbaren Größen des Testaufbaus abgeleitet. Die Modelle sind im Frequenzbereich konzipiert und besitzen eine minimale Komplexität. Die geringe Anzahl an Elementen der Netzwerkmodelle liefert visuell ein tiefes Verständnis über die Entstehung und Ausbreitung der Störemissionen innerhalb der Prüfumgebung. Gleichzeitig ist die erzielte Genauigkeit ausreichend hoch, um eine erste Abschätzung bezüglich dem Bauraum von notwendigen Filterelementen vornehmen zu können.

In der zweiten Modellstufe wird ein 3D-Geometriemodell des gesamten Komponententests erstellt und mit gemessenen Streuparametern von Komponenten des Aufbaus kombiniert. Die Anregung des passiven Systems durch Störquellen erfolgt im Frequenzbereich mit idealen Spannungsquellen zwischen Drain und Source der Halbleiterchips. Die Information über die Störquellen wird gesondert in einer transienten Schaltungssimulation gewonnen. Beide Simulationen zusammen sind in der Lage, sowohl leitungs- als auch feldgebundene Störemissionen vorherzusagen. Der Ansatz eröffnet die Möglichkeit, dass die Simulation der Quellen im Zeitbereich und die des Übertragungswegs im Frequenzbereich voneinander getrennt werden können. Darüber hinaus kann die Simulation der Quellen stark vereinfacht und dadurch die Simulationszeit im Zeitbereich deutlich reduziert werden. Es wird gezeigt, dass die Störquellen näherungsweise unabhängig von den Impedanzen des Gleichtaktstrompfads und von Elementen auf der Gleichspannungsseite des Inverters sind. Je nach Einbauort ist eine Optimierung der notwendigen Filterelemente daher komplett im Frequenzbereich mit kurzen Rechenzeiten möglich.

Die dritte Modellstufe nutzt Doppelpulsmessungen des Leistungsmoduls zur Erhöhung der Modellgenauigkeit. Es wird das Halbleitermodell zur Bestimmung der Störquellen betrachtet. In einem statischen Zustand des Leistungsschalters können die, hinsichtlich der Störemissionen, sensitiven Parameter des Modells nicht korrekt ermittelt werden. Die Untersuchung zeigt daher eine Methode zur Extraktion der relevanten Halbleiterparameter aus Schaltvorgängen in einer bekannten Prüfumgebung. Die dynamisch bestimmten Parameterwerte erhöhen die Vorhersagegenauigkeit der Störemissionsmodelle für den UKW-Bereich deutlich.

- **Simulation of Electromagnetic Emissions Caused by Traction Inverters in a CISPR25 Component Level Test Setup**

M. Sc. Philipp Hillenbrand

This work investigates modeling aspects of conducted and radiated emissions caused by traction inverters in a component level test setup according to the CISPR 25 standard. A three-step simulation approach is presented that provides models of varying complexity, adaptable to different product development stages of an inverter. The models are suitable for the integration into optimization algorithms thanks to short computation times. For the first model stage, physics based equivalent circuits are developed that model common- and differential-mode interferences separately. All model quantities are derived entirely from measurements of the test setup. The models are designed in the frequency domain, with minimal complexity. The limited number of network elements facilitates a deep understanding into the origin and propagation of the interferences within the test environment. At the same time, the achieved model accuracy is sufficient to gauge the required volume for necessary filter elements.

In the second model stage, a geometric 3D model of the entire component test setup is created and combined with measured scattering parameters of its components. The excitation of the resulting passive system is implemented in the frequency domain with ideal voltage sources at the semiconductor switches. The source characteristics are derived separately in a transient circuit simulation. The combination of the two is able to predict both, conducted as well as radiated emissions. This suggests that the time domain simulation of the sources can be considered separately from the frequency domain simulation of the transmission path. In addition, the simulation of the sources is simplified, by neglecting all elements except for the commutation cell and the differential impedances on the load side. This significantly reduces the transient simulation time. Once this part of the simulation is done, it can be combined with different transmission paths. The filter elements can thus be modelled in the frequency domain with very short computation times enabling fast and efficient optimizations. The third model stage uses double-pulse measurements to increase the model accuracy. The focus is on the critical part of the transient circuit simulation: the semiconductor model. Accurate measurement results of the necessary switch model parameters cannot be achieved in a passive state of the switches. The study therefore shows a method for extracting the crucial semiconductor parameters from switching events in a pre-characterized test environment. In the FM range, the extracted parameter values significantly increase the accuracy of the emission models compared to model parameters measured in a passive state of the switches.

- **Netzbetriebsverfahren zur Koordinierung von Phasenschiebertransformatoren und HGÜ-Verbindungen im Verbundnetz**

M. Sc. Martin Wolfram

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. D. Westermann
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Rudion
Tag der mündlichen Prüfung (TU Ilmenau): 11.10.2018

- **Health Index for High Voltage Gas-Insulated Switchgear**

M. Sc. Muhannad Al-Suhaily

Hauptberichter: Prof. Dr. J.J. Smit
Doctoral committee member: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung (TU Delft): 17.10.2018

- **HV DAC Diagnosis on 110 kV Power Cables**

M. Sc. Piotr Cichecki

Hauptberichter: Prof. Dr. J.J. Smit
Doctoral committee member: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung (TU Delft): 10.12.2018

5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Hochspannungstechnik

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

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

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

RESEARCH ACTIVITIES

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

High Voltage Engineering

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

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

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

Elektrische Energieversorgung / Smart Grids

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

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

Elektromagnetische Verträglichkeit

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 Messung von Teilentladungen (TE) ist eine wichtige Methode zur Untersuchung der Isolierfestigkeit von Betriebsmitteln. Neben der Höhe der gemessenen Entladung und dem Fehlerort ist die Art des Fehlers von großem Interesse. Kann der Fehlertyp, und damit die Ursache der Entladung, bestimmt werden, so wird eine zielgerichtete, und damit kostengünstigere Wartung bzw. Reparatur möglich.

Die klassische TE-Messung wird elektrisch nach der IEC 60270 durchgeführt. Mit der daraus gewonnenen Ladung und Phasenlage jedes Impulses kann das PRPD gezeichnet werden (Fig. 1). Anhand der typischen Muster kann so auf die Fehlerart geschlossen werden. Treten zwei oder mehr Fehler gleichzeitig auf, so können diese im PRPD allerdings oft nicht separiert werden. Um eine Diagnose mehrerer gleichzeitig auftretender Fehler zu ermöglichen, wurden zwei Ansätze untersucht.

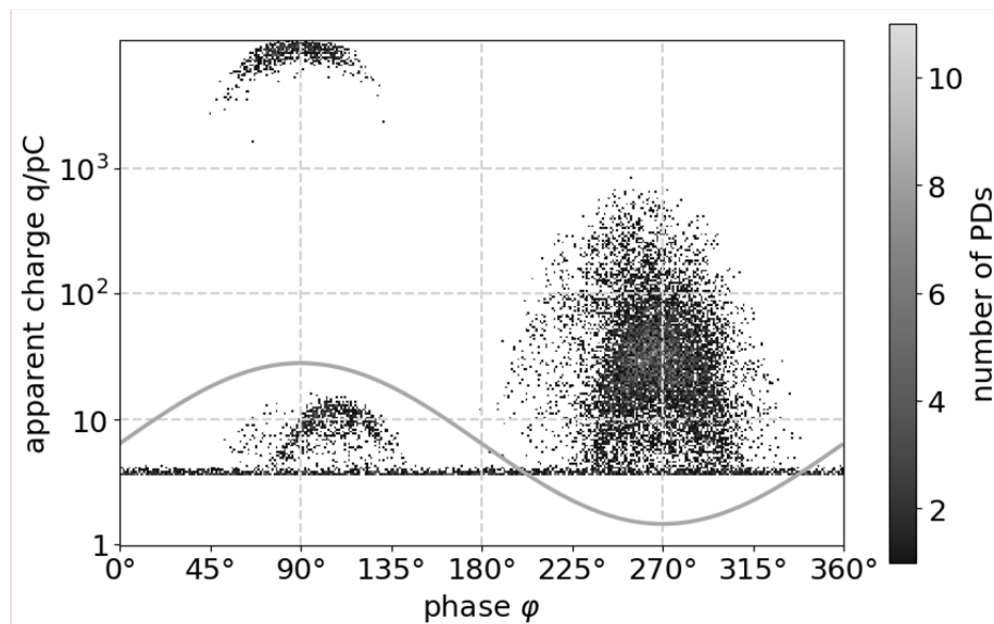


Fig. 1: Beispiel eines Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) Musters.
Example of a Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pattern.

TE-Fehler unterschiedlicher Art erzeugen verschiedene Impulsformen im Zeitbereich (Fig. 2). Einzelne Impulse sind zeitlich einfach voneinander zu trennen. Dadurch können, im Gegensatz zum PRPD, multiple Quellen getrennt behandelt werden. Einzelne TE-Impulse im Zeitbereich eignen sich somit zur Klassifikation der TE-Quelle. Um die Impulse für die Klassifikationsalgorithmen maschinenlesbar zu machen, wurden in der Vergangenheit typische Merkmale der Impulse berechnet.

■ Classification of Partial Discharge Sources by their PRPD Patterns

M. Sc. Benjamin Adam

Partial discharge (PD) measurement is an important method for investigating the insulation strength of high voltage equipment. In addition to the magnitude of the measured discharge and fault location, the nature of the fault is of great interest. If the type of fault and thus the cause of the discharge can be determined, a targeted, and therefore cheaper, maintenance or repair becomes possible. The classic electrical PD measurement is carried out in accordance with IEC 60270. With the resulting charge and phase of each pulse, the PRPD can be drawn (Fig. 1). Based on the typical pattern the type of error can be concluded. If two or more errors occur at the same time, they can often not be separated in the PRPD. In order to enable a diagnosis of several simultaneous errors, two approaches have been investigated.

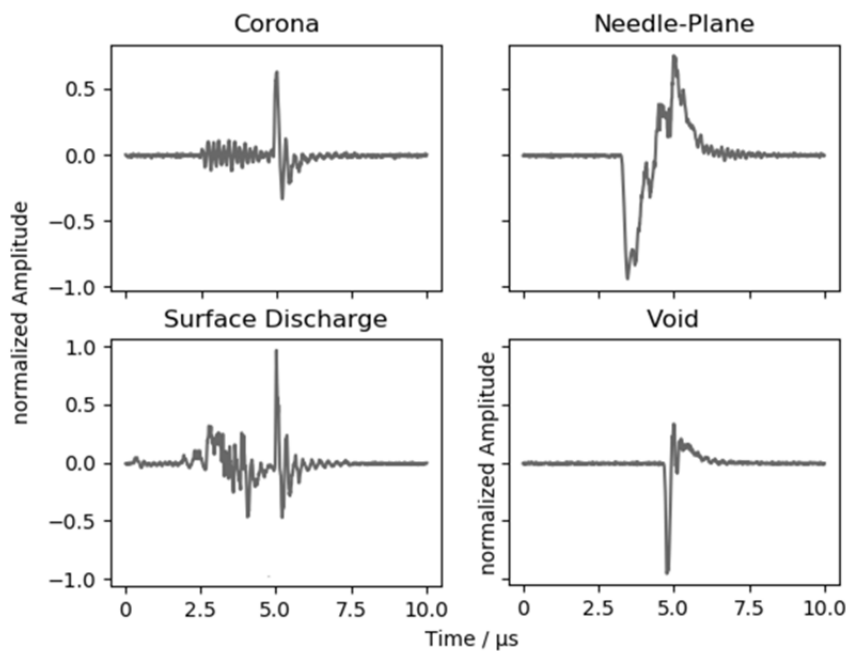


Fig. 2: TE-Impulse im Zeitbereich.
PD pulses in time domain.

Different types of PD sources generate different pulse forms in the time domain (Fig. 2). Individual impulses can be easily separated in time. As a result, in contrast to the PRPD, multiple sources can be handled separately. Individual PD pulses in the time domain are thus suitable for the classification of the PD source. In order to make the pulses for the classification algorithms machine-readable, typical features of the pulses have been calculated in the past. For example, the rise time or the maximum amplitude was used as descriptive properties to form the feature vector.

So wurden z.B. die Anstiegszeit oder die maximale Amplitude als beschreibende Eigenschaften genutzt, um den Merkmalsvektor zu bilden. Unser neuer Ansatz nutzt moderne neuronale Netze, um diesen Schritt der Merkmalsextraktion zu überspringen. Long-Short-Term Memory (LSTM) Netzwerke können den TE-Impuls als zeitliche Abfolge von Werten direkt als Eingabe verarbeiten und so die Klassifikation ermöglichen.

Mit Hilfe von 42000 Samples von vier künstlichen, im Labor aufgenommenen TE-Quellen wurde gezeigt, dass LSTM-Netzwerke für die Klassifikation von TE-Impulsen im Zeitbereich eingesetzt werden können. Der trainierte Klassifikator erreichte eine Klassifikationsgenauigkeit von 97%.

Oft sind Messungen im Zeitbereich nicht möglich oder passende Messwerte nicht verfügbar. Typische TE-Messgeräte liefern nicht den ganzen Impuls, sondern nur den integrierten Ladungswert. Deshalb wurde eine zweite Methode entwickelt, um bereits vorhandene Messsysteme effektiver einsetzen zu können.

Beim Zeichnen des PRPD aus den Ladungswerten und der Phasenlage jedes Impulses geht die zeitliche Information und die Reihenfolge der Impulse verloren. Diese Information wird vom Messsystem geliefert, aber für das PRPD nicht genutzt. Die von uns vorgestellte Methode nutzt die zeitliche Information, um die Klassifikation von TE zu verbessern.

Die neue Methode arbeitet direkt mit dem Datenstrom, bestehend aus Ladung, Phasenlage und Zeitpunkt der Entladung, und verzichtet damit vollständig auf das PRPD. Dadurch können auch altbekannte Merkmale für die Klassifikation nicht mehr genutzt werden, da diese oft direkt aus dem PRPD extrahiert werden. Um den Datenstrom direkt zu klassifizieren, kommen hier wieder LSTM-Netzwerke zum Einsatz.

Das System wurde mit 42000 Samples trainiert. Die Samples stammen aus Messungen aus fünf unterschiedlichen künstlichen TE-Quellen, die im Labor aufgenommen wurden. Eine Klassifikationsgenauigkeit von 99,9% konnte mit diesem Datensatz erreicht werden.

In der Zukunft erhoffen wir uns von diesem Ansatz neue Möglichkeiten, um multiple, gleichzeitig auftretende Teilentladungen mit bereits verfügbarer Messtechnik zu klassifizieren. Die zeitliche Reihenfolge der Teilentladungen und daraus abgeleitete Größen, wie z.B. die Impulswiederholrate liefern Zusatzinformationen, die helfen dieses Problem der TE-Klassifikation in der Zukunft zu lösen.

Our new approach uses modern neural networks to skip this feature extraction step. Long-Short-Term Memory (LSTM) networks can process the PD pulse as a time sequence of values directly as input, therefore making classification possible.

Using 42,000 samples from four artificial laboratory-acquired PD sources, it was demonstrated that LSTM networks can be used for the classification of PD pulses in the time domain. The trained classifier achieved a classification accuracy of 97%.

Often measurements in the time domain are not possible or suitable measurements are not available. Typical PD measuring instruments do not deliver the entire pulse but only the integrated charge value. Therefore, a second method was developed in order to use already existing measuring systems more effectively.

When drawing the PRPD from the charge values and the phase position of each pulse, the temporal information and the order of the pulses are lost. This information is supplied by the measuring system but not used for the PRPD. The method we use uses the temporal information to improve the classification of PD.

The new method works directly with the data stream consisting of charge, phase position and time of discharge, thus completely ignoring the PRPD. As a result, well-known features can no longer be used for the classification because they are often extracted directly from the PRPD. To directly classify the data stream, LSTM networks are used again.

The system was trained with 42,000 samples. The samples are from measurements taken from five different artificial PD sources taken in the laboratory. A classification accuracy of 99.9% could be achieved with this data set.

In the future, we hope that this approach establishes new possibilities for classifying multiple simultaneous partial discharges with already available measurement technology. The temporal order of the partial discharges and quantities derived therefrom, e.g. the pulse repetition rate, provide additional information that will help to solve this problem of PD classification in the future.

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

M. Sc. Chandra Prakash Beura

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

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

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

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

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

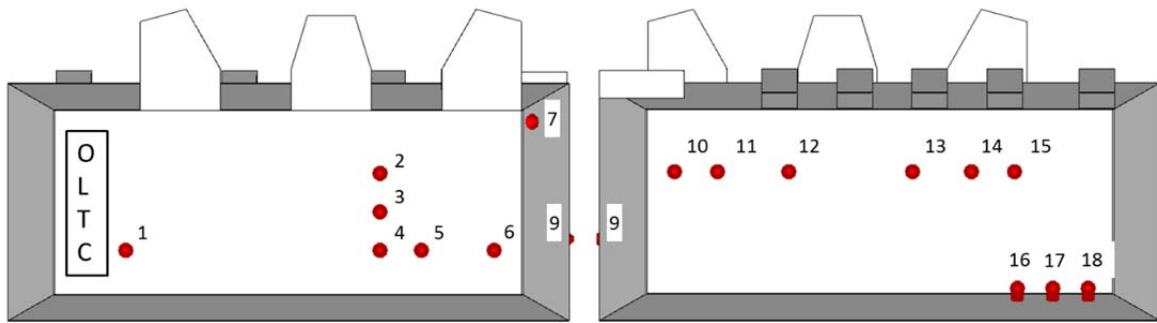


Fig. 1: Sensor distribution over tank surface for HV side (left) and MV/LV side (right)

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

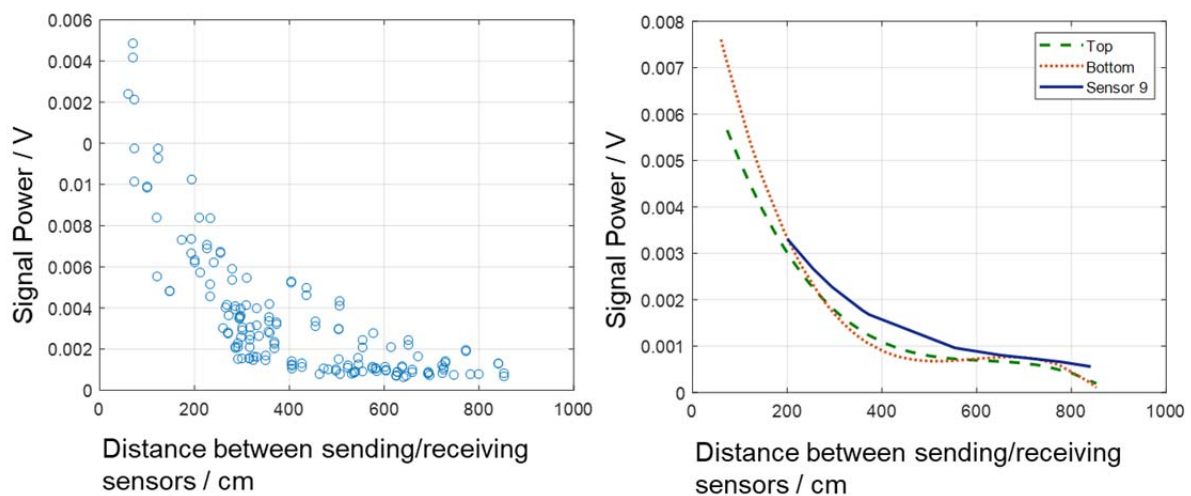


Fig. 2: Signal power of sending-receiving antenna pairs vs. distance (left) and fitted curves for different groups of antennas (right)

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

- **Vergleichsstudie zur Durchschlagsspannung von variablen, inhomogenen Elektrodenanordnungen in natürlichem Ester und Mineralöl**

M. Sc. Stephanie Hägele

Natürliche Ester werden zunehmend als Isolierflüssigkeiten in Leistungstransformatoren eingesetzt. Ihr Einsatz beruht auf vorteilhaften Eigenschaften gegenüber Mineralölen, wie beispielsweise einem höheren Flamm- und Brennpunkt und besserer Umweltverträglichkeit.

Für den Einsatz in Leistungstransformatoren ist die dielektrische Festigkeit der natürlichen Ester von großer Wichtigkeit. Vorausgehende Untersuchungen zeigen eine vergleichbare Durchschlagsspannung von Mineralölen und natürlichen Estern bei homogenen Feldanordnungen. In stark inhomogenen Feldern weisen natürliche Ester jedoch eine gegenüber Mineralölen verringerte Durchschlagsspannung auf.

Aktuelle Versuchsreihen haben zum Ziel, den Homogenitätsgrad zu finden, bei welchem die Verringerung der Durchschlagsspannung natürlicher Ester im Vergleich zu Mineralölen beginnt.

Fig. 1 zeigt die mittlere Durchschlagsspannung über dem Elektrodenabstand für Blitzstoßversuche bei verschiedenen Feldhomogenitäten in Mineralöl und natürlichem Ester. Zwei für alle Ergebnisse gültige Zusammenhänge sind erkennbar: Die mittlere Durchschlagsspannung steigt für beide Isolierflüssigkeiten mit zunehmendem Elektrodenabstand. Diese Steigerung ist nicht linear, sondern stagniert bei weiter steigendem Abstand. Bei großen Feldinhomogenitäten ist der bei Stagnation des Zuwachses der mittleren Durchschlagsspannung über dem Abstand erreichte Endwert für den untersuchten natürlichen Ester geringer als für das Mineralöl. Der natürliche Ester erreicht hier bei allen Abständen nur eine geringere dielektrische Festigkeit als Mineralöl. Dieses Verhalten ist bei homogenen Anordnungen (Kugel-Kugel) nicht zu beobachten: Die dielektrische Festigkeit ist hier vergleichbar. Bei den Anordnungen von mittlerer Feldinhomogenität (Spitzen-Anordnungen) ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Elektrodenabstand die Differenz in der mittleren Durchschlagsspannung zwischen natürlichem Ester und Mineralöl ebenfalls zunimmt. Bei kleinen Abständen besitzen beide Isolierflüssigkeiten eine vergleichbare dielektrische Festigkeit, bei großen Abständen hat Mineralöl eine höhere dielektrische Festigkeit. Weiterführende Untersuchungen beschäftigen sich mit der Ausbreitung von Vorentladungen bei den gegebenen Elektrodenanordnungen.

Comparative Study on Inhomogeneous Field Breakdown in Natural Ester Liquid and Mineral Oil

M. Sc. Stephanie Hägele

Dielectric strength is of high importance for the use of an insulating liquid in a power transformer. Mineral oil and natural ester liquid show comparable dielectric strength at homogeneous electrode gap arrangements. Natural ester liquids show reduced dielectric strength at highly inhomogeneous field arrangements under lightning impulse. Investigations conducted here are meant to find degrees of inhomogeneity where natural ester liquids start to show reduced dielectric strength.

Fig. 1 shows mean breakdown voltage at different electrode gaps under lightning impulse at different field inhomogeneities in mineral oil and natural ester liquid. Two relations can be found: Mean breakdown voltage increases for both insulating liquids with increasing gap distance. This increase tends to stagnate at large gap distances. Final values of these stagnating curves are higher for mineral oil than for natural ester liquid at high field inhomogeneity. This behaviour can't be transferred to arrangements with lower field inhomogeneity (e.g. sphere–sphere) where dielectric strength is comparable. Arrangements using medium field inhomogeneity (blunt points) show that differences in mean breakdown voltage between the liquids increase with increasing gap distance. In this case, dielectric strength is comparable between the liquids for small, but not for large gap distances where mineral oil shows higher mean breakdown values. Continuitive investigations are conducted on pre-breakdown phenomena of the defined electrode gap arrangements.

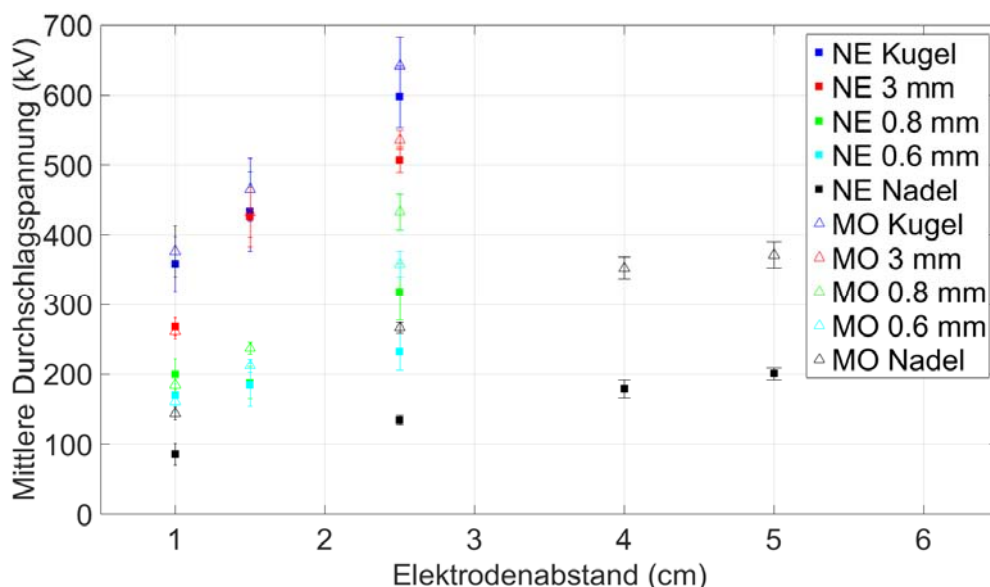


Fig. 1: Mittlere Durchschlagsspannung über dem Elektrodenabstand für verschiedene Feldinhomogenitätsfaktoren in Mineralöl und natürlichem Ester.
Mean breakdown voltage dependent on gap distance for different field inhomogeneities in mineral oil and natural ester liquid.

■ **Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren mittels CFD**

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Leistungstransformatoren hängt besonders von den thermischen Bedingungen in den Wicklungen ab. Eine übermäßige Wärmeerzeugung ist der Hauptgrund für die Verschlechterung der Isolationseigenschaften und für die Verringerung der Lebensdauer. Ein optimiertes Design der Kühlung ist so von großer Bedeutung, um Betriebsstörungen und Materialalterung aufgrund von thermischen Schäden zu vermeiden.

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

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

Um diese Konstruktionsgeometrie zu visualisieren, zeigt Fig. 1 eine vergrößerte dreidimensionale Ansicht eines Abschnitts mit zwei Passagen. Das gesamte Modell besteht aus drei Passagen, welche aus jeweils 6 Scheiben, 4 Leitern und 6 Kühlkanälen aufgebaut sind. Die Distanzstücke werden verwendet, um die Breite der horizontalen Kanäle an den inneren und äußeren Wicklungsdurchmesser anzupassen. Da die Bestimmung der Heißpunkttemperatur der Wicklung von besonderem Interesse ist, beinhaltet das Modell Temperaturmessungen an jedem Leiterelement. Jedes Element ist mit einem Temperatursensor PT-100 ausgestattet, damit der HSL und die HST genau zu bestimmen sind.

Um Einflüsse von wichtigen geometrischen Größen einer Wicklung und deren Randbedingungen auf die Temperaturverteilung und die Strömungsverteilung zu untersuchen, wird eine Parameterstudie mittels CFD durchgeführt. Die Anzahl der Scheiben zwischen zwei Barrieren wird zwischen 6 und 10 variiert. Die Höhe der Horizontalkanäle beträgt 4 mm und 6 mm. Die Vertikalkanäle haben eine Weite von 6 mm und 10 mm.

