

# INHALT

<b>1.</b>	<b>VORWORT</b> .....	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS</b> .....	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>LEHRE</b> .....	<b>8</b>
	3.1 VORLESUNGEN .....	8
	3.2 PRAKTIKA .....	13
	3.3 EXKURSIONEN .....	14
	3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN .....	16
<b>4.</b>	<b>PROMOTIONEN</b> .....	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>FORSCHUNGSARBEITEN</b> .....	<b>48</b>
	5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK .....	52
	5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS .....	82
	5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT .....	114
<b>6.</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN</b> .....	<b>120</b>
<b>7.</b>	<b>MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE</b> .....	<b>125</b>
<b>8.</b>	<b>PRÜFEINRICHTUNGEN</b> .....	<b>127</b>
<b>9.</b>	<b>LAGEPLÄNE</b> .....	<b>128</b>

# 1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2015 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Das Jahr 2015 war für die Energielandschaft sehr interessant und wichtig. Zum einen hat sich die Weltgemeinschaft im Dezember in Paris auf globale Ziele im Bereich des Klimaschutzes geeinigt. Zum anderen wurden in Deutschland einige wichtige Meilensteine z.B. durch die Verabschiedung eines neuen Erdkabel-Gesetzes sowie die Erarbeitung von Gesetzesentwürfen im Bereich der Digitalisierung der Energiewende sowie des Strommarktes 2.0 erreicht. Diese Entwicklungen haben zwar einen bedeutenden Einfluss auf die Fortschritte bei der Energiewende in Deutschland, jedoch stellen sie keine endgültigen Lösungen dar. Alle diese Aspekte sind ein deutliches Signal, dass die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich intelligenter Energieversorgungssysteme in den kommenden Jahren weiterhin an Bedeutung gewinnen werden.

Die aktuellen Aktivitäten der Bundesregierung im Rahmen diverser Förderprogramme, wie z.B. *“Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende (SINTEG)”* sowie *“Kopernikus-Projekte für die Energiewende”* zeigen dies. Im Rahmen des Schaufensterprogramms wurden auch die Aktivitäten des Vereins *“Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V.”*, dessen Vorstandsvorsitz wir in 2015 übernehmen durften, besonders gewürdigt. Ein durch den Verein geführtes Konsortium wurde zur Einreichung des Projektantrags *“C/sells”* nominiert. Mit einem Projektvolumen von rund 100 Mio. € werden 60 Partner aus Industrie, Energiewirtschaft und Wissenschaft innerhalb von vier Jahren ein zelluläres Energiesystem in Süddeutschland umsetzen.

Das Interesse an Themen der Energiewende, des Netzausbaus und Smart Grid Lösungen ist auch bei den Studierenden weiter ungebrochen. Über 70 studentische Arbeiten wurden in 2015 am IEH abgeschlossen, ein sehr gutes Ergebnis. Auch dieses Jahr konnten wir unseren Studierenden die Inhalte der Lehrveranstaltungen im Rahmen diverser Exkursionen, u.a. bei der viertägigen Pfingstexkursion, mit Einblicken in die Praxis nahe bringen. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Gastgebern herzlich bedanken.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben zwei abgeschlossenen Dissertationen von Dr.-Ing. Simon Burow (*Neue Methoden zur Dämpfung schneller transients Überspannungen in gasisoliereten Schaltanlagen*) und Dr.-Ing. Andreas Weinläder (*Thermohydraulische Untersuchung von ölgefüllten Leistungstransformatoren*) dokumentieren über 30 Veröffentlichungen unsere Forschungsaktivitäten.

Besonders erwähnen möchte ich hier den Abschlussbericht zur CIGRE WG A 2.37 *“Transformer Reliability Survey“*, deren Vorsitzender ich sein durfte. Durch die Arbeitsgruppe wurden weltweit fast 1000 Transformatorausfälle gesammelt und ausgewertet. So steht nun endlich wieder eine aktuelle Ausfallstatistik zur Verfügung. Einen Großteil unserer Veröffentlichungen können Sie auch auf unserer Homepage ([www.uni-stuttgart.de/ieh](http://www.uni-stuttgart.de/ieh)) finden.

Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns, in diesem Jahr vier neue Mitarbeiter einzustellen, die sich Fragestellungen sowohl im Netz- als auch im Hochspannungsbereich annehmen werden. Dabei beschäftigt sich Herr M. Sc. Manswet Banka mit dem Thema Netzwiederaufbau während sich Herr M. Sc. Daniel Groß dem Thema Zustandserkennung widmet. Herr M. Sc. Benjamin Adam wird Mustererkennungsverfahren für Teilentladungsmessungen und Herr M. Sc. Michael Schühle den Einfluss von DC-Strömen auf das Betriebsverhalten von Leistungstransformatoren untersuchen.

Im Jahr 2016 wird das Institut wieder Gastgeber des traditionsreichen *Stuttgarter Hochspannungssymposiums* sein, das wir am 01.-02.03.2016 im bekannten Rahmen in der Filderhalle in Leinfelden durchführen werden. Die innovativen Lösungen im Netzbereich werden im Mittelpunkt dieser Veranstaltung stehen. So haben wir als Titel der Veranstaltung *“Innovationen für die Netze der Zukunft“* gewählt. Dankenswerterweise haben sehr renommierte Experten verschiedener Energieversorgungsunternehmen und Hersteller einen Beitrag zugesagt. Das ausführliche Programm und weitere Informationen hierzu finden Sie auf der Homepage <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/symposium>. Wir freuen uns schon jetzt auf interessante Beiträge zu diesem hochaktuellen Thema und auf die lebhaften Diskussionen.

Allen unseren Freunden möchten wir an dieser Stelle recht herzlich für die Anregungen und Hilfe danken. Unser besonderer Dank gilt den Firmen, die uns durch Aufträge und Spenden unterstützt haben, sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 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 Mitarbeitern des Instituts.

Stuttgart, im Januar 2016

## PREFACE

Dear friends!

As usual, we would like to inform you about our activities with our annual report 2015.

The year 2015 was an interesting and important period of time for the energy landscape. On the one hand, in Paris the international community has agreed on global goals in the area of climate protection. On the other hand, several important milestones were achieved in Germany, for example by adopting a new law on underground cables as well as preparing draft laws in the area of digitalization of the energy transition and the electricity market 2.0.

These developments have indeed a considerable impact on the promotion of energy transition in Germany but they do not provide definitive solutions. All these aspects are clear signals that research and development activities in the area of intelligent energy supply systems will become more important in the upcoming years.

The current activities of the Federal Government emphasise this with various founding programmes, for example "*Showcase of intelligent energy – Digital agenda for the energy transition*" as well as "*Kopernikus-projects for the energy transition*" ("*Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende (SINTEG)*", "*Kopernikus-Projekte für die Energiewende*"). In the framework of the showcase programme the activities of the association "*Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V.*", whose chairmanship of the board we took over in 2015, were particularly appreciated. A consortium, led by this association, was nominated to prepare the project "*C/sells*". With a volume of about € 100 million, 60 partners from industry, energy sector and science will implement a cellular smart energy system in Southern Germany within four years.

Again our students show a continuing interest in subjects of energy transition, network expansion and smart grid solutions. More than 70 students finished their degree at our institute in 2015, which is a very good result. As every year, we offered several excursions to our students, for example a four days trip in May, which gave them the opportunity to gain practical insight. We would like to thank the enterprises and partners contributing to our excursions with financial help and personal efforts.

Once again, concerning the scientific work we look back to a very successful year. Besides two finished dissertations of Dr.-Ing. Simon Burow (*New Methods of Damping Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Switchgear*) and Dr.-Ing. Andreas Weinläder (*Thermohydraulic Investigation of Oil-Filled Power Transformers*) more than 30 conference papers and publications show our research activities. I would like to mention particularly the final report of the CIGRE Working Group A 2.37 "*Transformer Reliability Survey*", whose chairman I was. Nearly 1000 transformer failures worldwide have been collected and evaluated by the working group. Thus the community has after years again access to a current failure statistic.

Please find more information about the publications on our website ([www.uni-stuttgart.de/ieh](http://www.uni-stuttgart.de/ieh)).

The high number of graduates at the institute and numerous industrial encouragements allowed us this year to hire four new employees who will work on new research topics in the area of power grids and high voltage engineering. M. Sc. Manswet Banka will dedicate himself to questions of grid restoration process whereas M. Sc. Daniel Groß will examine the subject of state estimation. M. Sc. Benjamin Adam will work on pattern recognition methods for partial discharge measurement and M. Sc. Michael Schühle will investigate the influence of DC currents on the operation of power transformers.

This year the institute will once again host the well-known *Stuttgarter Hochspannungssymposium* taking place on March 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> 2016 at the Filderhalle in Leinfelden in the same settings. Innovative solutions in power grids will be in the focus of the event. That's why we chose "*Innovations for the power grid of the future*" as a title of the event. Well-respected experts of various energy supply companies and manufacturers have kindly promised to contribute. You can find the detailed programme and further information on our website <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/symposium>. We already look forward to interesting presentations about this highly topical subject and to lively discussions.

Finally we would like to send our sincere thanks to all our friends who have contributed to our success in many ways. Especially we would like to express our gratitude to the partners who supported us with research contracts and donation, and to the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy. 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 2016.

Stuttgart, January 2016

Prof. Stefan Tenbohlen

Prof. Krzysztof Rudion

## 2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail: vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	Telefon / phone: +49 (0)711-
Institutsleiter / Head of Institute:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN	-685-67871
Leiter des Fachgebiets Netzintegration erneuerbarer Energien:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof RUDION	-685-67872
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER	
Lehrbeauftragte:	Dr.-Ing. Wolfgang PFAFF <i>Robert Bosch GmbH</i>	-811-20992
	Dipl.-Ing. Ulrich SCHERER <i>TransnetBW GmbH</i>	-21858-3437
	Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH <i>Schneider Electric Energy GmbH</i>	
	Dr.-Ing. Markus PÖLLER <i>Moeller &amp; Poeller Engineering GmbH</i>	
	Dr.-Ing. habil. Konstantin O. PAPAILIOU	
Oberingenieure:	Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI	-685-67878
	Dipl.-Ing. Daniel SCHNEIDER <i>(Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)</i>	341 2075
Akademische Mitarbeiter / Scientific Staff:	M. Sc. Ahmad ABDEL-MAJEED (bis 13.11.2015)	
	M. Sc. Benjamin ADAM (ab 1.6.2015)	-685-69198
	Dipl.-Ing. Philipp ARNOLD	341 2075
	M. Sc. Manswet BANKA	-685-67868
	Dipl.-Ing. Michael BELTLE	-685-68061
	Dipl.-Wi.-Ing. Marc BRUNNER	-685-69197
	M. Sc. Mohammad DJAMALI	-685-68270
	M. Sc. Simon EBERLEIN	-685-67857
	Dipl.-Ing. Simon EILENBERGER (bis 31.12.2015)	
	Dipl.-Ing. Katharina FREY	-685-67838

	M. Sc. Daniel GROß	-685-67875
	M. Sc. Stephanie HÄGELE	-685-67858
	M. Sc. Philipp HILLENBRAND	-685-67817
	Dipl.-Ing. Christoph KATTMANN	-685-67874
	M. Sc. Mohsen NEMATI (bis 30.9.2015)	
	Dipl.-Ing. Nicolas SCHMIDT (bis 31.10.2015)	
	M. Sc. Michael SCHÜHLE (ab 10.8.2015)	-685-69142
	Dipl.-Ing. Martin SIEGEL	-685-67867
	M. Sc. Christian SUTTNER	-341 2075
	M. Sc. Farzaneh VAHIDI	-685-69195
	M. Sc. Pascal WIEST	-685-69196
	Dipl.-Ing. Manuel WILD	-341 2075
Sekretariat / Secretary:	<i>Institutsteil Stuttgart-Vaihingen:</i>	
	Nicole SCHÄRLI	-685-67870
	Annette GUGEL	-685-67880
	<i>Hochspannungslabor Ostfildern:</i>	
	Renate KINSKI	-341 2075
Buchhaltung / Accounting:	Hermine LWOWSKI	-685-67876
Technische Angestellte / Technical Staff:	Can AKGÜL, <i>Auszubildender</i> (ab 1.9.2015)	-685-67847
	Erwin BECK, <i>Mechanikermeister</i>	-685-67847
	Metin DEMIRHAN, <i>Mechaniker</i>	-685-67847
	Timon GOLD, <i>Zentralwerkstattleiter</i>	-685-67847
	Daniel HARTICH, <i>Auszubildender</i>	-685-67847
	Michael HERDTLE, <i>Mechaniker</i>	-341 2075
	Enis KAYNAK, <i>Mechaniker</i> (ab 1.7.2015)	-685-67847
	Edona KUQI, <i>Auszubildende</i>	-685-67847
	Hartmut RÖNISCH, <i>Elektrotechniker</i>	-685-67856
	Rudolf van de WEYER, <i>Elektromeister</i>	-341 2075
	Christian WÖLZLEIN, <i>IT-Systemkaufmann</i>	-685-67863
Gastwissenschaftler / Visiting scientists:	M. Sc. Mohammad H. SAMIMI, Teheran (ab 16.06.2015)	

## **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. D. SCHNEIDER*****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. U. SCHERER*****Energiewirtschaft in Verbundsystemen***

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Vortragsübungen für Studierende zu wechselnden Themen*

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

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

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

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik im 1. und 3. 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*
- *Erzeugung und Messung von Stossspannungen*

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

### ***Praktische Übungen im Labor Hochspannungstechnik und Energieübertragung***

Die Praktischen Übungen im Labor am IEH umfassen Versuche mit folgenden Inhalten:

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

**DR.-ING. U. SCHÄRLI / M.SC. MOHSEN NEMATI**

### ***Praktikum im Studiengang „Erneuerbare Energien“***

Das Institut bietet in diesem Bachelorstudiengang einen Praktikumsversuch an, der die Grundprinzipien von Spannungs- und Frequenzregelung zeigt. Dabei kommt ein Inselnetz mit Batteriestromrichter zum Einsatz, in dem Netzspannung und –frequenz verändert werden können und der Einfluss von Wirk- und Blindleistung verdeutlicht werden.

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

### 3.3 EXKURSIONEN

11. Februar 2015, ganztägig:

Besichtigung der „Pfisterer Kontaktsysteme GmbH“ und Fachvorträge zur Kontakttechnik von Hochspannungskabeln mit Hörern der Vorlesung „Hochspannungsfreileitungen“



Besuch bei Pfisterer Kontaktsysteme GmbH in Winterbach.

15. Juni 2015, ganztägig

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

12. Mai 2015 sowie 2. Juni 2015, je ganztägig

Besichtigung des Kernkraftwerks Philippsburg der EnBW mit ausführlicher Diskussion aktueller Fragen zur Energiepolitik und -versorgung

26. – 29. Mai 2015: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei

- |                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| - SIEMENS AG Dresden | Leistungstransformatoren    |
| - HIGHVOLT Dresden   | Prüftechnik                 |
| - VATTENFALL Europe  | Braunkohlekraftwerk Boxberg |
| - ENERCON Magdeburg  | Windkraftanlagen            |



Die Exkursionsteilnehmer beim Braunkohlekraftwerk Boxberg

### 3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

**Abgeschlossene Masterarbeiten vom 1.11.2014 bis 31.10.2015:**

*Adam, Benjamin*

#### **Automatisierte Erkennung und Klassifikation von phasenaufgelösten Teilentladungsmustern**

Teilentladungsmessungen werden verwendet, um den Zustand eines Hochspannungsbetriebsmittels einzuschätzen. Eine kurzzeitige Messung gibt aber aufgrund der oft hohen Volatilität von Teilentladungen kein vollständiges Bild über den Zustand des Betriebsmittels und dessen Isolation. Deswegen geht der Trend hin zu einer kontinuierlichen Überwachung. Für eine Auswertung werden die TE-Messergebnisse als  $\varphi$ -q-n Diagramme dargestellt. Aus den sich ergebenden Mustern, den PRPD Pattern, lassen sich Rückschlüsse auf die Teilentladungsquellen ziehen. Diese TE-Muster werden oft manuell von Experten interpretiert. Für ein andauerndes Monitoring müssen die Messergebnisse aber automatisiert ausgewertet werden können. In der Arbeit wird ein Verfahren präsentiert um PRPD Pattern automatisiert zu erkennen und zu klassifizieren. Dafür wird die aus der Mustererkennung bekannte Methode von Viola und Jones auf das Problem der Erkennung von TE-Mustern angewandt.

#### **Automated Detection and Classification of Phase-Resolved Partial Discharge Patterns**

Partial Discharge measurements are used to estimate the condition of high voltage equipment. A short-time measurement might not provide a complete overview about the condition of the equipment and its isolation due to the high volatility of partial discharges. Therefore, continuous monitoring is gaining attention. PD-measurements are plotted as  $\varphi$ -q-n diagrams for analysis purposes. Conclusions can be drawn about the sources of the PD from the PRPD pattern resulting from these diagrams. PD-patterns are often analyzed manually by experts. Measurements have to be analyzed automatically during continuous monitoring. This thesis presents a method for automatic PD-pattern recognition and classification. For that purpose the pattern recognition algorithm of Viola and Jones is used to find PD-patterns.

*Bauer, Sebastian*

#### **Optimierung der Schätzgenauigkeit einer Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen**

Der vermehrte Einsatz dezentraler Energieerzeugungsanlagen verlangt nach einem flexibleren Netz. Vor allem das deutsche Niederspannungsnetz muss auf die schwankende Einspeisung besser reagieren können. In Form von innovativen Regelmethode kann auf große Spannungshübe eingewirkt werden. Wichtig ist hierbei das Erkennen von kritischen Situationen. Die Zustandsschätzung ist eine solche Technik, die mithilfe von Messungen auf den Netzzustand schließen kann. Entscheidend sind hierbei zum einen Pseudomessungen, also auf historischen Daten basierende künstliche Last- bzw. Erzeugungsprofile und zum anderen gut platzierte Echt-

zeitmessungen. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte die Anzahl an Echtzeitmessungen möglichst gering sein. Gute Pseudomessungen verringern dabei die Anzahl an Echtzeitmessungen. Bei den in dieser Arbeit entwickelten Lastprofilen überzeugen vor allem die Pseudomessungen auf Basis des Gaußschen Mischverteilungsmodells. Die Prognosewerte von Leistungserzeugern können am besten durch ein Regressionsmodell wiedergegeben werden. Oftmals ist eine gewünschte Schätzgenauigkeit trotzdem nur mit zusätzlichen Echtzeitmessgeräten erreichbar. Aus diesem Grund werden zusätzlich verschiedene Platzierungsmethoden getestet.

### **Optimization of the Estimation Error for State Estimation in Low Voltage Grids**

The increased usage of distributed energy generation units requires a more flexible grid. Especially Germany's low voltage grid has to improve the response to the fluctuating feed-in of renewable energy sources. Innovative control techniques can help to comply with the specific voltage range. Therefore it is important to recognize critical situations. State Estimation is helpful in this context, because it can identify the present state of the network. Key to state estimation are pseudo measurements, load and generation profiles based on historical data as well as real-time measurements. Due to economic reasons the number of real-time measurements should be minimized. Good pseudo measurements reduce the amount of real-time measurements. Therefore pseudo measurements based on the Gaussian mixture model can be convincing. Forecasting power generation values are accomplished by a regression model. A required estimation accuracy is often only reachable with additional real-time measurements. For this reason this research presents four placement methods.

*Beck, Kira*

### **Bestimmung des technischen und wirtschaftlichen Potentials verschiedener Einspeisemanagementvarianten in der Mittelspannung**

Mit der von der Politik beschlossenen Energiewende ist der Weg in eine umweltverträgliche und nachhaltige Energieversorgung in Deutschland geebnet. Um jedoch die mit der zunehmend fluktuierenden und dezentralen Stromerzeugung einhergehenden Netzengpässe zu vermeiden und die Netzstabilität weiterhin zu gewährleisten wird neben dem konventionellen Netzausbau und dem Einsatz innovativer Betriebsmittel auch das Kappen von Netzbelastungsspitzen durch Einspeisemanagement (ESM) diskutiert. Anhand von zeitreihenbasierten Jahressimulationen eines realen Mittelspannungsnetzes in der Simulationsumgebung PowerFactory werden verschiedene Strategien, welche ESM sowohl in der Netzplanung als auch im Netzbetrieb betrachten, hinsichtlich ihres technischen und wirtschaftlichen Potentials untersucht. Die technische Bewertung erfolgt mittels der abgeregelten Jahresenergie und der erhöhten Netzanschlusskapazität der Erneuerbaren Energien. Weiterhin wird der volkswirtschaftliche Nutzen unter Berücksichtigung von Investitions- und Betriebskosten sowie der Kompensationszahlungen für die abgeregelte Energie bestimmt. Mit der Intention, das volkswirtschaftliche Optimum zwischen einem reduzierten Netzausbau und einem minimalen Einsatz an ESM-Maßnahmen zu erreichen, werden zwei Netzplanungsverfahren entworfen. Der zusätzliche Aufwand während des Netzplanungsprozesses soll möglichst gering sein. Es zeigt sich, dass ESM für das

untersuchte Mittelspannungsnetz einen verzögerten Netzausbau ermöglicht. Somit bewirkt ESM durch die Aggregation des Netzausbaubedarfs zu einem späteren Zeitpunkt einen gezielteren und damit gegenüber dem konventionellen Netzausbau volkswirtschaftlich sinnvolleren Netzausbau.

### **Determination of the Technical and Economic Potential of various Possibilities concerning Generation Management on the Medium Voltage Level**

The political announcement of the German Energiewende paves the way for an environmentally friendly and sustainable energy supply in Germany. In order to ensure grid stability and avoid system congestions which come along with the increase of intermittent and distributive power generation, peak shaving of generation by means of feed-in management is discussed in addition to the conventional grid expansion and the application of innovative network equipment. With the help of time series based annual simulations of a real medium voltage grid in PowerFactory, different strategies regarding feed-in management in both planning and operating grids are analyzed in terms of their technical and economic potential. The technical evaluation results from the limited annual energy and the hosting capacity of renewable energies. Furthermore, the economic benefit of feed-in management measures is to be defined in light of investment and operating costs as well as compensation payments resulting from the amount of annual energy curtailment due to feed-in management measures. Two concepts of grid planning are designed with the intention of minimizing additional effort during the grid planning progress and reaching the economic optimum between a reduced grid expansion and a minimal amount of feed-in management measures. The assessment shows that feed-in management measures enables a decelerated grid expansion for the analyzed medium voltage grid. Thus, a more distinctive and economically efficient development compared with the conventional grid expansion can be achieved by aggregating conventional grid enhancements.

*Beckler, Simon*

### **EMT-Simulationsstudien und Analyse von DC-Fehlern bei VSC-HGÜ**

Das Verhalten von VSC-HGÜ-Konvertern im DC-Fehlerfall wird analysiert. Für je einen einpoligen sowie mehrpoligen Referenzfehlerfall werden die sich einstellenden Spannungs- und Stromverläufe nach Fehlereintritt detailliert betrachtet. Anschließend werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt um den Einfluss verschiedener Größen auf das Fehlerverhalten zu ermitteln. Weiter wird der Einsatz eines alternativen Spannungskriteriums zur Fehlerdetektion untersucht, wodurch die Detektionszeiten für einpolige Fehler erheblich reduziert werden können. Zuletzt wird gezeigt, dass alle betrachteten DC-Fehler durch die Konverter zuverlässig geklärt werden können. Die Fehlerklärung durch Blockieren der Stromrichterventile weist allerdings im Vergleich zur Klärung durch die Regelfähigkeit der Konverter erhebliche Nachteile auf.

### **EMT Simulation Studies and Analysis of DC Faults for VSC-HVDC**

The behavior of VSC-HVDC converters during DC faults is analyzed. The current and voltage characteristics are observed in detail in the case of a representative pole-to-

ground fault and multiple-pole-to-ground fault respectively. Sensitivity analyses are conducted in order to investigate the impact of several parameters on the fault behavior. Furthermore the usage of an alternative voltage criterion is found to decrease the fault detection time for pole-to-ground faults. Finally it is shown that each DC fault can be cleared by the converters. However fault clearance utilizing blocking of the valves has many disadvantages compared to fault clearance utilizing the controllability of the converters.

*Czakalla, Moritz*

### **Probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse in einem Mittelspannungsnetz mit automatisiertem Störungsmanagement**

Durch den Einsatz von Fernwirktechnik kann die Zuverlässigkeit in Mittelspannungsnetzen signifikant verbessert werden. Ein automatisiertes Störungsmanagement verkürzt die Dauer zur Lokalisierung fehlerbetroffener Betriebsmittel und für deren Freischaltung. Dadurch können die Kunden an unterbrochenen Ortsnetz- und Schaltstationen schneller wiederversorgt werden. Die Netze BW GmbH hat in einem Projektvorhaben ein Netzgebiet für die Erprobung solcher teilautarker Netzautomatisierungsmaßnahmen ausgewählt. In dieser Arbeit wird der praktische Nutzen dieses geplanten Systems für das Netzgebiet systematisch in der Theorie untersucht. Hierzu wurde mit der Software PowerFactory von DlgSILENT eine probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Nicht-Verfügbarkeit des Netzgebietes durch ein automatisiertes Störungsmanagement bereits mit wenigen steuerbaren Stationen deutlich verbessern lässt und dass die Verbesserung mit einem höheren Automatisierungsgrad nur noch marginal zunimmt.

### **Probabilistic Analysis of the Reliability for a Medium Voltage Grid with Automated Fault Management System**

In medium voltage grids the use of telecontrol units can significantly improve the overall system reliability. An automated fault management system reduces the time required for fault detection and clearing. Interrupted grid sections which are outside the fault area can therefore be resupplied faster. The Netze BW GmbH is currently exploring such a partially self-sufficient automation system in one of their medium voltage grids. The thesis investigates the practical benefits of the planned system in this specific grid. A probabilistic reliability analysis was conducted using the software PowerFactory by DlgSILENT. The results show a strong improvement in the grid availability, even with only a few substations automated. Furthermore the system showed a saturation towards the maximum availability, even at higher automation levels.

*Eisenmann, Lukas*

### **Untersuchung des EMV-Verhaltens von SiC-MOSFETs verglichen mit IGBTs**

Die Arbeit vergleicht leitungsgebundene Störungen von Silizium IGBTs (engl. Insulated Gate Bipolar Transistor) mit Siliziumcarbid MOSFETs (engl. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) als Leistungsschalter in Traktionsinvertern. Es

werden drei verschiedene Inverter mit unterschiedlichen Dioden und Leistungsschaltern, aber gleichem Aufbau der Kommutierungszelle und gleichen Gatetreibern untersucht. Bei unterschiedlichen Systemparametern wird der Wirkungsgrad der Inverter den entstehenden Störemissionen gegenübergestellt. Zu diesen Systemparametern zählen die Zwischenkreisspannung, die Schaltfrequenz der Leistungsschalter, die Gatevorwiderstände sowie die Verriegelungszeit. Abschließend werden die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung am Leistungsschalter analysiert, um die Ursache der unterschiedlichen Wirkungsgrade und Störemissionen zu erklären.

### **Investigation of the EMC Behavior of SiC-MOSFETs compared to IGBTs**

This thesis compares conducted emissions of silicon IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) with silicon carbide MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect transistor) as switching elements in traction inverters. It examines three different inverters with different diodes and power switches, but the same structure of commutation cell and the same gate drivers. For various system parameters, the efficiency of the inverters with the resulting conducted emissions is compared. These system parameters include the DC link voltage, the switching frequency of the power switches, the gate series resistors and the locking time. Finally, the waveforms of current and voltage on the circuit breaker are analyzed to determine the cause of the different efficiencies and conducted emissions.

*Fitz, Nikolaj*

### **Entwicklung eines Zustandsschätzers für den Feldeinsatz**

Die Masterarbeit befasst sich mit der Überwachung von Niederspannungsnetzen durch den Einsatz eines am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik entwickelten neuartigen Zustandsschätzers. Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Der erste Teil beschäftigt sich mit den benötigten Softwaremodulen für die Realisierung der Messdatenerfassung und Aufzeichnung. Die Software ist durch externe Konfigurierbarkeit nicht fehleranfällig und bietet durch Kontrollmechanismen eine redundante Messdatenaufzeichnung. Der zweite Teil beinhaltet den Aufbau zweier Zustandsschätzsysteme für den Einsatz an der Ortsnetzstation im Netzlabor Boxberg. Für die Ortsnetzstation ist ein Schaltschrank mit allen Systemen für die Zustandsschätzung entwickelt und realisiert worden. Auf dem System läuft die zu Beginn entwickelte Software mit entsprechender Anpassung an das betrachtende Netz. Das System bietet die Möglichkeit durch einen Globalstrahlungssensor die Einspeiseleistung von Photovoltaikanlagen zu berechnen und daraus den aktuellen Netzzustand durch die Zustandsschätzung zu bestimmen. Der Zustandsschätzer besitzt ein integriertes Fernwirkssystem zur Überwachung und Kontrolle.

### **Development of a State Estimator for field use**

This master thesis deals with the monitoring of low-voltage networks through the use of an innovative state estimator developed at IEH. The work is divided into two parts. The first part deals with the needed software modules for the implementation of the data acquisition and recording. The software is not error-prone by external configurability and provides a redundant measurement data recording by control mechanisms.

The second part involves building two state estimation systems for use on the local network station in the network lab Boxberg. For the local network station a cabinet in which all systems for state estimation has been developed and realized. The system runs the software developed at the beginning with appropriate adaptation to the observing network. The system offers the possibility to calculate the injection of photovoltaic energy by using a global radiation sensor and to determine the current network state through the state estimate. The state estimator has an integrated remote control system for monitoring and control.

*Göppele, Fabian*

### **Beitrag von Nachtspeicheröfen zur Netzintegration erneuerbarer Energie**

Im Rahmen dieser Arbeit dimensioniert ein Algorithmus mit Hilfe von Heizlastprofilen ein Speicherheizungssystem, wofür verschiedene Regelungsvarianten implementiert werden. Auf Basis von Szenarien zum Gebäudebestand und zum Ausbau der erneuerbaren Energien wird das Potential zur Netzentlastung durch eine optimierte Regelung der Speicherheizungen untersucht. Unterschieden werden hierbei die Verteilung der Anlagen im Netz, die Art der erneuerbaren Energieerzeugung sowie das vorgegebene Zielprofil des Optimierungsalgorithmus. Abschließend werden die wirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Betriebsweisen dargestellt.

### **Contribution of Night Storage Heaters for the Integration of Renewable Energies into Electrical Power Grids**

Within the scope of this work an algorithm scales a storage heating system by considering different heating load profiles, for which several alternative control options are implemented. Based on scenarios on the building stock and the development of renewable energies the potential of unloading the grid through storage heating systems is evaluated. The distribution of systems within the grid, the way renewable energy is produced and the default profile of the optimizing algorithm are differentiated. The financial impact of the different operating modes is finally discussed. Within the scope of this work an algorithm scales a storage heating system by considering different heating load profiles, for which several alternative control options are implemented. Based on scenarios on the building stock and the development of renewable energies the potential of unloading the grid through storage heating systems is evaluated. The distribution of systems within the grid, the way renewable energy is produced and the default profile of the optimizing algorithm are differentiated. The financial impact of the different operating modes is finally discussed.

*Groß, Daniel*

### **Verallgemeinerung einer Simulationsumgebung als Grundlage zur Netzplanung und Betriebsführung in intelligenten Verteilnetzen**

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Masterarbeit ist die Verallgemeinerung einer Simulationsumgebung als Grundlage zur Netzplanung und Betriebsführung in intelligenten Verteilnetzen. Die Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen nimmt kontinuierlich zu und stellt die Verteilnetzbetreiber vor neue Aufgaben. Um entwickelte Regel-

verfahren in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht beurteilen zu können, werden Simulationen in Verteilnetzmodellen durchgeführt. Da die Anzahl an Verteilnetzen eines Verteilnetzbetreibers in der Regel sehr hoch ist, ist es nicht möglich, zu jedem Verteilnetz ein Modell in einem Simulationsprogramm zu erstellen und den Einfluss von Regelverfahren mittels Simulationen zu testen. Ein Ansatz zur allgemeinen Beurteilung von Regelverfahren bietet eine Clusteranalyse. Dabei werden Verteilnetze kategorisiert und anschließend Referenznetze ermittelt. Jedes Referenznetz repräsentiert eine gewisse Anzahl an Verteilnetzen. Durch Simulationen von Regelverfahren in den Referenznetzmodellen können die Auswirkungen in den zugrundeliegenden Verteilnetzen in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht bewertet werden.

### **Generalization of a Simulation Environment as Basis for Network Planning and Operation Methods in Smart Distribution Grids**

The scope of this Master Thesis is the generalization of a simulation environment as basis for network planning and operation methods in smart distribution grids. The consistent development of renewable energy sources in distribution grids is a huge challenge for the distribution system operators. For a technical and economical appraisal of developed controllers, simulations in grid models are realized. Because of the high quantity of distribution grids owned by a distribution system operator it is not possible to embed a model of each distribution grid in a simulation environment and test the influence of controllers by simulations. A preparation for a general appraisal of the controllers is given by a so-called cluster analysis. Although distribution grids will be categorized and afterwards reference grid models will be determined. Each reference grid represents a certain number of distribution grids. By simulations of controllers in the reference grid models the appraisal can be assessed in technical and economic aspects.

*Heusel, Jannis*

### **Alternativen zur iterativen Spannungsberechnung für Monte-Carlo-Simulationen in Niederspannungsnetzen**

Iterative Lastflussrechenmethoden zeichnen sich durch eine große Genauigkeit, aber auch eine lange Rechenzeit aus. Für Optimierungsprobleme oder Monte-Carlo-Simulationen kann dies zu erheblichen Nachteilen führen, weshalb Alternativen gesucht werden. Diese Arbeit stellt hierfür das Konzept der gewichteten Leistung als alternative Lösungsmethode für die Spannungsberechnung in Niederspannungsnetzen vor. Mit ihr lässt sich die Maximalspannung über 500-mal schneller als bei iterativen Methoden berechnen. Die Methodik nutzt den linearen Zusammenhang zwischen der Spannungsminderung und dem Wirkwiderstand der Leitung. Der Einfluss des Blindwiderstandes wird anschließend über Korrekturfaktoren angepasst, so dass eine Genauigkeit in Höhe einer mittleren Abweichung von weniger als 1 V erzielt werden kann.

### **Alternatives to Iterative Voltage Calculation for Monte Carlo Simulation in Low Voltage Grids**

Iterative load flow calculation is a very accurate but also time-consuming method. For Monte-Carlo-Simulations and optimization problems this can induce serious disad-

vantages, which is why research is looking for alternative methods. This thesis presents a concept with weighted loads as a possibility for voltage calculation in low voltage grids, which allows calculating the maximum voltage more than 500 times faster than Newton-Raphson. The method uses the linear correlation between voltage drop and active resistance. The influence of reactive resistance is considered with a correction factor, so that the method achieves an accuracy of less than 1 V mean deviation. Co-occurrence of supply and demand loads and the effects of reactive power are the main reason for this inaccuracy.

*Hummel, Simon*

### **Entwicklung einer Platine zur Regelung eines Batteriespeichers**

In dieser Arbeit wird eine Platine entwickelt, die es ermöglicht, mehrere unterschiedlich gealterte KFZ-Starterbatterien gemeinsam in einem stationären Batteriesystem zu nutzen. Als Energiequelle wird ein Photovoltaik-Modul (PV-Modul) verwendet, welches über einen Laderegler bis zu sechs gealterte Batterien laden kann. Auf der Platine befindet sich ein ansteuerbarer Laderegler, der den Ladevorgang im maximalen Arbeitspunkt (MPP) des PV-Moduls ermöglicht. Des Weiteren sind Schalter auf der Platine integriert, um jede Batterie explizit zu- und wegzuschalten, dass beim Ausfall einer Batterie die Funktionalität des Systems aufrechterhalten wird.

### **Development of a Circuit Board for Control of a Battery Storage System**

In this work, a printed circuit board (PCB) is developed which allows to use several different aged car batteries in a stationary battery system. The energy source is a photovoltaic module (PV module), which can charge up to six aged batteries via a charge controller. On the board there is a controllable buck converter implemented as charge controller, which allows charging at maximum power point (MPP) of the PV module. Furthermore, switches on the board will explicitly switch each battery that the failure of a battery may not cause the failure of the system.

*Kan, Yijun*

### **Comparison of Different State Estimation Methods for Distribution Systems**

This thesis studies and compares the different state estimator in the low voltage distribution networks. At first, a snapshot of the energy system was reviewed. An accurate modeling is essential for monitoring and controlling a system. Then the model of distribution system was introduced. Then, power flow algorithm was explained in two different mathematical models. One was Newton-Raphson-Method; the other was Back-/Forward-Sweep-Method. Due to the lack of real-time measurements in the low voltage distribution network, the actual network condition can be monitored by using a state estimation (SE) algorithm. Two different mathematical approaches were compared and Weighted Least Square (WLS) Method was chosen in the following studies. The state estimators that based on WLS-Method in this thesis were distinguished in four classes: polar nodal voltage SE, rectangular nodal voltage SE, polar branch current SE and rectangular branch current SE. The performances of these state estimators were analyzed from different views. A scheme was

designed to choose a suitable state estimator for a practical distribution network. Moreover, the photovoltaic generation was estimated with corresponding accuracy. The accuracies of the load and the photovoltaic generation were not the same. Monte Carlo simulation was proposed as the simulation-model. A practical Monte Carlo simulation-model referred to be used for estimating network state in reality. The meter placement problem was discussed at the end of this thesis. Some rules for placing different measurements were tried to be founded out.

*Jin, Kang*

### **Thermische Modellierung von OFAF-Leistungstransformatoren**

Die Arbeit beschäftigt sich mit verschiedenen Ansätzen zur Modellierung des thermischen Verhaltens von Leistungstransformatoren mit OFAF-Kühlanlage. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Wärmeübertragungsphänomene in Betracht gezogen. Darüber hinaus wurde die Abweichung der mit den jeweiligen Modellen berechneten Öltemperaturen von der gemessenen Öltemperatur verwendet, um die Modelle zu validieren und ihre Genauigkeit mit konventionellen Modellen zu vergleichen. Als konventionelles Modell wurde das in der Norm IEC 60076-7 vorgeschlagene Modell verwendet. Es wurde gezeigt, dass die berechnete Öltemperatur mittels des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Modells gut mit der gemessenen Öltemperatur übereinstimmt.

### **Thermal Modeling of OFAF Transformer**

This work deals with different approaches for modelling of the thermal behavior of power transformers with an OFAF cooling system. For this purpose, different heat transfer phenomena have been considered. Moreover, the deviation of the calculated temperature using different models from the measured temperature during normal operation of a transformer was used for model validation as well as for comparison with conventional models. The IEC 60076-7 model was used in this work as the conventional model. It has been shown that the accuracy of the proposed model is better than the conventional models.

*Mayer, Daniel*

### **Power-to-Heat durch Laststeuerung eines Verbundes von Wärmepumpen**

In der vorliegenden Masterthesis werden aktuelle und zukünftige Potenziale von Power-to-Heat mit Wärmepumpen und Pufferspeichern zur Aufnahme von Windstrom induzierten Spannungsspitzen untersucht. Dazu wurde ein hierarchisch aufgebauter Regelungsalgorithmus zur Laststeuerung eines Verbundes von Wärmepumpen implementiert. Mit Hilfe von dynamischen Preisvektoren und mathematischer Optimierung auf Haushaltsebene kann damit im Verbund eine globale Zielstellung verfolgt werden. Um die Qualität der Regelung zu analysieren, wurde eine modular aufgebaute thermisch-elektrische Simulationsumgebung entwickelt. Thermische Lastprofile werden in diesem Zusammenhang im Regelungsalgorithmus berücksichtigt, da zu jedem Zeitpunkt die Deckung des individuellen Heizwärmebedarfs gewährleistet sein muss. Durch den lokalen Einsatz von thermischen Pufferspeichern

entstehen Lastverschiebungspotenziale, die von der Regelung zum Erreichen einer globalen Zielstellung genutzt werden. Abschließend wurde in verschiedenen Netzsimulationen mit Lastflussberechnungen auf mögliche Netzzrückwirkungen von einer großen Anzahl an Wärmepumpen in einem Verteilnetz aufmerksam gemacht.