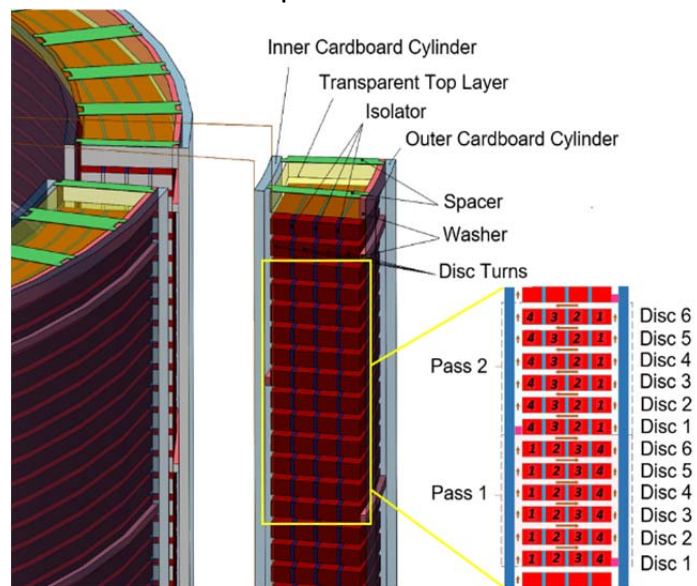
Thermal Modelling of Power Transformers with CFD

M. Sc. Saeed Khandan Siar

Lifetime and reliability of power transformers are highly dependent on cooling conditions in the windings. The excessive heat generation is the major cause of deteriorating insulation performance and aging. Therefore, optimal cooling design is necessary to avoid operating faults and materials degradation due to thermal damage. Simulations present numerical Computational Fluid Dynamic (CFD) investigations and experimental studies on the cooling performance of a zig-zag winding model used direct-oil-forced flow (OD). Winding thermal behavior and cooling performance are assessed by using different parameters to predict significant influences on Hot-Spot Temperature (HST) and Hot-Spot Location (HSL).

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

To visualize the construction geometry, Fig. 1 shows a magnified 3D view including two considered passes. The entire model consists of sections, each consisting of 6 discs, 4 conductors and 6 horizontal cooling channels. The spacers are used to set the width of horizontal



channels at the inner and outer winding position. Since the determination of the hot-spot temperature is a matter of particular interest, the experimental winding model includes temperature sensors on each conductor element. Each element is equipped with a sensor PT-100, so that the HSL and the HST can be precisely determined.

Fig. 1: Wicklung und Abstandshalter mit periodischem Kühlkanalsystem.

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

Die Verteilungen der Massenströme mit 10 Scheiben und 6 Scheiben sind in Fig. 2 dargestellt. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass die Differenz zwischen dem kleinsten und dem größten Wert innerhalb der Passage, d.h. die Inhomogenität der Ölverteilung, zunimmt. Insbesondere tritt mit zunehmender Kanalweite eine starke Vergleichmäßigung der Ölverteilung ein. Die Mindesthöhe der Horizontalkanäle ist wegen der Spannungsfestigkeit meist vorgegeben ist. Eine weitere Erhöhung führt zur Verschlechterung der gewünschten kapazitiven Kopplung zwischen den Scheiben und vergrößert den Platzbedarf der Wicklung.

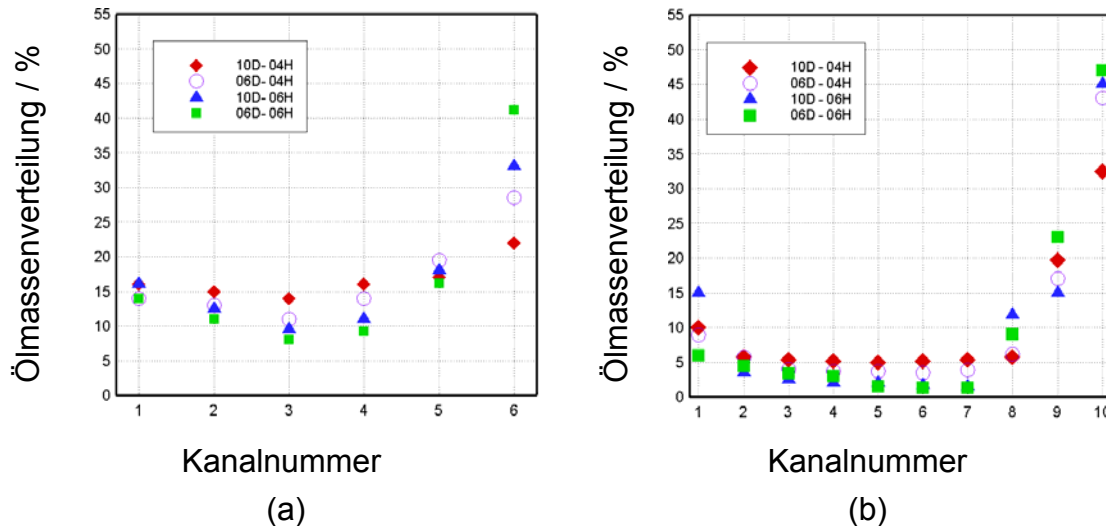


Fig. 2: a) Strömungsverteilung bei 6 Scheiben je Passage (Ölmassenstrom 3kg/s)
b) Strömungsverteilung bei 10 Scheiben je Passage (Ölmassenstrom 3 kg/s).
a) Oil flow distribution at a flow rate of 3 kg/s and 6 discs per passage.
b) Oil flow distribution at a flow rate of 3 kg/s and 10 discs per passage.

In Fig. 3 sind die Stromlinien der Viskosität des Öls für eine Eintrittstemperatur von 80°C für unterschiedliche Konfigurationen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Ablösewirbel am Eingang des horizontalen Kühlkanals, die den Durchfluss des Öls behindern, bei kleinerer Höhe der Horizontalkanäle (H) deutlich geringer sind. Das Öl verteilt sich somit homogener und bewirkt eine niedrigere Heißpunkttemperatur. Es ist zudem erkennbar, dass sich bei größerer Weite der Vertikalkanäle (D) auf beiden Seiten eine bessere Ölverteilung einstellt und es damit zu einem geringeren Druckabfall in der Wicklung kommt. Um für alle Wicklungsscheiben einen optimierten Wärmeübergang zu erhalten, sollten die Ölkanäle durch möglichst viele Barrieren unterteilt werden, da dann der Wärmeübergangskoeffizient anhand von der gleichmäßigen Ölverteilung am höchsten ist. Eine größere Anzahl Barrieren führt jedoch zu einem höheren Fertigungsaufwand und bedingt einen höheren Leistungsbedarf zum Strömungsantrieb. Eine kleine Kanalhöhe ergibt beim gegebenen Massenstrom eine bessere Kühlung. Abschließend ist festzustellen, dass die beste Kühlleistung mit größeren Vertikalkanälen in Verbindung mit kleineren Horizontalkanälen erreicht wird.

The oil distribution within the horizontal channels is shown for 6 discs and 10 discs per pass in Fig. 2. It can be observed that the difference between the smallest and the largest share of the oil within the pass increases. Specifically, increasing the channel width leads to a better oil distribution. The minimum height of the horizontal channels is fixed because of the dielectric strength at the different cases. Furthermore, an increment of the height not only leads to the deterioration of the desired capacitive coupling between the discs, but also increases the requirement of the winding space.

Fig. 3 shows the streamlines of the oil at an inlet temperature of 80°C for different configurations. It can be noted that a reduction of the horizontal channels' height also leads to a reduction in the distribution of strong separation vortices. Additionally, oil distributes more smoothly and results in a lower of hot-spot temperature. With a large width of the vertical channels, better oil distribution can be observed in the horizontal channels, which results in a lower pressure drop in the winding.

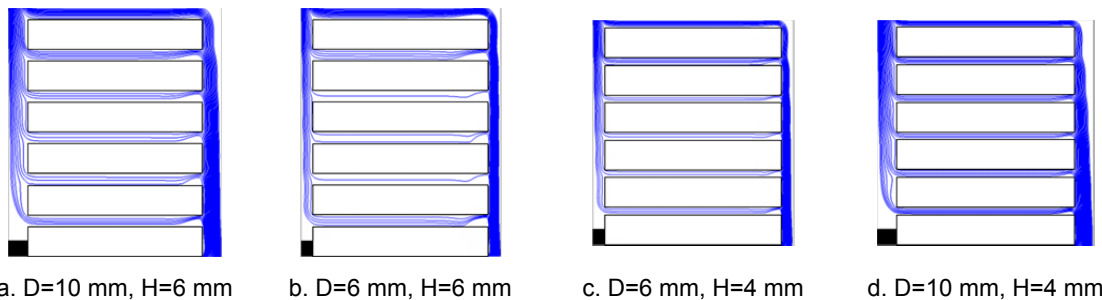


Fig. 3: Stromlinien in unterschiedlichen Geometrien
beim Ölmassenstrom von 3 kg/s und 6 Scheiben pro Passage.
Streamlines at different geometrical parameters
at an oil mass flow of 3 kg/s and 6 discs per pass.

In order to obtain a better heat transfer for all the discs, the oil passes should be subdivided by as many washers as possible, as the heat transfer coefficient is the highest. However, a larger number of washers leads to higher manufacturing costs and requires a higher power supply for oil flow. It can then be concluded that the best cooling performance is achieved with larger vertical channels combined with the smaller horizontal channels.

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

TE-Detektion von Energiekabelstrecken mittels in Kabelmuffen integrierter kapazitiver TE-Sensoren

M. Sc. Daniel Passow

Im Hinblick auf die weiter voranschreitende möglich des Hoch- und Höchstspannungsnetzes ergeben sich aufgrund der steigenden Kabellängen neue Herausforderungen an die TE-Prüftechnik. Für Kabelstrecken großer Längen beeinflussen Dämpfungs-, Dispersionseffekte und die große Kabelkapazität die Sensitivität und Lokalisationsgenauigkeit der TE-Messung. Die frequenzabhängige Dämpfung des Energiekabels spielt im Vergleich zur Dispersion die dominierende Rolle und sorgt für eine Reduktion der Pulsamplitude, Fig. 1 zeigt das Dämpfungsverhalten eines 1 m langen 110 kV XLPE-Kabelstücks.

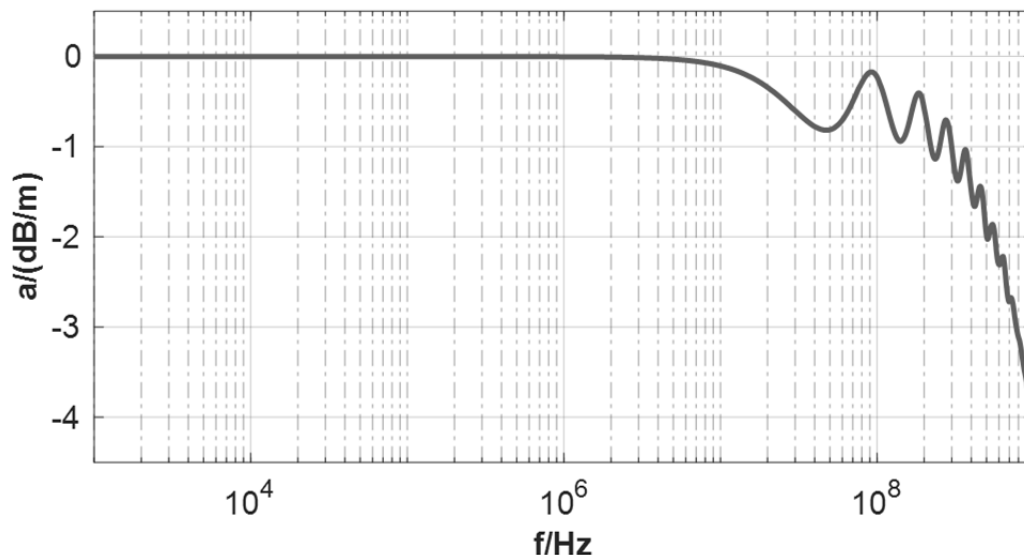


Fig. 1: Frequenzabhängige Kabeldämpfung.
Frequency dependent cable attenuation.

Aufgrund der reduzierten Sensitivität und Lokalisationsgenauigkeit der TE-Messung ist es notwendig, lange Energiekabelstrecken mit zusätzlichen Sensoren auszustatten. Da Kabelmuffen in regelmäßigen Abständen innerhalb einer Kabelstrecke installiert sind, stellen diese einen geeigneten Einbauort für zusätzliche TE-Sensoren dar. Die Randbedingung für die Integration eines zusätzlichen Sensors innerhalb der Kabelmuffe sind dabei durch die Feldsteuerung und Geometrie der Kabelmuffe eingeschränkt. Durch das Ausnutzen der unterschiedlichen Leitfähigkeiten der die Kabelmuffe umgebenden halbleitenden Schichten ist es möglich, einen kapazitiven Teiler nach Fig. 2 aufzubauen. Dabei lässt sich die Kapazität C_2 als Koppelkapazität zur Auskopplung der TE-Impulse einsetzen. Bei geeigneter Dimensionierung und Materialauswahl kann innerhalb eines weiten Frequenzbereichs sensitiv gemessen werden.

■ PD Detection in Power Cables by Using Joints with Integrated Capacitive PD Sensors

M. Sc. Daniel Passow

Recent development in electrical grids trends towards energy transmission over long length power cables. The growing length of these future power cable installations is getting challenging for conventional one-sided PD measurements at cable terminations due to high cable capacities and subsequent attenuation and dispersion of PD pulses. As a result, measurement sensitivity and localization performance of conventional PD measurement systems are reduced with growing cable lengths. Fig. 1 shows the frequency dependent cable attenuation of a 110 kV-XLPE cable, in comparison with dispersion attenuation is the dominating effect.

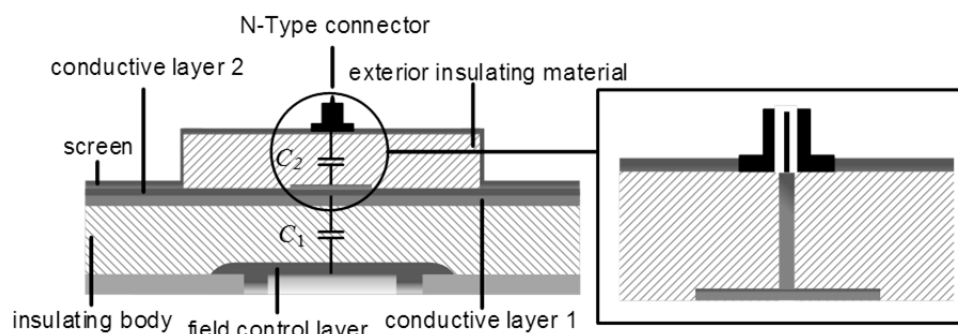


Fig. 2: Schnittbild durch eine Kabelmuffe mit kapazitivem Sensorbelag.
Sectional view of a joint with integrated capacitive sensor.

The common procedure for PD localization usually uses Time Domain Reflectometry. In long length power cables, the reflected PD pulse can be attenuated by several orders of magnitude resulting in low pulse amplitudes which eventually disappear in noise. Hence, pulse detection and PD localization become difficult or even impossible. Therefore, in case of long length power cables conventional one-sided PD measurement at cable terminations needs to be supplemented with additional PD sensors distributed along the cable. Such a distribution of additional PD sensors could be achieved by installing PD sensors in joints. Either the PD sensors could be applied to the joints during assembly or the PD sensors could be integrated as part of prefabricated joints. Fig. 2 shows the sectional view of a joint with an integrated capacitive PD sensor. The capacitance C_2 could be used as coupling capacitor in a conventional PD measurement setup. In order to understand and proof the concept of the integrated capacitive PD sensor the equivalent circuit diagram in Fig. 3 is introduced. The parameters R_1 and C_2 are defined by their materials properties like specific resistance per meter or permittivity. These parameters need to be determined through measurement and can be implemented in a simulation model of the equivalent circuit diagram.

Eine ausreichend genaue Modellierung des kapazitiven Sensors im Frequenzbereich von 30 kHz-30 MHz kann mit dem in Fig. 3 dargestellten Ersatzschaltbild erreicht werden. Bei den Parameterwerten R_1 (Widerstand der leitfähigen Schichten) und C_2 (Kapazität des äußeren Isoliermediums) handelt es sich um frequenzabhängige, durch die Geometrie und Materialien des Sensors vorgegebene Parameter, die messtechnisch durch den Einsatz eines VNA bestimmt werden müssen.

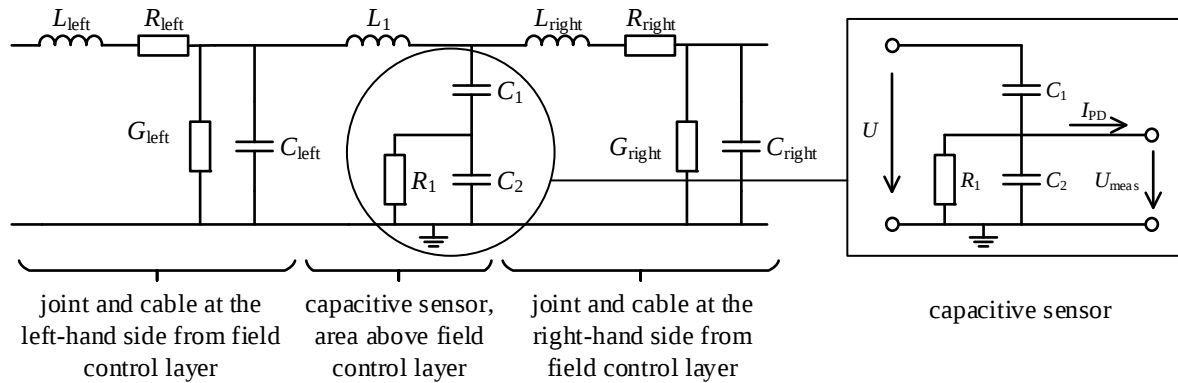


Fig. 3: Ersatzschaltbild der Kabelmuffe mit integriertem kapazitiven Sensor.

Equivalent Circuit Diagram model of joint with integrated capacitive sensor.

Durch die Abbildung des Modells mit den messtechnisch bestimmten Parameterwerten in einer herkömmlichen SPICE-Simulation ist es möglich, das Übertragungsverhalten des kapazitiven Sensors simulativ zu bestimmen. Die Verifikation des Modells wird durch den Vergleich der Simulationsdaten mit der an einem Prototyp gemessenen Transferfunktion des kapazitiven Teilers gezeigt (siehe Fig. 4 links). Die Eignung des integrierten kapazitiven Sensors für die TE-Messung kann durch die Einspeisung eines nach IEC 60270 konformen Kalibrierimpulses am Innenleiter einer Kabelmuffe nachgewiesen werden. Die Kalibrierungsmessung ergibt dabei eine Sensitivität von $< 5 \text{ pC}$ (vgl. Fig. 4). In Kabelmuffen integrierte kapazitive TE-Sensoren bieten also ein großes Potential, um die Sensitivität und Lokalisationsgenauigkeit bei der Vor-Ort-TE-Messung von Kabelstrecken zu erhöhen. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit, die integrierten kapazitiven TE-Sensoren zur Beurteilung des Isolationszustands im Monitoringbetrieb einzusetzen. Für die Zustandsbeurteilung einer Kabelmuffe stellt die Temperatur einen weiteren wichtigen Parameter dar. Für den Online-Monitoringbetrieb zur Zustandserfassung ist es somit sinnvoll, die Kabelmuffe um Temperatursensoren zu ergänzen. Zur Beurteilung der von den Temperatursensoren erfassten Temperatur wird ein detailliertes thermisches Modell der Kabelmuffe benötigt. Die Entwicklung dieses thermischen Modells und der benötigten Sensorik sowie die Erweiterung der Kabelmuffe um eine Kommunikationsfunktion sollen Teil der Untersuchungen der kommenden Jahre sein und herkömmliche Kabelmuffen im Zeitgeist des IoT in ein intelligentes Betriebsmittel weiterentwickeln.

In order to verify the modelling approach the simulations results need to be verified by measurement. Fig. 4 shows the comparison of the measured transfer function of an integrated capacitive PD sensor with the simulations results. The measurement data was obtained from an early prototype of a joint with an integrated capacitive PD sensor. Additionally, the measurement sensitivity of the integrated PD sensor is determined through calibration measurement with an IEC 60270 conform calibrator using the integrated capacitive PD sensor as an external coupling capacitor, which can be compared to the conventional IEC 60270 PD-measurement setup. The potential sensitivity level is well below 5 pC. Fig 4 shows the result of the calibration measurement.

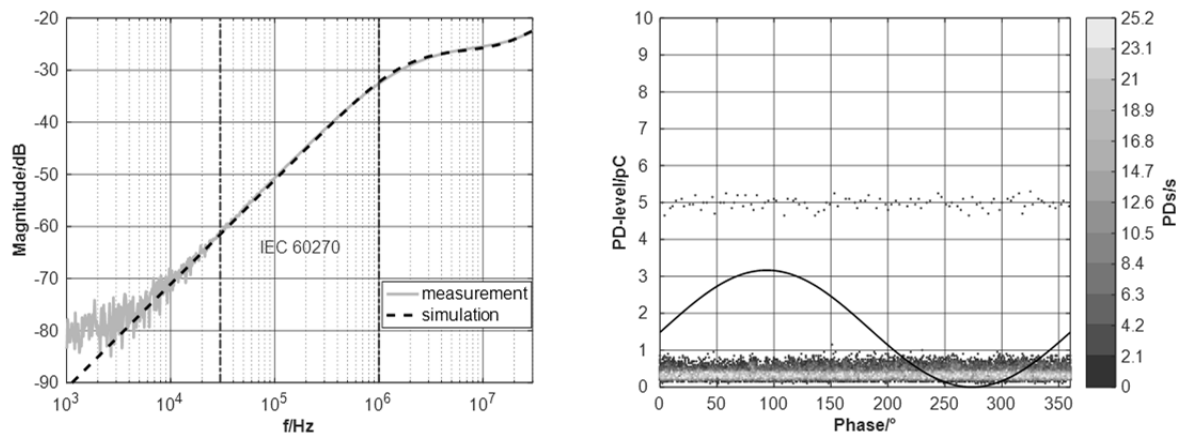


Fig. 4: Übertragungsfunktion des kapazitiven Sensors (links);
PRPD der Kalibrierungsmessung (rechts).
Left-hand side: transfer function of the capacitive sensor;
right-hand side: PRPD of the calibration measurement

■ Einfluss von Gleichströmen auf Transformatoren und induktive Stromwandler

M. Sc. Michael Schühle

Weltweit kommen bei der Erzeugung, dem Transport und Verbrauch von elektrischer Energie Wechselspannungen 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 GIC (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. In Fig. 1 ist die Entstehung eines GIC-Stroms verdeutlicht. Durch das auf der Erde vorherrschende magnetische Feld entsteht in Verbindung mit dem Wellenwiderstand der Erde ein geoelektrisches Feld. Über eine Freileitung und zwei im Sternpunkt geerdete Transformatoren kommt es zu einer Spannung U_{GIC} und infolge dessen zu einem Strom I_{GIC} durch die sich bildende Schleife aus Transformatoren, Freileitung und Erde.

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.

Durch den Gleichstrom kommt es im Eisenkern zu einer Verschiebung des magnetischen Flusses und dadurch zu einer einseitigen Sättigung. 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.

■ Influence of Direct Currents on Transformers and Inductive Current Transformers

M. Sc. Michael Schühle

Typically the worldwide power grids use alternating voltages. Voltages easily can be transformed, thus the AC system became more popular than the direct current (DC) system. So today we are using 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' which is caused by interferences between solar activities and your earth's magnetic field. Fig. 1 shows the principle genesis of a GIC. The source of a GIC is the variation of the magnetic field at the earth's surface. In combination with the earth's ground impedance the magnetic field results in an electric field at the surface. Within the electric circuit of two grounded transformers, a transmission line and the ground, the electric field causes a voltage U_{GIC} and thus a current I_{GIC} .

But there exist also human made DC currents. A very common use case for DC currents in conjunction with grounded electrodes is a cathodic corrosion protection system. Other human made DC current arise from high voltage direct current (HVDC) systems in close proximity to conventional AC systems, like on hybrid transmission lines. This is a present scenario in the network development plan of Germany.

The additional direct current in inductive assets with iron cores results in a shift of the magnetic core's flux. The saturation effects of the core lead to a deformation of the sinusoidal flux curve. This deformation causes a measurement error at the secondary side of current transformers.

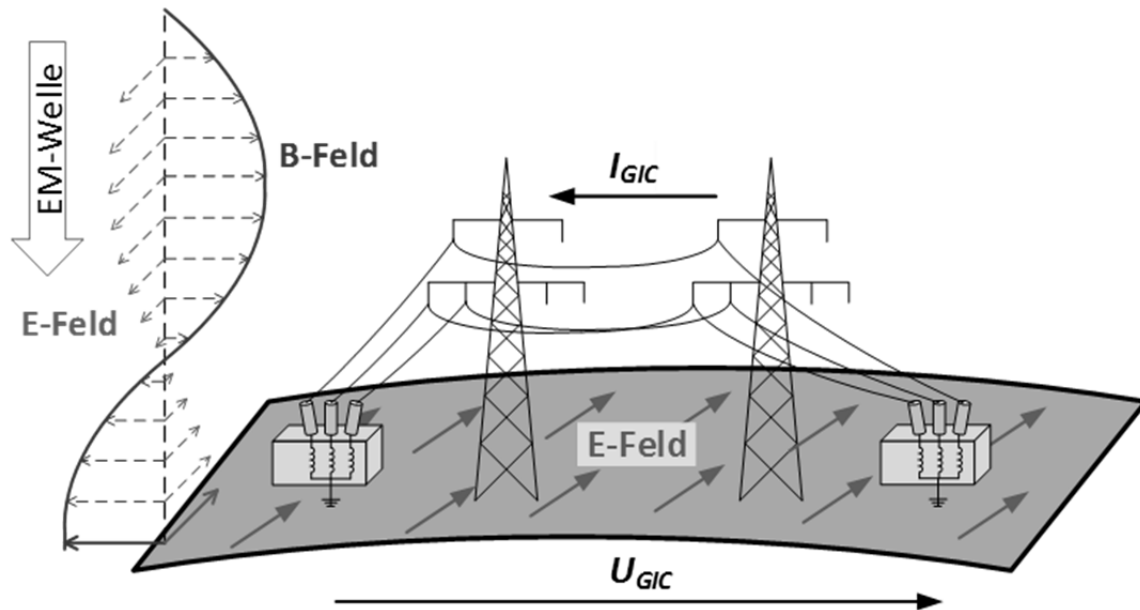


Fig. 1: Entstehung von GIC-Strömen durch ein senkrecht auf der Erdoberfläche stehendes Magnetfeld.
GIC induced by an electromagnetic field at the surface of the earth.

Fig. 2 zeigt den Einfluss des Gleichstroms auf die magnetische Flussdichte im Eisenkern. Die Gleichströme mit einer Amplitude von $I_{DC} = 0,1 A - 100 A$ führen zu einer zunehmenden, dauerhaften Verschiebung B_{Offset} . Der Peak-to-Peak-Wert der oszillierenden Flussdichte ΔB ist für alle Kurven identisch und zeitlich konstant.

Die in Fig. 2 gezeigten Kurven beziehen sich auf den Messkern 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.

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

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

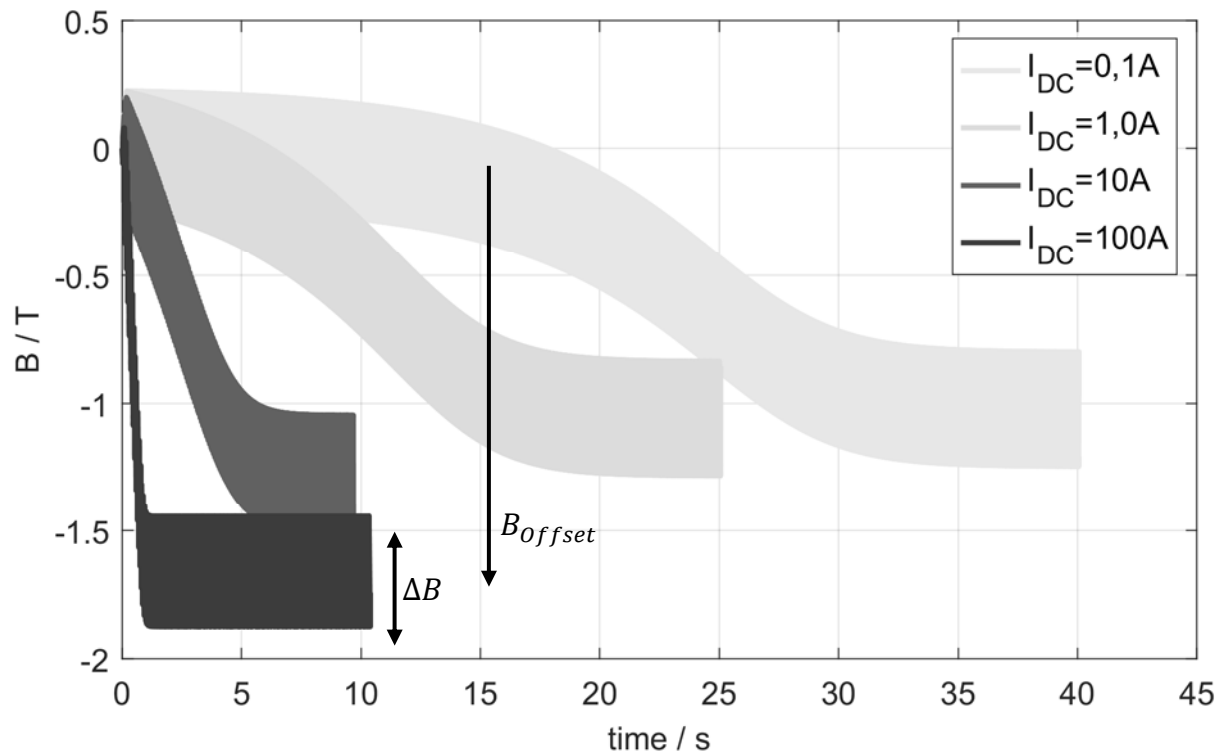


Fig. 2: Einfluss von parasitären Gleichströmen auf die magnetische Flussdichte im Eisenkern eines Stromwandlers.
Influence of parasitic direct currents on the magnetic flux density in iron cores of current transformers.

Fig. 2 shows the development of the magnetic field density depending on direct currents $I_{DC} = 0,1 \text{ A} - 100 \text{ A}$. The oscillating amplitude ΔB of every curve and at every time is the same. The shift of the magnetic flux depends on the parasitic DC. With larger direct currents the shift of the flux increases. The transient oscillation of the magnetic shift is also affected by the direct current's amplitude. With a larger DC amplitude the time constant decreases and a steady state is achieved earlier. Conversely, this means that measurement errors due to small DC amplitudes will appear with a delay of many seconds.

The curves showed in Fig. 2 are based on the simulation of a measurement current transformer without an air gap. But protection current transformers typically have an additional air gap inside the core. This air gap results in a distinctly decreased oscillating amplitude ΔB and magnetic shift B_{Offset} .

The influence of a parasitic DC on protection transformers with air gap is reduced in the same range and, therefore, the measurement error for parasitic DCs $I_{DC} < 10 \text{ A}$ 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 most valuable facilities in electric power networks and therefore, they should be carefully monitored in order to maintain the reliability of the transmission and distribution networks. One of the most important aspects of the transformer assessment is the detection of mechanical deformations and displacements of the windings, which can result from short circuits in the network as well as reduced clamping pressure due to insulation aging. Frequency response analysis (FRA) is a recently developed and a widely accepted tool to detect incipient winding deformation within power transformers. Previous studies on FRA topic lead to the standardization of the measurement procedures. However, the interpretation of FRA results is still a challenge. In literature, circuit models are proposed for interpretation of FRA results. These circuit models have many limitations and drawbacks due to difficulties in calculating detailed turn-based parameters.

In contrast, this contribution proposes a new method to obtain a turn-based high frequency (HF) model of transformer windings. For this purpose, a single-phase transformer is modelled with HV and LV windings as shown in Fig 1. The windings correspond to a medium voltage transformer of 1 MVA. The HV winding is a continuous disk winding (height = 865 mm) with 660 turns in 60 disks and the LV winding is a helical winding (height = 865 mm) with 24 turns and 12 parallel conductors in each turn. The model automatically calculates the frequency dependent parameters including inductances, capacitances and resistances using Finite Element Method (FEM). In the proposed model, FRA traces are directly derived from a HF finite element model without computing the circuit model, which is an important aspect, compared with the previous contributions. An experimental setup of LV and HV windings is employed in this research to validate the model.

To verify the accuracy of the model, first, simulation results are compared with experimental measurements for healthy windings as demonstrated in Fig. 2(a) and 2(b). Afterwards, a common mechanical fault, namely axial displacement (AD) in the HV winding, is applied to the experimental setup as well as the HF model as shown in Fig. 2(c) and 2(d). In order to show the reliability of the model in predicting the numerical indices for the FRA interpretation, different numerical indices are evaluated based on wide and short frequency bands, the results of correlation coefficient and standard deviation are presented in Fig. 2(e) and 2(f). Additionally, the proposed model is also useful to study the effects of windings electrical properties on the frequency response of transformer. These studies are the future steps to develop and enhance the application of the proposed HF transformer model.

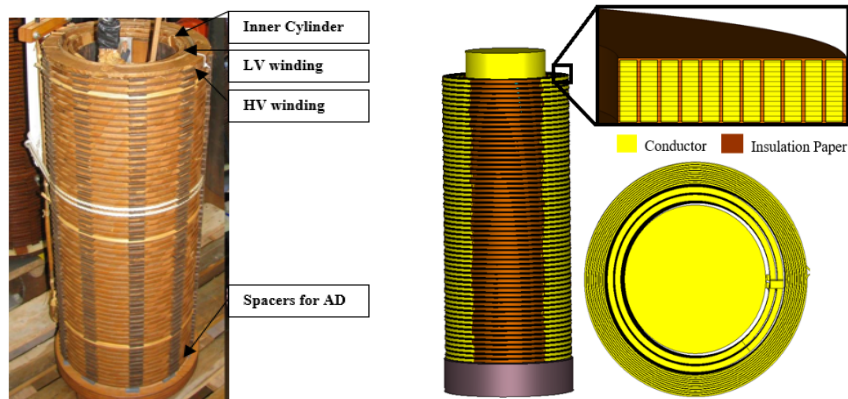


Fig. 1: Experimental and simulated model of HV and LV windings.

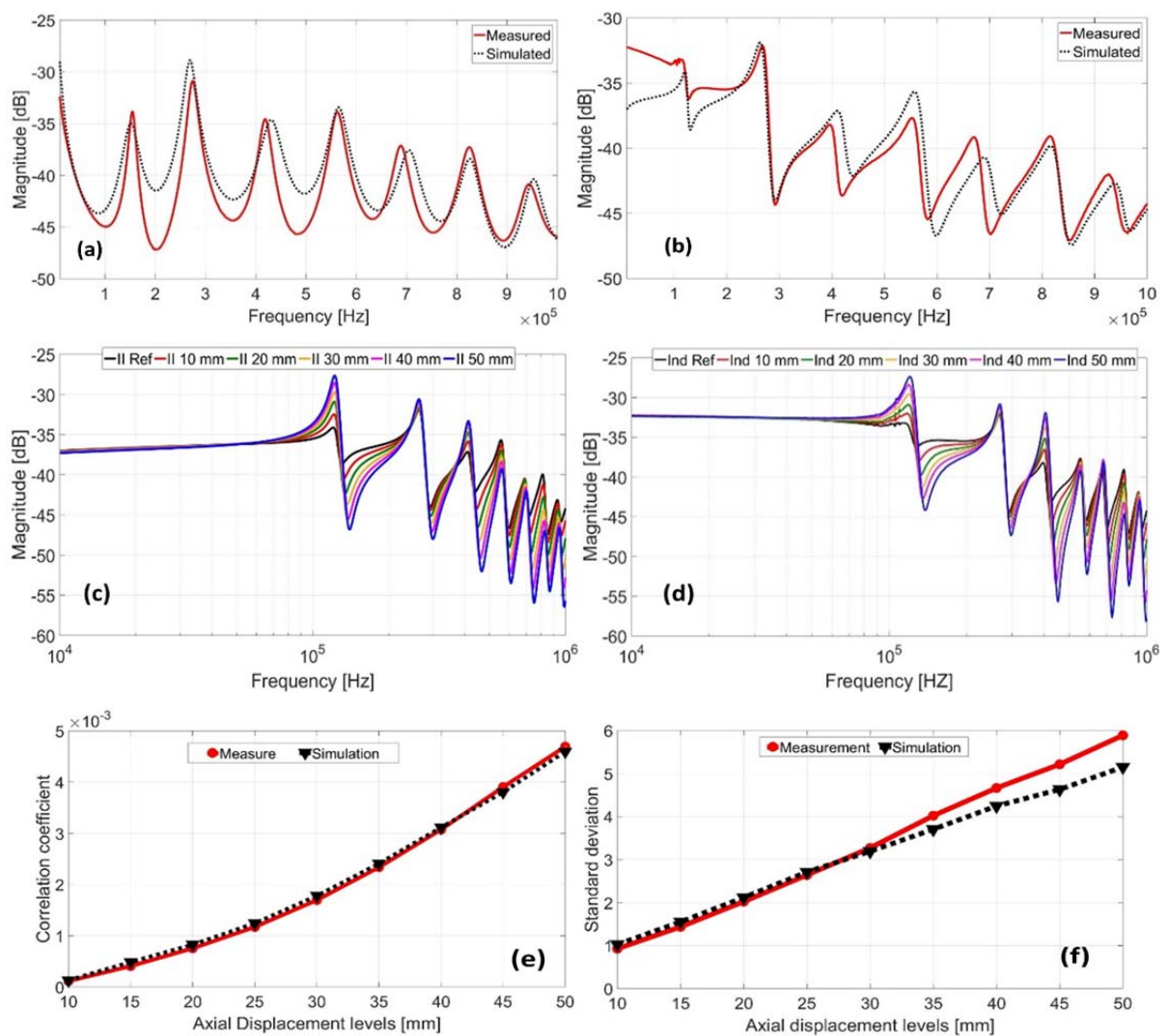


Fig. 2: Comparison of measured and simulated frequency responses of windings

(a) FRA traces of healthy winding, open circuit (OC)

(b) FRA traces of healthy winding, inductive inter-winding (IIW)

(c) Simulated FRA traces of axially displaced HV winding (IIW)

(d) Measured FRA traces of axially displaced HV winding (IIW)

(e) Correlation coefficient (CC) behaviour for different levels of AD

(f) Standard (SD) behaviour for different levels of AD

- **TE-Charakterisierung frei beweglicher Partikel in HVDC-GIS durch Kombination von UHF-Messtechnik, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und PSA-Analyse**

M. Sc. Philipp Wenger

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) gelten aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und langen Betriebserfahrung in Wechselspannungsnetzen als wesentliche Komponenten der Energieversorgung. Daher wird diese bewährte Technik auch vermehrt bei Gleichspannungsanwendung eingesetzt. Das dielektrische Verhalten von gasförmigen Isoliermedien in coaxialen Elektrodenanordnungen unter Gleichspannungsbelastung unterscheidet sich jedoch wesentlich vom Verhalten bei Wechselspannung. Der zuverlässige Einsatz elektrischer Betriebsmittel der Hochspannungstechnik setzt ein dauerhaft beständiges Isolationssystem voraus. Teilentladungen (TE) führen zum lokalen Zusammenbrechen eines kleinen Teils der Isolationsstrecke über einen kurzen Zeitraum. In GIS werden TE vor allem durch freibewegliche Metallpartikel verursacht, die während der Fertigung, der Montage aber auch während des Betriebs (z.B. durch mechanischen Abrieb bei Schalthandlungen) in die Anlage gelangen. Die Feldstärke, bei der das Partikel abhebt und zwischen Kathode und Anode springt, hängt von seiner geometrischer Form und seiner Masse ab. Neben der Bewegung von einer Elektrode zur anderen, können weitere Bewegungsformen, wie beispielsweise das sogenannte Firefly auftreten. Bei Firefly bewegt sich das Partikel mit oszillierenden Sprüngen in kleinem Abstand an der negativen Elektrode und emittiert Licht- und TE-Impulse. Der Übergang zwischen den einzelnen Bewegungsarten ist fließend und wird im Wesentlichen von der Höhe und Polarität der angelegten Gleichspannung bestimmt. Unabhängig von der Wahl des Isolationsmaterials werden beim Auftreten von TE elektromagnetische Impulse emittiert. In SF₆ können TE-Impulse breitbandig sein und hochfrequente Spektralanteile über 10 GHz besitzen, die mittels der UHF-Messtechnik erfasst werden können. In den durchgeführten Untersuchungen werden die Partikelbewegungen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Teilentladungsaktivität betrachtet.

Fig. 1 zeigt das UHF-TE-Signal eines zylinderförmigen Partikels während der Fireflybewegung mit Sprungamplituden, bei denen es sich bis zu einigen Millimeter von der negativen Elektrode entfernt. Bei dieser Form der Bewegung entstehen eine V-förmige Impulsfolge des TE-Signals. Je näher das Partikel der Elektrode kommt, desto kleiner wird die Impulsamplitude und desto größer die Impulswiederholrate. Während das Partikel die Elektrode berührt werden keine TE-Impulse detektiert. Darüber hinaus kann aus den zeitsynchron aufgezeichneten Kamerabildern geschlossen werden, dass die TE-Impulse aussetzen, sobald das Partikel sich weiter als 0,5 mm von der Elektrode entfernt hat.

- **Combined Characterization of Free-moving Particles in HVDC-GIS using UHF PD, High-speed Imaging and Pulse-Sequence Analysis**

M. Sc. Philipp Wenger

Gas-insulated switchgear (GIS) are considered essential components of the power supply grid due to their high reliability and long operating experience in the AC grid. Therefore, this well-proven technology is also used increasingly in DC voltage applications. However, the dielectric behavior of gaseous insulations in coaxial electrode arrangements differs significantly under DC field stress from the behavior under AC. Defects in HV insulation often result in partial discharges (PD) which can lead to deterioration of the insulation withstand strength and which may trigger a breakdown and overall failure of the entire insulation system. In GIS, metal free-moving particles are a major source of PD. These get into the GIS during manufacturing and assembly, but may also be generated during operation (for example, from mechanical abrasion during switching operations).

The electric field strength at which a free moving particle lifts off and jumps between the cathode and the anode depends on its geometry and mass. In addition to the alternating motion from one electrode to another, other forms of motion may occur, such as 'firefly', characterized by a rapid oscillating motion of the particles in the close vicinity of one electrode, accompanied by light emission and PD. The transition between the individual types of motion is continuous and is affected by the amplitude and polarity of the applied DC voltage.

The occurrence of PD in any kind of electrical insulation is associated with the emission of electromagnetic pulses. The pulse amplitude and the repetition rate depends on the trajectory and the relative position of the particle with respect to the electrodes. In SF₆, the fast rise-time PD pulses produce RF (radio-frequency) spectral components in excess of 10 GHz, allowing them to be measured using UHF techniques.

Fig. 1 shows the UHF signal of a wire-shaped particle performing a firefly movement with large bouncing amplitudes. The particle moves just few millimetres away from the negative electrode. This mode of motion results in the bursts of UHF pulses with a particular V-shaped as shown in the figure. The closer the particle is at the electrode, the smaller the amplitude of the individual PD pulses and the higher the pulse repetition rate. By the time the particle touches the electrode, no PD pulses are measured. Based on the camera images combined with the UHF measurements, it is considered that no PD pulses occur at distances greater than 0.5 mm for wire-shaped particles of 4 mm length undergoing firefly motion.

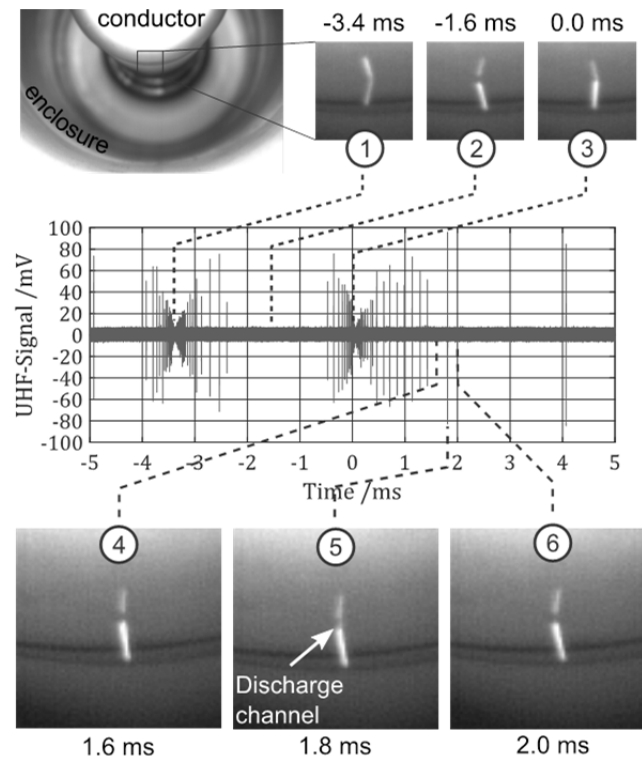


Fig. 1: Korrelation des Bewegungsmusters und des UHF-TE-Signals eines 4 mm langen, zylinderförmigen Partikels während der Fireflybewegung mit großen Sprungamplituden bei $U_{DC} = -230$ kV.
Correlation of particle motion and UHF-PD pulses from a 4 mm wire-shaped particle during large jumping firefly motion at $U_{DC} = -230$ kV.

Entscheidend für die Entstehung und die Intensität von Teilentladungen an den Partikelspitzen ist das vorherrschende lokale elektrische Feld. Ist die kritische elektrische Feldstärke der Isolierstrecke überschritten, kommt es zu einem raschen Anstieg der Ladungsträger in diesem Bereich. Das resultierende elektrische Feld setzt sich aus der Überlagerung des angelegten Gleichfelds und die durch vorangegangenen Teilentladungen gebildeten Raumladungszonen zusammen. Nachfolgende TE-Impulse werden deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit von vorangegangenen Impulsen maßgeblich beeinflusst.

Die Puls-Sequenz-Analyse (PSA) ist ein geeignetes Werkzeug, um die im Zeitbereich gemessenen Signale der Teilentladungsaktivität visuell darzustellen. In Fig. 2 ist die Pulssequenz, die aus dem UHF-TE-Signal bei Fireflybewegung extrahiert wird graphisch dargestellt. Zu jedem Impuls mit der Amplitude p wird auch die Amplitude des Nachfolgepulses p_{nach} und der zeitliche Abstand Δt_{nach} bestimmt. Mit Hilfe von PSA-Diagrammen werden die TE-Impulse visualisiert, um den Benutzer, ähnlich dem PRPD bei AC-TE-Messungen, bei der Defekterkennung zu unterstützen. Die PSA-Diagramme der drei Firefly-Bewegungsmuster zeigen eindeutige Merkmale, die zu einer Klassifizierung herangezogen werden können. Die Auswertung zeigen, dass kleinste Änderungen im Bewegungsmuster im UHF-TE-Signal erkennbar sind und anhand der PSA-Methode separiert, statistisch gewichtet und visuell dargestellt werden können.

The prevailing local electric field represents the main driver for the generation and intensity of partial discharges at particle tips. If the critical electrical field strength of the insulation is exceeded, there is a rapid increase in the charge carriers in this area. The resulting electric field is composed of the superposition of the applied DC field and the space charge region formed by previous partial discharges. Successive PD pulses are, therefore, influenced by previous pulses.

Pulse sequence analysis (PSA) is a suitable tool for visual evaluation of partial discharge signals at DC voltage. Fig. 2 shows the evaluation of the pulse sequence, extracted from the UHF-PD-signal measured at Firefly. The amplitude of the first pulse p , the successor pulse p_{suc} and the time delay Δt_{suc} are determined for each pair.

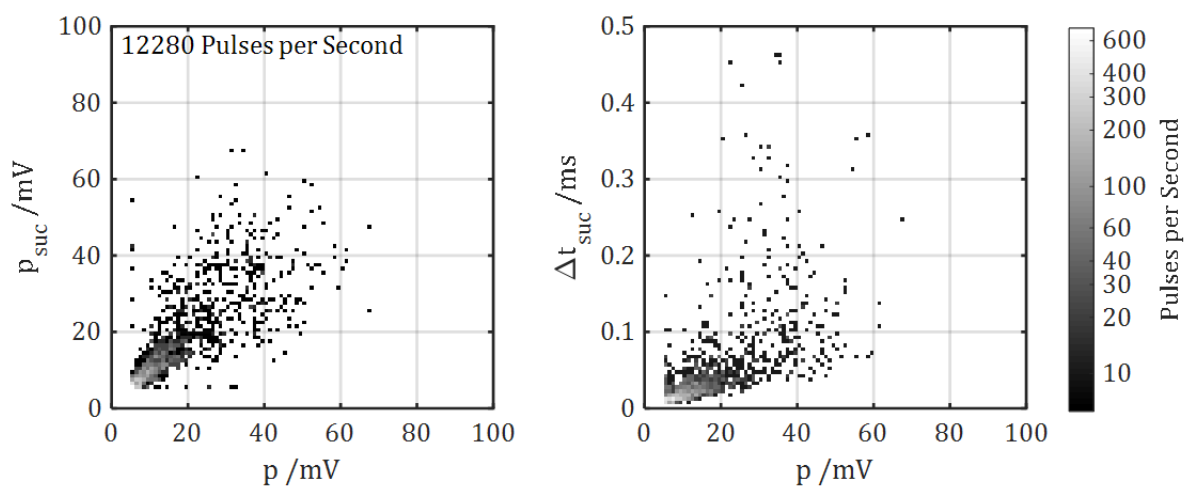


Fig. 2: PSA-Muster eines zylinderförmigen Partikels während der Firefly-Bewegung mit großen Sprungamplituden bei $U_{\text{DC}} = -230$ kV.
PSA-pattern of a wire-shaped particle during firefly with large jumping amplitudes at $U_{\text{DC}} = -230$ kV.

With the aid of PSA diagrams, PD pulses are evaluated in order to support the user in defect detection and determination, as is similarly done using the well-known PRPD pattern in AC-PD measurements. The PSA diagrams of different firefly motion patterns show unique features that can be used for classification. The presented measurements strongly indicate that small differences in the motion behavior of free moving particles can be separated, statistically evaluated and represented by combining the UHF-PD measuring method and the PSA method.

5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

■ Forschungsprojekt „grid-control“

Laufzeit: Juli 2015 – Dezember 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.

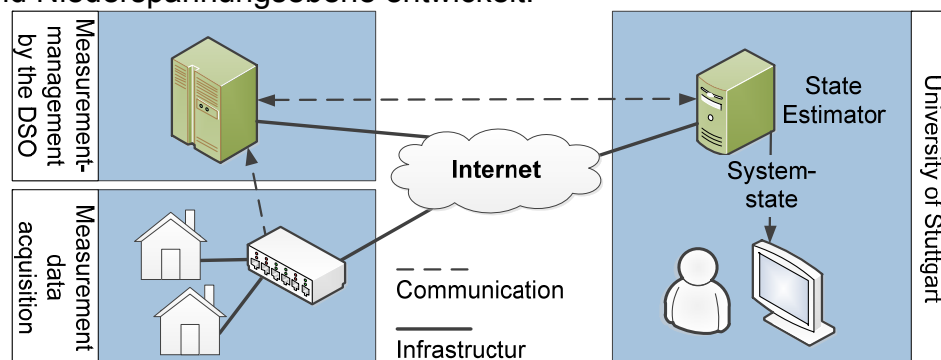


Fig. 1: Konzept zur Einbindung der Zustandsschätzung.
Concept of embedding the state estimation

■ Research Project “grid-control”

Period: July 2015 – December 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:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

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



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

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Konsortialtreffen in Heidelberg

■ Research Project “CALLIA”

Period: July 2016 – March 2019

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

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

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

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag



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

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

Laufzeit: September 2016 – Juni 2019

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



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

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

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

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

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

Period: September 2016 – June 2019

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

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

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

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

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

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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 criteria in order to optimize operation. By internal management of each cell and communication between the cells as a network, a more robust power supply infrastructure is possible. This allows a more optimized integration of renewable and decentralized energy generation.



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

In the 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:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Period: April 2017 – March 2020

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

The main tasks are as follows:

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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

Laufzeit: Juni 2017 – Mai 2020

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

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

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

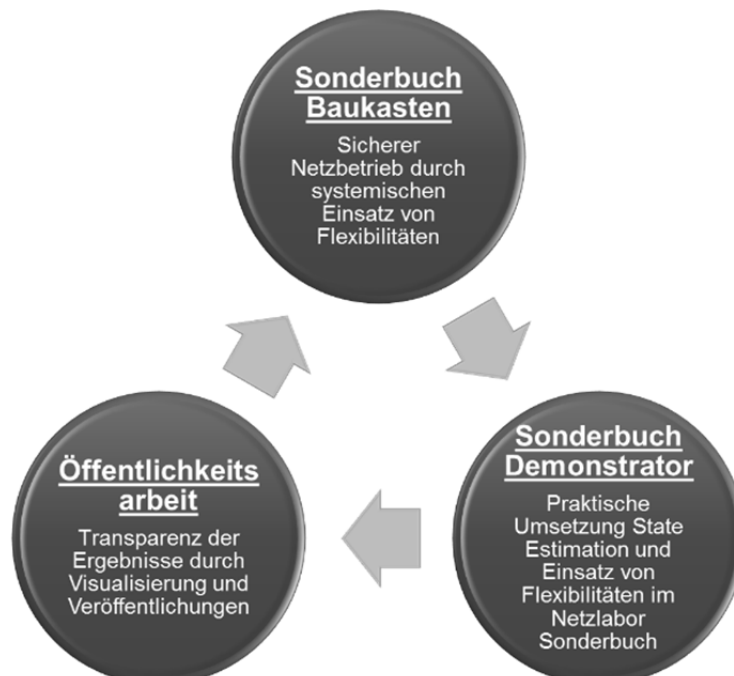


Fig. 1: Schwerpunkte des Forschungsprojekts.
Main focuses of the research project.

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

Period: June 2017 – May 2020

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

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

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

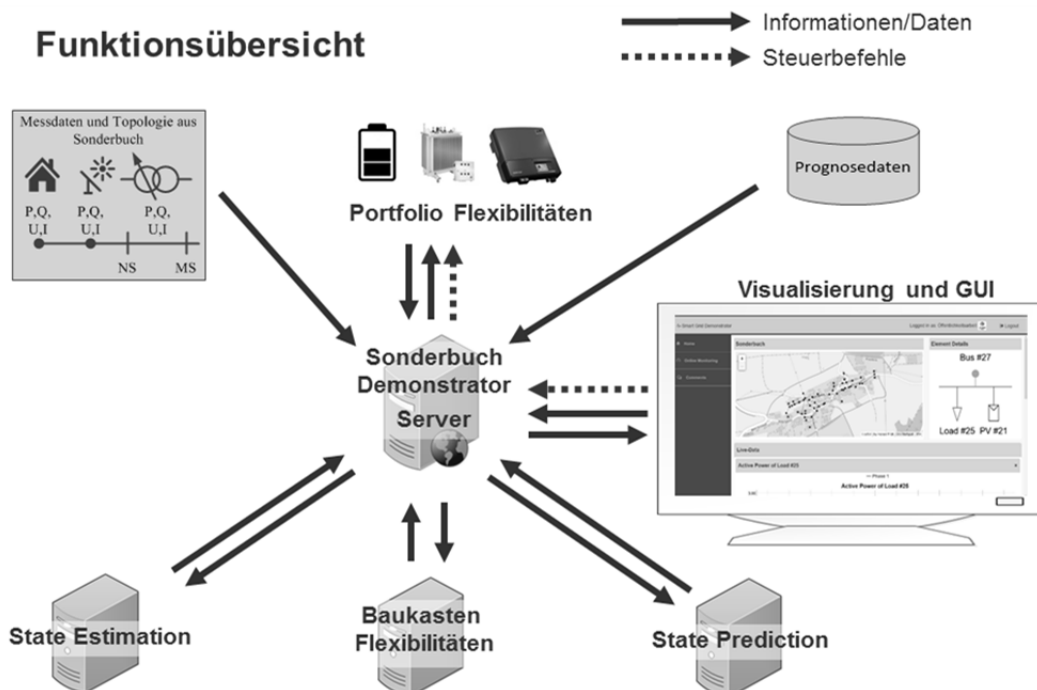


Fig. 2: Projektbausteine und deren Kopplung.
Project blocks and their coupling.