### **Power-to-Heat by Demand-Side Management of a Network of Heat Pumps**

The aim of the thesis is the development of a control strategy for a compound of heat pumps and an analysis of its effects on a distribution grid with renewable energy. The introduced approach has a scalable, hierarchical structure and can autonomously determine the optimization potential of a large group of buildings. Furthermore, it exploits this potential to work towards a global objective using local mathematical optimizations techniques. The performance of the implemented methodology was investigated through a specific use case. For this purpose, a modularly designed thermal-electric simulation environment was developed. Additionally, thermal load profiles are considered to include the local constraints of the mathematical optimization in each building. Through the use of thermal buffer storages in combination with the heat pumps the potential for thermal load shifting is emphasized, which is exploited to work towards a global objective. Finally, the effects of a variety of heat pumps, either conjointly or individually controlled, on a distribution grid were analyzed through selected power system simulations with load flow calculations.

*Nägele, Haiko*

### **Optimaler Einsatz von Batteriespeichern und flexiblen Haushaltslasten im virtuellen Verbund**

Im zukünftigen Verteilnetz ist durch die Verbreitung von Batteriespeichern, elektrischen Wärmeerzeugern und Elektrofahrzeugen in Haushalten großes Potenzial für den flexiblen Einsatz von Last und Einspeisung zu erwarten. Eine Prognose der im Jahr 2030 vorherrschenden Durchdringung des Verteilnetzes mit diesen Technologien ist daher Teil dieser Arbeit. Kern der Arbeit ist zudem die Untersuchung, wie das zunehmend verfügbare Flexibilitätspotenzial mittels neuer Geschäftsmodelle gewinnbringend genutzt werden kann. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei der optimierte Einsatz von Last- und Einspeiseflexibilität zur Minimierung der Energiebeschaffungskosten am Spotmarkt sowie die Vermarktung von Regelleistung, bereitgestellt durch Batteriespeicher im virtuellen Verbund. Als Grundlage für die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials der betrachteten Geschäftsmodelle wird ein entsprechendes Optimierungsmodell entwickelt und auf eine Anzahl von insgesamt einhundert Modellhaushalten angewendet. Die Ergebnisse des optimierten Einsatzes am Spotmarkt zeigen, im Mittel über ein gesamtes Jahr, Einsparpotenziale von rund 28% der Beschaffungskosten für den Vertreiber elektrischer Energie. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass die Bereitstellung und Vermarktung von Primärregelleistung im virtuellen Speicherverbund eine vielversprechende Quelle für zusätzliche Einnahmen darstellt.

### **Optimal Operation of Battery Storage and Flexible Loads in a Virtual Cluster**

Future distribution grids are expected to entail a high potential of load and feed-in flexibility due to a further diffusion of battery storage systems, electric heating and electric vehicles in households. Therefore, as a part of this work, the penetration of such technologies in distribution grids is predicted for the year 2030. Moreover, core of this study is to investigate the profitability of novel business models utilizing the increasing flexibility potential. In the course, the study focuses the optimal commitment of battery storage systems, heat pumps and electric vehicles with the aim of minimizing energy procurement costs at the electricity spot market and in addition investigates the possible profits providing control reserve supplied by clusters of battery storage systems. As a basis to evaluate the economic potential of the considered business models, an appropriate optimization model is developed and adapted to an overall number of one hundred model households. The results show that minimizing procurement costs at the electricity spot market over an entire year leads to potential savings of about 28% for the electricity supplier. Furthermore, it can be seen that providing control reserve with virtually connected battery storage systems is a promising source of additional income.

*Pullmann, Tim*

### **Aufbau und Analyse eines DC-Netzes**

Das von CIGRE entworfene Gleichstromnetz „B4 Grid Test System“ wird zusammengefasst, aufbereitet und in der Netzsimulationssoftware PowerFactory aufgebaut. Es wird eine Lastflussrechnung durchgeführt, bei deren Vergleich mit der Vorgabe nur geringe Abweichungen festzustellen sind. Mit der von CIGRE vorgegebenen Regelung werden Simulationen im Zeitbereich durchgeführt. Zur stabilen Regelung wird das System in drei Teilsysteme aufgeteilt, deren Reglerparameter bestimmt werden. An den einzelnen Teilsystemen werden Fehler simuliert, um bei Instabilität Maßnahmen zur Stabilisierung durchzuführen. Dieses Prozedere wird nach Verbindung der Teilsysteme wiederholt. Um das Verhalten zu verbessern, wird eine neue Art der Verbindung der Teilsysteme vorgeschlagen. Das aufgebaute Gesamtsystem kann zum Test neuer Regler genutzt werden.

### **Implementation and Analysis of a DC Network**

The „B4 Grid Test System“ is summarised, prepared and implemented in the software PowerFactory. There are only minor differences between the calculated load-flow and the results by CIGRE. The control strategy proposed by CIGRE is added in order to run time domain simulations. To achieve stable simulations the system is divided into three parts. Their control parameters are determined. Short circuit events and line failures are simulated. Causes for instabilities are investigated and adjustments are made to improve stability. This procedure is repeated after connecting the other parts of the whole system. To improve stability, a new way of connecting the system parts is proposed. The complete test system can be used to test new control strategies.

*Schlesiger, Johannes*

### **Erzeugungsmanagement in der Verteilnetzplanung für vermaschte Netze**

Vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung und Umsetzung eines Erzeugungsmanagementkonzepts zur Abregelung von Stromerzeugungsspitzen in vermaschten Verteilnetzen. Dazu wird auf Basis vorhandener Lastflussberechnungen mit realen Messdaten ein Algorithmus in Matlab programmiert, welcher eine dynamische Leistungsbegrenzung der Erzeugungsanlagen vornimmt. Die Parameter-Erzeugungsleistung und Leitungsauslastung werden hierfür in Verbindung gesetzt. Grundlage für den Zusammenhang bildet die Methode des Power-Flow-Tracings, genauer der Distribution Factor. Zur Beurteilung der Funktionsweise des Algorithmus werden mit diesem Berechnungen für verschiedene Messdatensätze sowie Auslastungsgrenzen durchgeführt. Dabei werden auch die durch den Algorithmus abgeregelten Energien betrachtet. Anschließend folgen Lastflussberechnungen mittels PowerFactory zur Beurteilung der Güte der Methode.

### **Active Power Control in Distribution Network Planning for meshed Grids**

This thesis deals with the development and implementation of a generation management concept enabling the limitation of peaks in energy production in intermeshed distribution grids. Based on load flow calculations, an algorithm is programmed in Matlab which limits the generation of production units dynamically. Generation power and power line loading are therefore linked on the basis of the Power-Flow-Tracing method, more precisely the Distribution Factor. Algorithm functionality is assessed by calculations for different measurement data and different power line loading limits. In addition, load flow calculations with PowerFactory are carried out to analyze the quality of the algorithm.

*Schühle, Michael*

### **Auswirkungen überlagerter Gleichströme und deren phasenbezogene Verteilung auf Leistungstransformatoren**

Die Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen von Gleichströmen auf Leistungstransformatoren. Die Datengrundlage bilden verschiedene Messreihen, die im Prüffeld eines Transformatorenherstellers durchgeführt wurden. Dabei wurden zwei baugleiche 350 MVA-Transformatoren überspannungsseitig verbunden und über ihre Sternpunkte mit Gleichstrom belastet. Für die Auswertung in dieser Arbeit werden die überspannungsseitigen Strom- und Spannungsverläufe, Vibrationen und Schallpegel berücksichtigt. Die Auswertung der Ströme und Spannungen erfolgt nach einer Erweiterung der IEEE Standard Definition 1459-2010 zur Analyse der Lastberechnung unter unsymmetrischen und nichtsinusförmigen Bedingungen. Die Messungen zeigen, dass bereits kleine Gleichströme in der Größenordnung des Magnetisierungsstromes eine Sättigung des Eisenkernes hervorrufen. Neben einer gleichmäßigen Verteilung wird auch eine ungleichmäßige Gleichstromverteilung auf den Phasen untersucht. Mit steigendem symmetrischem oder unsymmetrischem Gleichstrom steigen die Leerlaufverluste der Transformatoren stark an. Einen ebenfalls starken Anstieg lässt sich bei den Geräuschen und Vibrationen feststellen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Vibrationsmessungen direkte Rückschlüsse auf die Ge-

räuschzunahme möglich sind. Dabei zeigen sich je nach Verteilung deutliche Unterschiede im Verhalten der Transformatoren. Die deutlichsten Effekte zeigen sich im Blindleistungsbedarf, den Leerlaufverlusten, den Strom- und Spannungsverzerrungen, den Kesselvibrationen sowie dem daraus resultierenden Schallpegel.

### **Effects of Superimposed Direct Currents with Different Phase Distributions on Power Transformers**

The master thesis describes the effect of direct currents (DC) on power transformers. A test setup consisting of two 350 MVA transformers to determine the effects of DC was realized. The transformers were connected to each other at their high voltage (HV) sides. To inject the DC at the HV side a constant current supply was inserted in the path between the star connections of both transformers. To calculate the exchanged power the voltages and currents at HV potential was measured. Also, the emitted sound and the vibrations of each transformer were measured. The power analysis is calculated according to the IEEE Standard Definition 1459-2010. The evaluation of all data shows high gains of apparent power, power losses, vibrations and sound with rising DC. These effects already occur at small DC in the range of the magnetizing current. Different current distributions over the three phases measurements are taken into account: symmetric and asymmetric scenarios. The symmetric distribution represents the DC originated of geomagnetic induced currents and the asymmetric distribution of influences are due to HVDC at hybrid lines. The severity of the occurring effects also depends on the current distributions over the three phases and not only from the magnitude of the DC at the star point.

*Singer, Jan*

### **Simulation der Störspannung an HV+/HV- der Bordnetznachbildung in KFZ-HV Bordnetzen**

Die Arbeit untersucht leitungsgebundene Störungen in Elektrofahrzeugen. Im Fokus liegt der Inverter, welcher als Hauptquelle von elektromagnetischen Störungen in einem elektrischen Antriebsstrang identifiziert werden kann. Zum Verständnis des Übertragungswegs werden zunächst die relevanten Komponenten untersucht und charakterisiert. Weiter erfolgt die Messung von Stör-Spannungen und -Strömen an den Bordnetznachbildungen (BNN). In einem daraus abgeleiteten Simulationsmodell werden Gleichtaktstörungen auf deren Anregung untersucht. Dem folgen Untersuchungen von Symmetrieeigenschaften im System, welche unsymmetrische Störspannungen hervorrufen. Der letzte Teil der Arbeit widmet sich den Gegentaktstörungen.

### **Simulation of the Noise Voltage at HV+/HV- at the LISN of Automotive HV Networks**

This thesis focuses on conducted emissions of electric vehicles. Here, the inverter can be determined as the main noise source of the traction chain. For understanding the transmission path all components of the electric drive system are characterized. Further, noise voltages and currents are measured at the LISN. In the next part a simulation model for common-mode disturbances is developed. The excitation of common-mode and differential-mode currents is investigated to understand the noise

spectrum. A detailed central section is attended to asymmetrical interference voltage. The last part of this thesis deals with differential-mode noise.

*Speckmann, Friedrich*

### **Technische und wirtschaftliche Betrachtung von Spannungshaltungsmaßnahmen in einer probabilistischen Simulationsumgebung**

Die fortlaufend wachsende Menge an erneuerbaren Energien stellt netzebenenübergreifende Änderungen für das deutsche Stromnetz dar. Um eine stetige Systemstabilität zu gewährleisten, wird eine Verstärkung des Netzes stattfinden müssen. Dies gilt nicht nur für die bereits geplanten Nord-Süd-Verbindungen des Übertragungsnetzes, es betrifft ebenfalls die unteren Netzebenen bis hin zum Niederspannungsnetz. Deshalb wird eine technisch und wirtschaftlich optimierte Ausbau- oder Betriebsstrategie benötigt, um die steigende Anzahl an dezentralen Energieanlagen sinnvoll zu integrieren. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der technischen und wirtschaftlichen Abschätzung intelligenter Spannungsregelungsverfahren. Dazu werden insbesondere die Kombinationen aus rONT-, WLR- und BLR-Modulen am Beispiel des Pilotnetzes Sonderbuch untersucht. Durch die Übertragung der Regelmethode auf Referenznetze soll eine Verallgemeinerung vorgenommen und daraufhin eine Netzregelungsempfehlung ausgesprochen werden.

### **Technical and Economic Analysis of Voltage Stability Methods in a Probabilistic Simulation Environment**

The steadily increasing amount of renewable energies in the German electrical grid leads to changes in its various voltage levels. To ensure constant system stability, it is necessary to expand the electrical grid. This is not only limited to the already planned north-south-connections, but also affects the low-voltage grids. Therefore an economic and technical strategy is required to integrate the increasing amount of renewable energy sources. This thesis deals with the economic and technical assessment of intelligent voltage control modules. Especially the combination of a controllable distribution transformer, an active power control and a reactive power control is examined. In order to increase the value of the gathered information from the Sonderbuch-Grid, the results will be projected on reference grids and a general grid-expansion strategy recommendation will be given.

*Teichmann, Vincent*

### **Konzept zum Online-Monitoring der Systemstabilität mit einem Softwaretool für DSA**

Die automatisierte Überwachung der Systemstabilität in Stromnetzen ist noch nicht Stand der Technik in den europäischen Netzleitwarten. Die Übertragungsnetzbetreiber ziehen aber die Einführung einer hierfür geeigneten Software in Erwägung. Bestandteil der Masterarbeit war es, ein Softwaretool für DSA hinsichtlich seiner Funktionsfähigkeit zu untersuchen. Die dabei angewendeten Verfahren zur Bewertung der Systemstabilität wurden analysiert und bewertet. Die Kompatibilität mit dem Netzmodell des Netzbetreibers wurde überprüft, und notwendige Anpassungen wurden ausgearbeitet. Das Ganze wurde abschließend in einem Offline-Test angewendet und

ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass das Tool grundsätzlich zuverlässig arbeitet. Einzelne Schwierigkeiten ergeben sich noch bei der Anwendung auf das Netzmodell und bei bestimmten Funktionen.

### **Investigation of a Software Tool for the Online-Monitoring of Dynamic System Analysis (DSA)**

The automated monitoring of the system stability in power grids is not yet state of the art in the European grid control centers. However, transmission system operators (TSO) consider the introduction of a suitable software tool. In this master thesis a software tool was examined on its functional capability. The procedures used for assessing the system stability were analyzed and assessed. The compatibility with the network model of a TSO was checked and necessary adjustments were identified. Eventually, all this was applied and evaluated in an offline-test. The results show that the tool basically works reliably. Several difficulties still arise when applied to the network model of the TSO and in some functions of the tool itself.

*Tserbe, Viacheslav*

### **Untersuchung der Wirtschaftlichkeit neuer Pumpspeicherkraftwerke an der Day-Ahead Strombörse**

Die Wirtschaftlichkeit neuer Pumpspeicherkraftwerke unter der Annahme energie-wirtschaftlicher Rahmenbedingungen bis 2030 wird untersucht. In vier Szenarien wird der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland variiert. In jedem Szenario wird mit Hilfe eines Elektrizitätsmarktmodells der stündliche Preisverlauf des Spotmarkts über ein Jahr ermittelt. Auf Basis des ermittelten Preisverlaufes werden die Ertragspotentiale für verschiedene Pumpspeicherkonfigurationen berechnet, wobei das Speichervolumen, die Pump- und die Turbinenleistung verändert werden. Daraus wird die ertragreichste Konfiguration bestimmt und anschließend eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchgeführt. Die Ermittlung des Ertragspotentials erfolgt mit zwei Methoden. Als ertragreichste Pumpspeicherkonfiguration stellt sich eine Kombination aus ca. 1 MW-Pumpleistung, ca. 1 MW-Turbinenleistung und ca. 5 MWh-Speichervolumen heraus. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass selbst die Erträge der ertragreichsten Pumpspeicherkonfiguration vom Day-Ahead-Handel in allen Szenarien keinen wirtschaftlichen Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks sicherstellen. Ein weiteres Ergebnis der Arbeit ist, dass weder die Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Preises noch eine 30-prozentige Erhöhung der Brennstoffpreise für die Spitzenlastkraftwerke die Pumpspeicherkraftwerkswirtschaftlichkeit stark beeinflussen können.

### **Profitability Analysis of New Pump Storages at the Day-Ahead Electricity Exchange**

The thesis investigates the economic efficiency of new pumped-storage plants concerning different requirements of energy industry until 2030. Four scenarios have been investigated by varying the amount of renewable energy for electricity generation in Germany. The electricity demand remains constant in all scenarios. The investigations of economic efficiency have been performed in the following way: At first, using electricity market model, the hourly price development of spot market has

been calculated for the whole year. Based on the determined price development, the potential yields have been estimated for different pumped-storage plants configurations, like storage volume, pumps and turbines performance. By this means, the most profitable configurations have been determined. Afterwards, detailed economic studies have been performed. The potential yield has been carried out using two approaches. As a result the most profitable configuration for pumped-storage plant is the combination of ~1 MW pump power, ~1 MW turbine power and ~ 5 MWh storage volume. Moreover, it was shown, that the income of the storage plant with the most profitable configuration from day-ahead trading is not sufficient to ensure profitability. Another finding of this thesis is that neither the doubling of the CO<sub>2</sub>-prices nor a 30 percent increase in fuel prices for the peaking power plants can strongly influence the economic efficiency of pumped-storage plants.

*Wang, Dengxia*

### **Study on the Decrease of Line Loading in Transmission System via Reactive Power Compensation**

The reactive power of renewable energy sources can be controlled caused by their inverter based coupling to the network. This thesis investigates, if the line loading can be decreased via reactive power compensation caused by the increasing penetration of renewable energy sources. Therefore, a probabilistic simulation environment is used to study the line loadings in a 110 kV-grid for different reactive powers at the substations. Additionally, a method is implemented to manage the reactive power flows in the system. The results show that the effect of the reactive power to the line loadings is very small and a decrease is only possible for a few percent.

*Wang, Xiang*

### **Erkennung von Topologie-Fehlern**

Zustandsschätzung ist ein Instrument zum Management und zur Steuerung von Netzen. Dabei sollen fehlerhafte Messdaten erkannt und möglichst vorab entfernt werden. Zusätzlich können Zustandsschätzer auch durch eine falsche Netzwerk-Topologie getäuscht werden. Aus diesem Grunde ist es für einen robusten Zustandsschätzer wichtig, die aktuelle Netztopologie zu kennen. In der Arbeit wird zunächst eine auf Hypothesentests basierende Bad Data-Erkennung für Verteilnetze entwickelt. Mit diesem Algorithmus kann die aktuelle Netztopologie bestätigt werden. Danach werden abweichende Netzkonfigurationen in einer Datenbank abgelegt. Auf diese Netze wird dann der obige Algorithmus angewandt. Die Ergebnisse werden mit einem rekursiven Bayes-Ansatz analysiert und führen zum Netz mit der korrekten Topologie. Das Verfahren wurde an einem 62-Knoten-Niederspannungsnetz erfolgreich getestet.

### **Network Topology Error Detection**

State estimation plays an important role in automatic management and control of active complex distribution networks. It is essential to detect measurement errors and to identify and eliminate them if possible in order to realize a robust state estimation.

In addition, a state estimator may be also deceived by incorrect topology information. In this thesis a basic bad data identification algorithm based on hypothesis testing for distribution system is proposed to identify the possible multiple bad data. The thesis also deals with the identification of network topology changes in distribution systems. The possible network configurations are firstly stored in a data base before identification, and then a recursive Bayesian approach, which uses the output of state estimation of each model in the data base, is used to identify the correct network topology. Both bad data processing algorithm and identification of network topology error algorithm are demonstrated on a 62 node test power distribution network.

*Zeuner, Andreas*

### **Betriebsführung einer HGÜ-Strecke**

Im Rahmen des Gesetzes zur Förderung erneuerbarer Energien nehmen die Lastflüsse im Übertragungsnetz Europas zu. Die Einbindung von Hochspannungsgleichstromübertragungs(HGÜ)-Strecken kann das europäische Verbundnetz entlasten. Die Arbeit zeigt, dass selbstgeführte Umrichter zusätzlich zur Steuerung des Wirkleistungsflusses auch Blindleistung kompensieren und die Netzfrequenz stützen können. Hierfür wird zunächst eine kaskadierte Regelung aufgebaut, die durch eine innere Stromregelschleife in dq-Koordinaten die Wirk- und Blindleistung unabhängig voneinander steuern kann. Die Funktionalität der Wirkleistungsregelung wird anhand eines Betriebes nach Fahrplan und durch eine integrierte Leistungs-Frequenzregelung gezeigt. Die Blindleistungsregelung wird in weiteren Simulationen zur Spannungsstützung eingesetzt und getestet. Abschließend wird das Verhalten der Umrichter während des Hoch- und Herunterfahrens anhand verschiedener Konzepte untersucht.

### **Control of VSC HVDC Connections**

The load flow on the European high voltage energy transmission network rises continuously because of the Renewable Energies Act. The implementation of high voltage direct current (HVDC) transmission helps to relieve the European grid. The work shows that self-commutated converters are able to compensate reactive power additionally to the control of active power flow. For this purpose a cascaded control is constructed. It controls the active and reactive power independently by an inner current control loop in dq-coordinates. The operation with a scheduled powerflow shows the functionality of the active power control. An integrated power-frequency control stabilizes the grid frequency. The reactive power control is used and tested in other simulations to support the ac-voltage. The final investigation studies the behavior of the inverter during different concepts of startup and shutdown.

*Zöller, Tomas*

### **Entwicklung eines MILP-basierten Energiemanagementsystems mit Betrachtung der Spannungsqualität im Mikronetz**

Eines der Hauptkriterien eines zentralen Energiemanagementsystems für Mikronetze ist die optimale Regelung von dezentralen Energieanlagen. Zu diesem Zweck wird

die Optimierung des Unit Commitment und Economic Dispatch des Mikronetzes mit einer Mixed-integer linear programming (MILP) Methode mithilfe des IBM CPLEX Optimization Studios durchgeführt. In dieser Arbeit wird diese Optimierungsmethode mit einer Schnittstelle zur Netzsimulation verknüpft, um im Rahmen eines iterativen Prozesses Spannungsgrenzen zu berücksichtigen. Dieser Prozess beinhaltet eine Methode zur Umverteilung der Wirkleistung in einem Mikronetz und eine Methode zur optimierten Verteilung der Blindleistung mit dem Programm Matpower. Diese Methoden werden anhand einer Fallstudie eines zukünftig exemplarischen Mikronetzes bewertet und anhand eines Vergleichs mit einem Genetischen Algorithmus validiert.

### **Development of a Mixed-Integer Linear Programming Based Energy Management System with Voltage Supporting Active and Reactive Power Control**

One of the main issues within the centralized Energy Management Systems for microgrids is the problem of the optimal management of controllable resources. For this purpose, the unit commitment and economic dispatch for the generators of a microgrid are optimized with a mixed-integer linear programming (MILP) optimization method using the IBM CPLEX Optimization Studio. In this work, this optimization method is linked with a network simulation program which allows the consideration of voltage constraints through an iterative process. This process comprises a method to redistribute the active power in the microgrid as well as a method to optimize the reactive power distribution using Matpower. These methods are evaluated with a case study based on an exemplary future microgrid. A comparison to the Genetic Algorithm validates the results at the end.

### **Abgeschlossene Bachelorarbeiten sowie Forschungsarbeiten (\*) vom 1.11.2014 bis 31.10.2015:**

<b>NAME</b>	<b>THEMA</b>
Becher, Sven	Entwicklung und Auswertung von Teilentladungsquellen unter Wechselspannung und gedämpfter Wechselspannung. Development and Investigation of PD Sources under AC and Damped AC.
Bender, Marcus	Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten bei der Einspeisung von Photovoltaikanlagen in das Niederspannungsnetz. Study of Improvements for the Feed of Photovoltaic Energy into the Low Voltage Grid.
Böckmann, Olaf	Probabilistische Simulationen zur Untersuchung des Einflusses von Speichertechnologien auf Niederspannungsnetze. Probabilistic Simulations to Analyze the Impact of Storage Technologies on Low Voltage Grids.

NAME	THEMA
Brodbeck, Simon	Optimierung und Bewertung von Blindleistungsregelverfahren auf Referenznetzebene. Optimization and Evaluation of Reactive Power Control Methods in Reference Grids.
Bura, Christian	Engpassvermeidung im Drehstromnetz mithilfe von HGÜ-Strecken. Congestion Management with HVDC Links in the Transmission Grid.
Contreras, Daniel (*)	Modellierung von Windkraftanlagen mit DFIG in PowerFactory und Simulink. Modeling of DFIG Wind Generators in PowerFactory and Simulink.
Dryden, Werther	Anwendung des renpass-Marktmodells auf ein Übertragungsnetz. Application of the renpass Market Model on a Transmission Network.
Eberspächer, Maria (*)	Methoden zur PV-Ertragsberechnung aus Einstrahlungsdaten. Methods to Calculate the PV Energy Output with Irradiation Data.
Eringer, Ludwig (*)	Evaluierung synthetischer Haushaltslastprofile und deren Verbesserung durch Realmessung. Evaluation of Synthetic Private Load Profiles and Measurement Optimization.
Gärtner, Ruben	Untersuchung des Hochfrequenzverhaltens von permanent erregten Synchronmaschinen. Investigation of the High Frequency Behavior of Permanent Magnetic Synchronous Motors.
Göppele, Fabian (*)	Untersuchung der Gleichzeitigkeitsfaktoren von Wärmepumpen im Verbund bei verschiedenen Regelungsstrategien. Investigation of Coincidence Factors of Aggregated Heat Pumps Considering Different Control Methodologies.
Gerber, Malte	Power Quality-Analyse mit Python. Power Quality Analysis using Python.
Hach, Felix	Analyse der Auslegungsszenarien für die Ausfallanalyse in der Verteilnetzplanung. Scenarios for Contingency Analysis in Distribution Grid Planning.
Heinzelmann, Anja (*)	Entwicklung und Bewertung eines modularen Regelkonzeptes für ein dezentrales autarkes Smart Grid im Verteilnetz. Development and Evaluation of Modular Control Concepts within a Decentralized autarkic Smart Grid in the Distribution Grid
Helmer, Matthias (*)	Entwicklung eines Systems zur Langzeit-UHF-TE-Überwachung von Leistungstransformatoren. Development of a System for Long-Term UHF-PD Monitoring of Power Transformers.

NAME	THEMA
Hingerl, Helena (*)	Methodik für die Zuweisung des technisch und wirtschaftlich günstigsten Netzverknüpfungspunkts dezentraler Erzeugungsanlagen. Methodology for the Allocation of the Technical and Economical most Favourable Point of Common Coupling of Decentralized Power Generation.
Jacksch, Matthias	Untersuchung der Störspannung auf der mechanischen Welle von elektrischen Synchronmaschinen. Investigation of the Disturbance Voltage on the Shaft of Permanent Magnetic Synchronal Motors.
John, Christoph	Blindleistungsoptimierung im Übertragungsnetz. Reactive Power Optimization in the Transmission Grid.
Kaiser, Nils	Untersuchung und Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit verschiedener HD-Pressboards. A Comparison of Oil-impregnated Pressboard Conductivity for two Different HD-Pressboards.
Kaus, Sebastian (*)	Betriebsführungskonzept für einen Windpark. Operational Concept for a Wind Farm.
Kidane, Natnael	Messung der Spannungsabhängigkeit von Haushaltslasten. Measurement of Voltage Dependency of Household Loads.
Kohler, Christoph (*)	Wettbewerbsfähigkeit erneuerbarer Energien in afrikanischen Ländern. Competitiveness of Renewable Energies in African Countries.
Lemke, Philip	Auswirkungen unterschiedlicher Ausbauszenarien auf die Leitungsauslastung im Verteilnetz. Calculation of the Loading in the Distribution Grid Based on Regional Extension of Renewable Energy.
Leppert, Julian	Implementierung von Lastflusssimulation in Niederspannungsnetzen in C. Implementation of Load Flow Simulation in C.
Luo, Wei (*)	Fuzzy C-Mean Verfahren zur Parametrisierung der thermischen Modelle von Leistungstransformatoren. Parameterizing of Thermal Models of Power Transformers using Fuzzy C-Mean Method.
Meyer, Wendelin	Aufbau und Implementierung eines mehrkanaligen Systems zur Ortung von Teilentladungen. Development and Implementation of a Multi-Channel Partial Discharge Detection System.
Müller, Denis (*)	Störfestigkeitsuntersuchung einer Sensorapplikation zur unkonventionellen Strommessung in Mittelspannungsschaltanlagen. Investigation of Electromagnetic Immunity of an Unconventional Current Measurement Application for Medium Voltage.
Nägele, Haiko (*)	Anwendung von Cluster-Referenznetzen. Usage of Cluster Reference Grids.

NAME	THEMA
Neumann, Ansgar (*)	Planung von Blindstromkompensationsanlagen und Oberschwingungsfiltren. Design of Power Factor Correction Systems and Harmonic Filters.
Nüßle, Marius	Verlustoptimaler Betrieb von zwei parallel verlaufenden HGÜ-Strecken in einem Übertragungsnetz. Optimal Operation of two Parallel HVDC Lines in a Transmission Network.
Öztürk, Özgür	Analyse von Messdaten zur Verwendung in probabilistischen Lastflussrechnungen. Analysis of Load Measurements for Probabilistic Load Flow Calculation.
Peng, Yue (*)	Dynamische Untersuchung verschiedener Generatormodelle in MatDyn und PowerFactory. Dynamic Analysis of Different Generator Models in MatDyn and PowerFactory.
Penner, Dimitri	Untersuchung des Einflusses von DC-Komponenten auf die mechanische Schwingung von Transformatoren und Bewertung von neuen Dämpfungsmethoden. Investigation of DC on Mechanical Transformer Oscillations and Evaluation of Core Plate Damping Methods.
Pfeiffer, Andre (*)	Betriebsführungsstrategien für Photovoltaik-Batteriespeicher-Systeme mit Netzanschluss im Niederspannungsnetz. Operation of PV-Combined Energy Storage Systems in the Low Voltage Grid.
Pregitzer, Felix (*)	Untersuchungen und Empfehlungen für die chilenische Norm zur privaten Netzeinspeisung. Review and Recommendations to the Chilean Standard for Incorporating Residential Generation.
Renninger, Stephan	Genetischer Algorithmus in einem Energie Management System: Analyse und Verbesserung, Selbstanpassung und Inselnetzbetrieb. Genetic Algorithm in an Energy Management System: Analysis and Improvement, Self Adaption and Island Mode.
Schaaf, Marcus	Aufbau einer Steuerung für einen Vakuum-Leistungsschalter. Design of a Control for a Vacuum Circuit Breaker.
Schlesiger, Johannes (*)	Erstellen eines PowerFactory-Modells für das deutsche Übertragungsnetz. Modeling of the German Transmission Grid with PowerFactory.
Schnaars, Julia	Analytische Berechnung probabilistischer Lastflüsse. Analytical Probabilistic Load Flow.
Schön, Andrea	Vergleich verschiedener Betriebsführungskonzepte mit selbstgeführten HGÜ-Umrichtern. Comparison of Different Control Concepts with Self-Commutated HVDC Converters.

NAME	THEMA
Schreck, Sebastian	Modellierung, Simulation und Bewertung eines Energiemanagementsystems am Beispiel des Flughafens Stuttgart. Modeling, Simulation and Evaluation of an Energy Management System Using the Example of the Stuttgart Airport.
Schrettle, Bernd (*)	Durchschlagversuche an Störspitzen in SF <sub>6</sub> . Breakdown Experiments with Protrusions in SF <sub>6</sub> .
Spudic, Boris (*)	Antennenfaktorbestimmung von UHF-Sensoren unter Öl mittels GTEM-Zelle. Antenna Factor Determination of UHF Sensors in Oil Using a GTEM Cell.
Stöhling, Franka	Untersuchung der Systeminteraktionen an AC-/DC-Schnittstellen. Investigations of System Interactions of AC/DC-Networks.
Teichmann, Vincent (*)	Aufbau eines Hochrechnungssystems zur Erfassung der PV-Einspeisung innerhalb einer Regelzone auf Basis von Online-Ist-Werten. Development of an Extrapolation System for Recording the PV Units Feed-in within a Control Area Based on Online Measurements Data from PV Units.
Torralba Díaz, Laura	Simulation zur Auswirkung von Wasserstofftankstellen auf elektrische Verteilnetze mit regenerativen dezentralen Erzeugern. Hydrogen Stations in Electric MV Networks with Renewable Energy Supply.
Wenger, Philipp (*)	Design und Aufbau eines ohmschen Referenzteilers. Design and Setup of a Resistive Reference Voltage Divider.
Wild, Julian	Konstruktion einer einstellbaren elektronischen Last. Construction of an Adjustable Electronic Load
Vöhringer, Matthias	Ausfallanalyse im Hochspannungsnetz auf Basis probabilistischer Lastflussrechnungen. Contingency Analysis Based on Probabilistic Load Flow Calculation in the High Voltage Grid.
Wolf, Thomas	Untersuchung der zweiseitigen Teilentladungsmessung und der Synchronisierung am Energiekabel. Investigation of Double Sided Partial Discharge Measurement and Synchronization of Measurement Sites.
Wörtz, Felix (*)	Entwicklung und Automatisierung einer Schnittstelle zwischen PSS SINCAL und MATLAB zur Betrachtung der Netzbeschränkungen in MILP- und GA-Algorithmen. Development and Automation of an Interface between MATLAB and PSS-SINCAL for Network Calculations in MILP and GA Algorithms.
Xiang, Xiwen (*)	Berechnung der jährlichen Auslastungshäufigkeit mittels probabilistischer Lastflussrechnung. Calculation of Annual Loading Frequencies Using Probabilistic Load Flow.
Xiao, Peng	Untersuchungen über die Einflüsse des Wassers auf die elektrische Leitfähigkeit des Pressboards. Effects of Water on the Electrical Conductivity of Pressboard.

<b>NAME</b>	<b>THEMA</b>
Yang, Shangdan (*)	Modellierung von Dreiphasentransformatoren für die Zustandsschätzung in Verteilungsnetzen. Modelling of Three Phase Transformers for State Estimation in Distribution Grids.

## 4. PROMOTIONEN

### ▪ **Neue Methoden zur Dämpfung schneller transienter Überspannungen in gasisolierten Schaltanlagen**

**Dipl.-Ing. Simon Burow**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. C. Franck, ETH Zürich  
Tag der mündlichen Prüfung: 02.07.2015

In den letzten Jahrzehnten ist der Bedarf der Übertragung von immer größeren Mengen elektrischer Energie über immer weitere Strecken kontinuierlich gestiegen. Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen und um die Übertragung der Energie möglichst wirtschaftlich und verlustoptimiert zu gestalten, wurden die Betriebsspannungen stetig erhöht. Die aktuell höchste Nennspannung eines Übertragungsnetzes, das in China in Betrieb genommen wurde, beträgt 1100 kV. Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) können zentrale Elemente dieser Übertragungsnetze sein. Allerdings können Schaltvorgänge und Fehler, die einen Überschlag zwischen spannungsführenden und geerdeten Teilen einer GIS verursachen, zu sehr hohen transienten Überspannungen führen. Die Dämpfung dieser sogenannten Very Fast Transient Overvoltages (VFTs) ist Ziel der Arbeit, da dadurch das Isolationssystem der GIS und angrenzender Betriebsmittel sehr stark beansprucht werden. Darüber hinaus können die Amplituden der VFTs bei entsprechend hohen Betriebsspannungen die Bemessungs-Blitzstoßspannung überschreiten. Dies kann dazu führen, dass die VFT-Amplituden zum maßgebenden Kriterium für die dielektrische Auslegung einer GIS werden. Mit Hilfe von Dämpfungsmaßnahmen kann dem entgegengewirkt und damit aufwendigere, kostenintensive dielektrische Designs der GIS vermieden werden. Ebenso kann damit weiterhin die hohe Zuverlässigkeit von GIS gewährleistet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei neue Methoden, mit denen die Amplituden der VFTs gedämpft werden können, entwickelt und analysiert.

Für die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften kommen eine GIS und ein Messsystem zum Einsatz, mit denen Hochspannungsversuche mit VFT-Amplituden von bis zu rund 800 kV durchgeführt werden können. Zur Messung der transienten Überspannungen wird ein Messsystem entwickelt, das aus kapazitiven Sensoren besteht, die in der GIS installiert werden. Mit einem Burch-Abschluss am Ende der Messleitung kann eine konstante Übertragungsfunktion des Messsystems bis zu einer Frequenz von rund 100 MHz sichergestellt werden. Als Versuchsanlage wird eine aus mehreren Segmenten zusammengesetzte GIS verwendet, die in der Standardausführung rund 8,4 m lang ist. Über eine Hochspannungsdurchführung ist die Versuchsanlage an einen Stoßspannungsgenerator angeschlossen. Die Stoßspannung führt an einer Kugelfunkenstrecke unter SF<sub>6</sub>-Atmosphäre innerhalb der GIS zu einem Überschlag, durch den die VFTs initiiert werden. In Abhängigkeit der

Amplitude der Stoßspannung, des SF<sub>6</sub> - Drucks und des Abstands der Kugelfunkenstrecke können sowohl die Steilheit als auch die Amplitude der VFTs variiert werden. Durch eine mögliche Verbindung des Innenleiters mit der geerdeten GIS-Kapselung kann die Resonanzfrequenz der Versuchsanlage variiert werden. Verschiedene Dämpfungsmethoden können in den Aufbau integriert werden, so dass der Einfluss der VFT-Parameter auf die Dämpfungseigenschaften analysiert werden kann.

Mit der Entwicklung eines SPICE-Modells, das die VFTs der Versuchsanlage hinreichend genau abbildet, wird die Grundlage für die Simulation der einzelnen Dämpfungsmethoden gelegt. Modelle des jeweiligen Ansatzes werden in das SPICE-Modell integriert und ermöglichen die Darstellung und Analyse der Dämpfungsmechanismen.

Bei den betrachteten Dämpfungsansätzen kann die geringste Dämpfung mit einem Hohlraumresonator erzielt werden. Schirmelektroden, die in GIS zur Homogenisierung des elektrischen Felds zum Einsatz kommen, werden dafür so angepasst, dass sie als Hohlraumresonator fungieren und durch die VFTs angeregt werden. In einem Widerstand wird Energie aus dem Resonator absorbiert und dadurch die VFTs gedämpft. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass diese Dämpfungsmethode sehr frequenzselektiv ist. VFTs mit Grundfrequenzen, die von der Resonanzfrequenz des Resonators abweichen, werden nicht gedämpft. Ebenso können die ersten Spitzen der VFTs nicht gedämpft werden. Erst nach wenigen 100 ns kann eine leichte Dämpfung der VFTs festgestellt werden.

Mit einem spiralförmig geschlitzten Innenleiterstück und Metalloxidvaristoren kann in Versuchen eine Dämpfung der ersten Spitze um bis zu 40 % erzielt werden. Das speziell geformte Innenleiterstück stellt aufgrund der spiralförmigen Schlitzung eine Induktivität von nur wenigen Mikrohenry dar. Die Metalloxidvaristoren sind im Inneren des geschlitzten Leiters parallel zur Induktivität angeordnet. Durch die hochfrequenten VFTs fällt über der Induktivität des geschlitzten Innenleiters und damit auch über den parallel angeordneten Metalloxidvaristoren Spannung ab. Übersteigt diese Spannung die Bemessungsspannung der Varistoren, werden diese leitfähig und absorbieren die Energie der VFTs. Dies führt zur Dämpfung der VFTs. Bei der typischen Betriebsfrequenz von 50 Hz stellt die Induktivität hingegen nur eine vernachlässigbare Impedanz dar. Der Nennstrom wird dadurch nicht beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass die Dämpfung dieser Methode nur geringfügig von den Parametern der VFTs beeinflusst wird.