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

Laufzeit: Juli 2018 – Dezember 2020

Bei Logistikzentren kann man davon ausgehen, dass einzelne Prozesse, wie z.B. das Laden elektrischer Gabelstapler, zeitlich verschoben werden können und somit ein Potential zur Flexibilisierung vorhanden ist. Um das Potential zu quantifizieren sind jedoch zunächst detaillierte Messungen der elektrischen Verbräuche der einzelnen Prozesse, wie sie im Projekt FELSeN vorgesehen sind, notwendig. Ziel des Projektes ist, die Flexibilitätspotenziale von Logistikzentren zu erschließen und einen netzdienlichen Einsatz dieser Flexibilitäten zu ermöglichen. FELSeN ist eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart (IFT), dem IEH, dem Verteilnetzbetreiber Netze BW GmbH und der Häfele GmbH & Co KG.



Im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie erfolgt eine Untersuchung des Einflusses einer Elektrifizierung der Personen- und Lastkraftfahrzeuge auf das Flexibilitätspotenzial eines Logistikzentrums. Diese Untersuchung erfolgt zwar am Beispiel des Logistikzentrums der Firma Häfele GmbH & Co KG, jedoch sind insbesondere die Ergebnisse der Personenkraftfahrzeuge übertragbar auf sämtliche Produktionsstandorte, bei denen die Mitarbeiter mit dem Auto die Arbeitsstelle erreichen. Insbesondere das Ableiten von Anschlussrichtlinien für die Einbindung einer Ladeinfrastruktur



Logistikzentrum der Firma Häfele in Nagold

in einem intelligenten Energiemanagementsystem stellt einen großen Mehrwert für viele Firmen in Baden-Württemberg dar. Das Projekt FELSeN hilft dabei, die Netzeintegration der Elektromobilität in Baden-Württemberg zu verbessern um damit ebenfalls die Akzeptanz dieser Technologie zu erhöhen.



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

- **Research Project „FELSeN”:
Flexibility Potential of Logistic Centers to provide
Ancillary Services in Power Grids**

Period: July 2018 – December 2020

Nowadays, in the case of logistics centers, it can be assumed that individual processes, e.g. the loading of electric forklifts, can be postponed and thus a potential for flexibility can be opened. However, in order to quantify this potential, detailed measurements of the electrical consumption of the individual processes are necessary. Obtaining these measurements of the individual consumptions within the logistic center are a key component within the FELSeN project. One aim of the project is to tap into the flexibility potential of logistics centers and to enable the use of these flexibilities to provide ancillary services to the distribution grid. FELSeN is a cooperation between the Institute for Materials Handling and Logistics of the University of Stuttgart (IFT), the IEH, the distribution system operator Netze BW GmbH and the Häfele GmbH & Co KG.



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



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

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

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

M. Sc. Manswet Banka

Die herkömmlichen Konzepte zum Netzwiederaufbau betrachten dezentrale Erzeugungsanlagen (DEA) auf Grund ihrer Vielzahl und des volatilen Charakters kaum. In modernen Konzepten geschieht allerdings ein Umdenken. Der Wiederaufbau des Systems kann nicht nur von den höheren zu den niederen Spannungsebenen erfolgen, sondern auch umgekehrt. Diese Konzepte basieren auf der Aufteilung des Netzes in stabile Inseln, die die meisten ihrer Kunden weiter versorgen können. Nach der Fehlerbeseitigung haben die Inselnetze die Möglichkeit, sich wieder mit dem Verbundsystem zu synchronisieren oder sogar Leistung einzuspeisen und so Energie zur Resynchronisation der abgeschalteten thermischen Kraftwerke bereitzustellen. Solche Strategien werden als "Bottom-Up" oder "Build-together" bezeichnet.

Schon heute gibt es Regionen in Deutschland, in denen die lokale Erzeugung den Verbrauch auf Verteilnetzebene übersteigt. Mit der richtigen Koordination bietet dies die Möglichkeit eines Inselbetriebes und somit einer Umsetzung der Build-Together-Strategie. Im Süden Deutschlands besteht der Großteil der RES aus PV-Anlagen, wobei mehr als 50 % der Leistung auf den niederen Spannungsebenen installiert sind. Eine Koordination der Anlagen auf NS-Seite ist nicht praktikabel, ihre aggregierte Reaktion auf die Systemfrequenzänderungen muss jedoch berücksichtigt werden.

Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der Build-Together-Strategie ist somit, die Teilnetzbetriebsfähigkeit einzelner Netzregionen zu realisieren. Die Verantwortung für die komplexen Aufgaben der Koordination eines solchen Systems könnte das entwickelte Multi-Agenten (MA)-basierte System übernehmen (Fig. 1). Das MA-System übernimmt die Steuerung der DEA auf Mittelspannungsebene. Die Ziele der Agenten ändern sich je nach Netzzustand. Während des Verbundbetriebs versuchen die Agenten, ihre Versorgung entsprechend ihrer Fähigkeiten und ihrer Primärenergiequellen, wie bspw. durch Wind oder PV-Einstrahlung, zu maximieren. Im Teilnetzbetrieb werden die Agenten vom Koordinator-Agent informiert und ändern ihre Ziele, um den Betrieb durch das Abfangen der Volatilitäten der einzelnen Niederspannungsabgänge, die den Teilnetzbetrieb eventuell nicht erkannt haben, zu stabilisieren. Der Koordinator-Agent führt den Resynchronisationsprozess des Teilnetzes mit dem restlichen Verbundnetz durch. Wenn der Fehler behoben ist, stellt dieser einen Wirk- und Blindleistungsfluss über den HS/MS-Transformator gemäß den Anforderungen des Systembetreibers und den im Netz verfügbaren Flexibilitäten bereit.

■ **Multi-Agent Based Operation of a Distribution Grid During a Disturbance in the Bulk System**

M. Sc. Manswet Banka

Although nowadays the DER are not involved in the coordinated system restoration due to their multitude and volatile nature, the modern concepts change the paradigm of reenergizing the system from higher to lower levels and take advantage of DER presence. These concepts base on the division of the power system into stable islands which stay energized and can supply most of their customers with power. After fault clearance they could reconnect to the bulk or even energize the lines and provide the needed energy for resynchronization of the disconnected thermal power plants. These strategies are referred to as “bottom up” or “build together”.

Today there are regions in Germany where the local generation exceeds the consumption at the distribution level. With a proper coordination this offers the possibility of islanded operation and thus an implementation of the build together strategy. In the southern part of the country most of the RES comprise PV systems, whereas more than 50 % of capacity is installed at low voltage level. Coordination of the devices at LV is not feasible but their aggregated response to the system frequency changes has to be taken into account.

As already mentioned, the prerequisite for the successful implementation of the build together strategy is islanding capacity of some of the grid regions. The responsibility of the complex task to coordinate such a system might be taken by the developed multi-agent (MA) based system (Fig. 1). The MA system takes responsibility for the control of the DER at medium voltage level. Agents' objectives change depending on grid state. During the interconnected operation the agents try to maximize their supply according to their capabilities and prime energy source. In islanding mode, the agents are informed by the coordinator agent and they change their objectives in order to help stabilize the operation and smooth out volatilities coming from the low voltage feeders which may not be aware of the islanded operation. The coordinator agent conducts the resynchronization process of the island when the fault is cleared and provides active and reactive power flow over the HV/MV transformer according to the demand of the system operator and flexibilities located in the grid.

Thanks to the combination of the control system based on the MA architecture and flexible DERs, like biogas power plant, battery storage systems or PV, the autonomous operation of the islanded grid and automated resynchronization with upper grid levels during system restoration is possible, which helps shorten the duration of the restoration process and increases the overall system reliability.

Durch die Kombination des auf der MA-Architektur basierenden Steuerungssystems und flexibler DEA wie Biogaskraftwerk, Batteriespeichersysteme oder PV, ist der autonome Betrieb des Teilnetzes und eine automatisierte Resynchronisation mit den oberen Netzebenen bei einem Netzwiederaufbau möglich, was wiederum hilft, den Prozess zu verkürzen und die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen.

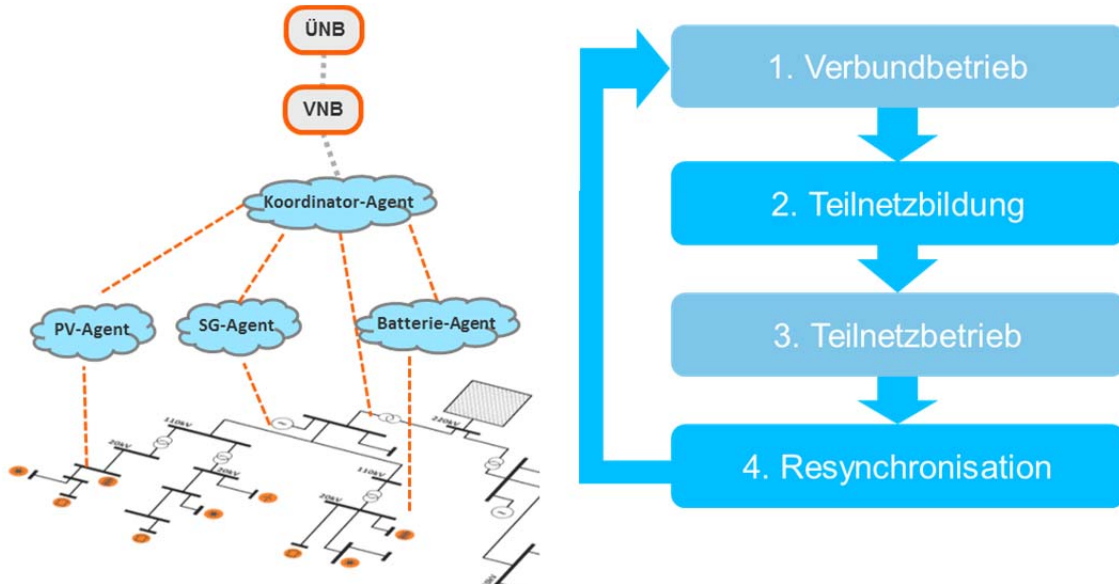


Fig. 1: Struktur des analysierten Systems (links) und allgemeines Zustandsdiagramm des Mittelspannungsnetzes (rechts).
The structure of the analyzed system (left) and the state diagram of the medium voltage grid (right).

■ **Analyse der Microgrid Resynchronisation mit Hilfe einer PHIL-Simulationsumgebung**

M. Sc. Matthias Buchner

Das Microgrid-Konzept zieht viel Aufmerksamkeit auf sich, da es als ein vielversprechender Weg zur Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen eingeschätzt wird. Ein Microgrid ist eine lokale Gruppierung von Energieerzeugern und Verbrauchern, die im Verbund mit dem Versorgungsnetz oder eigenständig als Insel betrieben werden können. Um eine unterbrechungsfreie und zuverlässige Versorgung gewährleisten zu können, ist ein sanfter Übergang vom Insel- in den Verbundbetrieb erforderlich. Um dies gewährleisten zu können, müssen vor der Resynchronisation die Frequenz, die Spannung und die Phasenlage des Microgrids mit der des Versorgungsnetzes angeglichen werden werden.

Die Auswirkungen einer nicht synchronen Resynchronisation des Microgrids mit dem Versorgungsnetz können mit Hilfe einer Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulationsumgebung untersucht werden.

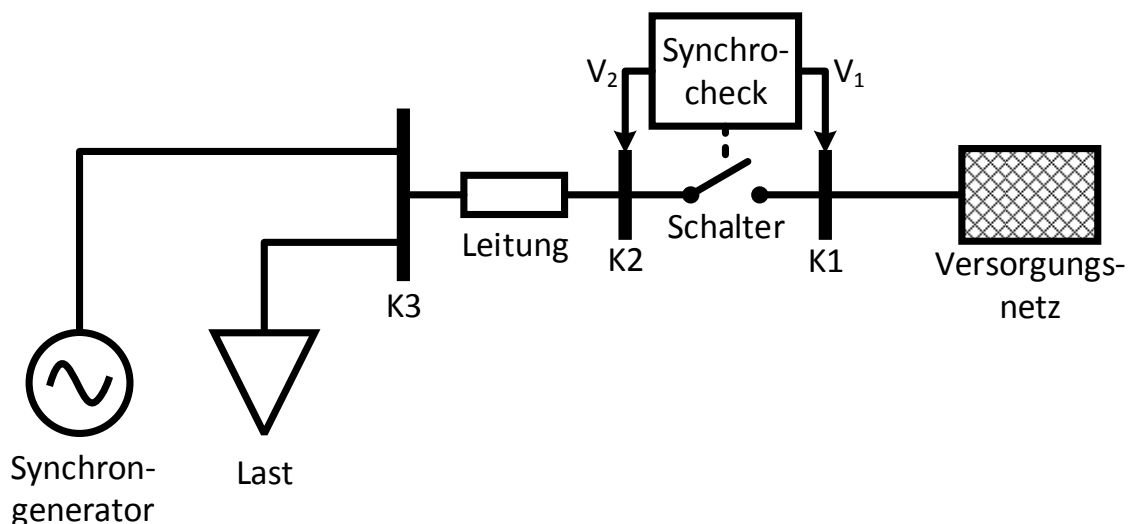


Fig. 1: Versuchsaufbau für die Resynchronisation.
Experimental setup for resynchronization.

Das Versorgungsnetz in Fig. 1 wird hierbei durch einen 15 kVA-Linearverstärker simuliert, der eine flexible Anpassung der Frequenz, der Spannung und des Phasenwinkels ermöglicht. Für die Simulation der Last im Microgrid wird eine leistungselektronische, dynamische Last mit einer Leistung 15 kVA verwendet, wodurch die Wirk- und Blindleistung im Microgrid flexibel angepasst werden können.

■ **Analysis of Microgrid Resynchronisation using PHIL Simulation Environment**

M. Sc. Matthias Buchner

The Microgrid concept attracts much attention as it is seen as a promising way to integrate distributed generation. A Microgrid is a local grouping of energy producers and consumers which can be operated in connection with the external grid or independently as an island. In order to guarantee an uninterrupted and reliable supply, a smooth transition from island to interconnected operation is required. In order to ensure this, the frequency, voltage and phase of the microgrid must be adjusted to that of the external grid before the resynchronization.

The effects of a non-synchronous resynchronization of the Microgrid with the external grid can be investigated with the help of a Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) simulation environment.

The external grid in Fig. 1 is simulated by a 15 kVA linear amplifier, which allows a flexible adjustment of frequency, voltage and phase angle. For the simulation of the load in the Microgrid, a power electronic, dynamic load with a power of 15 kVA is used, whereby the active and reactive power in the Microgrid can be flexibly adapted. To synchronize the Microgrid with the external grid under different conditions Voltage, frequency and angle differences are separated by a circuit breaker which is switched by a mains protection device with synchronous check capability. The synchrocheck compares the voltage on both sides of the switch and switches it when the synchronization parameters are reached. A synchronous generator with a power of 5.5 kVA is used as the grid-forming unit in the Microgrid.

Zur Synchronisation des Microgrid mit dem Versorgungsnetz bei verschiedenen Spannungs-, Frequenz- und Winkeldifferenzen wird ein Trennschalter verwendet, welcher von einer Netzschutzeinrichtung mit Synchroncheck-Fähigkeit geschaltet wird. Der Synchrocheck vergleicht die Spannung auf beiden Seiten des Schalters und schaltet diesen bei Erreichen der Synchronisationsparameter. Als netzbildende Einheit im Microgrid wird ein Synchrongenerator mit einer Leistung von 5,5 kVA verwendet.

Die Auswirkungen einer Resynchronisation bei einer Phasendifferenz von $\Delta\varphi = 37^\circ$ lässt sich in Fig. 2 beobachten. Spannung und Frequenz von Microgrid und Versorgungsnetz sind in diesem Fall gleich, und der Synchrongenerator ist unbelastet. Der Leistungsschalter wird bei $t = 8 \text{ ms}$ geschlossen. Es kommt zu hohen Spannungsspitzen, und die Ströme steigen kurzzeitig bis auf das 5-fache des Nennstromes. Auch die Leistung steigt auf das 3-fache der Nennleistung. Die Auswirkung einer wachsenden Phasendifferenz mit zusätzlichen Spannungs- und Frequenzdifferenzen soll in weiteren zukünftigen Versuchen untersucht werden.

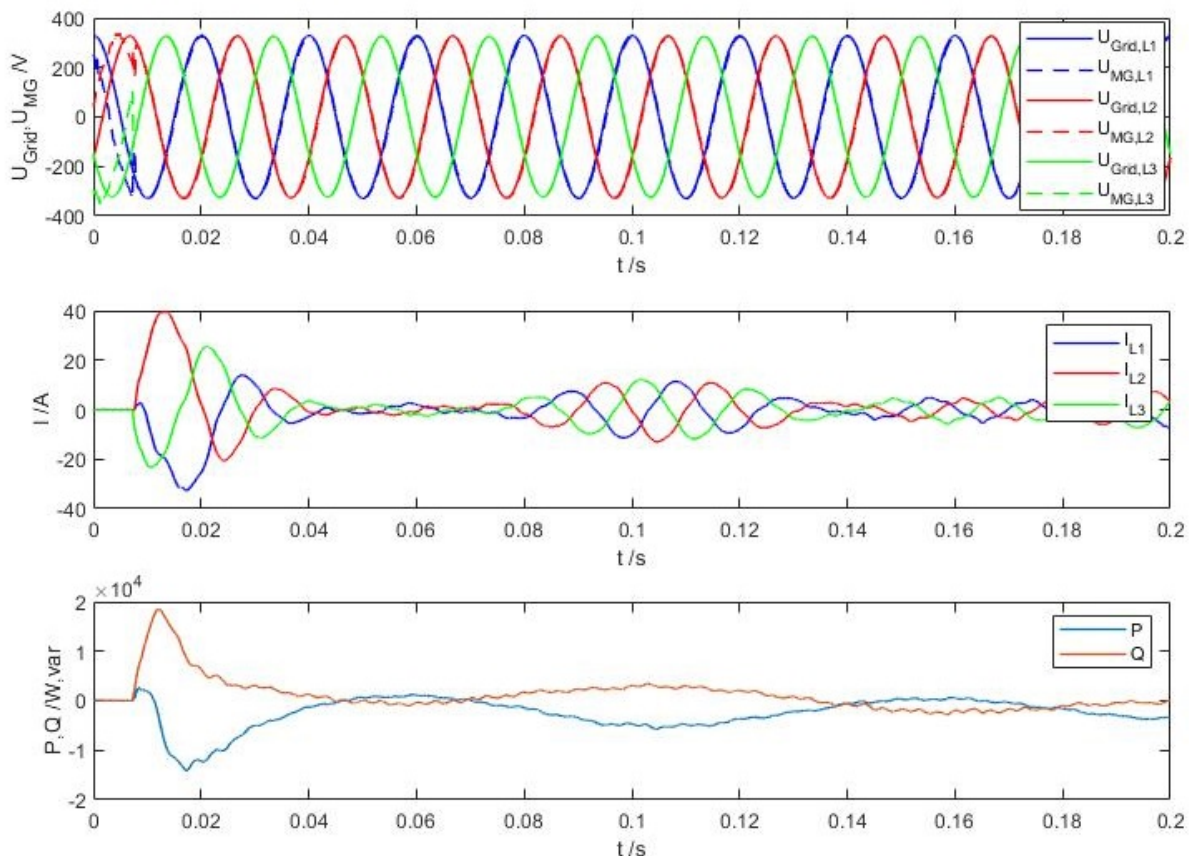


Fig. 2: Resynchronisation von Microgrid und Versorgungsnetz bei einer Phasendifferenz von $\Delta\varphi = 37^\circ$.

Resynchronization of microgrid and external grid (difference $\Delta\varphi = 37^\circ$).

The effects of resynchronization with a phase difference of $\Delta\varphi = 37^\circ$ can be observed in Fig. 2. In this case the voltage and also the frequency of the Microgrid and the external grid are the same and the synchronous generator is unloaded. The circuit-breaker is closed at $t = 8\text{ ms}$. This results in high voltage peaks due to the non-synchronous resynchronisation. The currents rise briefly up to 5 times the rated current and also the power rises to more than 3 times the rated power. The effect of a growing phase difference with additional voltage and frequency differences will be investigated in future experiments.

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

M.Sc. Daniel Contreras

Verteilnetze entwickeln sich aufgrund eines enormen Zuwachses an erneuerbarer Energieerzeugung von ihrem traditionellen passiven Charakter hin zu einem aktiven. Der traditionelle "Fit-and-forget"-Ansatz wird durch eine aktive Rolle der Netzbetreiber ersetzt, wofür genauere Kenntnisse über den Zustand des Netzes notwendig sind. Folglich wird erwartet, dass die Anforderungen an die Bereitstellung von Flexibilitäten zunehmen, um bei betrieblichen Aufgaben im Netz, wie z. B. Engpassmanagement oder Spannungshaltung, helfen zu können. Um diese Flexibilitäten optimal nutzen zu können, muss die Kommunikation und Koordination zwischen Netzbetreibern (insbesondere zwischen Verteilnetzbetreiber (VNB) und Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)) verbessert werden. Jeder der vier ÜNB in Deutschland muss mit mehr als hundert unterschiedlichen VNB zusammenarbeiten, die innerhalb ihrer Regelzonen verbunden sind. Ein solches Szenario erschwert es den Akteuren, ein angemessenes Koordinationsniveau zu erreichen. Unterschiedliche ÜNB-VNB Koordinationsschemas wurden bereits untersucht, 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 Koordinationsschemas meist unpraktisch, und neue Alternativen sind erforderlich.

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

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

M. Sc. Daniel Contreras

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

This research focuses in the development of a method that performs the aggregation of the flexibility that a distribution grid can provide at a single interconnection point to the transmission grid. The proposed method is based on a linear OPF with the limits of the flexibility providing units (FPU) as input. Any decentralized generating unit, storage system or controllable load that can provide flexibility to an electrical grid can be considered as a FPU. Such a formulation of the problem requires a detailed knowledge of the grid topology, as well as the grid constraints, adding an additional challenge that needs to be faced. The concept can be extended to incorporate time-series of generation of load, where the process is repeated for each time step. A schematic representation of the aggregation concept with inclusion of time series is shown in Fig. 1.

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

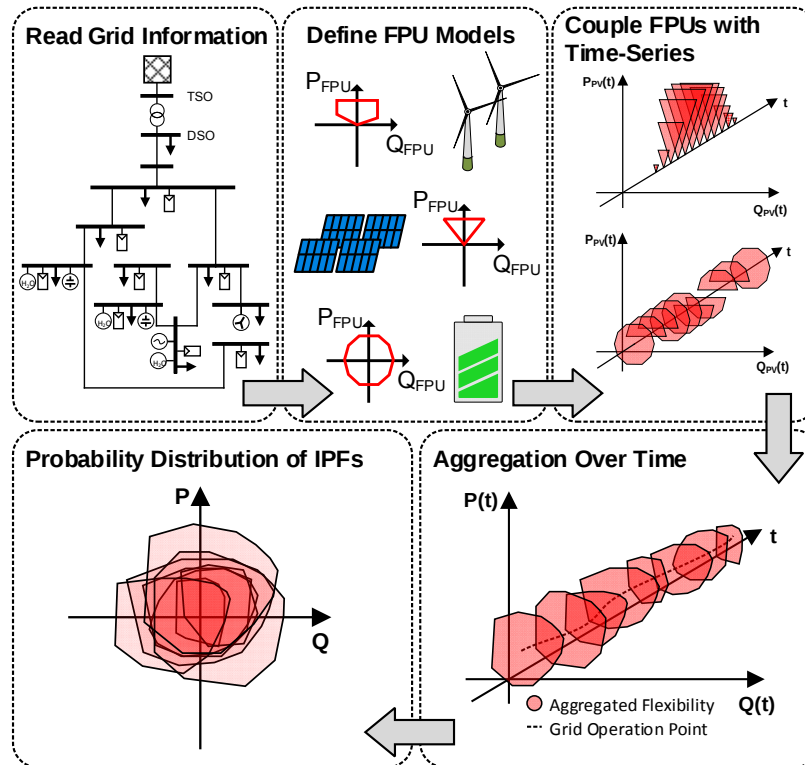


Fig. 1: Schematische Darstellung des Aggregationsalgorithmus mit Zeitreihen.
Schematic representation of the aggregation algorithm with time-series.

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

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

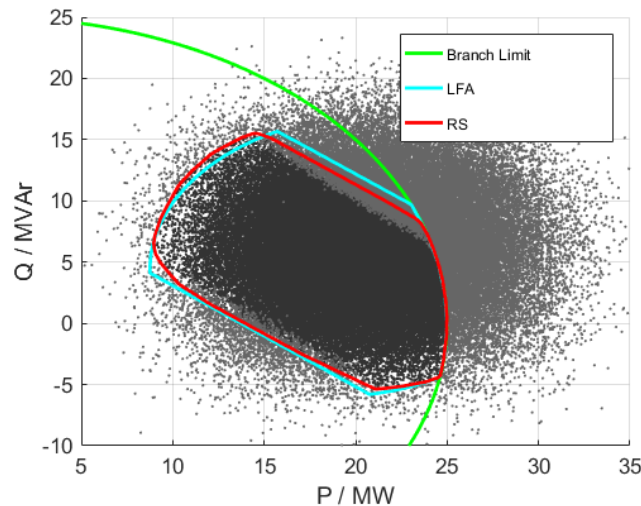


Fig. 2: Vergleich des linearen Aggregationsverfahrens mit dem Stichprobenverfahren.
Comparison of the linear aggregation method with random sampling approach.

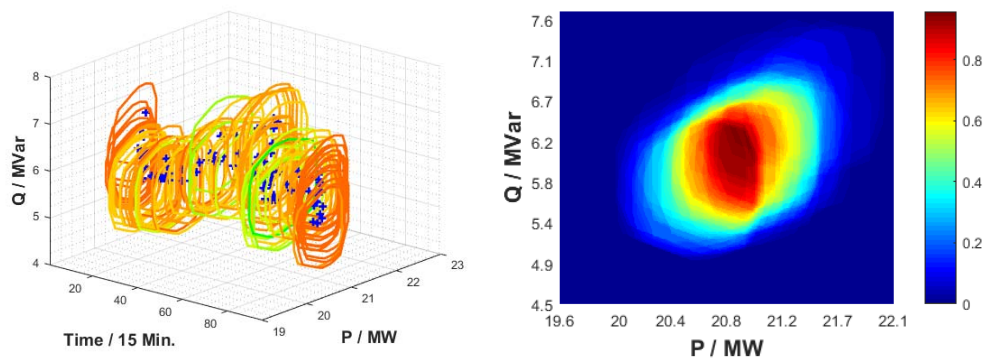


Fig. 3: Aggregierte Flexibilitätsbereiche eines 20 kV-Verteilnetzes über einen Tag.
Aggregated flexibility chart of a 20 kV distribution grid over one day.

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

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

■ **Analyse der Kleinsignalstabilität von Netzen mit hohem Anteil leistungselektronischer Komponenten**

M. Sc. Simon Eberlein

In Forschung wie Industrie ist die Untersuchung der Kleinsignalstabilität von elektrischen Netzen mit hohem Anteil an dezentralen Erzeugern in den letzten Jahren auf großes Interesse gestoßen. Da dezentrale Anlagen, wie beispielsweise PV- oder Windkraftanlagen, durch leistungselektronische Wechselrichter an das Netz angeschlossen werden, zeigen sie ein völlig anderes Verhalten in Bezug auf die Kleinsignalstabilität des Systems im Vergleich zu Synchronmaschinen. Dies gilt als mögliches Hemmnis für den weiteren Zubau erneuerbarer Energien, da es unter gewissen Bedingungen zu Instabilitäten im Versorgungssystem kommen kann.

Da die Modellierung leistungselektronischer Komponenten mit einem hohen Detaillierungsgrad erfolgen muss, um die schnellen Vorgänge in deren Regelungen zu erfassen, werden am IEH zunächst kleinere Netze, sogenannte Mikronetze, untersucht, bevor die validierten Modelle und Methoden auch auf größere Netzregionen angewandt werden.