Eine noch bessere Dämpfung der transienten Überspannungen kann mit nanokristallinen Ringbandkernen, die um den Innenleiter angeordnet sind, erzielt werden. Diese Ringe bestehen aus sehr dünnen Bändern einer auf Eisen basierenden Legierung. Durch ihre speziellen Eigenschaften stellen sie auch im gesättigten Zustand eine ausreichende Impedanz für die Dämpfung der VFTs dar. Bei der Untersuchung des Materialverhaltens unter VFT-Beanspruchung konnte gezeigt werden, dass Ringbandkerne mit einer hohen Permeabilität eine bessere Dämpfung erzielen als niederpermeable. Durch den Einsatz von mehr Ringbandkernen kann die VFT-

Dämpfung nahezu linear gesteigert werden und eine nahezu vollständige Dämpfung der VFTs erzielt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Messmethode entwickelt, mit der die Impedanz der Ringbandkerne bei VFT-Beanspruchung bestimmt werden kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass von den drei vorgestellten Ansätzen nanokristalline Ringbandkerne das größte Dämpfungspotential besitzen. Darüber hinaus lassen sich die Ringbandkerne relativ einfach in GIS integrieren und die Dämpfung kann mittels einer einfachen Simulation hinreichend genau berechnet werden.

- **New Methods of Damping Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Switchgear**

**Dipl.-Ing. Simon Burow**

During the last decades, the global electrical energy demand has continuously risen. In the same way, the distance of transmission increased. In order to realise an efficient transmission of energy, the operating voltage of the power grids was raised step by step. Today, the highest operating voltage of 1100 kV is used in a Chinese transmission network. By means of such voltages, the transmission loss is reduced and the economic efficiency is increased. Gas insulated switchgears (GIS) can be central elements of such power grids. Unfortunately, very fast transient overvoltages (VFTs) can originate from switching operations inside the GIS. Also faults with a breakdown under SF<sub>6</sub>-atmosphere of a GIS can cause such overvoltages. VFTs are high stress for the insulation system of the GIS itself and of the connected equipment. For suitable high operating voltages, the amplitudes of VFTs can exceed the rated lightning surge voltage. In that case, the dielectric design of a GIS has to be adapted to these amplitudes. New methods of VFT-attenuation who allow to control these problems and avoid expensive and complex GIS-designs are investigated in this work. The most promising methods the author has developed are presented in the following chapters.

For the investigation of the damping characteristics, a high voltage GIS setup was used and a special measurement system was developed. The measurement system basically consists of a capacitive voltage sensor and a Burch termination of the measurement cable. Together, a precise measurement of the VFTs with voltages of about 800 kV and frequency components up to 100 MHz can be ensured. The high voltage test setup mainly consists of several GIS-sections with a total length of 8.4 m. The VFTs are generated by a breakdown in a spark gap inside the GIS. For this purpose, a standard HV impulse generator feeds a surge voltage via a bushing inside the GIS. The spark gap consists of two spherical electrodes and is situated in an SF<sub>6</sub>

atmosphere. As soon as the surge voltage reaches the breakdown voltage of the spark gap, a sparkover occurs between the contacts and initiates the VFTs. It is possible to control the breakdown voltage of the spark gap and, therefore, the amplitude of the resulting VFT as well, by means of adjusting the SF6 pressure and the width of the spark gap. Two possibilities to terminate the GIS at the bus duct end enable an investigation of the damping characteristics at two different resonant frequencies. On the one hand, it is open terminated. On the other hand, the inner conductor is connected to the grounded enclosure and forms a shorted termination. The different reflection factors lead to different resonant frequencies. All three attenuation methods were installed inside this test setup and their damping characteristics were investigated.

A SPICE-model of the test setup was created. It enables a simulation of the VFTs with satisfactory accuracy. This model serves a frame for the investigation of the attenuation methods. Models of each method were developed and integrated in the frame model of the GIS setup. By using those integrated models, the attenuation mechanics of the different methods were analysed and illustrated.

The smallest attenuation was achieved by a special radio frequency (RF) resonator inside the GIS. The resonator is formed by adapted shielding parts which are stimulated by VFTs. A suitable resistor absorbs the energy of the VFTs and, thereby, the VFTs get attenuated. Different experiments indicate a strong frequency dependency of this attenuation method. A reduction of the VFT amplitude was achieved with this setup only if the resonance frequency of the resonator fits the main frequency component of the VFT very well. Furthermore, the first peaks of a VFT could not be attenuated with this method. After some 100 ns, only a slight attenuation of the VFTs could be verified.

A good damping effect was achieved by means of a helical sliced GIS conductor and metal oxide surge arresters. Up to 40 % of the first VFT peak could be attenuated. The helical part forms an inductance of some micro henry. In parallel, a surge arrester stack is connected inside the conductor. Due to the high-frequency components of the VFTs, an inductive voltage drop across the arrangement occurs and the arresters become conductive. Therefore, energy is absorbed and the VFTs are damped. The investigation of this method shows a vast independency of the VFT characteristics.

The most efficient damping was achieved by means of nanocrystalline rings. They are located on the inner conductor of the GIS and consist of a very thin tape of an iron based alloy. These rings have a very specific characteristic and even in a magnetically saturated state, they form a sufficient impedance to attenuate VFTs. The investigations show that rings with a high permeability achieve a greater attenuation effect. Due to an application of a higher number of rings, an approximately linear increasing attenuation can be achieved and an almost entire attenuation of the VFTs can be reached. It is difficult to determine the impedance of the rings during VFT

exposure. Therefore, a measuring method was developed which bases on the determination of the VFT reflection coefficient.

Summing up, nanocrystalline rings are the most efficient attenuation method. Besides the best damping effect of all methods tested, its integration into a GIS is relatively uncomplicated and the attenuation can be reliably calculated by using a simple simulation.

## ■ **Thermohydraulische Untersuchung von ölgefüllten Leistungstransformatoren**

**Dipl.-Ing. Andreas Weinläder**

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr. techn. W. Rucker

Tag der mündlichen Prüfung:

05.10.2015

Ölgefüllte Leistungstransformatoren werden bereits seit über hundert Jahren in der Energieversorgung verwendet, wobei sich der Grundaufbau von deren Isolation – nämlich Papier, getränkt und umgeben von Isolieröl – auch im heutigen Zeitalter der Kunststoffe nicht grundlegend geändert hat. Die Verwendung von niedrigviskosem Isolieröl bringt gegenüber festen Isolierstoffen den großen Vorteil mit sich, dass der Transport der im Transformator unvermeidlichen Verlustwärme nach außen neben der Wärmeleitung auch durch Umlaufen des Öls (konvektiv) erfolgt. Die Konvektion des Öls ereignet sich im Betrieb bereits ohne einen vorgesehenen Antrieb, allein aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen warmem und kaltem Öl (Naturkonvektion) und wird bei großen Transformatoren durch Pumpen zusätzlich stark forciert.

Da die Lebensdauer eines Transformators sehr oft durch die Lebensdauer seiner festen Isolation – nämlich dem Papier – bestimmt wird und dieses unter starkem Einfluss seiner thermischen Beanspruchung altert, kommt einer guten thermischen Auslegung des Transformators eine große Bedeutung zu. Um diese zu ermöglichen, bedarf es zuverlässiger Berechnungsverfahren, um die Temperaturverteilung innerhalb eines entworfenen Transformators nachzurechnen und erforderlichenfalls diesen Entwurf in Richtung einer besseren Temperaturverteilung, mit weniger hohen Temperaturspitzen, zu korrigieren.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der konvektiven Wärmeübertragung zwischen der festen Isolationsoberfläche und dem umlaufenden Öl innerhalb der Wicklung von Transformatoren. Mit dem Ziel, die thermohydraulischen Verhältnisse innerhalb des Transformators, insbesondere auch die Temperaturverteilung innerhalb der Wicklung, mittels CFD (Computational Fluid Dynamic) in Verbindung mit zeitgemäßen Rechnern zu untersuchen, wurden zunächst Laborversuche durchgeführt. Dies ge-

schah mit Wicklungsmodellen von Scheibenwicklungen mit zickzack-förmiger Ölführung. Deren Messergebnisse wurden anschließend mit Ergebnissen der entsprechenden CFD-Simulationen verglichen. Wichtiges Merkmal der Modelle ist, dass die periodische Symmetrie realer Wicklungen, sowohl in axialer als auch in azimuthaler Richtung, ausgenutzt wurde, wodurch nur ein kleiner Bruchteil einer solchen Wicklung nachgebaut werden musste. Dadurch war es möglich, die unskalierten Originalabmessungen der zu modellierenden Wicklungsgeometrie im Modell beizubehalten.

In einem ersten Schritt wurden Wicklungsmodelle mit – entsprechend der Verlustleistung in realen Wicklungen – beheizbaren Leiterelementen hergestellt und die sich unter vorgegebenen Randbedingungen (Vorlauftemperatur und Massenstrom des eingespeisten Öls) stationär einstellende Temperatur in den Leiterelementen gemessen und mit den aus entsprechenden CFD-Simulationen erhaltenen Werten verglichen. Hierbei zeigte sich im Bereich von niedrigen Öl-Vorlauftemperaturen eine gute Übereinstimmung der Werte, im Bereich von hohen Öl-Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Öl-Vorlauftemperaturen wurde die Übereinstimmung deutlich schlechter. Grund hierfür könnten auftretende Turbulenzen sein, welche bei den bisher angewendeten CFD-Modellen nicht berücksichtigt wurden. Hier ergibt sich folglich ein wichtiger Ansatzpunkt für weitere Arbeiten, insbesondere auch, da nicht aufgeklärt werden konnte, ob die beobachteten Abweichungen ihren Ursprung in einem falsch berechneten Geschwindigkeitsfeld hatten oder ob, ausgehend von einem richtig berechneten Geschwindigkeitsfeld, Fehler erst bei der Berechnung des Wärmeüberganges aufgetreten sind.

Nach der so vorgenommenen eingeschränkten Validierung der Modellannahmen für die verwendeten CFD-Modelle wurden unter Zugrundelegung dieser Annahmen Parametervariationen an CFD-Scheibenwicklungsmodellen mit zickzack-förmiger Ölführung durchgeführt. Ausgehend von einer Basisgeometrie mit möglichst typischen Abmessungen wurden abwechselnd unterschiedliche Abmessungen und weitere Parameter variiert und die Auswirkung dieser Variationen auf den Druckabfall entlang einer Wicklungspassage, die Strömungsverteilung und die Verteilung der mittleren Wärmeübergangszahlen der einzelnen Wicklungsscheiben untersucht. Diese Untersuchungen wurden bei verschiedenen Eintrittsbedingungen (Randbedingungen am Öleintrittsbereich der untersuchten Passage) durchgeführt, d.h. der Massenstrom und die Temperatur des einströmenden Öls wurden variiert, um unterschiedliche Betriebsbedingungen und Ausführungsformen von Transformatoren zu berücksichtigen. Hierdurch ließ sich dann jede untersuchte Wicklungsgeometrie durch Kennlinien bzw. Kennfelder -mit den unabhängigen Variablen Massenstrom und Temperatur des einströmenden Öls- charakterisieren.

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen besagen, dass im Bereich hoher Re-Zahlen, wie sie im Fall von pumpengetriebenem Ölumlaufl (OD-Kühlung) zu erwarten sind, sich die Ansätze von vereinfachenden und bisher oft verwendeten Netzwerkmodellen zunehmend als unzureichend erweisen. Zudem wird die Verteilung der Strömung auf die einzelnen horizontalen Ölkanäle zwischen den Wicklungsscheiben zunehmend ungleichmäßig und entsprechend auch die Temperaturverteilung in der Wicklung.

Weiterhin beeinflussen die praktisch immer in nennenswertem Umfang vorhandenen Leckagen in den Ölbarrieren (zur zickzack-förmigen Ölführung) die Strömungs- und Temperaturverteilung in stark negativer Weise.

Zur weitergehenden Überprüfung der gemachten Modellannahmen wurde abschließend die Wicklung eines großen Maschinentransformators modelliert und untersucht. Hierbei wurde es durch Verwendung der o.g. Kennfelder der Wicklung ermöglicht, die Aufteilung des von der Ölpumpe praktisch fest vorgegebenen Ölmassenstroms (Gesamtwert) auf Ober- und Unterspannungswicklung zu berechnen. Mit den dann bekannten beiden Ölmassenströmen konnte – wiederum unter Verwendung der jeweiligen Kennfelder der beiden Wicklungen – die sich einstellende mittlere Wicklungstemperatur und auch die jeweilige Heißpunkttemperatur bestimmt werden.

## ▪ **Thermohydraulic Investigation of Oil-Filled Power Transformers**

**Dipl.-Ing. Andreas Weinläder**

Oil filled power transformers have been used in energy supply for more than hundred years, while the basic composition of their insulation – i.e. oil immersed and surrounded by insulating oil – did not change basically, even in this day and age of plastic. The usage of insulating oil with low viscosity has the great advantage in comparison with solid insulating materials that the transport of the unavoidable heat of loss of the transformer to the outside occurs – beneath heat conduction – also by the circulation of the oil i.e. convective. The advection of the oil occurs even without any provided drive only by the difference of density between warm and cold oil (natural convection) and is forced strongly by pumps for large transformers.

Since the endurance of a transformer is mostly determined by the endurance of its solid insulation – i.e. the paper – which ages under strong influence of its thermal load, a sound thermal design of the transformer is of great importance. To enable this, reliable calculation methods are required to recalculate the temperature distribution within a designed transformer and if necessary to revise the design into the direction of a better temperature distribution with less high temperature peaks.

The present thesis deals about the convective heat transfer between the solid insulation surface and the circulating oil within the winding of transformers. With the aim to investigate the thermohydraulic proportions within the transformer, especially the temperature distribution within the winding with the help of CFD (Computational Fluid Dynamic) in connection with up to date computers, at first laboratory experiments were conducted. This happened with models of disc type windings with a zigzag-formed oil path. The measurement results of these experiments were

compared with results of corresponding CFD-simulations. An essential feature of these models is that they make use of the periodic symmetry of real windings both in axial and azimuthal direction, whereby only a small fraction of such a winding had to be copied. Thereby it was possible to maintain the original dimensions of the winding geometry in the model.

In a first step, winding models with heatable conductor elements were built, according to the loss power in real windings. With these models the steady state temperatures in the conductor elements were measured under given boundary conditions (the temperature and mass flow rate of the infed oil). These temperatures were then compared with the values of corresponding CFD-simulations. Here, in the range of low oil temperatures a good accordance of the values became apparent while in the range of high oil temperatures and high oil mass flow rates the accordance became worse. The reason for that could be occurring turbulences which were unaccounted for in the used CFD-models. From there, an essential starting point for further investigations results, especially because up to now it became not clear, if the deviations between the temperatures resulted from a wrong calculated velocity field or if from a correctly calculated velocity field the errors occurred in the calculation of the heat transfer.

After the now conducted partial validation of the modelling assumptions of the used CFD-models, on the base of these assumptions, parametric variations at CFD-disc type models with zigzag-formed oil path were conducted. Starting with a basic geometry with as much as possible typical dimensions, alternately different dimensions and parameters were varied and the impact of these variations on the pressure drop along the winding path, the flow distribution and the average heat transfer coefficient of the particular winding discs were investigated. These investigations were conducted at different conditions at the inlet of the investigated winding pass, i.e. the mass flow rate and the temperature of the inflowing oil, to account for different conditions of operation and executions of transformers. Hereby it was possible to characterize each investigated winding geometry by characteristic curves or characteristic fields with the mass flow rate and the temperature of the inflowing oil as an independent variable.

The results of the CFD-simulations indicate that in the range of high Reynolds-numbers, as it is to expect for pump driven oil circulation (OD-cooling), the approaches of often used simplifying network models get increasingly deficient. Furthermore the flow distribution on the particular horizontal oil channels between the winding discs gets increasingly unequal and in consequence of that also the temperature distribution within the winding. Also the leakages of the barriers (for the zigzag-formed steering of the oil), which are more or less always present, are influencing the distribution of flow and temperature in a strongly negative manner.

For further validation of the used modelling assumptions, finally the winding of a large generator step up transformer was modelled and investigated. Here it was possible - by usage of the above mentioned characteristic fields of the winding- to calculate the

division of the total oil mass flow, which is prescribed by the pump, on the high- and low voltage winding. With the now known both oil mass flows, it was possible – also by usage of the characteristic fields of the windings – to determine the average winding temperature and also the hot spot temperature.

- **Experimentelle Untersuchungen zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit von Metalloxidvaristoren für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik**

**Dipl.-Ing. Maximilian Nikolaus Tuczek**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung (TU Darmstadt): 12.11.2014

- **Optimierte Positionierung von Messtechnik zur Zustandsschätzung in Verteilnetzen**

**Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. David Echternacht**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. A. Moser

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung (RWTH Aachen): 8.12.2014

- **Betrieb einer Zweipunkt-Offshore-HGÜ-Verbindung. Modelluntersuchungen**

**Dipl.-Ing. Steffen Rabe**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. P. Schegner, Prof. Dr.-Ing. K. Rudion

Tag der mündlichen Prüfung (OVGU Magdeburg): 27.03.2015

## 5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

### Hochspannungstechnik

Am Institut werden moderne *Messmethoden* zur Erfassung hoher Stossspannungen und schnellveränderlicher elektromagnetischer Felder untersucht und weiterentwickelt. Zu einem Schwerpunkt hat sich in den letzten Jahren die Teilentladung-(TE)-Messtechnik entwickelt. Wir beschäftigen uns hier vor allem mit fortschrittlichen Verfahren der Störgrößenunterdrückung und Mustererkennung, der akustischen TE-Messtechnik und der UHF-Methode zur Erfassung und Ortung von TE.

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

Hinsichtlich des *Designs* hochspannungstechnischer Betriebsmittel werden neue Isolierstoffe (z. B. natürliche und synthetische Ester) auf Ihre physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften hin geprüft. Durch den Einsatz moderner Softwarewerkzeuge, z. B. Finite Elemente Methode (FEM) und Computational Fluid Dynamics (CFD), wird der Ölstrom und das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren untersucht. Das Forschungsgebiet Gasförmige Isolationssysteme ist geprägt durch Themenstellungen wie die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von SF<sub>6</sub> und Mischgasen, des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Spannungsfestigkeit und die Untersuchung der Ausbreitung und Dämpfung von Very Fast Transients in GIS.

## RESEARCH ACTIVITIES

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

### High Voltage Engineering

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

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

Regarding the *design* of high voltage equipment new materials (e. g. natural and synthetic esters) are investigated concerning their physical, chemical and electric properties. By means of modern software tools, e. g. finite element analysis (FEM) and computational fluid dynamics (CFD), the oil flow distribution and the thermal behaviour of power transformers can be investigated and optimized. The research area Gaseous Dielectrics is characterized by topics like investigation of dielectric properties of pure SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>-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 SF<sub>6</sub>-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 behaviour 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 disturbance 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 goal 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 sporadically impulses in the automotive power network with as less coupling disturbances as possible.

## 5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

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

**M. Sc. Benjamin Adam**

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

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

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

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

Ein Problem bei der Klassifikation stellen überlagerte TE-Muster dar. Treten zwei TE-Quellen gleichzeitig auf, so sind ihre Muster nicht mehr eindeutig trennbar. Ein Ansatz zur Lösung ist das Training des Klassifikators mit bereits überlagerten Mustern. Dabei wird für jede Kombination aus zwei Fehlerquellen eine kombinierte Klasse erstellt und der Klassifikator mit dieser trainiert. Der so erweiterte Klassifikator kann nun auch gleichzeitig auftretende TE-Quellen erkennen.

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

**M. Sc. Benjamin Adam**

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

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

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

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

The method is challenged if several PD patterns of different sources are superimposed because a distinct separation is not given generally. One approach to face this issue is the use of classifiers which are trained not on the single patterns but on their superimposition: a combined class which considers both sources is created. The extended classifier can now also detect concurrent PD sources.

## ▪ Teilentladungsverhalten metallischer Partikel in SF<sub>6</sub> unter Gleichspannungsbeanspruchung

Dipl.-Ing. Philipp Arnold

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) und gasisolierte Leitungen (GIL) werden seit mehreren Jahrzehnten in der elektrischen Energieübertragung bei hoher Wechselspannung eingesetzt. Umfangreiche Forschung auf diesem Gebiet hat wesentlich zum erfolgreichen Einsatz und zur Verbreitung der Technologie beigetragen. Weit entwickelte Diagnoseverfahren ausgehend von Teilentladungsmessungen liefern in der Herstellungs-Endprüfung und im Betrieb durch Anlagenüberwachung (Teilentladungs-Monitoring) verlässliche Informationen über eventuelle Fehlstellen im Isoliersystem.

Die aktuellen Veränderungen im Netzbetrieb zeigen einen starken Trend zum vermehrten Einsatz von Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Dabei können gasisolierte Systeme eine Schlüsseltechnologie sein, Netzknoten kompakt aufzubauen. Derzeit gibt es noch wenig Betriebserfahrung zu gasisolierten Anlagen unter Gleichspannungsbeanspruchung.

Systematische, experimentelle Untersuchungen an realistischen Störstellen im Bereich der Gasisolierung sollen rasch den notwendigen Erkenntnisgewinn hinsichtlich des noch weitgehend unbekanntem Teilentladungsverhaltens unter Gleichspannung bringen: Dazu wurden in der laufenden Forschung schon umfangreich freibewegliche Metallpartikel untersucht. Das unter angelegter Hochspannung resultierende Partikel- und damit unmittelbar verknüpfte Teilentladungsverhalten weicht im DC-Fall wesentlich vom AC-Fall ab, jedoch ist die Detektion prinzipiell mit den am Markt eingeführten üblichen Messverfahren (elektrisch, UHF, akustisch, optisch; Fig. 1) möglich.

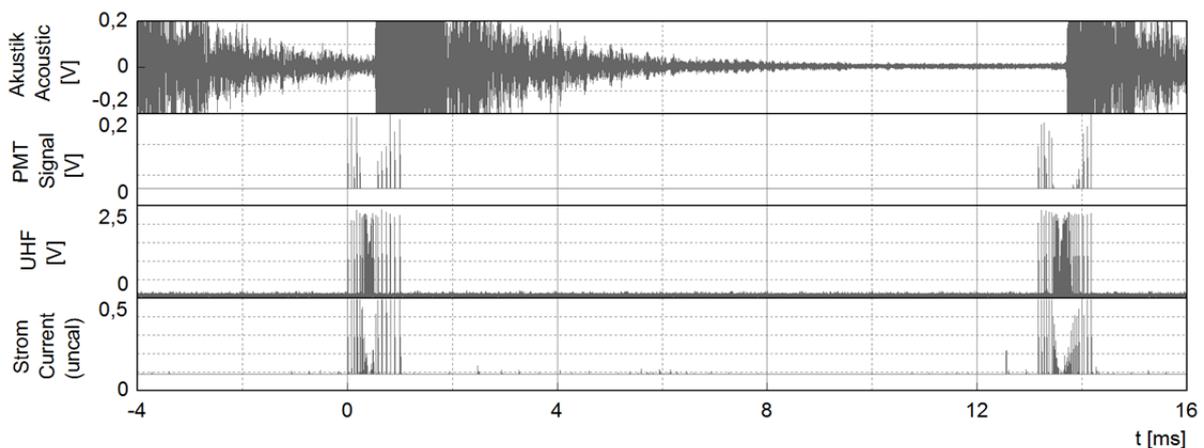


Fig. 1: Gemessene Teilentladungssignale an freibeweglichem, stabförmigem Partikel. Measured PD signals: Moving wire particle, 3 bar SF<sub>6</sub>, +340 kV DC.

- **Partial Discharge Characteristics of Metallic Particles in SF<sub>6</sub> at Direct Voltage Stress**

**Dipl.-Ing. Philipp Arnold**

Gas insulated switchgear (GIS) and gas insulated transmission lines (GITL) are being used for several decades in high voltage AC (HVAC) transmission. Intensive researches lead to successful application and penetration of the technology. Advanced diagnostics based on partial discharge (PD) measurements provide reliable information on potential defects within the insulation system meanwhile.

Recent changes in grid operation are heading towards increased application of high voltage DC (HVDC) transmission. Gas insulated systems can be seen as a key technology to build compact nodes. For the moment, there is little experience in HVDC operation of gas insulated installations.

Experimental investigations performed systematically covering realistic defects in the gaseous insulation shall clarify the mostly unknown partial discharge characteristics at DC. In the course of ongoing research, loose conductive particles have been investigated considerably. Under applied high DC voltage, the resulting particle motion and motion-related partial discharge activity significantly differs from AC conditions. However, PD detection is possible in principle with all measurement methods available on the market (electrical, UHF, acoustic, optical; Fig. 1).

Detection of fixed particles (protrusions) can be more difficult than in case of movable particles. In direct comparison, lower PD signal amplitudes arise and therefore higher sensitivity is needed. Traditionally, requirements concerning DC test voltage sources were relatively low – corona on rectifier electrodes was not an issue so far, as DC PD measurements were uncommon. Size of the HV circuitry (voltage source, protection resistor, test object) poses a problem concerning interferences and external disturbances (loop- or monopole-like arrangements). With non-encapsulated test setups, usable measurement data can only be acquired with high measurement enhancement efforts.

Validity of DC PD measurements can be increased significantly through synchronous measuring applying different measurement principles. Both for free particles as well as fixed particles, plausibility of single PD events can be verified through simultaneous synchronicity or causal interrelation.

Acoustic pickups are especially suitable for movable particles as such devices can provide reliable information on mechanical particle event on electrodes. Optical sensors are especially suitable for fixed particles as such devices can be directed towards the needle tip initially.

Die Detektion ortsfester Störspitzen (festsitzende Metallpartikel auf Elektrodenoberflächen) gestaltet sich schwieriger als im Falle freibeweglicher Partikel: Es treten im direkten Vergleich wesentlich geringere Amplituden in den Teilentladungssignalen auf, folglich wird eine hohe Empfindlichkeit der Messsysteme notwendig. Die Anforderungen an Gleichspannungsprüfanlagen waren bisher vergleichsweise gering, die Hochspannungserzeuger sind meist luftisoliert aufgebaut – Koronafreiheit spielte bisher nur eine untergeordnete Rolle. Große räumliche Ausmaße des Prüfkreises stellen ein Problem hinsichtlich externer Störeinkopplungen dar. Am nicht-gekapselten Prüfaufbau lassen sich ohne entsprechenden messtechnischen Aufwand keine verwertbaren Teilentladungsmessungen gewinnen. Die Aussagekraft von DC-Teilentladungsmessungen kann wesentlich durch die synchrone Messung mit unterschiedlichen Messprinzipien gesteigert werden.

Sowohl an freibeweglichen Partikeln als auch an festen Störspitzen kann die Plausibilität der einzelnen gemessenen Signale durch simultanes Auftreten der Signale oder kausalen Zusammenhang geklärt werden.

An freibeweglichen Partikeln eignet sich hierfür insbesondere die akustische Messung, da Körperschallsensoren zuverlässige Information über Elektrodenberührungen liefern können. An festen Störspitzen ist die optische Messung unproblematisch möglich, da der optische Sensor einmalig auf die untersuchte Spitze ausgerichtet werden kann.

Abgesehen von der akustischen Teilentladungsmessung kann für freibewegliche Partikel und feste Störspitzen hinsichtlich des zeitlichen Auftretens gefolgert werden, dass elektrisches, UHF und optisches Teilentladungssignal synchron auftreten. Die Korrelation hinsichtlich des Amplitudenwertes ist oft, aber nicht immer gegeben. Zeitabstands-basierte TE-Auswerteverfahren lassen sich somit praktisch unabhängig vom Messverfahren auf ein verifiziertes Signal anwenden.

Die Schwierigkeit des ganzheitlichen Erfassens des Teilentladungsverhalten typischer Defekte unter Gleichspannung in SF<sub>6</sub> liegt in der Vielzahl möglicher Parameter und verbundener Einflussfaktoren (Partikelgröße, Partikelbeschaffenheit, Spitzenlänge, Spitzenradius, Gasdruck, Polarität, Höhe der Prüfspannung, Dauer der Hochspannungsprüfung, Zeitpunkt der Messung, Veränderung der Gasqualität in Folge der TE-Aktivität).

Folgende Vorgehensweisen haben sich als praktikabel herausgestellt: Zunächst Messung unter langsamer, kontinuierlicher Spannungssteigerung (Fig. 2), anschließend Messung bei Konstantspannung oberhalb der Einsetzspannung (Fig. 3).

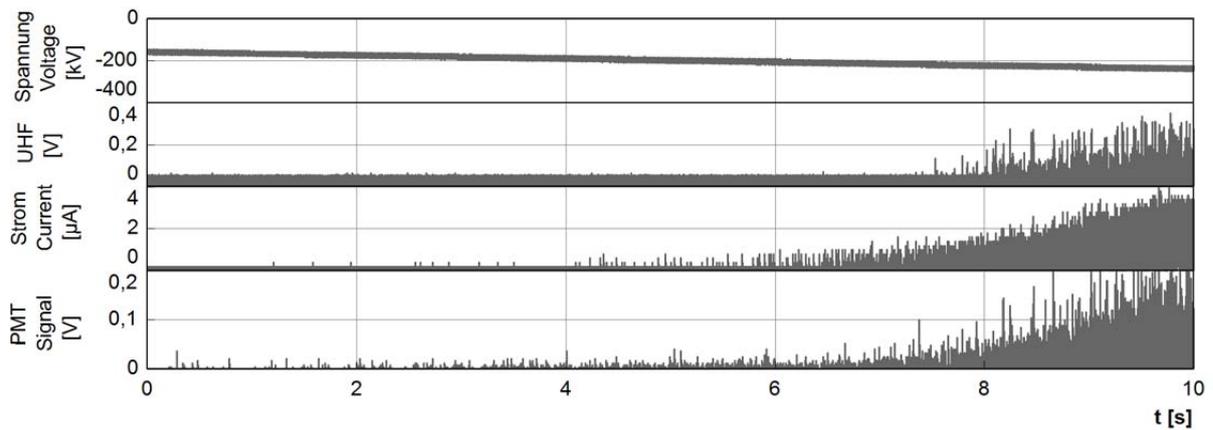


Fig. 2: Scharfe Störspitze auf Erdseite in coaxialer Anordnung.

Sharp protrusion on ground electrode, coaxial arrangement, 3 mm, 2 bar SF<sub>6</sub>.  
Spannungssteigerungsversuch / Voltage ramped up.

Except acoustic measurements, both for movable and fixed particles electrical, UHF and optical PD signals occur simultaneously. Correlation regarding amplitudes often matches, but not always. Therefore, pause-time-based PD analysis can be performed independently from the measurement principle for a certain defect, applied to any verified signal.

Difficulty in integrated characterization of HVDC GIS PD mannerism is simply given by the multitude of parameters and influencing factors (particle size, particle properties, protrusion length, protrusion tip radius, gas pressure, polarity, magnitude of test voltage, duration of voltage application, time of measurement after initial voltage application, change in gas quality as a result of PD activity). Practical test procedures can be as follows: Firstly, measuring during a slow voltage rising test (Fig. 2) – secondly, measuring at a certain constant voltage (Fig. 3).

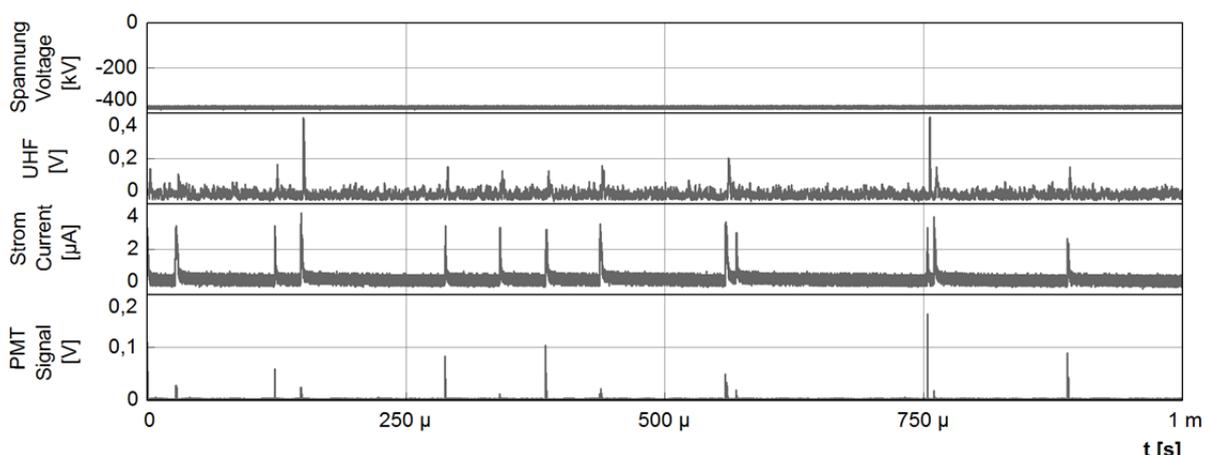


Fig. 3: Scharfe Störspitze auf Erdseite in coaxialer Anordnung.

Sharp protrusion on ground electrode, coaxial arrangement,  
3 mm, 5 bar SF<sub>6</sub>, const. DC.

## ■ Interpretation mechanischer Betriebschwingungen von Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Michael Beltle

Die Langzeitüberwachung von Transformatoren, das Monitoring, gewinnt im Rahmen der Diagnostik von Betriebsmitteln zunehmend an Bedeutung. Eine einfach umsetzbare Möglichkeit für Transformatormonitoring bietet die Betrachtung der mechanischen Schwingungen auf der Kesselwand. Mit diesem Verfahren können Rückschlüsse auf den mechanischen Zustand des Aktivteils gezogen werden. Schwingungen werden in einem Laboraufbau bei verschiedenen Verspannungen des geblechten Kerns vermessen. Messungen direkt auf dem Aktivteil und auf dem Kessel ermöglichen es, das Übertragungsverhalten der Struktur zu untersuchen, siehe Fig. 1 (links). Betrachtet wird, wie stark sich einzelne Jochabschnitte hinsichtlich ihrer mechanischen Schwingungen abhängig von den Einspannkräften untereinander verändern und welche Signale sich aus der Überlagerung aller Schwingungsquellen an der Kesselwand ergeben, siehe Fig. 1 (rechts). Mechanische Manipulationen des Aktivteils führen zu einem veränderten Schwingungsverhalten des Kerns und der auf dem Kessel messbaren Schwingung. Die Signalleistung hängt vom jeweiligen Kernabschnitt und für externe Messungen vom Einfluss des Koppelpfades ab.

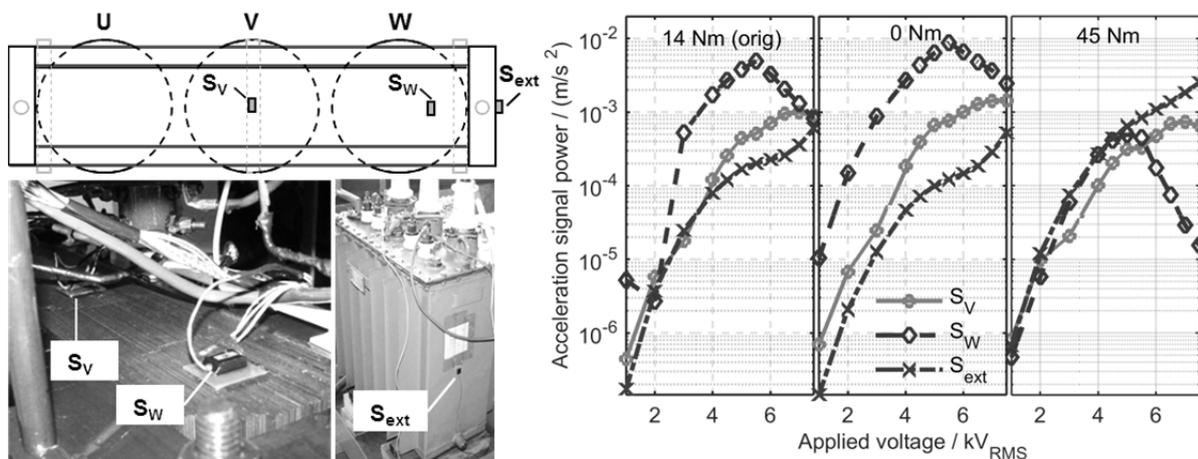


Fig. 1: Links: Messaufbau mit 2 Beschleunigungssensoren direkt auf dem Aktivteil des Testtransformators ( $S_V$  und  $S_W$ ) und einem Sensor  $S_{ext}$  auf der Kesselwand.

Rechts: Signalleistung der Beschleunigungsmessungen bei  $f_{n,mech} = 100$  Hz und veränderlicher Magnetisierungsspannung für verschiedene Verspannungsmomente des Aktivteils.

Left: Measurement setup using 2 acceleration sensors on the core yoke (sensors  $S_V$  and  $S_W$ ) and an external sensor  $S_{ext}$  on the tank wall.

Right: Signal power of acceleration signals at  $f_{n,mech} = 100$  Hz over AC supply voltage (RMS) at different torques applied to the core measured at different Sensor positions.

## ■ Asset Diagnosis for Power Transformers Based on Mechanical Oscillations

Dipl.-Ing. Michael Beltle

The reliable operation of power transformers is an essential factor for the high availability of electric energy. Reliability demands can be enforced using condition based asset management which relies on different diagnosis measurements and continuous monitoring. An approach for mechanical surveillance is available by regarding transformers' mechanical oscillations during operation. The correlation of the mechanical status of the active part's core and measured vibrations is shown in a laboratory setup which allows the manipulation of clamping torque of the core. Acceleration sensors are mounted directly on the active part ( $S_V$ ,  $S_W$ ) and on the outside tank wall ( $S_{ext}$ ), see Fig. 1 (left). Three different setups of torque are determined: the original torque (14 Nm), a reduced torque (0 Nm) and a tightened torque (45 Nm). The resulting basic mechanical frequency  $f_{n,mech} = 100$  Hz at the different torques is shown in Fig. 1 (right). Signals at different positions are not influenced uniformly. Hence, structural changes can be identified by derivations at each position in general but different measurement positions cannot be compared against each other.

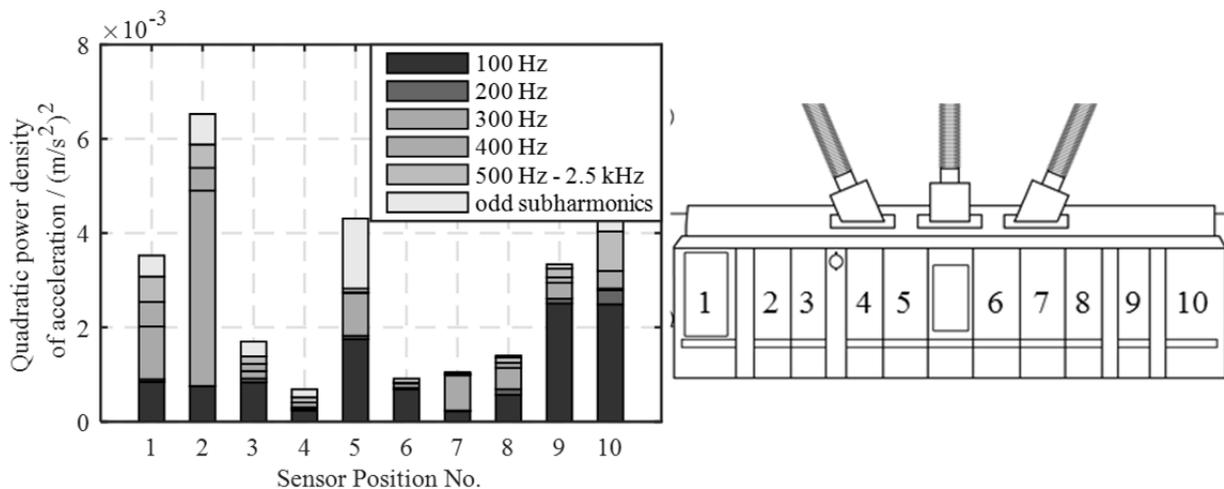


Fig. 2: Links: Signalleistungsanteile der einzelnen mechanischen Frequenzen (Grundfrequenz und Harmonische) an verschiedenen Kesselpositionen.  
 Rechts: Seitenansicht Leistungstransformator mit einzelnen Kesselsegmenten 1-10, unterteilt durch Verstrebrungen. Die Messungen finden mittig in jedem Segment statt.  
 Left: Signal power of single frequencies (basic frequency and its harmonics) at different tank positions.  
 Right: Side view of transformer tank wall with different segments. Measurements are performed centric within each segment.