Eine Modellierungsmethode, die sich hierzu anbietet, ist die Transformation des gesamten Netzes in das synchrone Referenzsystem, welches mit der Frequenz der Netzspannung rotiert. Von der Modellierung von Synchronmaschinen ist dieses Referenzsystem als dq0-System bekannt. Es hat den Vorteil, dass im stationären Zustand alle Zustandsgrößen im System konstant sind, auch die im statischen Referenzsystem sonst sinusförmigen Spannungen und Ströme. In diesem stationären Zustand kann das System linearisiert und eine detaillierte Kleinsignalstabilitätsanalyse durchgeführt werden, welche sämtliche Dynamiken im Netz berücksichtigt, auch die der Leitungen. Bei traditionellen Methoden zur Kleinsignalstabilitätsanalyse wird die Dynamik der Leitungen hingegen in der Regel vernachlässigt, da diese als algebraische Gleichungen und nicht als Differenzialgleichungen dargestellt werden.

Die Analyse des linearisierten Systems erfolgt mittels Modalanalyse. Da die Modelle von Wechselrichtern und deren Regelung komplex und von hoher Ordnung sind, ist es schwierig, deren Regelparameter per Hand zu optimieren, weshalb heuristische Methoden, wie genetische Algorithmen, angewandt werden. Mit Hilfe dieser Methoden können automatisiert eine hohe Anzahl an Regelparametervariation mit Hilfe der Modalanalyse getestet und schließlich ein optimiertes Parameterset gefunden werden.

■ **Small-Signal Stability Analysis of Power Systems with High Share of Power-Electronic based Generation**

M. Sc. Simon Eberlein

Researchers as well as the industry have developed a strong interest in the small-signal stability of power systems with a high share of distributed generators. As distributed generators, such as photovoltaics and wind power plants, are connected to the grid through power electronics, they exhibit a very different behavior with respect to small-signal stability in comparison to synchronous machines. This is seen as a potential constraint for the further increase of the penetration of the power system with renewable energies as it can lead to instability under certain conditions.

Power electronics need to be modelled with great detail in order to catch the fast dynamics of their controllers. Therefore, at IEH we start with the investigation of small grids, so-called microgrids, before the validated models and methods are applied to larger power systems.

A suitable modelling technique is the transformation of the whole system into the synchronous reference frame which rotates with the frequency of the grid voltage. This is familiar from the modelling of synchronous machines where it is called the dq0-reference frame. It has the advantage that all states are constant at a stable operating point, even the voltages and currents, which are sinusoidal in the stationary reference frame. At such a stable operating point, the system can be linearized and a detailed small-signal stability analysis is conducted which also takes into account the line dynamics. In traditional methods for small-signal stability, however, the line dynamics are usually neglected because the lines are represented by algebraic instead of differential equations.

The linearized system is investigated deploying modal analysis. Due to the intricacy and high order of the models of inverters and their control, it is hardly possible to optimize the control parameters by hand. Instead, heuristic methods, such as genetic algorithms, are utilized. In this way, a large number of parameter variations can be tested through modal analysis and finally an optimal parameter set is found.

■ **Störungsfreier Betrieb von elektrischen Industriernetzen durch PQ-Erkennung und -Vorhersage**

M. Sc. Adrian Eisenmann

Die zunehmende Automatisierung in industriellen Prozessketten ebenso wie die fortschreitende Durchdringung der elektrischen Netze mit Erneuerbaren Energien führen zu einem höheren Aufkommen von Power Quality (PQ) Störfällen. Diese Störfälle können zu Maschinenschäden, zusätzlichen Verlusten in den Übertragungsstrecken, Beeinträchtigung der IKT-Infrastruktur, fehlerhaftem Verhalten von Netzbetriebsmitteln wie Schutzschaltern bis hin zum kompletten Systemausfall führen. Deshalb werden nach derzeitigem Stand der Technik bei sensiblen Anlagen teure Filteranlagen zur Kompensation der Netzurückwirkungen der PQ-Störungen eingebaut. Auch an diesen Filteranlagen können Störungen auftreten und diese dadurch selbst zu einem Sicherheitsrisiko werden. Daneben kann durch eine Beschädigung einer Anlage ein hoher finanzieller Verlust für den Anlagenbetreiber einhergehen.

Deshalb wird am Institut an Algorithmen zur Unterstützung bzw. Substituierung von Filteranlagen geforscht, die das Potential haben, durch intelligente Einsatzplanung und Anlagenmanagement die Entstehung von schädlichen Netzurückwirkungen zu vermeiden. Ein multi-kriteriell optimierter Einsatzplan soll dem Anlagenbetreiber dabei als Werkzeug zur Hand gegeben werden, der - gestützt durch verschiedene Machine-Learning Verfahren – einen störungsfreien Fabrikbetrieb ermöglicht.

Bevor eine Optimierung der Betriebsparameter der Anlagen stattfinden kann, steht jedoch eine zutreffende Bestimmung des aktuellen Netzzustandes an. Dazu wurde im Projekt "Versorgungsqualität und –sicherheit bei Einspeisung aus erneuerbaren Energien" (VIPEEER) ein Messsystem in der Forschungsfabrik des ARENA 2036 e.V. installiert, das innerhalb des Forschungsgebäudes Messwerte an 33 Messstellen in sekundlicher Auflösung liefert. Daneben konnten durch Messungen mit einer mobilen Messeinheit Profile einzelner Verbraucher hinsichtlich ihrer Netzurückwirkungen gewonnen werden. Diese Messdaten stellen zum einen die Basis für eine dynamische Simulation des industriellen Elektrizitätsnetzes des Forschungsgebäudes, zum anderen für eine Zeitreihenprognose zur Vorhersage kritischer PQ-Betriebszustände, dar.

Eine zutreffende Erkennung und Prognose kritischer Systemzustände ist deshalb ein wichtiger Baustein auf dem Weg zu zukunftssicheren Elektrizitätsnetzen, die allen Ansprüchen einer hochautomatisierten, industriellen Produktion gerecht werden.

■ **PQ Detection and Prediction for a flawless Operation of Industrial Electrical Grids**

M. Sc. Adrian Eisenmann

The increasing automation in industrial process chains, as well as the progressive penetration of electric grids with renewable energies lead to more power quality (PQ) incidents. These incidents may result in machine damage, additional losses in the transmission lines, interference with the IKT infrastructure, faulty operation of network equipment like circuit breakers up to complete system failure. Therefore, according to the current state of the art, expansive filter systems are installed in sensitive parts of the systems to minimize the grid interference of the PQ faults. But these filter systems may be affected by disturbances and pose a considerable security risk. Additionally, damages to the plant can result in serious financial losses for the plant operator.

For this reason, the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) is researching on algorithms, which potentially support or substitute the need of filter systems through intelligent resource planning and plant management to avoid the generation of harmful network perturbations. A multi-objective optimized schedule is to be given to the plant operator as a tool which - supported by various machine-learning algorithms - enables a factory operation free of faults.

However, before an optimization of the operating parameters of the system can take place, an accurate determination of the current network status is necessary. For this purpose, a measuring system was installed within the project "Quality of Service and Security of Electric Power Supply for an Industrial Production with Volatile Renewable Energy Sources / Versorgungsqualität und –sicherheit bei Einspeisung aus erneuerbaren Energien (VIPEEER)" in the research factory of the ARENA 2036 e.V. which provides data values at 33 measuring points every second. In addition, it was possible to obtain profiles of individual electrical consumers with regard to their network perturbations by measurements with a mobile measuring unit. These data represent the basis for a dynamic simulation of the industrial electricity grid from the research building on the one hand and, on the other hand, for time series forecasting to predict critical PQ operating states.

Therefore, appropriate detection and prognosis of critical system states is an important component on the way to future-proof electricity networks that meet all the requirements of a highly automated, industrial production.

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

M. Sc. Heiner Früh

In den Verteilnetzen der Zukunft werden dezentrale Energieerzeugungsanlagen (DEA) auf Grund des Wegfalls der großen Kraftwerke 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 durch die Kombinatorik der einzelnen Flexibilitäten zu einem hochkomplexen, nichtlinearen Optimierungsproblem. Dabei müssen mehrere Randbedingungen berücksichtigt werden: Das Halten der Spannung in einem definierten Bereich und die Vermeidung von Betriebsmittelüberlastungen. Gleichzeitig sollen die Netzverluste minimiert und der Systembetrieb optimiert werden. Zur Lösung derartiger nichtlinearer Optimierungsprobleme gibt es verschiedene Ansätze.

Im ersten Ansatz wurde eine Lösung mittels so genannter Genetischer Algorithmen (GA) untersucht. Ziel des implementierten GA ist die Minimierung der Zielfunktion nach Gleichung (1). Spannungsabweichungen und Übertragungsverluste sollen minimiert werden, wobei Betriebsmittelüberlastungen sowie Abregelungen von DEA durch Einspeisemanagement (EisMan) zu vermeiden sind. Darüber hinaus soll der Einsatz flexibler Leistung minimiert werden, um Betriebsmittel wie bspw. Batteriespeicher effizient betreiben zu können. Auf diese Weise soll für eine Sequenz einzelner Zeitpunkte ein Fahrplan für die betrieblichen Flexibilitäten ermittelt werden.

$$f = \sum_{t=0}^{\text{timesteps}} \left[\underbrace{g_v \sum_n \left(v_{Ist,n} - v_{Ziel} \right)^2}_{\text{Spannungsabweichungen}} + \underbrace{g_{losses} \sum_l \left(\frac{v_{2,l} - v_{1,l}}{Z_l} \right)^2}_{\text{Übertragungsverluste}} \right] \cdot (g_{overload})^N + S_{EisMan} + S_{Power} \quad \text{mit} \quad S_{EisMan} = g_{EisMan} \sum_{pv=0}^{PVA} P_{abgeregelt,pv} \quad (1)$$

und $S_{Power} = \sum_{f=0}^{Flex} (g_p \cdot |P_f| + g_q \cdot |Q_f|)$

g : Gewichtungsfaktoren

S_{EisMan} : Strafterm für abgeregelte Leistung von PVA durch EisMan

N : Anzahl überlasteter Betriebsmittel (Leitungen und Transformatoren)

S_{Power} : Strafterm für eingesetzte, flexible Leistung

In Fig. 1 sind die durch den GA ermittelten Betriebspunkte aller betrachteten Flexibilitäten eines realen Niederspannungsnetzes dargestellt. Es handelt sich dabei um einen regelbaren Ortsnetztransformator, drei Batteriespeicher und 27 PV-Anlagen. Es wird ein Starklastszenario betrachtet, bei dem keine Wirkleistungseinspeisung durch PV-Anlagen möglich ist.

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

M. Sc. Heiner Fröh

In the distribution grids of the future, distributed generation must contribute to the stabilization of the power system, due to the loss of the big power plants. There are certain resources available 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 of their systems.

With a large number of flexible resources, the search for the optimal operating point becomes a highly complex, non-linear optimization problem due to the combinatorics of the individual flexibilities. Several boundary conditions must be considered: Maintaining the voltage in a defined range and avoiding overload of the equipment. At the same time, grid losses should be minimized. Several approaches for solving these kind of nonlinear optimization problems are being considered.

In a first approach, a solution using Genetic Algorithms (GA) was examined. The aim of the implemented GA is to minimize the objective function according to equation (1). Voltage deviations and transmission losses should be minimized, avoiding equipment overloads and DEA curtailments through feed-in management (EisMan). In addition, the use of flexible power should be minimized in order to operate resources such as batteries efficiently. In this way a schedule for the operational flexibilities shall be determined for a sequence of individual points in time.

$$f = \sum_{t=0}^{\text{timesteps}} \left[\left(g_v \sum_n \underbrace{(v_{1st,n} - v_{Ziel})^2}_{\text{voltage deviations}} + g_{\text{losses}} \sum_l \underbrace{\left| \frac{(v_{2,l} - v_{1,l})^2}{Z_l} \right|}_{\text{losses}} \right) \cdot (g_{\text{overload}})^N + S_{\text{EisMan}} + S_{\text{Power}} \right] \quad \text{with} \quad S_{\text{EisMan}} = g_{\text{EisMan}} \sum_{pv=0}^{PVA} P_{\text{curtailed},pv} \quad (1)$$

$$\text{and} \quad S_{\text{Power}} = \sum_{f=0}^{Flex} (g_p \cdot |P_f| + g_q \cdot |Q_f|)$$

g : weighting factors

N : number of overloaded utilities (lines and transformers)

S_{EisMan} : penalty term for curtailed power of feed-in management

S_{Power} : penalty term for the usage of flexible power

Für jeden Knoten des Netzes wird neben der Spannung auch die verbrauchte Wirk- und Blindleistung (Verbraucherzählpfeilsystem) aller am jeweiligen Knoten angeschlossenen Flexibilitäten dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Nutzung der Flexibilitäten die Spannungshaltung verbessert. Außerdem wird deutlich, dass der GA für die Flexibilitäten mancher Knoten sowohl kapazitive als auch induktive Betriebspunkte ermittelt hat. Die ermittelten Betriebspunkte sind somit nicht optimal, und der GA hat das globale Optimum noch nicht ermittelt. Dennoch wurde die Optimierung nach zwei Minuten abgebrochen, da nur noch minimale Verbesserungen erreicht wurden.

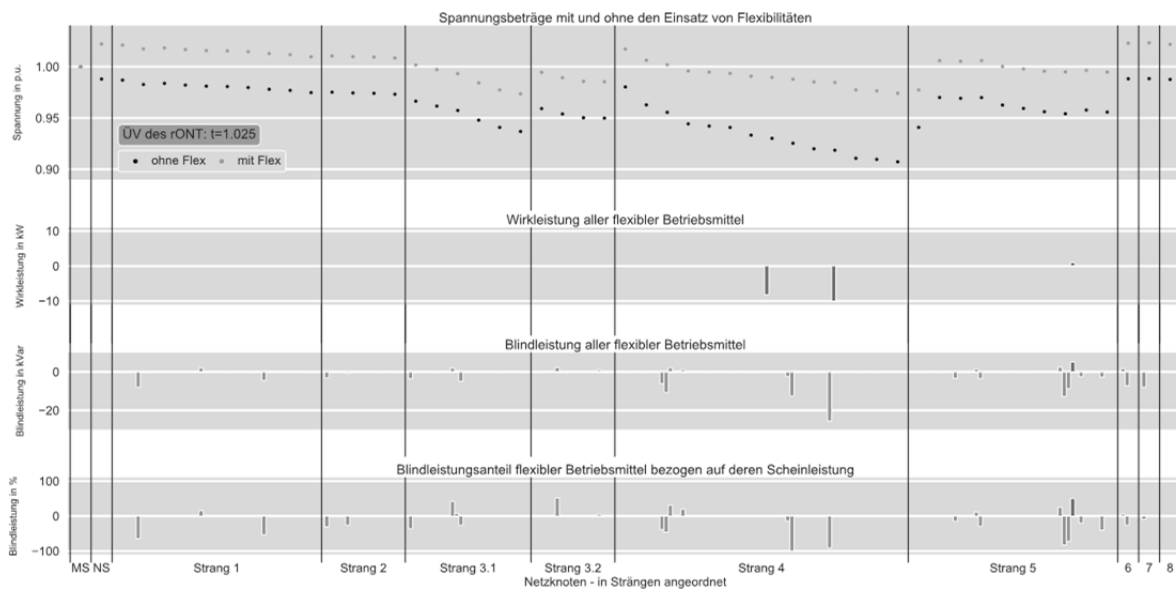


Fig. 1: Durch den GA innerhalb von zwei Minuten ermittelte Betriebszustände der Flexibilitäten eines realen Niederspannungsnetzes mit einem regelbaren Ortsnetztransformator, drei Batteriespeichern und 27 PV-Anlagen für den Fall eines Starklastszenarios.

Operating points found by the GA after two minutes for the flexibilities of a real LV system with one adjustable power transformer, three batteries and 27 PV plants during a peak load scenario.

Die bisherigen Untersuchungen haben ergeben, dass der implementierte GA in der Lage ist, die optimalen Betriebspunkte der Flexibilitäten ausreichend gut anzunähern. Jedoch schwankt die Zeit bis zur Konvergenz sehr stark. In seltenen Fällen konvergiert der GA in ein lokales Minimum, und der optimale Betriebspunkt kann nicht ermittelt werden. Bereits bei der Betrachtung kurzer Sequenzen mit bis zu zehn Zeitpunkten ist die Konvergenzdauer mit mehreren Minuten deutlich zu groß, um den GA für Echtzeitanwendungen verwenden zu können.

Im nächsten Schritt ist daher eine Linearisierung der Lastflussrechnung geplant, bei der lediglich die erste Iteration des Newton-Raphson Verfahrens durchgeführt wird. Dadurch entsteht ein lineares Optimierungsproblem, das durch analytische Verfahren deutlich schneller gelöst werden kann als durch einen GA.

Fig. 1 shows the operating points of all considered flexibilities of a real low-voltage grid determined by the GA. These include one adjustable power transformer, three batteries and 27 PV plants. A peak load scenario is considered in which no active power can be fed in by the PV plants. For each node of the grid, not only the voltage but also the consumed active and reactive power (consumer reference arrow system) of all flexibilities connected to the respective node are displayed. The figure shows that the use of the flexibilities achieves a significant improvement in voltage maintenance. In addition, it becomes clear that the GA has determined both capacitive and inductive operating points for the flexibilities of some nodes. The determined operating points are therefore not optimal and the GA has not yet found the global optimum. Nevertheless, the optimization was aborted after two minutes because only minimal improvements could be achieved.

The simulations show that the implemented GA is able to approximate the optimal operating points of the flexibilities with sufficient accuracy. However, the time to convergence varies strongly. In rare cases, the GA converges to a local minimum and the optimal operating point cannot be approximated. Even when looking at short sequences with up to ten points in time, a convergence time of several minutes is clearly too high to use the GA for real-time applications.

Therefore, in the next step a linearization of the load flow calculation will be investigated where just the first iteration of the Newton-Raphson method is performed. This results in a linear optimization problem which can be solved much faster by analytical methods than by a GA.

- **Validierung einer Verteilnetz-Zustandsschätzung für den operativen Einsatz in Mittel- und Niederspannungsnetzen**

M. Sc. Daniel Groß

Die Zunahme an dezentralen Erzeugungsanlagen hat in den letzten Jahren verstärkt dazu geführt, dass der Strom nicht mehr ausschließlich, wie in der klassischen elektrischen Energieversorgung, von den Spannungsebenen des Übertragungsnetzes in die unterlagerten Spannungsebenen des Verteilnetzes fließt und dort an die Endkunden verteilt wird. Vielmehr nimmt, je nach lokaler Einspeisesituation, eine Lastflussumkehr von den unteren Netzebenen in die oberen Netzebenen auf Verteilnetzseite zu. Eine besonders hohe Ausprägung dieser multidirektionalen Lastflüsse ist durch den stetigen Zubau an Photovoltaikanlagen in den Niederspannungsnetzen sowie Windkraftanlagen in Mittel- und Hochspannungsnetzen zu erkennen. Weitere Aspekte, welche in Bezug auf die Veränderung von Lastflusssituationen zu berücksichtigen sind, resultieren aus der Zunahme der Elektromobilität sowie einer wachsenden Verbreitung von Speichern, bspw. zur Eigenverbrauchsoptimierung. Die sich wandelnden Einspeise- und Lastsituationen führen somit zu nachhaltig veränderten Versorgungsaufgaben bei den Verteilnetzbetreibern (VNB), wodurch sie eine genauere Kenntnis über den aktuellen Systemzustand ihrer Verteilnetze benötigen. Die Überwachung eines Netzgebietes ist in der Regel mit hohem finanziellem Aufwand verbunden. Dabei spielen insbesondere Investitionskosten in Messsysteme eine maßgebliche Rolle. Aus diesem Grund ergeben sich bei den VNB Fragestellungen in Bezug auf die benötigte Anzahl an Messpunkten in einem zu überwachenden Netzgebiet, um auch bei nicht vollständiger Messwerterfassung für alle Netzknoten eine vollständige Beobachtbarkeit herstellen zu können. Dies wiederum wirft die Frage nach der Güte einer Zustandsschätzung (ZS) mit einer reduzierten Anzahl an realen Eingangsdaten auf. Aus diesem Grund wird im Forschungsprojekt grid-control die Möglichkeit gegeben, einen Zustandsschätzer für ein reales Mittel- und Niederspannungsnetz zu implementieren und die Güte der ZS unter realen Rahmenbedingungen mittels Messdaten zu validieren. Als Maß für die Güte wird hierbei der Spannungsschätzfehler definiert. Der Spannungsschätzfehler beschreibt die Differenz zwischen den berechneten Knotenspannungswerten der ZS und den erfassten Knotenspannungsmesswerten an den Ortsnetzstationen (ONS), normiert auf die Bezugsspannung. Fig. 1 zeigt im linken Teil eine schematische Darstellung des Mittelspannungsabgangs vom Schaltwerk sowie die Zusammensetzung der versorgten Ortsnetze. Der skizzierte Fehler (blaue durchgezogene Linie) bezieht sich hierbei auf die Messgeräte, welche auf Niederspannungsseite der ONS installiert sind. Im rechten Teil der Fig. 1 ist derselbe Mittelspannungsabgang dargestellt, wobei die einzelnen ONS durch

■ **Validation of a Distribution System State Estimation for operational Use in Medium and Low-Voltage Grids**

M. Sc. Daniel Groß

In recent years, the increase in decentralized renewable energy sources has increasingly led to the fact that electricity no longer exclusively flows from the voltage levels of the transmission grid to the subordinate voltage levels of the distribution grid, as in the classical electrical energy supply, where it is distributed to end customers. Much more, depending on the local feed-in situation, a load flow reversal from the lower grid levels to the upper grid levels on the distribution grid side increases. A particularly high level of these multidirectional load flows can be recognized by the constant expansion of photovoltaic systems in the low-voltage grids as well as wind turbines in medium- and high-voltage grids. Other aspects that need to be considered in relation to changes in load flow situations result from the growing number of electro-vehicles as well as an increasing use of storage, for example for self-consumption optimization. The ongoing change of feed-in and load situations thus ultimately lead to sustainably changed supply tasks for the distribution system operators, which means that they need more precise knowledge of the current system state of their distribution grids. The monitoring of a grid area is usually associated with high financial cost. In particular, investment costs in measuring systems play a decisive role. For this reason, it raises questions at the DSO side regarding the required number of measurement points in a monitored system area to establish complete observability at all grid nodes, even if the considered system is not completely measured. This in turn raises the question of the quality of a state estimation (SE) with a reduced number of real input data. For this reason, the research project grid-control offers the possibility to implement a state estimator for a real medium and low-voltage grid and to validate the quality of the SE under real conditions by means of measurement data. As a measure of the quality, the voltage estimation error is defined here. The voltage estimation error describes the difference between the calculated node voltage values of the SE and the detected node voltage measurements at the local grids normalized to the reference voltage. Fig. 1 shows in the left part, a schematic representation of the medium voltage feeder from the switching substation and the composition of the supplied local grids. The sketched error (blue solid line) refers to the measuring devices which are installed on the low-voltage side of the local grid substations. In the right part of Fig. 1 the same medium voltage feeder is shown with the individual local grids being simulated by synthetic substitution values for the load and the feed. The indicated error (green dashed line) refers to the deviation of the synthetic values. Based on this parameterization, the influence of the use of synthetic load and feed-in values on the SE results will be investigated.

synthetische Ersatzwerte für die Last und die Einspeisung nachgebildet werden. Der angedeutete Fehler (grün gestrichelte Linie) bezieht sich hierbei auf die Abweichung der synthetischen Werte. Anhand dieser Parametrierung wird der Einfluss durch die Verwendung synthetischer Last- und Einspeisewerten auf die ZS-Ergebnisse untersucht.

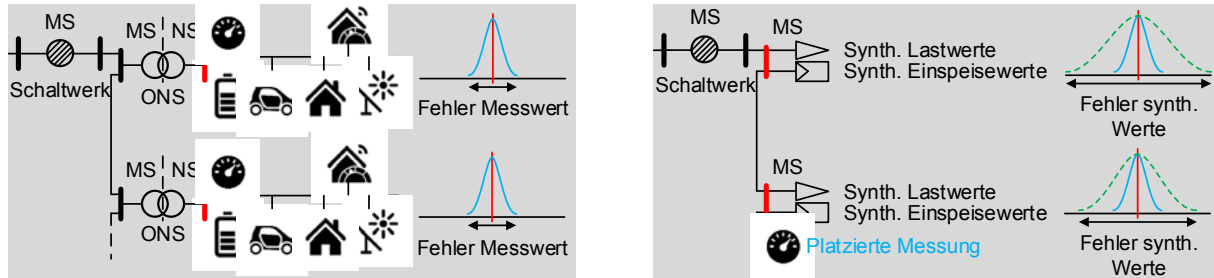


Fig. 1: Schematische Darstellung des Mittelspannungsabgangs mit realen und synthetischen Werten für die versorgten ONS.

Schematic illustration of the medium voltage feeder with real and synthetic values for the supplied local grids.

Fig. 2 zeigt die relative Auftrittshäufigkeit des Schätzfehlers des Spannungsbetrages an allen gemessenen ONS im Mittelspannungsabgang bei Verwendung der realen Leistungsmesswerte (blaue durchgezogene Kurve) sowie bei Verwendung der synthetischen Leistungswerte (orange gestrichelte Kurve). Die Abweichungen der durch die ZS ermittelten Knotenspannungen unter Verwendung der realen Leistungsmesswerte zu den realen Messwerten der Knotenspannungen liegen im Bereich zwischen -1% und +4%. Dies deutet darauf hin, dass bei reiner Verwendung von Leistungsmesswerten die durch die ZS bestimmten Knotenspannungen über den tatsächlich gemessenen Knotenspannungen liegen. Ein ähnliches Verhalten ist bei reiner Verwendung der synthetischen Leistungswerte zu erkennen, wobei die Überschätzung der Knotenspannungen im Vergleich zu den gemessenen Leistungswerten deutlicher ausgeprägt ist. Die Differenzen liegen hierbei im Bereich zwischen 0% und +4%. Ziel der auf der linken Seite in Fig. 1 angedeuteten platzierten Messung ist es, die Schätzfehler zu reduzieren, weshalb in Fig. 2 ebenfalls die Ergebnisse in Bezug auf die Messstellenplatzierung dargestellt sind. Hierbei wurden die bereits beschriebenen Simulationen um eine reale Spannungsmessung an einer ausgewählten ONS im Mittelspannungsabgang als zusätzlicher Messwert in der ZS erweitert. Die Ergebnisse sind in der grün strichpunktierten sowie der rot punktierten Kurve dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl bei der Verwendung der realen als auch der synthetischen Leistungswerte eine zusätzliche reale Spannungsmessung eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Reduzierung des Schätzfehlers ergibt. Die relativen Auftrittshäufigkeiten verschieben sich in beiden Fällen in Richtung 0% und verringern somit die Abweichungen der ZS-Ergebnisse zu den real gemessenen Spannungswerten und erhöhen dadurch die Güte der ZS. Nach wie vor tritt eine maximale Abweichung von +4% auf. Dies deutet darauf hin, dass zusätzliche reale Spannungsmessungen benötigt werden, um den Schätzfehler weiter zu reduzieren.

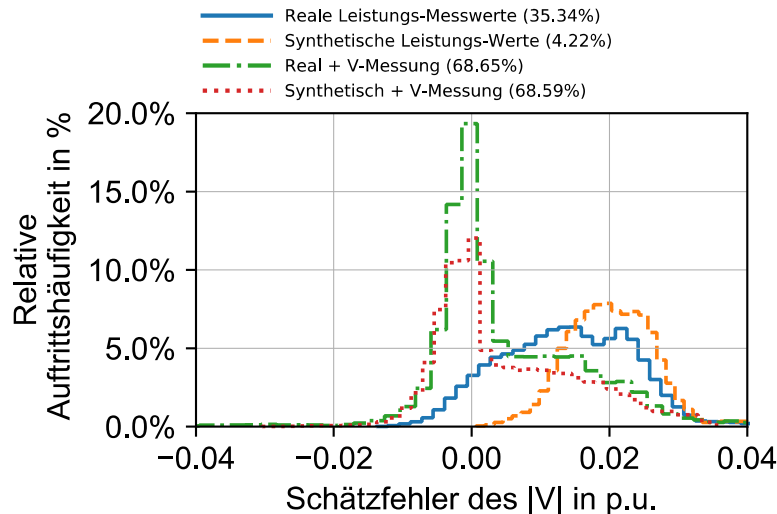


Fig. 2: Vergleich des Einsatzes synthetischer Werte als Ersatz für reale Messwerte in der ZS und der Einfluss zusätzlicher realer Spannungsmessungen.

Comparison of the use of synthetic values as a substitute for real measured values in the SE and the influence of additional real voltage measurements.

Fig. 2 shows the relative frequency of occurrence of the voltage estimation error on all measured local grid substations in the medium voltage feeder using the real power measurements (blue solid curve) and using the synthetic power values (orange dashed curve). The deviations of the node voltages determined by the SE using the real power measurement values to the real measured values of the node voltages are in the range between -1% and + 4%. This indicates that when only power measurements are used, the node voltages determined by the SE are higher than the actual measured node voltages. A similar behavior can be seen when the synthetic power values are used only, whereby the overestimation of the node voltages is more pronounced compared to the measured power values. The differences are in the range between 0% and + 4%. The aim of the placed measurement indicated in left part of Fig. 1 is to reduce the estimation errors which is why Fig. 2 also shows the results in terms of meter placement. Here, the simulations described above were extended by a real voltage measurement on a selected local grid substation in the medium voltage feeder as an additional measured value in the SE. The results are shown in the green dot-dash line and the red-dotted curve. It can be clearly seen that in both cases, for real and synthetic power measurements, an additional real voltage measurement provides a significant improvement in terms of reducing the estimation error. The relative frequencies of occurrence shift in both cases in the direction of 0% and thus reduce the deviations of the SE results to the real measured voltage values and thereby increase the quality of the SE. As before, a maximum deviation of + 4% occurs. This indicates that additional real voltage measurements are needed to further reduce the estimation error.

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

M. Sc. Ouafa Laribi

Den heutigen planerischen Grundsätzen zu Folge sollen Hochspannungsnetze so ausgelegt werden, dass jegliche Überlastungen aufgrund der angeschlossenen Verbraucher und Einspeisungen unter Erfüllung des (n-1)-Kriteriums vermieden werden können. Um diesen Grundsätzen im Hinblick auf die hohen und stark schwankenden Einspeisungen gerecht zu werden, sollen innovative Systemlösungen eingesetzt werden. Am IEH wird die Planung des Hochspannungsnetzes unter Nutzung von Speichern als Netzkomponente und der Spitzenkappung als zusätzlicher Freiheitsgrad untersucht. Hierfür wurde ein zeitreihenbasierter Planungsalgorithmus zur optimalen Dimensionierung und Platzierung der Speicher unter Einsatz der zeitreihenbasierten dynamischen Spitzenkappung entwickelt. Dabei wird die vorausgesetzte 3 % Grenze aus dem § 11 EnWG für die prognostizierte jährliche Energie pro Anlage eingehalten.

Als Untersuchungsnetz wurde ein 110 kV-Netz im Süden von Baden-Württemberg modelliert und anhand von Zeitreihen für Verbraucher und Einspeiser entsprechend eines zukünftigen Szenariojahres berechnet. Fig. 1 stellt in Form von Boxplots die Auslastung jeder Leitung des Untersuchungsnetzes bei allen relevanten (n-1)-Fällen in Prozent dar. Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass bei zwei Drittel der betrachteten Leitungen die Leitungsauslastungen über der thermischen Grenze von 100 %, hier durch die gestrichelte Linie repräsentiert, liegen.

Um das Netz präventiv gegen Leitungsüberlastungen zu ertüchtigen, wurde in einem ersten Schritt der Planungsalgorithmus nur für den Einsatz von Speichern als einzige Lösung zur Vermeidung von Netzüberlastungen implementiert. Der Planungsalgorithmus basiert auf einer linearen Mehrzieloptimierung, welche die erforderlichen Kapazitäten der Speicher minimiert. Zusätzlich werden lineare Randbedingungen zum Optimierungsproblem eingesetzt, welche die Einhaltung der maximalen thermischen Grenze der Leitungen im Normalzustand sowie bei allen relevanten Leitungsausfällen für jeden 15-minütigen Zeitschritt des betrachteten Szenariojahres beschreiben. Somit kann das (n-1)-Kriterium sichergestellt werden. Die resultierenden Ergebnisse aus dem Planungsalgorithmus stellen die benötigte Fahrweise, Kapazität, Leistung sowie Platzierung der Speicher dar.

In einem weiteren Schritt wurde der Planungsalgorithmus auf die dynamische zeitreihenbasierte Spitzenkappung erweitert, damit sehr hohe, aber selten auftretende Rückspeisungen aus EE-Anlagen gezielt gekappt werden können.

- **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

According to the actual planning principals, high voltage grids in Germany have to be dimensioned based on the connected load and power supply so that all potential overloading problems under consideration of the (n-1)-criterion could be avoided. Due to the high disapproval toward grid reinforcement, researches are being nowadays conducted to find out innovative system solutions in order to meet these premises. At the IEH, a new method combining the use of storage systems as a grid component and the power curtailment as a further degree of freedom in the grid planning is being examined. For that, a planning algorithm has been developed to determine the optimal dimensioning and placement of storage energy systems by a combined application of the storages with a time series based dynamic curtailment of renewable energy systems (RES).

For these examination purposes, a 110-kV grid in south Baden-Württemberg has been modeled and calculated based on time series of the connected loads and RES, for a considered future scenario year. The boxplots of Fig. 1 represents the values of the power loading on the lines in percent for 25 %, 50 % and 75 % of the simulated time steps under the consideration of all relevant (n-1)-states. The figure outlines the maximum and minimum occurring values as well. It can be seen, that for two-thirds of the lines, the power flow exceeds the 100 % allowable thermal limit, represented in the diagram through the dotted line.

At a first step, a planning algorithm based on a multi-objective linear optimization has been implemented in order to determine the minimal required storage capacities. The contribution of the storage systems to ensure the unloading of the grid has been considered through linear constraints for every relevant (n-1)-state at every 15-minute time step. In a second step, the planning algorithm has been expanded by including a time series based dynamic curtailment of the RES power into the optimization. The aim of the combined application of storage systems and dynamic curtailment is to pointedly reduce the RES power on times of very high but infrequent feed-in from RES. Hereby, the 3 % curtailment limit provided by the German energy Act (EnWG) has been considered as well. This limit implies that the total curtailed energy amount of every power plant over a year has to be maintained under its total predicted annual energy amount.

Der Planungsalgorithmus zur zeitreihenbasierten dynamischen Spitzenkappung beschränkt die gekappte Energie auf 3 % der prognostizierten jährlichen Energie.

Die Ergebnisse des Planungsalgorithmus haben gezeigt, dass der optimierte Einsatz von Speichern allein als Netzkomponente die Vermeidung von Leitungsüberlastungen unter Berücksichtigung des (n-1)-Kriteriums gewährleisten kann. Allerdings sind dafür sehr große Speicher erforderlich. Der kombinierte Einsatz von Speichern und zeitreihenbasierter dynamischer Spitzenkappung führt hingegen zu einer signifikanten Reduzierung der erforderlichen Speicherdimensionierung. Die aus dem Planungsalgorithmus gelieferte Fahrweise der Speicher sowie die abgeregelte Leistung über der Zeit stellen einen sicheren Leitungsbetrieb gemäß (n-1)-Kriterium sicher, wie es Fig. 2 zeigt.

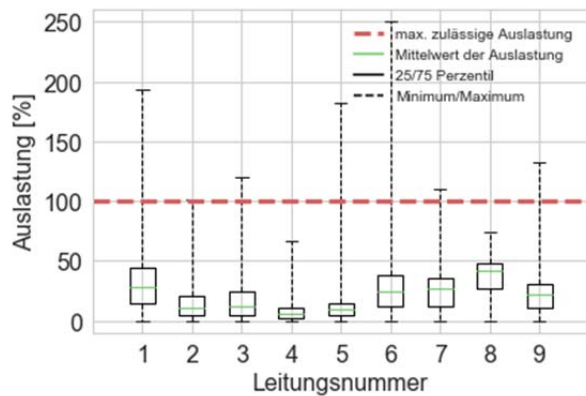


Fig. 1: Leitungsauslastung ohne Einsatz von Speichern oder dynamischer Spitzenkappung.
Line loading without use of neither energy storage systems nor power curtailment.

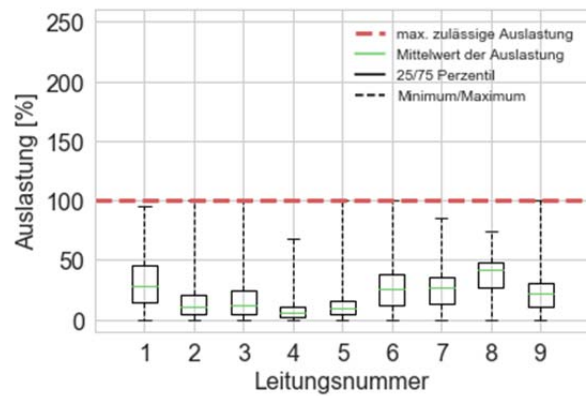


Fig. 2: Leitungsauslastung beim kombinierten Einsatz von Speichern und dynamischer Spitzenkappung.
Line loading by the combined use of energy storage systems and dynamic power curtailment.

The results of the planning algorithm show that the optimized application of storage systems as a grid component alone, enables maintaining the load flow on the power lines under the maximum allowed thermal limits of the lines with respect to the (n-1)-criterion. But this solution implies high resulting capacities of the storage systems.

The combined use of storage systems and dynamic curtailment however, leads to a significant reduction of the required storage capacities. The delivered charging and discharging schedules for the storage systems as well as the power curtailment schedule for the RES, ensure hereby an operation of the power lines for all relevant (n-1)-states under the maximum thermal limit, as shown in Fig. 2.

■ **Einsatz neuer Planungsmethoden in der zeitreihenbasierten Verteilnetzplanung**

M. Sc. Markus Miller

Die Netzbetreiber stehen aufgrund der Integration der stetig zunehmenden und bereits heute sehr hohen installierten Leistung von erneuerbaren Energien (EE) vor neuen Herausforderungen. So müssen die Netzbetreiber aufgrund der langen Planungs- und Genehmigungszeiten für neue Leitungen bereits heutzutage die Erhöhung der Übertragungskapazitäten planen, um zukünftige Überlastungen zu vermeiden. Die hierfür erforderlichen Maßnahmen zur Erweiterung des Verteilnetzes stoßen aber in der Bevölkerung auf eine geringe Akzeptanz. Deswegen werden am IEH neue Planungsmethoden entwickelt und in die zeitreihenbasierte Verteilnetzplanung integriert, um das bestehende Netz effizienter ausnutzen zu können und um einen sinnvollen Netzausbau zu gewährleisten.

Die Auslegung der Freileitungen erfolgt in den Hochspannungsnetzen nach den Errichtungsvorschriften der DIN EN 30341. Hiernach wird mit einem definierten Szenario für die Umgebungseinflüsse der thermische Grenzstrom der Leitungen bestimmt. Da die für diesen statischen Auslegungsfall verwendeten Umgebungseinflüsse in der Realität nur selten auftreten, wird am IEH eine Methodik zur Steigerung der Übertragungsleistung unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Wittereinflüsse aufgebaut. Hierfür wird ein Modell für die Wärmebilanz der Freileitungen verwendet, das eine Kühlung durch die Konvektion und Abstrahlung sowie eine Erwärmung des Leiters durch den Stromfluss und die Sonneneinstrahlung beinhaltet. Aus einem Klimamodell sind zudem 15-minütige Zeitreihen für die Umgebungstemperatur, die Sonneneinstrahlung und die Windgeschwindigkeit generiert worden. Für jede Freileitung kann dann mit dem thermischen Modell und den Zeitreihen eine dynamische, wetterabhängige Strombelastbarkeit berechnet werden. Diese können dann mit der am IEH entwickelten linearisierten Ausfallanalyse untersucht werden, um deren Einfluss auf die Steigerung der Übertragungskapazität bewerten zu können.

In Fig. 1 sind die Leitungsauslastungen im (n-1)-Zustand eines Testnetzes dargestellt. Dabei zeigt der linke Boxplot die Leitungsauslastung ohne Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten für jede Freileitung, die durch den starken Zubau an installierter Leistung der EE überlastet ist. Die Boxplots auf der rechten Seite zeigen die Ergebnisse mit Einsatz der dynamischen Strombelastbarkeiten. Hierfür würden die Strombelastbarkeiten des statischen Auslegungsfalles bei der Ausfallanalyse durch die Zeitreihen für die dynamischen Strombelastbarkeiten ersetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Methodik die Leistungsauslastungen der Freileitungen im (n-1)-Zustand senken kann.

■ **Use of new Planning Methods in the Time-Series-based Distribution Grid Planning**

M. Sc. Markus Miller

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

The design of overhead lines in high-voltage networks is realized in accordance with the installation regulations of DIN EN 30341. Accordingly, the thermal limit current of the lines is determined with a defined scenario for the ambient influences. Since the ambient influences used for this static design case rarely occur in reality, a methodology for increasing the transmission capacity is being developed at the IEH taking into account the environmental and weather influences. For this purpose, a model is used for the heat balance of the overhead lines which includes a cooling by the convection and the radiation as well as a heating of the conductor by the current flow and the solar radiation. In addition, 15-minute-time series for ambient temperature, solar radiation and wind speed were generated from a climate model. For each overhead line, a dynamic, weather-dependent current rating can then be calculated using the thermal model and the time series. The determined current rating can then be investigated with the linearized contingency analysis developed at IEH in order to evaluate their influence on the increase of the line transmission capacity.

Fig. 1 shows the line loadings in the (n-1)-state of a test grid. The left box plots show the line loadings of the system without using the dynamic current ratings for each line which is overloaded due to the high increase of the installed RES. The box plots on the right show the results using the dynamic current ratings. For this purpose, the current ratings of the static design case in the contingency analysis would be replaced by the time series for the dynamic current ratings. The results show that the methodology can reduce the line loading of overhead lines in the (n-1)-state.

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

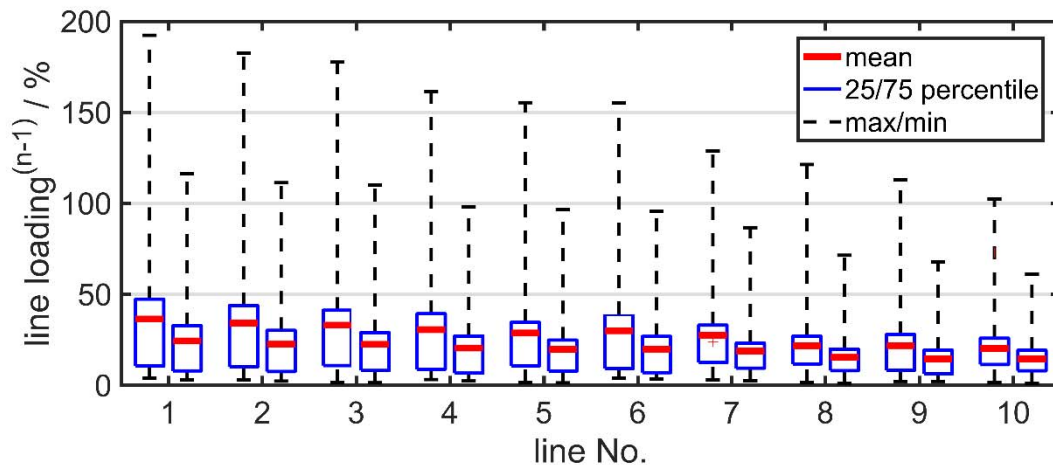


Fig. 1: Vergleich der Leitungsauslastung im (n-1)-Zustand ohne (linke Box) und mit Einsatz (rechte Box) der dynamischen Strombelastbarkeiten.
Comparison of the line loading in (n-1)-state without (left box) and with use (right box) of the dynamic current ratings.

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

■ **Messung und lokale Datenverarbeitung von Supraharmonischen**

M. Sc. Tim Streubel

Aufgrund der stetigen Verbreitung von leistungselektronisch gekoppelten Geräten konnte in den letzten Jahren ein deutlicher Anstieg von hochfrequenten Harmonischen in Verteilnetzen beobachtet werden. Um die Oberschwingungen in diesem Frequenzbereich (2-150 kHz) zu beschreiben, wurde der Begriff der Supraharmonischen eingeführt. Ein Grund für die Verschiebung der harmonischen Emissionen ist die Einführung aktiver, leistungselektronischer Schaltungskomponenten, durch welche die Konverter kleiner und günstiger produziert werden können. Des Weiteren hat das bisherige Fehlen von verbindlichen Normen für supraharmonische Emissionen deren Ausbreitung beschleunigt. Die langfristige Belastung von Betriebsmitteln mit Supraharmonischen führt zu erhöhten Wärmeverlusten, was eine Reduzierung der Lebensdauer zur Folge hat. Außerdem können die hochfrequenten Oberschwingungen zu Störungen bei der Kommunikationstechnologie PLC führen.

Die Untersuchung von Supraharmonischen ist ein aktives Forschungsfeld im Bereich der Power Quality aufgrund der Interessen verschiedener Internationaler Standardisierungsausschüsse. Deswegen wird am IEH im Rahmen des Forschungsprojektes C/sells ein Monitoring System zur Überwachung der Supraharmonischen im Verteilnetz implementiert. Bei PQ-Monitoring-Systemen werden die Messdaten üblicherweise kontinuierlich zu einem zentralisierten Datenserver übertragen und dort verarbeitet. Da bei der Messung von Supraharmonischen jedoch sehr große Datenmengen entstehen, werden diese lokal verarbeitet, um die Kommunikationsinfrastruktur zu entlasten. Ziel ist es dabei, nur bestimmte Anomalien in den harmonischen Spektren zu detektieren und diese zu beschreiben. Diese Anomalien sind als Harmonische Amplituden definiert, die signifikant von ihrem Erwartungswert abweichen. Solch eine Supraharmonische Anomalie (SHA) ist in Fig. 1 dargestellt.

Um derartige SHA zu detektieren wird für das Messgerät eine Detektionsmethode eingesetzt, die kontinuierlich Grenzwerte in Abhängigkeit der aktuellen Messdaten ermittelt. Dadurch entsteht ein Filter mit Grenzwerten (Fig. 1), der sich im Zeit- und Frequenzbereich anpasst. Harmonische Amplituden, die ihren entsprechenden Grenzwert überschreiten, werden als SHA gespeichert. Um die detektierten SHA weiter zu verarbeiten, wird ein Clusteralgorithmus (CA) eingesetzt.

■ **Measurement and local Preprocessing of Supraharmonics**

M. Sc. Tim Streubel

With the steady increase of power electronics devices in recent years, a significant increase in higher frequency harmonics in distribution grids is observed. In order to describe the harmonics in this frequency range (2-150 kHz), the term Supraharmonics was introduced. A driving factor for the frequency shift in harmonic emission was the introduction of active switching with high switching frequencies, enabling the production of smaller and cheaper converters. Furthermore, the lack of regulation in the 2-150 kHz frequency range accelerated the spread of emission. The long-term exposure of equipment with Supraharmonics induces increased losses due to thermal heating which reduces the lifetime of the affected devices. Furthermore, high Supraharmonic emission can distort and interact with the communication technology PLC.

Research on Supraharmonics has become an active field in power quality due to the interest of the international standard setting community. At the IEH a monitoring system for Supraharmonics in a distribution grid is implemented as part of the research project C/sells. Typically, the measurement data of PQ monitoring systems is sent to a centralized server where the data is processed in a continuous manner. Since large measurement datasets emerge for the monitoring of Supraharmonics, the data is processed locally in order to relieve the communication infrastructure. The objective of local pre-processing is to detect and characterize specific anomalies within the harmonic spectrum. The anomalies can be defined as harmonic amplitudes significantly deviating from their expected value. Such a Supraharmonic (SHA) amplitude is displayed in Fig. 1.

In order to identify such SHA, a detection method is implemented on the measurement device. The method continuously determines thresholds depending on latest measurements. This results in a filter plane with threshold limits for each harmonic adjusting itself in the time and frequency domain (Fig. 1). A harmonic amplitude exceeding the corresponding threshold plane is labelled as a SHA. To further process the detected SHA a clustering algorithm (CA) is utilized. The CA groups the identified anomalies based on the similarity of specific attributes such as affected frequency range, harmonic amplitude and duration. This allows the formulation of a classification problem and the detected anomalies can be associated with a corresponding cause.

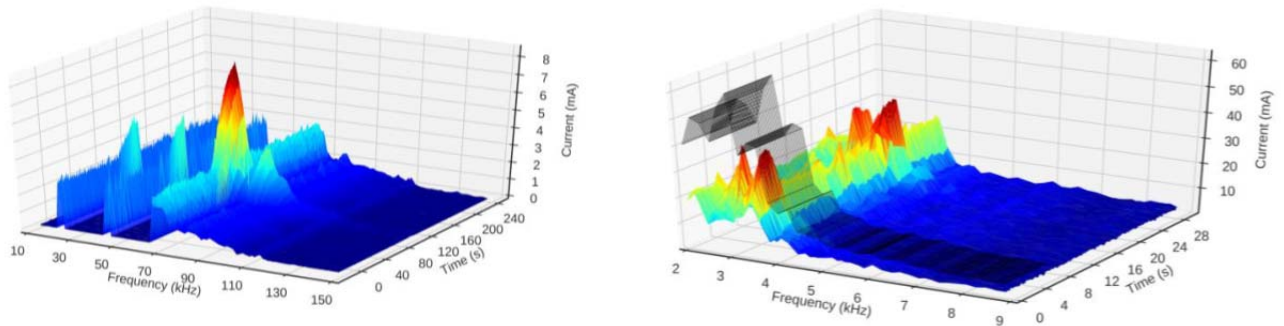


Fig. 1: Anomalie im Supraharmonischen Frequenzbereich (links);
 Filterfläche für die Detektion von SHA (rechts).
 Anomaly in the Supraharmonic frequency range (left);
 Calculated threshold plane for the detection of SHA (right).

Der CA gruppiert die erfassten Anomalien je nach Ähnlichkeit spezifischer Attribute wie z.B. Frequenzbereich, Amplitude und Dauer. Durch die lokale Verarbeitung der Daten auf dem Messgerät, kann die Supraharmonische Emission charakterisiert werden, während die benötigte Kapazität der Kommunikationsinfrastruktur reduziert wird.

With the preprocessing algorithm the Supraharmonics emission can be described and potential sources of high frequency distortion identified. By processing the data locally the capacity of the required communication structure of the monitoring system can be drastically reduced.

A Dynamic Model and Analysis of PEM Fuel Cells for Light Electric Vehicles

Prof. Dr. Tankut Yalcinöz

Energy prices and environmental concerns have put electric vehicles in the focus of public interest. Light electric vehicles such as pedelecs, electric bicycles, and electric scooters have started to use people's everyday lives to reduce air pollution, noise, and congestion in the city center. In light electric vehicles, the power demand fluctuations of the electric motor are of critical importance. Electric bikes in European countries, where people have higher bicycle culture, are rapidly spreading.

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells generate electricity electrochemically with minimal thermal losses and have very high efficiencies. Due to such high efficiencies, PEM fuel cells have a significant potential for many applications such as transportation, residential, telecommunication back-up, portable devices, and military applications. Small fuel cells with lightweight and without auxiliary devices are the ideal power source for low power applications.

In this study, a dynamic model of the PEM fuel cells for fueling electric bicycles is proposed. The power requirement of an electric bicycle varies significantly under different riding conditions. The modeling and simulation of the PEM fuel cell system for electric bicycles are verified using Matlab, Simulink, and Simscape Power Systems. Fig. 1 shows the general diagram of the PEM-FC system for an electric bicycle. A realistic drive cycle for Stuttgart is obtained by using a web software tool. The output powers of the PEM-FC are similar to the input powers of the bicycle calculated by the web-based trip simulator for the selected GPS trip. The simulation results show that the PEM-FC provides efficient and reasonable power at a constant voltage for electric bicycles.

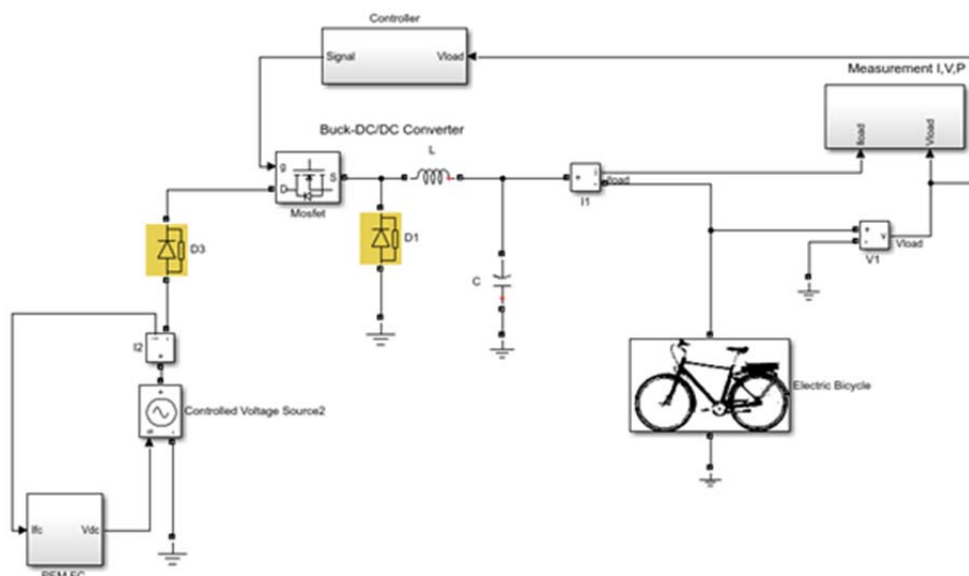


Fig. 1: PEM-FC system for an electric bicycle

■ **Economic Load Dispatch Using an Improved Particle Swarm Optimization based on Functional Constriction Factor and Functional Inertia Weight**

Prof. Dr. Tankut Yalcinöz

The economic load dispatch (ED) is one of the essential optimization problems in power systems planning and operation. The ED problem aims to determine the optimal outputs of units to minimize the total cost of power generation while meeting various loads and various constraints such as transmission losses, valve-point loading effects, ramp rate limits, prohibited operating zones, etc.

Metaheuristic optimization techniques can solve ED problems by taking into account various constraints in a reasonable time. Particle swarm optimization (PSO), which is a powerful metaheuristic optimization technique, stimulates animal social behaviors. It performs better for many hard optimization problems with faster and more stable convergence rates compared to the other optimization techniques. The PSO algorithm has several parameters, such as constriction factor, personal learning coefficient and inertia weight, which have a significant impact on the motion of the particle. In this study, some modifications are proposed in the PSO algorithm to solve constrained optimization problems to find the optimal solution faster and more accurate. An improved particle swarm optimization algorithm based on an asynchronous inertia weight and a functional constriction factor (IMPSO) is suggested to enhance performance in solving ED problems with transmission losses, ramp rate limits, valve-point loading effects, and prohibited operating zones. The proposed IMPSO method is verified on three test systems. It can be seen in Fig. 2 that the IMPSO's operating costs have dropped sharply during the first 100 iterations. The simulation results confirm the strength and sufficiency of the IMPSO compared to different optimization techniques.