Der Einfluss der Messposition auf mechanische Schwingungen kann an einem Netzkuppltransformator (Fünfschenkelkern) unter konstanten Rahmenbedingungen (konstante Last, Temperatur, Stufenschalterstellung) gezeigt werden. Fig. 2 zeigt links die Signalleistungen einzelner Frequenzanteile an insgesamt 10 verschiedenen Messstellen entlang der Kesselseite. Die Positionen sind in Fig. 2 (rechts) dargestellt. Erkennbar ist eine starke Positionsabhängigkeit des Messverfahrens. Daher sind feste Messstellen für Langzeituntersuchungen unabdingbar.

Zusätzliche betriebliche Belastungen für Transformatoren können durch ungewollte DC-Einkopplungen entstehen, die häufig in der Nähe großer Industrieanlagen entstehen oder durch Hochspannungsgleichstromübertragungsstrecken verursacht werden. Der Gleichstrom führt zu einer Verschiebung des magnetischen Arbeitspunktes innerhalb der Hystereseurve. Um solche Betriebszustände nachzustellen sind aufwändige Labormessungen notwendig. Fig. 3 zeigt ein typisches Setup bestehend aus zwei gekoppelten 350 MVA-Netzkuppltransformatoren. Diese werden im Leerlauf mit AC magnetisiert, dann wird ein DC über deren Sternpunkte eingepreßt. Verschiedene Szenarien können durch die Verteilung des DC auf die einzelnen Phasen realisiert werden. Die Auswirkungen von bereits geringen Gleichströmen sind in Fig. 4 dargestellt. Das linke Diagramm zeigt den DC im Sternpunkt eines Transformators. Rechts davon ist die Zunahme der Betriebschwingungen gezeigt. 0 dB entspricht dabei dem Fall ohne DC, im Extremfall steigen bei einem betragsmäßigem DC von  $|I_{DC}| = 1,25 \text{ A}$  die Kesselschwingungen um 12 dB an.

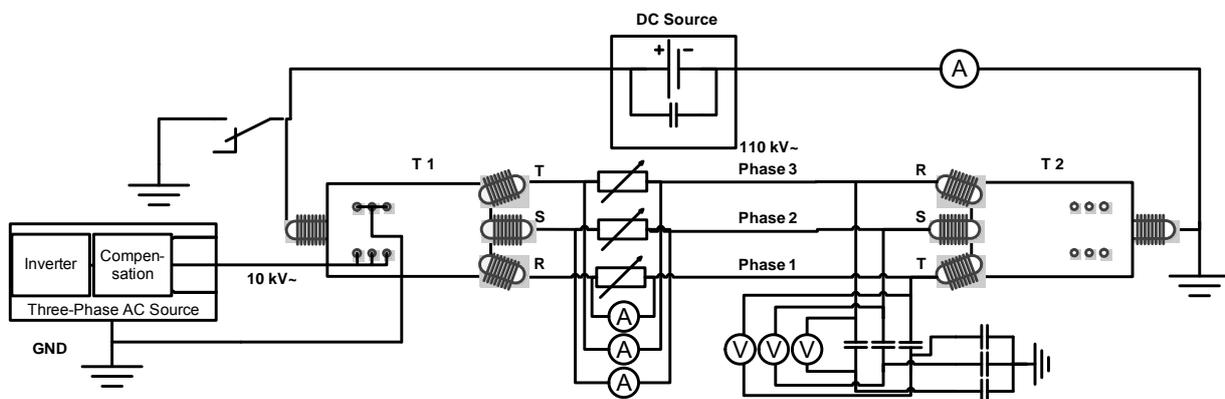


Fig. 3: Testsetup für DC-Versuche an Leistungstransformatoren. Verschaltung der Transformatoren über deren HV-Seite, DC-Masche über die beiden Sternpunkte (Massepotential). DC-Verteilung auf einzelne Phasen über ohmschen Stromteiler in den HV-Phasen.

DC test setup for power transformers in Back-to-back connection.

Transformers are connected on the HV sides. DC is injected on ground potential and the loop is closed through the transformer's star points. Different DC distributions are achieved by an Ohmic current divider on the HV phases.

The correlation between multiple punctual measurement positions on a tank wall and the resulting acceleration signal is performed on a power transformer in service. Fig. 2 (right) shows the side view of a 5-limb power transformer which provides 10 wall segments. Acceleration is measured at each segment at the same height and always in the middle of a segment. The signal power is discriminated into the basic frequency (100 Hz), harmonic contents, sub harmonics and noise, see Fig 2 (left). The strong deviation between positions demand for fixed sensor positions for all long-term investigations of transformer's mechanical oscillations.

Additional stress for transformers can be caused by unwanted DC coupling, which can occur near industrial areas and by HVDC transmission systems or geomagnetically induces currents (GIC). DC influences the magnetic operational point of the core plates and thus changes the hysteresis loop by adding an offset which can lead to half-wave saturation. Practical investigations of DC effects on real power transformers are extensive. Fig. 3 shows a setup of two 350 MVA grid couplers connected on their HV side at no-load condition. After AC magnetisation DC is forced through the transformers via their star points. Different scenarios can be realized by an adjustable ohmic current divider on the HV phases which forces asymmetrical DC between the phases. The effects of DC on mechanical oscillations are shown in Fig. 4. The left plot shows the DC running through the star point. The right plot illustrates the corresponding gain of oscillations. 0 dB represents the AC reference, where no DC is applied. In this scenario the worst case provides an absolute DC  $|I_{DC}| = 1,25$  A which leads to an increase of tank vibrations of 12 dB.

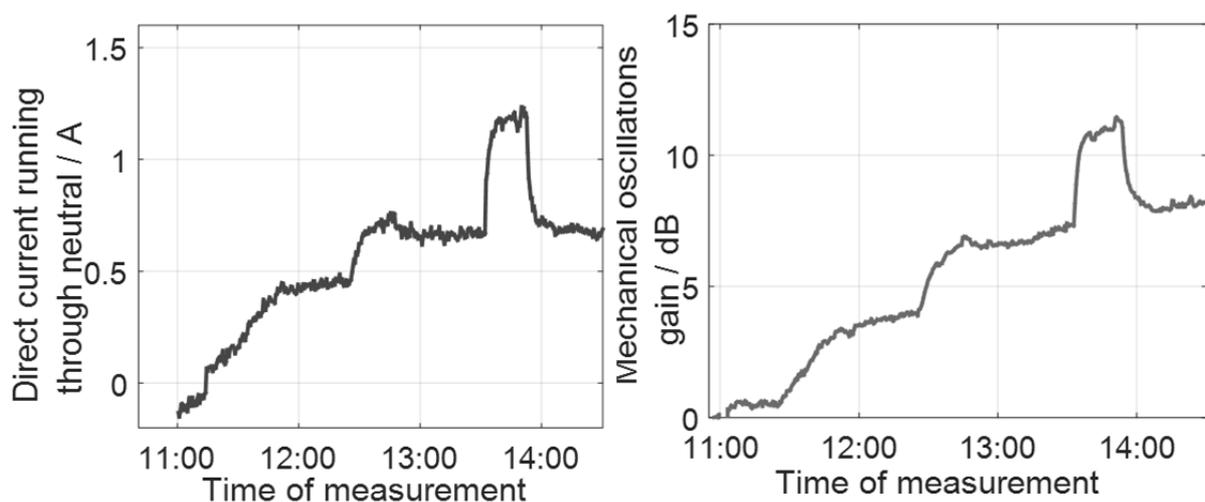


Fig. 4: Links: Gleichstromfluss durch den Sternpunkt. Für  $I_{DC} < 0$  fließt der Gleichstrom von der Masse über den Sternpunkt in den Transformator. Rechts: Resultierende Änderung der mechanische Schwingungen bezogen auf den Leerlauf ohne DC (=0 dB).  
 Left: Direct current through the transformer's neutral.  $I_{DC} < 0$  means the current flows from ground into the transformer.  
 Right: resulting gain of mechanical oscillations with reference to no-load condition without DC (= 0 dB).

## ▪ **Beurteilung der Überlastbarkeit von Verteiltransformatoren**

**M. Sc. Mohammad Djamali**

Mit der Öffnung der Strommärkte finden die Betreiber von Energieversorgungsnetzen neue Betriebsbedingungen vor. Eine möglichst hohe Ausnutzung eines Netzes, und damit jedes Betriebsmittels, gewinnt aus Kostengründen an Bedeutung. Eine Gefährdung der Betriebsmittel soll jedoch aus Gründen der Versorgungssicherheit vermieden werden. Bei diesen Überlegungen kann die kontrollierte Überlastung von Betriebsmitteln, wie zum Beispiel von Verteiltransformatoren, einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber einem Netzausbau bringen.

Ist die Überlastung eines Verteiltransformators notwendig, muss sichergestellt werden, dass er keine vorzeitige thermische Alterung erfährt. Um dies zu gewährleisten, kann bei einem mit einem Monitoringsystem ausgerüsteten Verteiltransformator die aktuelle Überlastbarkeit online berechnet werden. Das in der Software des Monitoringsystems implementierte thermische Modell errechnet die maximal mögliche Dauerlast bei den aktuellen Umgebungsbedingungen und die mögliche Zeit, die der Verteiltransformator bei einer vorwählbaren Überlast im Notbetrieb gefahren werden kann.

Zu diesem Zweck wurde ein thermisches Modell am IEH vorgeschlagen und implementiert, in welchem einige Wärmeübertragungsphänomene in Betracht gezogen wurden. Dies sind die natürliche Wärmekonvektion von Öl und Luft, die thermische Strahlung im Kühler sowie die natürliche Belüftung in der Transformatorstation, deren komplexen Zusammenhang sich in der thermisch-elektrischen Analogie in Fig. 1 widerspiegelt.

Die Genauigkeit von verschiedenen Modellen kann durch die Fehlerdauerlinie verglichen werden. Fig. 2 zeigt den Vergleich zwischen einem konventionellen Modell gemäß „IEC 60076-7 Loading Guide“ und dem in Fig. 1 dargestellten Modell. Beide Modelle sind durch Messdaten eines im Betrieb befindlichen 400 kVA-Verteiltransformators im Januar parametrisiert und mit Messdaten aus den Monaten Februar bis Juli verifiziert worden. Diese Weise der Parametrisierung beweist, dass die Modelle verschiedene Betriebszustände behandeln können. Wie aus der Fehlerdauerlinie in Fig. 2 hervorgeht, ergibt sich aus der genaueren Bestimmung des thermischen Widerstandes eine genauere Berechnung der oberen Öltemperatur. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen die Eignung der thermischen Modellierung für die Beschreibung des thermischen Verhaltens von Verteiltransformatoren. Damit wird die genaue Berechnung der Heißpunkttemperatur ermöglicht, weil sich dieser direkt auf die obere Öltemperatur bezieht. Damit kann die Belastbarkeit des Transformators berechnet werden.

## ■ **Assessment of the Overload Capability of Distribution Transformers**

**M. Sc. Mohammad Djamali**

The network operators have faced new challenges and new operation conditions by the opening of electricity markets. A maximum utilization of a system or a component has become an important subject due to financial reasons. However, the improper and risky operation of the components should be prevented. With these considerations, a controlled overloading of components, e.g. distribution transformers can be more economically advantageous than the extension of the network by installing transformers.

If the overloading of a distribution transformer in the distribution system is necessary, it should be guaranteed that the transformer does not experience an accelerated thermal ageing. To assure this, the overload capability of a distribution transformer which has been equipped with an online monitoring system can be calculated. The thermal model which is implemented into the monitoring system determines the maximum allowable load in the current ambient condition of the transformer as well as the time interval during which the distribution transformer is allowed to be overloaded.

For this purpose, a thermal model has been proposed and implemented, in which some heat transfer phenomena have been taken into account. This comprises the natural convection of oil and air, the thermal radiation in the cooler as well as the natural ventilation in the transformer substation. Taking these phenomena into account, the thermal-electrical analogy circuit is illustrated in Fig. 1.

The performance of different models can be compared based on their error duration curves. Fig. 2 shows the comparison between the performance of IEC 60076-7 as a conventional top-oil temperature model and the performance of an advanced physical model shown in Fig. 1. Both models have been parameterized with data measured from a 400 kVA distribution transformer during normal operation in January and verified with data from February to July. The described method for parameterizing and verifying the models proves that the model can perform under different conditions with an acceptable error. As can be seen from the error duration curve, the precise determination of the thermal resistance results in a more accurate calculation of the oil temperature. Thereby, due to the direct relationship between hot-spot temperature and top-oil temperature, the hot-spot temperature can be precisely calculated which may lead to the improved determination of the loading capability of a power transformer.

Um eine unkritische und von der Umgebungstemperatur abhängige Überlastung abschätzen zu können, kann auf Normen zurückgegriffen werden. Durch Vorgabe eines dort vorgeschriebenen Grenzwertes für die Heißpunkttemperatur kann ein maximaler Lastfaktor abgeschätzt werden, der die Lebensdauer des Verteiltransformators nicht beeinträchtigt. Nach IEC 60076-7 beträgt die maximal zulässige Heißpunkttemperatur 98°C. Fig. 3 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Belastbarkeit eines 400 kVA-Verteiltransformators im Monat Juni. Wie sich der Abbildung entnehmen lässt, können die günstigen äußeren Bedingungen daher eine Belastung des Verteiltransformators oberhalb der veranschlagten Leistungsgrenzen erlauben, ohne dabei die Lebensdauer des Betriebsmittels herabzusetzen.

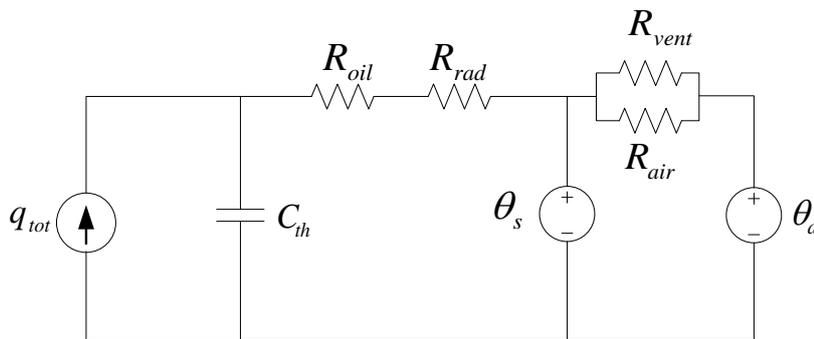


Fig. 1: Thermisch-elektrische Analogie des für Verteilnetztransformatoren entwickelten physikalischen Modells.  
The thermal-electrical analogy of the proposed physical model for distribution transformers.

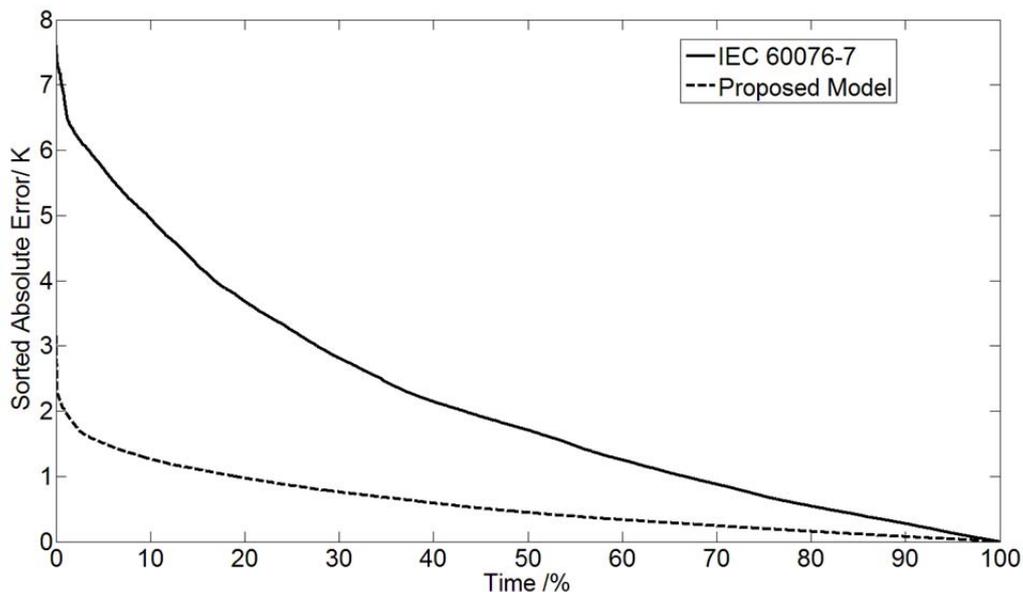


Fig. 2: Fehlerdauerlinie der berechneten oberen Öltemperatur für einen 400 kVA Verteiltransformator.  
Error duration curve of top-oil temperature calculated for a 400 kVA distribution transformer.

The application of available standards enables the estimation of a constant noncritical overload depending on the ambient temperature. Using the maximum value of the hot-spot temperature prescribed by standards, the overload capability of the distribution transformer can be calculated so that it does not lead to the accelerated thermal ageing and the consecutive lifetime reduction of the distribution transformer. According to the IEC 60076-7 standard, the maximum allowable hot-spot temperature corresponding to unity relative ageing rate is 98°C. Fig. 3 shows exemplary the overload capability of a 400 kVA distribution transformer during the month of June. As can be seen from the figure, lower ambient and station temperatures lead to higher loading capability of distribution transformers without reducing their life time.

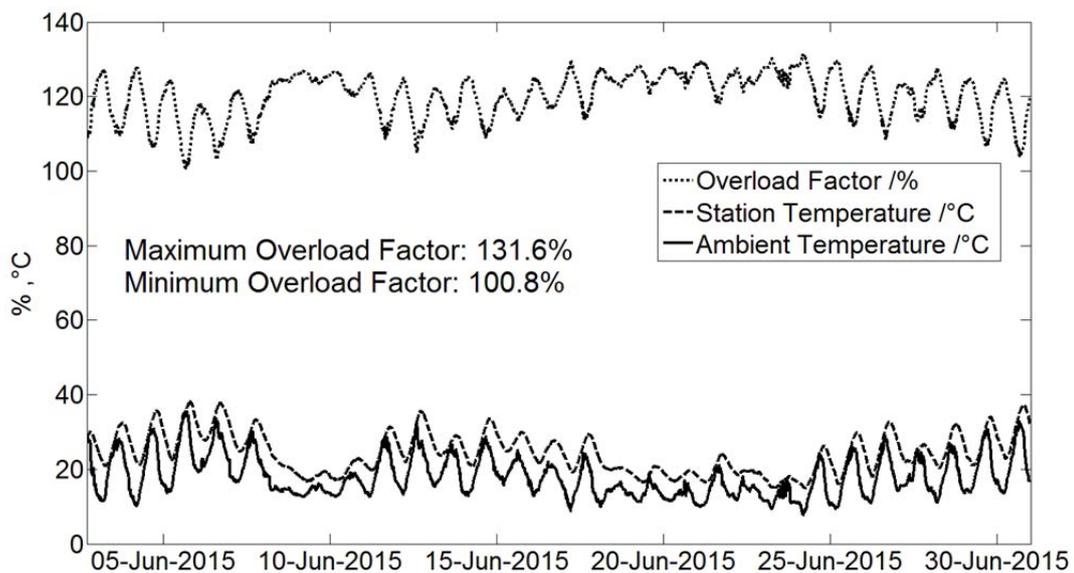


Fig. 3: Überlastbarkeit eines 400 kVA-Verteiltransformators im Monat Juni.  
Overload capability of a 400 kVA distribution transformer in June.