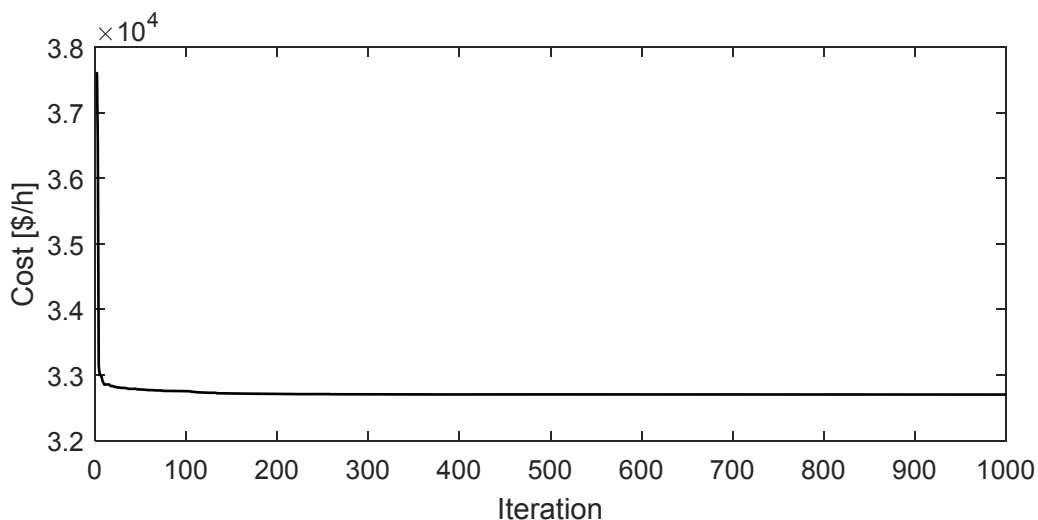


Fig. 2: Convergence characteristic of IMPSO for a 15-unit system

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

■ Gleichtaktauslöschung zur Reduzierung der Störaussendung von elektrischen Lenkungssystemen

M. Sc. Jonas Bertelmann

Seit einigen Jahren kommen vermehrt elektrische Antriebe in Lenksystemen zum Einsatz. Sie bieten Vorteile gegenüber den klassischen hydraulischen Systemen, beispielsweise im Hinblick auf Energieeinsparungen und der Möglichkeit des autonomen Fahrens oder Steer-by-Wire-Anwendungen. Lenkimpulse können vom Fahrer über das Lenkrad angefordert aber auch elektronisch über ein Steuergerät vorgegeben werden. Für das vollautomatische Lenken ist Redundanz aus Sicherheitsgründen unabdingbar. Dies erfordert für das elektrische Lenksystem eine doppelte Ausführung des Inverters, wie auch einen 6-phasigen Motor. Nur so kann im Fehlerfall dieser sicherheitskritischen Komponente die Lenkung gewährleistet werden.

Für eine zuverlässige Funktion des Lenksystems ist eine EMV-gerechte Auslegung unabdingbar. Durch den Einsatz von schnell schaltenden Halbleitern im Inverter des Lenkantriebs entstehen Störemissionen im Frequenzbereich von Funkdiensten und Übertragungssystemen. Diese können die Lenkung selbst und auch andere Fahrzeugsysteme beeinflussen. Mithilfe eines neuen Ansatzes soll die Emission der eingesetzten Wechselrichter reduziert werden, um auf passive Filtermaßnahmen verzichten zu können. Dazu wird die gegebene Systemredundanz ausgenutzt, indem die parallel arbeitenden Wechselrichter (Fig. 1) synchronisiert werden und exakt gegenphasig arbeiten. Untersuchungen dazu erfolgen auf Basis des CISPR 25 Komponententests. Den schematischen Aufbau zeigt Fig. 1, den zugehörigen Messaufbau Fig. 2. Die eingezeichneten Störströme entsprechen dabei jeweils der Gleichtaktstörung eines Inverters. Auf den geometrisch ausgedehnten Pfaden der Fahrzeugkarosserie (als GND eingezeichnet) und der Gleichstromversorgung kommt es zu einer Gleichtaktauslöschung.

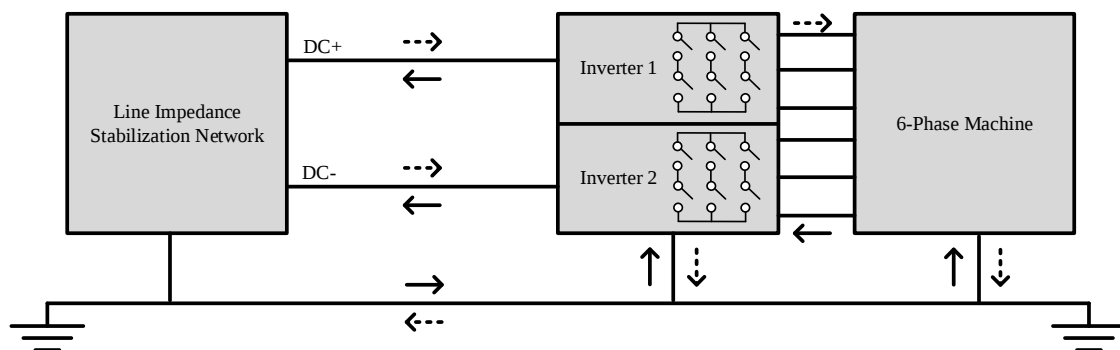


Fig. 1: Schematische Darstellung des Lenkantriebaus.
Schematic illustration of the electric steering system.

Common Mode Cancellation Techniques to minimize EMI of Automotive Steering

M. Sc. Jonas Bertelmann

Electric steering systems are used more and more for some years now. They have main advantages over conventional hydraulic systems, for example in terms of energy savings and the possibility of autonomous driving and steer-by-wire. Steering impulses can be requested either by the driver itself via the steering wheel or electronically by a control unit. For autonomous driving, redundancy is essential for safety reasons. This requires a second inverter as well as a 6-phase machine for the electric steering system. This is the only way to ensure steering in the event of failure of this safety-critical component.

An EMC-compliant design is essential for reliable operation of the steering system. Semiconductors with switching times in the nanosecond range are used in the inverter. The rapid changes of voltage induce high-frequency disturbance currents over parasitic elements. These are in the frequency range of radio services and other communication systems and can also influence the steering itself as well as other vehicle systems. With a new approach, the emission from the inverters shall be reduced without the common mode choke, resulting in lower costs and smaller size of the filter. For this purpose, the given redundancy is utilized by synchronizing the parallel inverters (Fig. 1) and switching them exactly inverse. Investigations referring to CISPR 25 component tests have been carried out. The schematic structure can be seen in Fig. 1 and the measuring environment in Fig. 2. The shown arrows are displaying the disturbing common mode currents of each inverter. On the geometrically extended paths of the vehicle body (drawn as GND) and the DC supply a common-mode cancellation occurs.

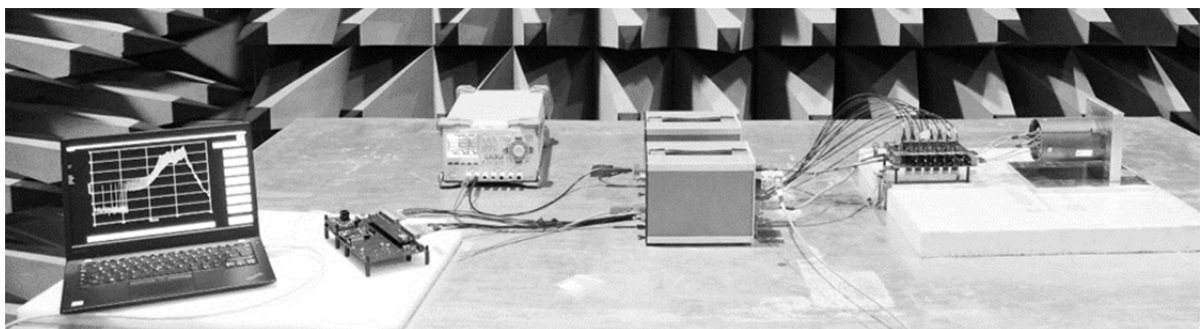


Fig. 2: Aufbau des Lenkungssystems im CISPR 25 Komponententest.
Structure of the steering system in the CISPR 25 component test.

■ EMV von standardisierten WPT-Systemen im KFZ

M. Sc. Manuel Haug

Das kabellose, induktive Laden soll bereits in naher Zukunft ein wesentlicher Bestandteil der Elektromobilität werden, insbesondere aufgrund des Komfortgewinns für den Anwender. Um die Kompatibilität der induktiven Ladeschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation herstellerübergreifend zu gewährleisten, sollen Wireless Power Transfer (WPT) Systeme international standardisiert werden. Dabei sind auch Messverfahren und Grenzwerte für EMV Komponententests zu berücksichtigen. Um realistische Grenzwerte z.B. für Störfestigkeitsprüfungen der fahrzeugseitigen Komponenten abzuleiten, müssen die potentiellen Koppelmechanismen und Störeinwirkungen auf die Fahrzeugspule identifiziert werden. Zwei wesentliche Kopplungsarten sind dabei Differential Mode (DM) Einkopplungen, die während der Fahrt oder während des Ladevorgangs in der Fahrzeugspule induziert werden, sowie Common Mode (CM) Störungen, die u.a. während des Ladevorgangs kapazitiv zwischen Boden- und Fahrzeugspule übertragen werden.

Um diese Kopplungswege und -arten zu untersuchen, werden repräsentative Spulendesigns nach aktuellen Vorschlägen der zuständigen Normungsgremien als Prototypen aufgebaut. Mit einem geeignetem WPT-Prüfstand können damit erste Komponententests durchgeführt werden. Fig. 1 zeigt beispielsweise den Prüfaufbau zur Bestimmung der Störspannung an der Fahrzeugspule bei Anregung der Bodenspule mit energiereichen Stoßspannungen (Surge).

Des Weiteren werden die WPT-Spulen als detaillierte 3D-Modelle (siehe Fig. 2) in einer EM-Simulationssoftware modelliert. Die Validierung der Modelle erfolgt über den Abgleich ihres frequenzabhängigen Impedanzverhaltens gegenüber Messungen an Prototypen. Neben potentiellen Störeinkopplungen können auch die gestrahlten Emissionen des Ladesystems sehr anschaulich und reproduzierbar untersucht werden. Ebenfalls lässt sich der Einfluss von Material- oder Geometrievariationen auf das Störpotential des Systems schnell und kostengünstig abschätzen.

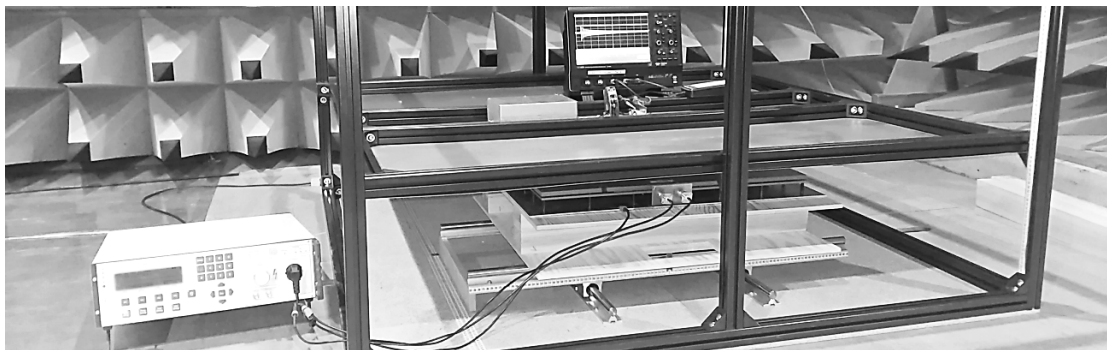


Fig. 1: Komponententest mit WPT-Prüfstand: Störfestigkeit gegen Stoßspannungen.
Component test with WPT-bench test setup: Immunity to surge voltage.

■ EMC of standardized WPT-Vehicle Charging Systems

M. Sc. Manuel Haug

In the near future, wireless inductive charging is expected to become a major part of electromobility, especially due to the increase of comfort for the user. Therefore, the Wireless Power Transfer (WPT) systems have to be standardized internationally to guarantee the compatibility between the vehicle and charging station, independent from various manufacturers. Measurement methods and limit values for EMC component tests should be taken into account in the standardization process as early as possible. In order to derive realistic limit values for example for immunity tests of vehicle components, the potential coupling mechanisms and interference effects on the vehicle coil have to be identified. In this context, two essential interference mechanisms are the differential mode (DM) coupling, which is induced in the vehicle coil during driving or during charging, as well as the common mode (CM) interference which is transmitted by the capacitance between the ground and vehicle coils during the charging process.

In order to investigate these coupling paths and types, representative coil designs are built up as prototypes according to the current standard proposals. They are electrically characterized on the basis of their impedance behavior. With a suitable WPT-bench test setup, first component tests can be carried out. Fig. 1 shows, for example, the bench test setup to determine the vehicle coils interference voltage when the floor assembled coil is excited with high-energy surge voltages.

Further, the WPT coils are modelled as detailed 3D models (see Fig. 2) in an EM simulation software and are validated on the basis of the prototypes impedance measurements. In addition to potentially interference coupling, the validated 3D models can also be used to investigate the radiated emission behavior very vividly and reproducibly. The influence of material or geometry variations on the systems interference potential can also be estimated very quickly and cost-effectively.

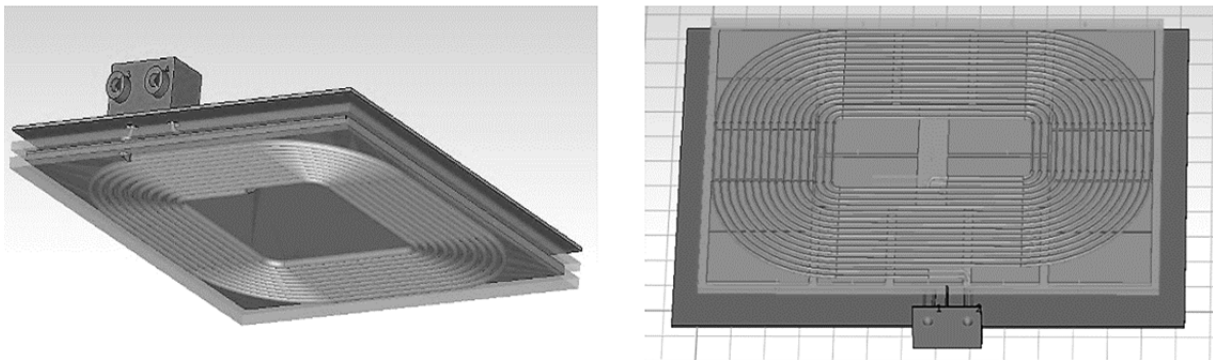


Fig. 2: 3D-Modelle von Fahrzeug- & Bodenspule für Ladeleistungen bis 11 kW.
3D models of vehicle & ground coils for charging power up to 11 kW.

■ **Auswirkungen von ungeschirmten Hochvoltleitungen auf leitungsgebundene Emissionen in Elektrofahrzeugen**

M. Sc. Denis Müller

Ein zentraler Bestandteil des elektromagnetischen Verträglichkeitskonzepts (EMV Konzept) im Hochvoltstrang von Elektrofahrzeugen sind die geschirmten Gleichstromleitungen (DC-Leitungen) des Traktionsnetzes. Durch den Kabelschirm soll eine unzulässig hohe Emission elektrischer und magnetischer Felder unterbunden werden. Problematisch ist die Anbindung der Kabelschirme an die Karosseriemasse. Diese soll im Stecker des Kabels möglichst niederimpedant und flächig ausgeführt sein. Gleichzeitig müssen Hochvoltstecker häufig Stromtragfähigkeiten von mehreren hundert Ampere bereitstellen, was zusätzliche Herausforderungen an die Kontaktstellen der Stecker bzgl. deren Wärmeabfuhr darstellt. Diese Rahmenbedingungen müssen für 10 bis 15 Jahre unter rauen Umgebungsbedingungen zuverlässig erfüllt werden.

Da diese Funktionalitäten mit hohen Kosten für Bauteile im Traktionsnetz einhergehen, gibt es Bestrebungen, die DC-Leitungen mit ungeschirmten Kabeln auszuführen. Bei einer ausreichenden Filterung der leitungsgebundenen Störungen direkt am DC-Anschluss des Traktionsinverters lässt sich die Abstrahlung auf ein zulässiges Maß reduzieren. Der Wegfall des Kabelschirms hat jedoch eine nicht zu unterschätzende Auswirkung auf die Auslegung der eingesetzten Filter.

Fig. 1 zeigt die Messung der leitungsgebundenen Störspannung eines Traktionsinverters mit einem Filter zur Einhaltung der Grenzwertklasse 5 nach CISPR25 (in grau). Im Vergleich zur Rohemission (siehe strichpunktierte Kurve) kann der Grenzwert mit geschirmten Kabeln und Filtern eingehalten werden. Werden ungeschirmte Hochvoltkabel verwendet, lässt sich eine Erhöhung der leitungsgebundenen Störungen (siehe gestrichelte Kurve) über annähernd den gesamten Frequenzbereich erkennen. Gleichzeitig verschärft sich der Grenzwert erheblich. Die Anhebung der Störspannung lässt sich mit der Verringerung der parasitären Induktivitäten durch die zusätzliche Masseanbindung des EMV-Filters über den Kabelschirm in Fig. 2 erklären.

Um den schärferen Anforderungen im Langwellen- und Mittelwellen-Frequenzbereich bei ungeschirmten Systemen zu genügen, werden größere induktive Bauelemente benötigt, was wiederum mehr Bauraum und ein größeres Gewicht des passiven EMV-Filters bedeutet. Eine Möglichkeit, die induktiven Bauelemente zu reduzieren, bietet die Kombination des konventionellen passiven Filters mit einer aktiven Filterstufe.

■ Effect of the Application of unshielded High Voltage Cables on Conducted Emissions in Electrical Vehicles

M. Sc. Denis Müller

A main component of the electromagnetic compatibility concept (EMC concept) in the high-voltage powertrain of electric vehicles are the shielded DC cables of the traction cable harness. The cable shield is intended to prevent unacceptable high emission of electric and magnetic fields. The connection of the cable shield to the chassis ground is difficult. It should be designed with a very small impedance. At the same time, high-voltage connectors often have to withstand currents of several hundred amps which provides additional challenges to the contact points of the connectors with regard to heat dissipation. These conditions must be reliable over periods of 10 to 15 years under harsh environmental conditions.

Since these functionalities are usually associated with high costs for the component, efforts are made to implement high-voltage cable harness using unshielded cables. With sufficient filtering of the conducted emissions at the input of the traction inverter, the radiation can also be reduced to a compliant level. However, the elimination of the cable shield has a significant effect on the requirements of the filters.

Fig. 1 shows a measurement of conducted emissions of a traction inverter with a filter for compliance according to CISPR25 class 5 (in grey). Compared to the raw emission (dotted line) the limit value can be complied with shielded cables and filters. If unshielded high-voltage cables are used, an increase in conducted emissions (dashed line) over almost the entire frequency range can be detected. At the same time, the limit value is considerably harsher. The increase in the disturbance voltage can be explained by the reduction in parasitic inductances due to the additional ground connection of the EMC filter through the cable shield in Fig. 2. This effect should be taken into account when designing an unshielded high-voltage vehicle electrical system.

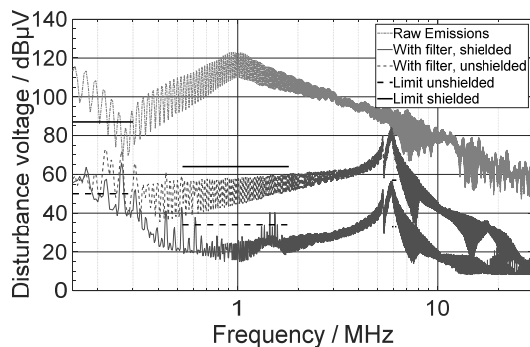


Fig. 1: Measurement of conducted emissions

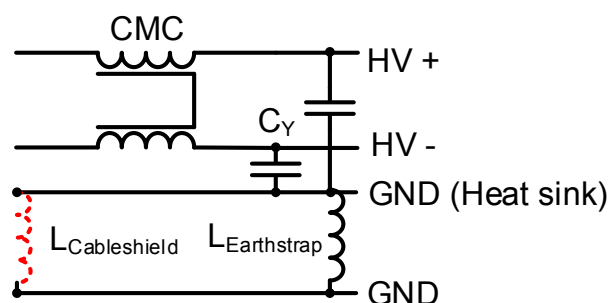


Fig. 2: Equivalent Circuit of the passive filter with parasitic inductance

Aktive Filter basieren auf dem Prinzip einer parallelen Regelschleife, die Störungen auf den Hochvoltleitungen ausregelt ohne dabei selbst hohe Lastströme tragen zu müssen. Fig. 3 zeigt das Prinzip eines aktiven Filters in Feedbacktopologie.

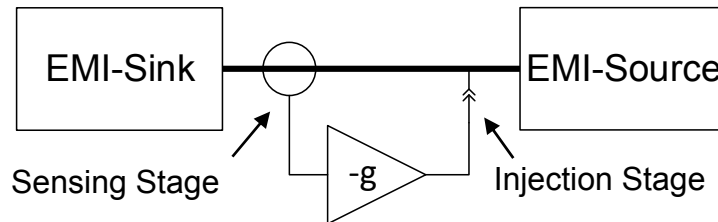


Fig. 3: Prinzip eines aktiven Filters in Feedbacktopologie.
Principle of a feedback active EMI filter.

Die Störspannung bzw. der Störstrom auf den Hochvoltleitungen wird über einen geeigneten Abgriff gemessen, das Sensorsignal anschließend invertiert, verstärkt und auf die Hochvoltleitungen in Form eines Kompensationsstroms bzw. einer Spannung eingeprägt. Die Auswahl der Sensor- bzw. Kompensationsgrößen richtet sich dabei nach den gegebenen Systemimpedanzen von Quelle und Senke.

Aufgrund begrenzter Bandbreite der aktiven Bauteile und des Phasenfehlers des Gesamtsystems bei höheren Frequenzen erreichen aktive Filter ihre maximale Dämpfung im Frequenzbereich unter 10 MHz. Um dennoch den gesamten Frequenzbereich abzudecken, bietet sich eine Kombination mit einer deutlich reduzierten passiven Filterstufe an. In Fig. 4 ist das Blockschaltbild eines solchen Hybridfilters dargestellt. Hierbei wird der passive Filter vor allem für den Frequenzbereich oberhalb 10 MHz ausgelegt, während der aktive Filter den unteren Frequenzbereich abdeckt. Somit können im Gesamtsystem die induktiven Bauelemente und damit auch Bauraum sowie Gewicht erheblich reduziert werden.

Derzeit beschäftigt sich die Forschung am IEH mit Entwicklung und Realisierung verschiedener Ansätze für aktive EMV-Filter. Dies umfasst einerseits die klassischen Ansätze, wie oben kurz dargestellt. Darüber hinaus stehen neue Verfahren im Fokus, bei welchen auf die Messstelle im Hochvoltkreis verzichtet werden kann bzw. die mit weniger Komponenten auskommen. Um solch ein Verfahren zu realisieren, sollen Schaltbefehle und verfügbare Informationen aus vorhandenen Messungen am Leistungshalbleiter verwendet werden, um eine geeignete Kompensationsgröße zu interpolieren. Mittels überwiegend digitalen Bausteinen soll damit eine Erweiterung des Frequenzbereichs der Filterdämpfung, verglichen mit aktiven Filtern in Analogtechnik, erreicht werden.

To comply with the harsher limits for unshielded systems in both, longwave and mediumwave frequency range, larger inductive components are required which leads to a rise in installation space and weight of the passive filter. A possibility to reduce the inductive components could be the combination of the conventional passive filter with an active filter stage for the lower frequency range.

Active filters are working as a parallel control loop to suppress the disturbances on the DC-cables without carrying the operation current. The disturbance voltage or current on the DC-cables is measured using a suitable sensing tap. The sensed signal will be inverted and then amplified. The created compensation signal is injected as a compensation current or voltage onto the HV lines. The choice of voltage or current as sensing or injection signal depends on the individual system impedances of source and sink.

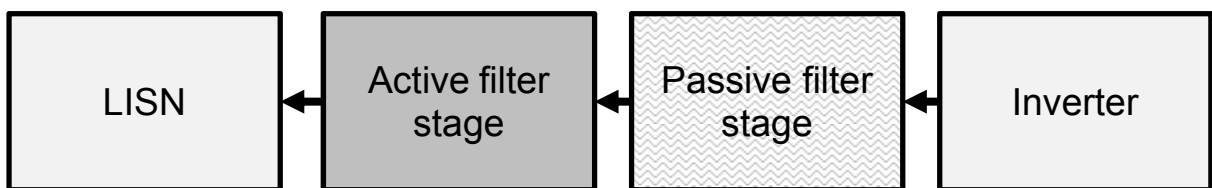


Fig. 4: Blockdiagramm eines hybriden Filters
Block diagram of a hybrid filter.

Due to limited bandwidth and phase error of active components at higher frequencies, active filter are providing their maximum attenuation typically below 10 MHz. To cover the entire frequency range, a combination with a significantly reduced passive filter can provide a practical solution. Fig. 4 shows a block diagram of such a hybrid EMI filter. The attenuation of the passive filter is mainly located in the higher frequency range above 10 MHz, while the active filter stage covers the lower frequency range. This leads to a reduction of the inductive parts and thus both, installation space and weight can be reduced considerably.

Research at the IEH currently focuses on the development and implementation of various topologies for active EMC filters. On the one hand, this includes the classical approaches, as briefly described above. On the other hand, the focus is on methods in which the measurement on the DC-cables can be avoided or require fewer analog circuit components. For the implementation of such a system, available information like switching times and measurements on the power semiconductor should be used to interpolate a suitable compensation signal. By mainly using digital components, the frequency range of the filters attenuation is to be extended, compared to analog active filter.

■ CISPR 25 Komponententests mit komplexen Kabelbäumen

M. Sc. Jan Schabel

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

Beim EMV-Komponententest eines Kfz-Steuergerätes muss eine Vielzahl an Bus-Signalen aus der Absorberkammer an externe Zuspieldgeräte übertragen werden. Dazu wird an das Steuergerät ein Stück des originalen Kabelbaums angeschlossen. Auf der anderen Seite des Kabelbaums werden die einzelnen Bus-Leitungen an optische Übertragungsstrecken oder geschirmte Leitungen angeschlossen, um diese aus der Absorberkammer zu führen. Die Verbindung der einzelnen Leitungen auf die Übertragungsstrecken erfolgt häufig in geschirmten Metallboxen. Innerhalb dieser Loadboxen ist durch die Norm keine Leitungsverlegung definiert. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit der Messung verhindert. Auch kann die Loadbox durch Reflexionen die Emissionsmessung beeinflussen.

Deshalb wird zunächst der Einfluss des Messaufbaus auf die Abstrahlung untersucht. Dazu werden einzelne Parameter, wie die Leitungslänge, die Anbindung des Gehäuses des Prüflings an die Bezugsmassefläche und die Verlegung der Leitungen im Messaufbau variiert.

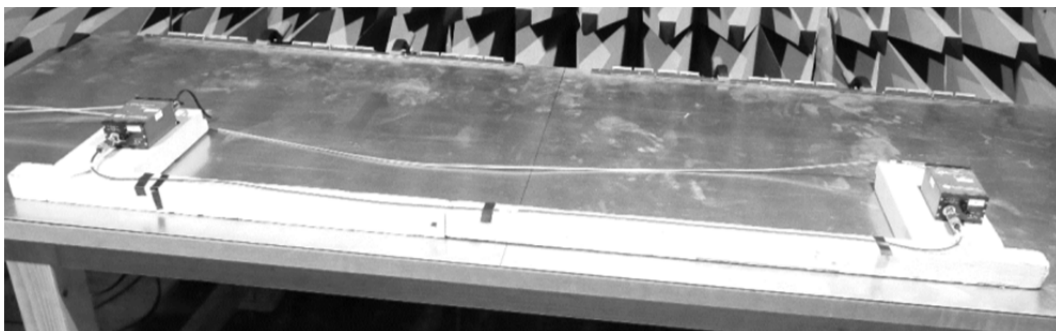


Fig. 1: Aufbau für die Messung gestrahlter Emissionen nach CISPR 25.
Setup for a measurement of radiated emissions acc. to CISPR 25.

■ CISPR 25 Component Level Test with complex Wiring Harnesses

M. Sc. Jan Schabel

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

When performing an EMC component test of an ECU, numerous bus signals have to be transmitted from the anechoic chamber to outside gears. Therefore, a piece of the original cable harness is connected to the ECU on one side. The other side either is connected to optical links or to shielded cables that lead out of the anechoic chamber. The connection between individual bus wires of the harness and the optical links is usually implemented in metal enclosures. Within these load boxes, the standard doesn't provide a defined cable routing. Thus, reproducibility of measurements is usually not given. In addition, the loadbox can cause reflections, affecting the emission measurement.

Measurements shall show how different variations in the test setup will influence the radiated emissions. Therefore, single parameters like the cable length, the ground connection of the DUT and placing of the cable in the setup are investigated.

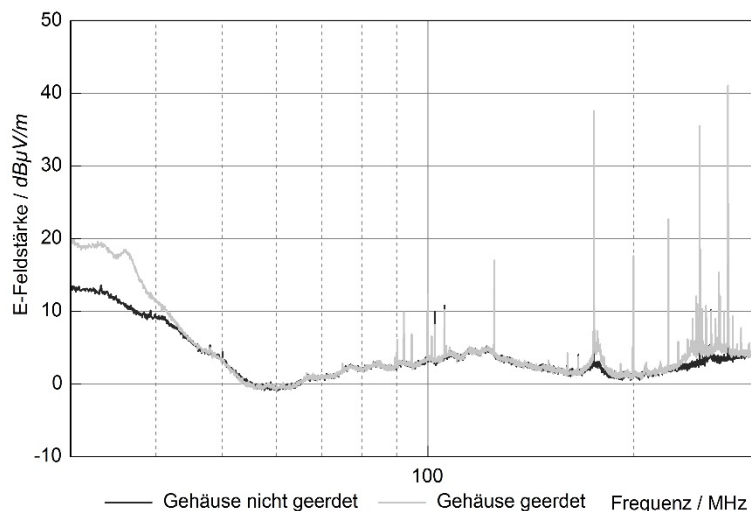


Fig. 2: Messung der gestrahlten Emissionen mit und ohne Verbindung des Gehäuses mit der Masse.

Radiated emission measurement with and without connecting the enclosure to ground.

■ 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, Symmetrie oder hohe Eingangs-impedanz.

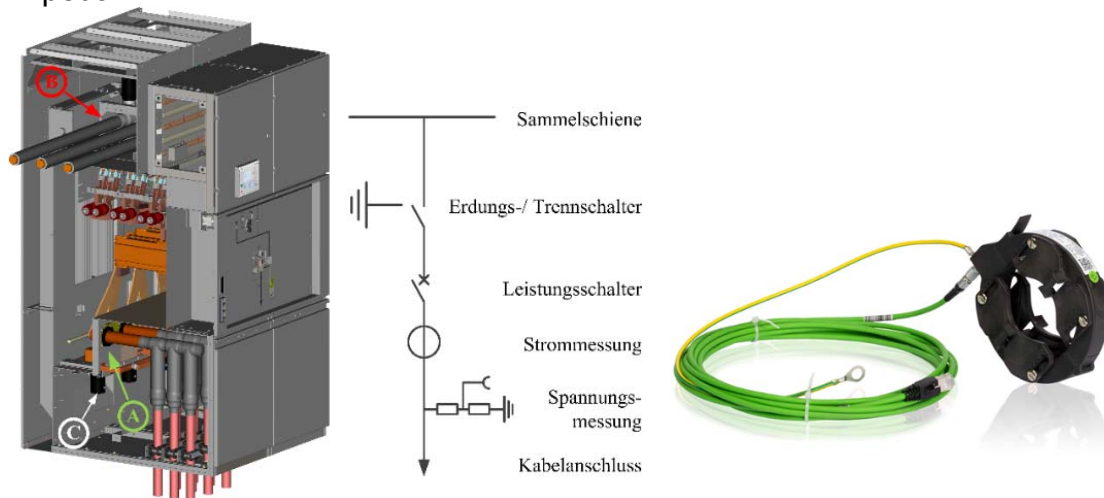


Fig. 1: Mittelspannungsschaltanlage (links) und Rogowski-Sensor (rechts).
Medium voltage switchgear (left) and Rogowski sensor (right).

Ziel der Arbeit ist es, die auftretenden Störpegel an den analogen Sensoreingängen zu ermitteln und Konzepte zur Sicherstellung der EMV abzuleiten. Hierfür werden an Schaltanlagen Messungen während Schalthandlungen, bzw. bei hohem Oberwellenanteil im Strom vorgenommen und diese dann in einem einfachen Aufbau, bestehend aus Schutzgerät, Prüfgenerator und 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 analog 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.

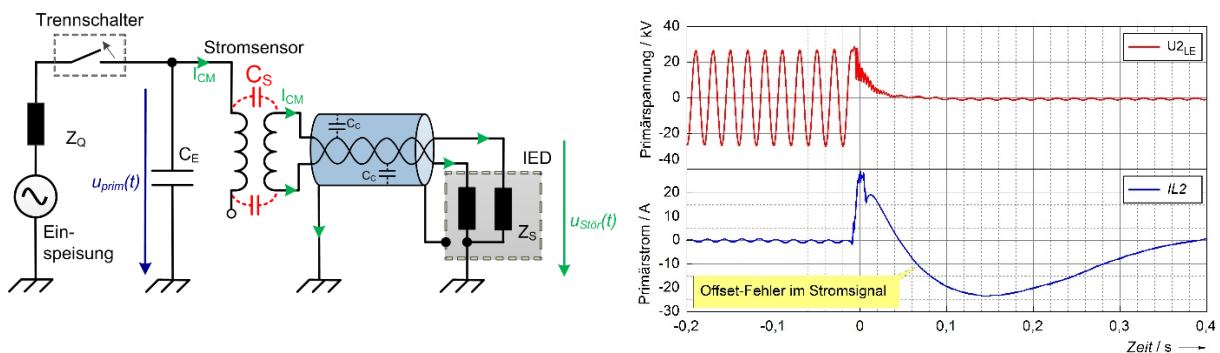


Fig. 2: ESB der Kopplung (li.) und Störschrieb einer Schutz-Überfunktion (re.).
Disturbance coupling (left) and record of protection malfunction (right).

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.ieh.uni-stuttgart.de abgerufen werden.

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

P. Wiest, K. Rudion, A. Probst

Efficient Integration of (n-1)-Security into probabilistic Network Expansion Planning.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 94, Januar 2018, pp. 151-159

P. Wiest, D. Groß, K. Rudion

Probabilistische Verteilnetzplanung zur Analyse der Gleichzeitigkeit von Elektromobilität.

5. Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien, Berlin, 30.-31. Januar 2018

M. Buchner, O. Laribi, K. Rudion

Bestimmung der Betriebsweise eines Speichers zur Netzentlastung auf Basis Linearer Optimierung.

5. Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien, Berlin, 30.-31. Januar 2018, Paper No. 01

D. Mueller, M. Beltle, S. Tenbohlen

Automatisierte Filteroptimierung für Hochvoltbordnetze basierend auf Schaltungssimulationen zur Störspannungsvorhersage.

EMV 2018, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 20.-22. Februar 2018, Tagungsband, S. 208-215

M. Haug, M. Beltle, S. Tenbohlen

Grundlegende Betrachtungen der Kopplungsmechanismen möglicher Störgrößen für induktive KFZ-Ladesysteme.

EMV 2018, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 20.-22. Februar 2018, S. 548 – 555

S. Haegele, S. Tenbohlen, D. Perrino, M. Konermann

Feldstudie für den flächendeckenden Einsatz natürlicher Ester in Verteiltransformatoren.

Stuttgarter Hochspannungssymposium, Stuttgart, 6.-7. März 2018, Tagungsband, S. 101-110

S. Tenbohlen, M. Tahir, S. Miyazaki

Development and Optimization of Methods for Objective Interpretation of Frequency Response Analysis of Power Transformers.

85th International Conference of Doble Clients, April 8-13, 2018 Boston, USA

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, Vol. 33, Issue 3, June, 2018, pp. 1091-1098, DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2711786

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

Real-Time Evaluation of the Dynamic Loading Capability of Indoor Distribution Transformers.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, Issue 3, June, 2018, pp. 1134-1142, available online, DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2728820

S. Tenbohlen, M. Beltle, M. Siegel

Condition Assessment of Power Transformers by UHF PD Monitoring.

Proceedings of TechCon SE Asia, Manila, June, 2018

M. Banka, D. Contreras, K. Rudion

Hardware-in-the-loop Test Bench for Investigation of DER Integration Strategies within a multi-agent-based Environment.

2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, Cyprus, June 3-7, 2018, Paper No. 137

S. Eberlein, K. Rudion

Influence of Inaccurate Low Voltage Microgrid Synchronization on Synchronous Generators.

IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), June 3-7, 2018, Limassol, Cyprus, paper No. 127

S. Eberlein, K. Rudion

Influence of Inaccurate Medium Voltage Microgrid Synchronization on Synchronous Generators.

CIREN Workshop, June 7-8, 2018, Ljubljana, Slovenia, paper No. 0424

D. A. Contreras, O. Laribi, M. Banka, K. Rudion

Assessing the Flexibility Provision of Microgrids in MV Distribution Grids.

CIREN Workshop, June 7-8, 2018, Ljubljana, Slovenia, paper No. 0428

D. Contreras, K. Rudion

Improved Assessment of the Flexibility Range of Distribution Grids Using Linear Optimization

20th Power Systems Computing Conference (PSCC 2018), June 11–15, 2018, Dublin, Ireland, session 07

T. Yalcinoz

A dynamic Model and Analysis of PEM Fuel Cells for an Electric Bicycle.

18th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 12-15, 2018, Palermo, Italy, S. 1-5

DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493821

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

Lightning Impulse Withstand of Natural Ester Liquid.

Energies, Special Issue Engineering Dielectric Liquid Applications, July 2018, doi:10.3390/en11081964

S. Tenbohlen, M. Tahir, E. Rahimpour, B. Poulin, S. Miyazaki

A New Approach for High Frequency Modelling of Disc Windings.

CIGRE session Paris, August, 2018, paper no. A2-214

S. Tenbohlen, C. Kattmann, T. Brügger, M. Siegel, M. Konermann, E. Junge, J. Christian

Power Quality Monitoring in Power Grids focusing on Accuracy of High Frequency Harmonics.

CIGRE Session 2018, Paris, France, August, 2018, paper No. C4-122.

M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal and H. Mohseni

Dismissing Uncertainties in the FRA Interpretation.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 4, Aug. 2018, pp. 2041-2043, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2618601

M. H. Samimi, S. Tenbohlen

Using the Temperature Dependency of the FRA to Evaluate the Pressure of the Transformer Press Ring.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 4, Aug. 2018, pp. 2050-2052, DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2691541

D. Mueller, M. Beltle, S. Tenbohlen

Automated Filter Optimization for High-Voltage Cable Harness based on Circuit Simulations for Conducted Emissions Prediction.

EMC Europe 2018, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Amsterdam, The Netherlands, August 27-30, 2018, Session SS-09b, Conference Proceedings, p. 84-89

S. Miyazaki, M. Tahir, S. Tenbohlen

Sensitivity of Connection Schemes for Detection of Axial Displacement of Transformer Winding by Frequency Response Analysis.

2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018), Athen, Greece, September 10-13, 2018, paper no. 148

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

Comparison of FRA Data measured by Different Instruments with Different Frequency Resolution.

2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018), Athen, Greece, September 10-13, 2018, paper no. 149

B. Adam, S. Tenbohlen

Classification of multiple PD Sources by Signal Features and LSTM Networks.

2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018), Athen, Greece, September 10-13, 2018, paper no. 170

S. Khandan, S. Tenbohlen

CFD Investigation of Temperature Distributions by Non-uniform Heat Losses inside Windings.

2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018), Athen, Greece, September 10-13, 2018, paper no. O-AM3

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

Synthetic Load Profiles of Various Customer Types for Smart Grid Simulations.

Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems - NEIS, Hamburg, Deutschland, September 20-21, 2018, Poster-Session 2

S. Eberlein, K. Rudion

Influence of PLL on Synthetic Inertia of DFIG Wind Turbine in Droop Controlled Microgrids.

IET Renewable Power Generation, September 26-27, 2018, Copenhagen, Denmark

J. Du, W. Chen, L. Cui, Z. Zhang, S. Tenbohlen

Investigation on the Propagation Characteristics of PD-induced Electromagnetic Waves in an actual 110kV Power Transformer and its Simulation Results.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, No. 5, Oct. 2018, pp. 1941-1948, DOI: 10.1109/TDEI.2018.007336

W. Fritz

Voltage Distortion by Grid-connected Solar PV Systems and its Effect on Bottom Line. 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE on Engineering and Business Education (ICEBE), October 15-19, 2018, Szczecin, Poland, Plenary Session 10

S. Eberlein, A. Heider, K. Rudion

Modelling and Control Optimization of Diesel Synchronous Generators in LV Microgrids.

8th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT 2018), October 21-25, 2018, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina

O. Laribi, P. Wiest, K. Rudion

Dimensioning and Positioning of Storage Systems under the Consideration of the (n-1) Security Criterion in 110 kV Distribution Grids.

8th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT 2018), October 21-25, 2018, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina

O. Laribi, M. Miller, P. Wiest, K. Rudion, F. Fischer, T. Lübke

Netzausbauoptimierung in den Verteilnetzen durch Einsatz moderner Planungsmethoden.

Ingenieurspiegel, Heft 4, 2018, S. 29-30

A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion

Power Quality Monitoring und Prognose in Verteilnetzen.

Ingenieurspiegel, Heft 4, 2018, S. 38-40

D. Groß, D. Contreras, H. Früh, K. Rudion, C. Exner, A. Großhans

Systemischer Einsatz von Flexibilitäten zur optimierten Betriebsführung in Verteilnetzen.

Ingenieurspiegel, Heft 4, 2018, S. 45-47

B. Adam, M. Beltle, S. Tenbohlen

Klassifikation von TE-Messungen unter Ausnutzung des vollständigen Informationsgehalts.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, Paper Nr. 409

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

TE-Charakterisierung frei beweglicher Partikel in HVDC-GIS mittels UHF-Messtechnik und Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, S. 10-15

C. Suttner, W. Ebbinghaus, S. Tenbohlen

Störfestigkeitsprüfung von Netzschutzeinrichtungen mit passiven Kleinsignalwandlern.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, Poster 5.1

M. Schühle, M. Beltle, S. Tenbohlen

Beeinflussung von induktiven Stromwandlern in Hoch- und Höchstspannungsnetzen durch parasitäre Gleichströme.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, S. 791-796

M. Tahir, S. Tenbohlen, S. Miyazaki

Optimization of FRA by an Improved Numerical Winding Model: Disk Space Variation.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, S. 545-550.

S. Khandan, S. Tenbohlen

CFD-Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das thermische Verhalten von Scheibenwicklungen in Leistungstransformatoren.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin

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

Modellierung und Aufbau eines kapazitiven Sensors zur Auskopplung von Teilentladungen (TE) an einer Kabelmuffe.

Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik 2018, 12.-14. November 2018, Berlin, S. 87-92

H. Früh, D. Groß, K. Rudion, A. Großhans

Ermittlung von Flexibilitätsparametern zur Systemoptimierung mittels Genetischer Algorithmen im Rahmen einer Praxisanwendung.

ETG-CIRED-Workshop 2018 (D-A-CH), Innovationen im Verteilnetz, 13.-14.11.2018, Berlin, Poster Nr. 1.13

T. Umemoto, S. Tenbohlen

Validations of Simulation of UHF Electromagnetic Wave Propagation in an Oil-filled Tank by Time-Domain Measurements

IET Generation Transmission & Distribution, November 2018, DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6173

T. Umemoto, S. Tenbohlen

Novel Simulation Technique of Electromagnetic Wave Propagation in the Ultra High Frequency Range within Power Transformers

Sensors 18(12), December 2018, DOI: 10.3390/s18124236

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 26.1.18 DFG Sitzung Fachkollegiatenwahl-Kommission, Frankfurt
Prof. K. Rudion
- 30.-31.1.18 Tagung „Künftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“, Berlin
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, H. Früh, M. Buchner
- 20.-22.2.18 Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische
Verträglichkeit, EMV 2018
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, D. Mueller, M. Haug
- 01.-02.3.18 Omexom Technikforum: „Wie meistern wir gemeinsam die komplexen
Zukunftsthemen, Digitalisierung und Energiewende 2.0“, Würzburg
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen
- 06.-07.3.18 Stuttgarter Hochspannungssymposium
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, S. Hägele
- 08.-09.3.18 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, JWG A2/D1.51, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 22.3.18 ETG Fachtagung V2 „Übertragung und Verteilung elektrischer
Energie“, Frankfurt
Prof. K. Rudion
- 10.04.18 CIGRE-Arbeitsgruppen-Meeting, DK A2, Bonn
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 19.04.18 Programmausschuss Hochspannungstechnik, Berlin
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 20.-26.4.18 TechCon SE Asia, Philippinen, Manila
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen
- 20.4.18 DFG Kollegiatenwahl – Findungskommissionssitzung
Prof. K. Rudion
- 15.-16.5.18 Technischer Beirat Omexom, Regensburg
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 11.-15.6.18 PSCC 20th Power Systems Computation Conference, Dublin
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, D. Contreras
- 18.7.18 C/sells TP4 Konferenz, München
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, S. Eberlein
- 5.-9.8.18 2018 IEEE PES General Meeting, Portland, USA
Prof. K. Rudion
- 25.8.18 CIGRE AG D1.01, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 26.-31.8.18 CIGRE Session 2018 und WG A2 FRA, Paris
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 27.-30.8.18 EMC Europe 2018, International Symposium on Electromagnetic
Compatibility, Amsterdam, The Netherlands, August 27-30, 2018,
Session SS-09b, Teilnehmer/Beiträge: D. Mueller

- 10.-13.9.18 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018), Athen, Griechenland
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen, S. Khandan, B. Adam, S. Hägele
- 17.09.18 Industriearbeitskreis Mittelspannungs-Leistungselektronik, Berlin
Teilnehmer/Beiträge: Prof. S. Tenbohlen
- 17.-20.09.18 18. HV Workshop 2018, Cottbus
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, Beura, Passow, Wenger
- 17.-19.9.18 ERA-Net SES: Family Projects Event 2018, Magdeburg
Teilnehmer: Prof. K. Rudion, D. Contreras
- 18.9.18 Workshop „Systemdienstleistungen – Stabile Stromversorgung durch PV- und Windenergie?“, Dortmund
Prof. K. Rudion
- 19.9.18 Dresdner Symposium Sternpunkterdung, Dresden
Prof. K. Rudion
- 20.-21.09.18 Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems - NEIS, Teilnehmer/Beiträge: P. Wiest
- 16.10.18 CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung, Essen
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 17.10.18 CIGRE Meeting TF 3 D1.70, Bad Honnef
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 12.-14.11.18 VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2018, Berlin
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen, S. Khandan, B. Adam, M. Tahir, M. Beltle, Ch. Suttner, D. Passow, P. Wenger
- 13.-14.11.18 ETG-CIRED Workshop 2018 (D-A-CH): Innovationen im Verteilnetz, Teilnehmer/Beiträge: P. Wiest, H. Früh
- 20.11.18 Umweltabend im Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
Prof. K. Rudion
- 27.11.18 DAK CIGRE SC C4, Stuttgart
Teilnehmer: Prof. S. Tenbohlen
- 3.12.18 7. Smart Grids Baden-Württemberg Kongress, Fellbach
Prof. K. Rudion

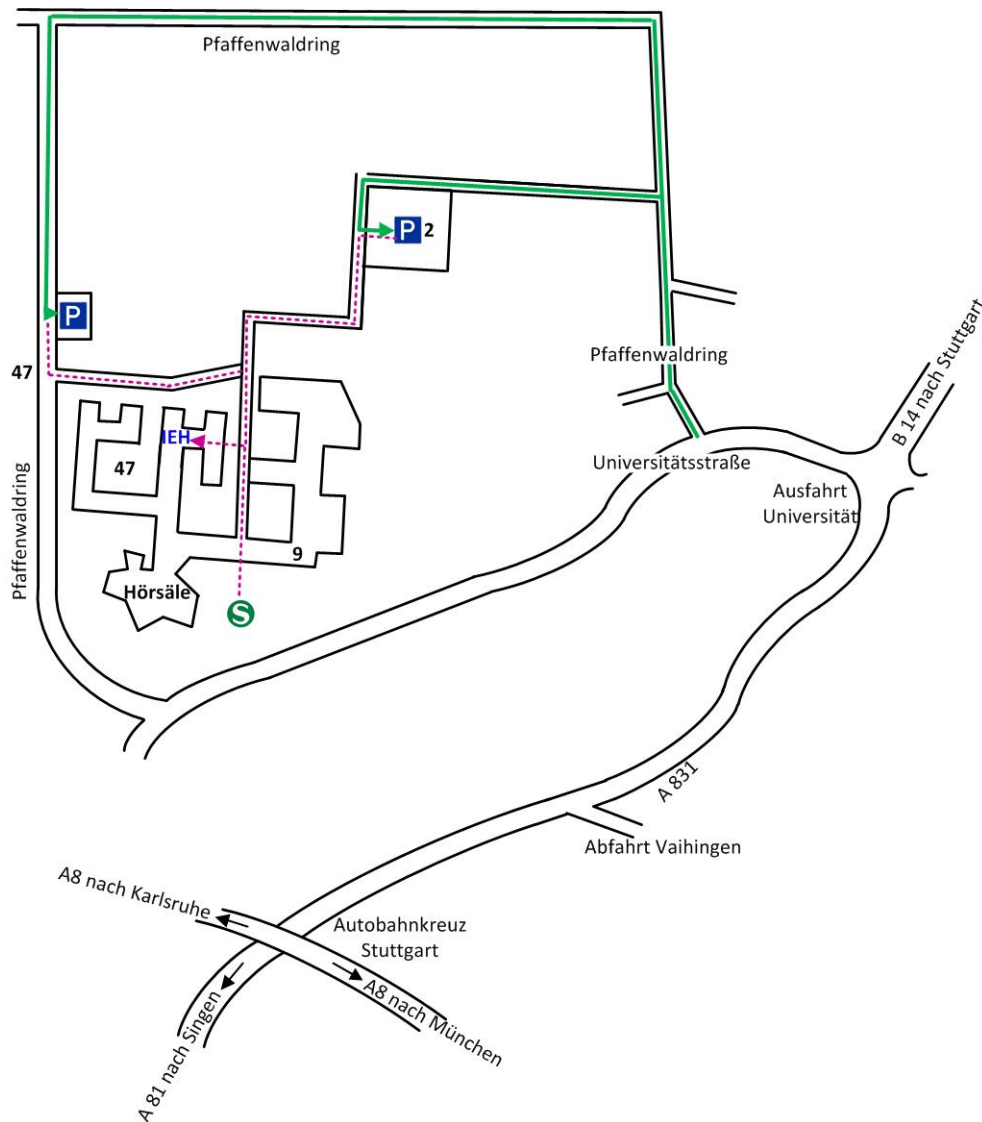
8. PRÜFEINRICHTUNGEN

Stoßspannungsanlagen	bis 1.4 MV, 100 kJ
Schwingende Blitzstoßspannung	bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ
Wechselspannungskaskade	2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung
Wechselspannungsanlage	300 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz
Gleichspannungsanlage	bis 600 kV, 10 mA mit Teilentladungsmessplatz
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluft- antenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m ³ (B x L x H)
Spannungsteiler	gedämpft kapazitive Spannungsteiler bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)
E/H-Feldmesssysteme	mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 500 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)
EMV-Prüf- und Messgeräte	diverse ESD-Pistolen, LV- und HV- Bordnetz- nachbildungen (LISN) für nach CISPR 25 / automotive und nach CIPSR 16. BCI-Zangen, Koppelzangen nach IEC 61000-4, Multifunktionsgeneratoren für Burst, Surge nach IEC 61000-4, versch. vektorielle Netzwerk- analysatoren, Breitbandmessempfänger 10 Hz-6 GHz. versch. Signalgeneratoren 9 kHz-6 GHz. Diverse Os- zilloskope bis 3 GHz.
EMV-Absorberräume	10 m und 3 m Messabstand, mit Leistungsverstärkern, Monopole, Bikonische, UltraLog- und Hornantennen für 9 kHz bis 5GHz, Videoüberwachung über LWL für Stör- festigkeit, TEM-Messzellen
Klimakammer	3 x 3 x 3 m ³ , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C
Einpolige SF6-Anlage	Un = 525 kV, max. Länge mit Abzweigen ca. 25 m
Einpolige SF6-Anlage	Un = 245 kV, max. Länge mit Abzweigen ca. 5 m
Teilentladungsmessgeräte	für elektrische TE-Messungen nach IEC 60270. UHF-Messsysteme (300 MHz-3 GHz), akustische Or- tungssysteme. Die Systeme unterstützen verschiedene Analyseverfahren.
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlag- spannungsmessgerät, Gaschromatographen (Vaku- umentgasung- und Headspace), Ölaufbereitungs- anlagen für Mineralöl und Bioester

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

9. LAGEPLÄNE

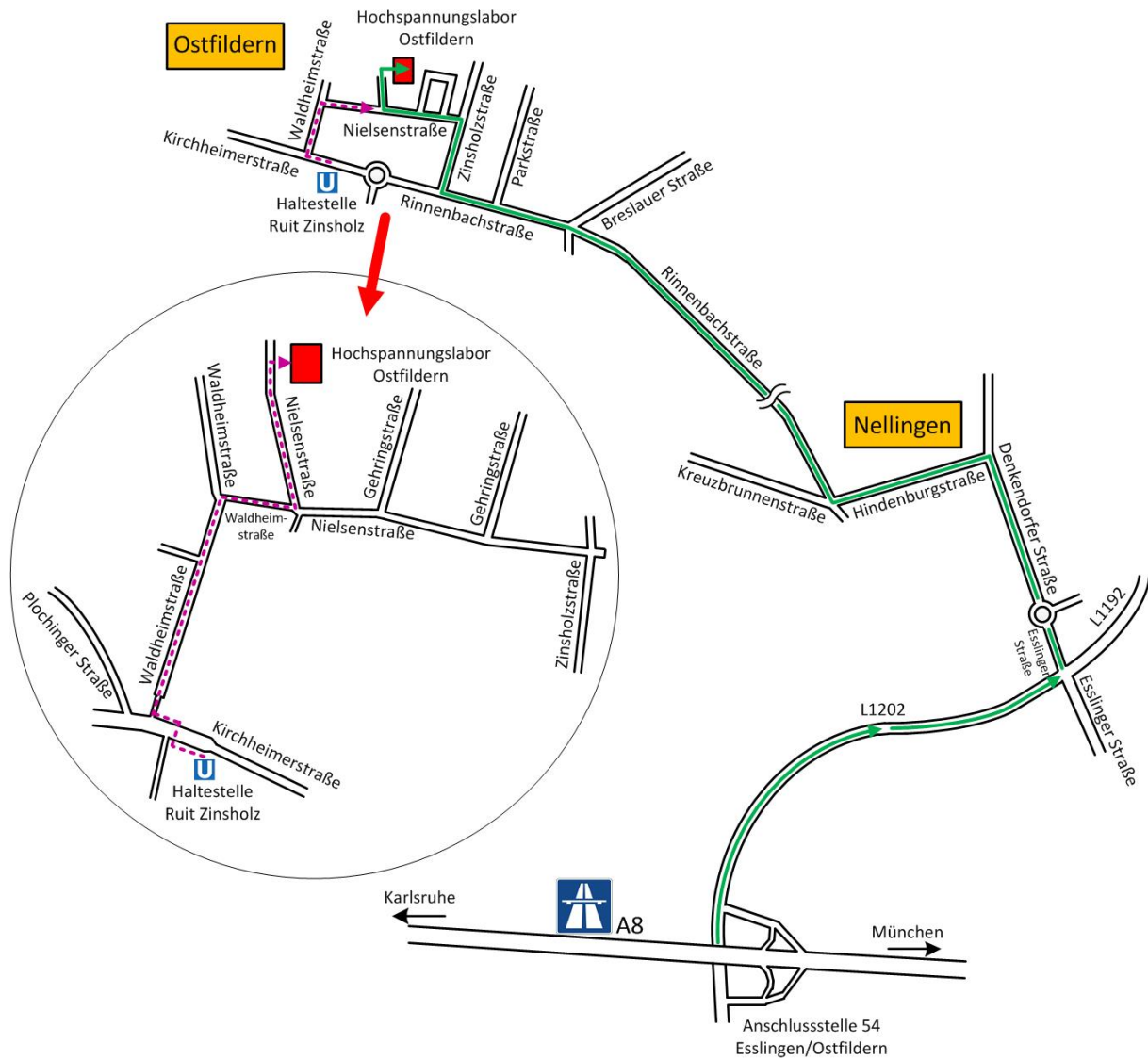
Lageplan
des Institutsteils Stuttgart-Vaihingen
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Telefon: +49 (0)711 685-67870



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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

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



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

Stadtbahnlinien U7 und U8

Haltestelle „Ruit Zinsholz“

(ab Stuttgart Hbf 20 Minuten Fahrzeit)