- **Untersuchung der Durchschlagfeldstärke von natürlichen Estern als Isolationsmedium in Leistungstransformatoren**

**M. Sc. Stephanie Hägele**

Der Einsatz von natürlichen Estern als Isolationsmaterial in Leistungstransformatoren bietet viele Vorteile im Vergleich zu konventionellen Mineralölen. Zu diesen zählen unter anderem der höhere Flammpunkt, das größere Wasserlösungsvermögen sowie eine bessere Umweltverträglichkeit. Verschiedene am IEH durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass natürliche Ester aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften als Isolierstoff im Transformatorenbereich einsetzbar sind. Nachteil der Öle auf Pflanzenbasis ist jedoch eine geringere Durchschlagfeldstärke bei inhomogenen Feldverteilungen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich damit, wie stark die Durchschlagsspannung von pflanzlichen und konventionellen Ölen durch die elektrische Feldverteilung beeinflusst wird. Dies wird in verschiedenen Versuchsaufbauten mit unterschiedlichen Spannungsbeanspruchungen untersucht. Erste Messungen erfolgen in Anlehnung an den in der ASTM D3300 definierten Test zur Messung der Durchschlagsspannung mit Normblitzimpuls 1,2 / 50  $\mu$ s. Um die Feldhomogenität zu verändern, werden verschiedene Elektroden bei variablem Abstand verwendet. Die homogene Feldverteilung wird mit zwei Kugelelektroden bei geringer Schlagweite erzeugt. Für die stark inhomogene Feldverteilung wird eine Kugelelektrode durch eine Nadel mit definiertem Spitzenradius ausgetauscht.

Der verwendete natürliche Ester zeigt bei schwach inhomogener Anordnung nahezu dieselbe dielektrische Festigkeit wie das Mineralöl. Wird jedoch die Homogenität des elektrischen Felds stark verringert, zeigen die Ergebnisse eine deutlich geringere Durchschlagsspannung des verwendeten pflanzlichen Öls. Dies ist auf Unterschiede in den chemischen und Entladungseigenschaften in natürlichen Estern im Vergleich zu Mineralöl zurückzuführen. In welcher Form diese Eigenschaft den Einsatz von pflanzlichen Ölen als Isolierstoff in Leistungstransformatoren beeinflusst und ab welchem Inhomogenitätsgrad die Verminderung der Durchschlagfestigkeit auftritt, ist Gegenstand aktueller Forschungen am IEH.

Weitere Forschungsthemen in diesem Bereich sind Alterungs- sowie Hoch- und Tieftemperaturuntersuchungen an natürlichen Estern und Mineralölen.

- **Investigation of the Dielectric Strength of Natural Ester Liquid as Insulation Material in Power Transformers**

**M. Sc. Stephanie Hägele**

Using natural ester liquids as insulation material in power transformers offers many advantages compared to conventional mineral oils. These are for example the higher flash point, the greater water solubility and better environmental sustainability. At the IEH, various experiments results illustrate, that the electrical properties of natural ester liquids are suitable to be used as insulating material in power transformers. However, a disadvantage of plant based oils is the lower breakdown field strength in extremely inhomogeneous field distributions.

This contribution investigates the influence of the electric field distribution on the breakdown voltage of plant based oils compared to conventional mineral oils for different degrees of inhomogeneity. Investigations are done with different experimental setups and different types of excitation voltage. The breakdown voltage of a standard 1.2 / 50  $\mu$ s lightning impulse is measured based on the breakdown test defined in ASTM D3300. To vary the inhomogeneity of the electric field, different types of electrodes are used in different sparking distances. The less inhomogeneous field distribution is set by two sphere electrodes at low sparking distance. For the extremely inhomogeneous field distribution one sphere electrode is substituted by a needle electrode having a defined tip radius.

The results of the breakdown voltage obtained from a slightly inhomogeneous electric field distribution show a comparable dielectric strength for both oils. However, if the homogeneity of the electric field is severely reduced, the results show a noticeable lower breakdown voltage of the natural ester liquid compared to the mineral oil. This is due to differences in the chemical structure and discharge mechanisms in natural ester in comparison to mineral oil.

If or in which way this property affects the use of natural ester liquids as insulation material in power transformers and at what degree of inhomogeneity the reduction of dielectric strength occurs, is the subject of current research at the IEH.

Further research topics concerning natural ester liquid application in power transformers are ageing studies and investigations on high and low temperature behavior of natural ester liquids compared to mineral oil.

- **Effect of Different Connection Schemes, Measurement Impedances and Termination Resistors on the Sensitivity of the FRA Method**

**M. Sc. Mohammad H. Samimi**

Power transformers, which are among the most important apparatuses in power systems, may experience mechanical deformations in inside geometry. These mechanical changes occur mainly because of massive electromagnetic forces, which are due to the high short-circuit currents in the windings. If the deformation is severe, it may lead to a consecutive electrical failure of the power transformer after re-energizing which is, in fact, the end of transformer service-life. It is vital, therefore, to diagnose these destructive deformations beforehand, providing the opportunity to carry out a fast and low-cost overhaul. One of the promising diagnostic tools, which is very helpful for determining such mechanical deformations, is transfer function (TF) assessment using the well-known frequency response analysis (FRA) method. Nowadays, the main efforts focus on the interpretation of FRA results to reach a reliable algorithm for assessing the mechanical condition of the transformer windings.

For the mechanical condition assessment, it is important to use the measuring configurations that have the best sensitivity to mechanical changes, simplifying the interpretation due to more distinct variations in the results. Here, the main effort is to find the connection scheme, the terminating resistor (TR), and measurement impedance (MI) that provide the best sensitivity for detecting different mechanical defects. The measurement diagram used for FRA technique along with the TR and MI is shown in Fig. 1.

Regarding the MIs, CIGRE standard clearly states: “at the present time, there is no technical evidence of any particular impedance value being of greater benefit for the detection of winding displacement,” but this research tries to investigate the preferable resistor as MI. Regarding the TRs, there is no previous study and, therefore, 50  $\Omega$  resistors are normally used for termination.

An experimental setup with two windings is designed to perform the sensitivity analysis. Both winding terminals can be grounded or left floating and, thus, different connection schemes can be implemented. Different resistors are also used for termination and measurement impedance. Three mechanical changes are applied to the experimental setup as well: axial displacement, disc space variation, and radial deformation, Fig. 2. The mechanical deformations are implemented in various steps and for each step and resistor one trace is recorded. Finally, the comparison of different traces can show the best configuration for FRA technique.

Fig. 3 shows the relative sensitivity of the FRA traces recorded with different TRs for two mechanical deformations, as an example. As can be seen, when the TR value is

larger, the FRA method is more sensitive to mechanical changes. Therefore, it is better to use the high-impedance termination method for measuring FRA traces.

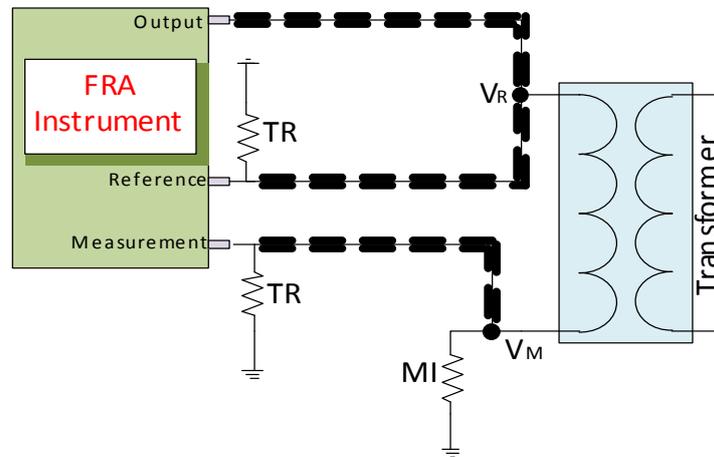


Fig. 1: The measurement diagram of the FRA method.  
TR is the terminating resistor and MI is the measurement impedance.

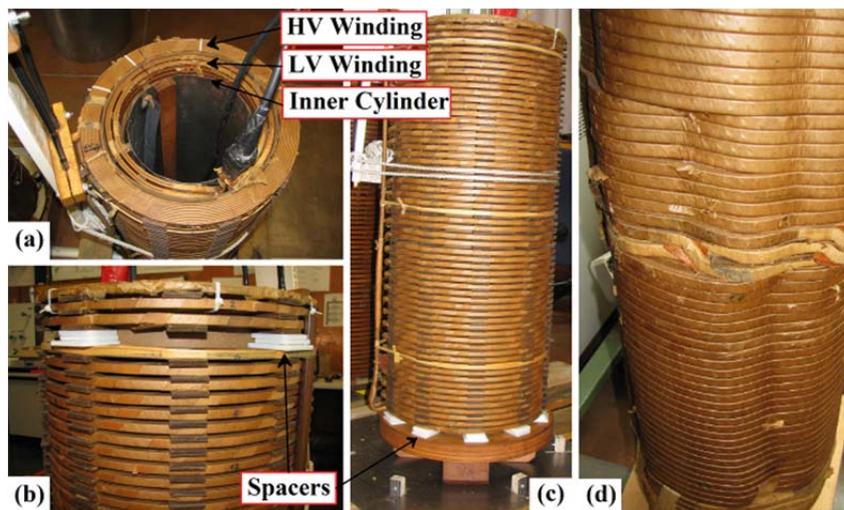


Fig. 2: The experimental setup and different mechanical changes:  
(a) HV and LV winding, (b) disc space variation,  
(c) axial displacement, and (d) radial deformation.

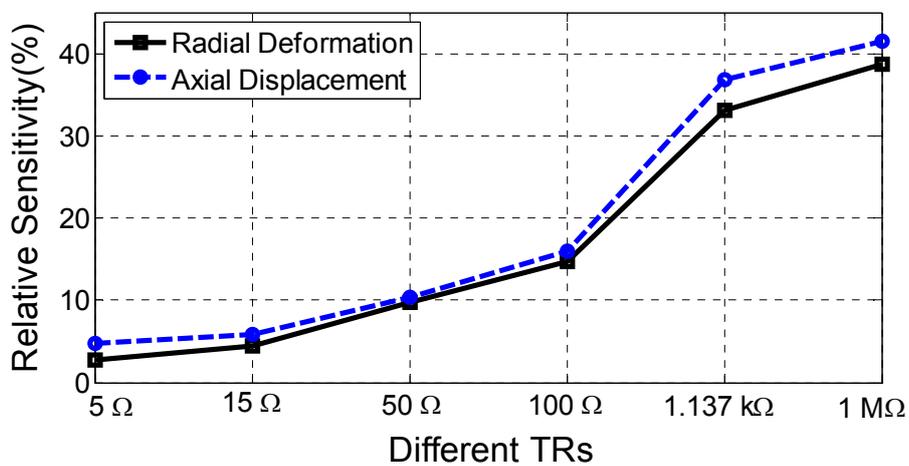


Fig. 3: Effect of different TRs on the sensitivity of FRA traces.

## ▪ Einflüsse von Gleichstrom auf Leistungstransformatoren

M. Sc. Michael Schühle

Leistungstransformatoren gehören zu den wichtigsten Betriebsmitteln in Übertragungsnetzen. Diese sind als Wechselspannungsbetriebsmittel konzipiert und nicht für eine zusätzliche Gleichstrombeanspruchung ausgelegt. Immer öfter werden Leistungstransformatoren jedoch aufgrund äußerer Einflüsse und Beschaltungen mit einem zusätzlichen Gleichstrom beansprucht.

Der Gleichstrom erzeugt innerhalb einer Wicklung eine konstante Durchflutung. In Abhängigkeit vom magnetischen Netzwerk (Kern) bildet sich dadurch ein magnetischer Gleichfluss aus. Bei einem Dreiphasentransformator können die resultierenden Gleichflüsse durch die Wicklungen mithilfe des Überlagerungssatzes ermittelt werden. Dabei zeigt sich, dass bei gleicher DC-Beanspruchung aller Phasen die Gleichflüsse in 3-Schenkel-Transformatoren deutlich geringer sind als in 5-Schenkel-Transformatoren, welche über Rückflussschenkel ohne Wicklung verfügen.

Aufgrund des sich bildenden Gleichflusses wird das Kernmaterial nicht symmetrisch magnetisiert. Fig. 1 A zeigt die Hysteresekurve, die während einer Sinusperiode in einer Phase im Normalbetrieb durchlaufen wird. Fig. 1 B zeigt die Hysteresekurve mit DC-Überlagerung. Die kurzzeitig größere magnetische Feldstärke wird, dem Durchflutungsgesetz entsprechend, durch einen größeren Magnetisierungsstrom hervorgerufen.

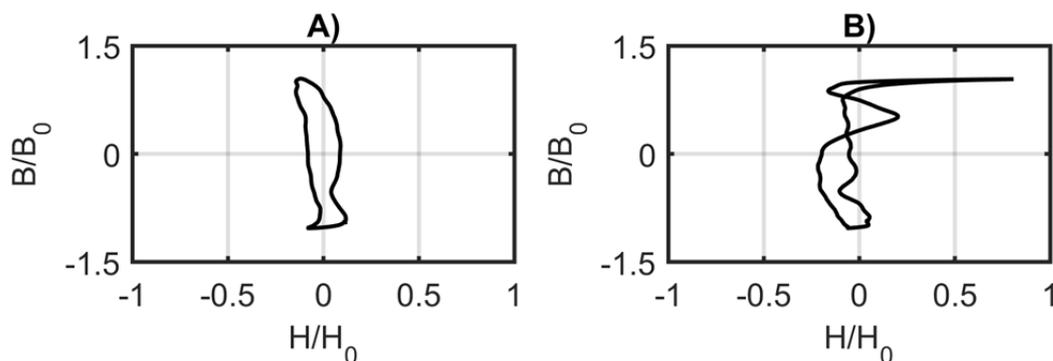


Fig. 1: Normierte Hysteresekurven im A) Normalbetrieb und B) mit überlagertem DC. Normalized hysteresis loops in A) rated operation and B) with DC overlay.

Zu den Auswirkungen von DC in Leistungstransformatoren gehören neben erhöhten Verlusten (Fig. 2), bedingt durch den größeren Magnetisierungsstrom, auch stärkere Vibrationen. Ziel der aktuellen Forschung ist es, die Auswirkungen abzuschätzen und hinsichtlich der Betriebssicherheit des Leistungstransformators bewerten zu können.

▪ **Influence of Direct Current on Power Transformers**

**M. Sc. Michael Schühle**

Power transformers are important assets in the power transmission network. Transformers are designed for alternating currents and are not suited for direct currents (DC) and voltages. Nevertheless, power transformers are sometimes stressed with an additional DC due to external sources which couple DC into the grid. Known DC sources are geomagnetically induced currents (GIC), coupling effects driven by corona of HVDC systems in close proximity to ac lines and galvanic coupling of DC from industrial areas through the grounded star points windings.

DC leads to a constant magnetomotive force (MMF) inside the core section of a winding. A magnetic unidirectional flux is created, depending on the magnetic network. In a three-phase transformer, the resulting unidirectional flux through the windings can be determined by using the superposition theorem. A certain DC leads to distinct unidirectional fluxes, depending on the core geometry: in 3-limb transformers fluxes are significantly lower than in 5-limb transformers which are equipped with additional side limbs without winding.

The non-alternating, unidirectional flux causes an offset in the magnetizing hysteresis loop of the core's electric steel plates. Fig. 1 A) shows a hysteresis loop during a sinusoidal period at normal operation without DC. Fig. 1 B) shows a hysteresis loop during the impact of DC. The temporarily higher magnetic field strength results in a greater magnetizing current due to the Ampere's law. DC in power transformers causes increased losses (Fig. 2 B)) due to the larger magnetizing current. Additionally, mechanical vibrations increase due to magnetostriction effects in the core plates. The aim of the current research is to investigate the overall impact of DC on HVAC equipment and to evaluate the terms of operational reliability of power transformers at different scenarios.

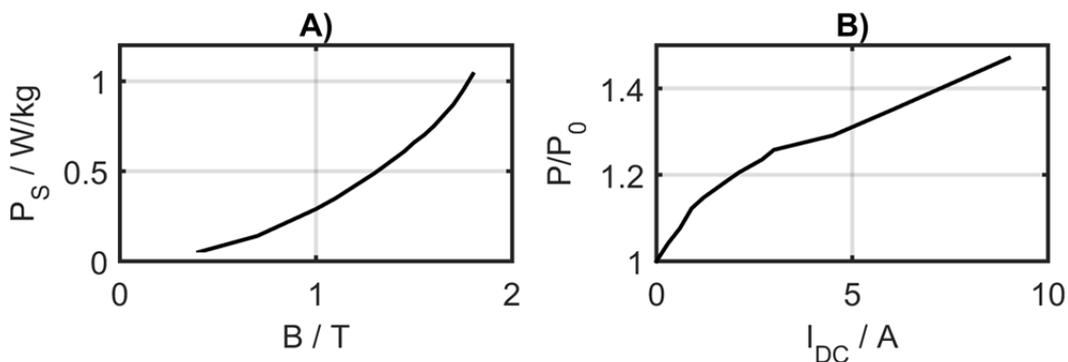


Fig. 2: A) Verlustkennlinie von Transformatorblech      B) Verlustkurve bei DC-Einfluss.  
 A) Loss characteristic of electrical sheet      B) Loss curve at DC influence.

## ▪ Charakterisierung von UHF-Sensoren für die TE-Messung an Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Martin Siegel

In Leistungstransformatoren können Teilentladungen (TE) an Fehlstellen in der elektrischen Isolierung auftreten. In ungünstigen Fällen können TE zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Isolation im Laufe der Zeit und schließlich zu einem Zusammenbruch des gesamten Isolationssystems führen. Welche Bedeutung die TE-Messung in der Diagnostik hat, zeigt sich durch die standardisierte elektrische Messung nach IEC 60270, die für Abnahmeprüfungen von Leistungstransformatoren erforderlich ist. Die scheinbare Ladung  $Q_{IEC}$  ist ein wichtiger Qualitätsindex von Transformatoren. Seit einigen Jahren kommen neben der genormten Messung alternative TE-Messmethoden zum Einsatz. Die Ultrahochfrequenz(UHF)-Messung, die ursprünglich für gasisolierte Anlagen entwickelt wurde, wird zunehmend auch für die Diagnostik von Transformatoren eingesetzt, da sie vor Ort weniger störempfindlich ist als die elektrische Messung. So kann die UHF-Methode beispielsweise als vergleichende Messung zwischen Werksabnahmeprüfungen (FAT) mit geringen Störpegeln und Vor-Ort-Abnahmeprüfungen (SAT) mit höheren Störpegeln eingesetzt werden. Wichtige Voraussetzung hierfür ist eine Standardisierung der UHF-Methode, was zu Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der UHF-Messungen führt. Um dies zu erreichen sind - ähnlich wie bei der elektrischen Messung - eine Kalibrierung der Messtechnik und eine Validierung der Empfindlichkeit der UHF-Sensorik erforderlich. Die Empfindlichkeit kann durch den Antennenfaktor (AF) bestimmt werden. Hierfür wird eine ölgefüllte Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell (GTEM-Zelle) entwickelt und aufgebaut (siehe Fig. 1, Fig. 2). Mit bekanntem AF können Korrekturfaktoren eingeführt werden, um Messungen verschiedener UHF-Sensoren vergleichbar zu machen. Zur Bestimmung des AF von UHF-Sensoren wird der Sensor über eine Aufnahme in der Deckelplatte in das Prüfvolumen der GTEM-Zelle eingeführt.

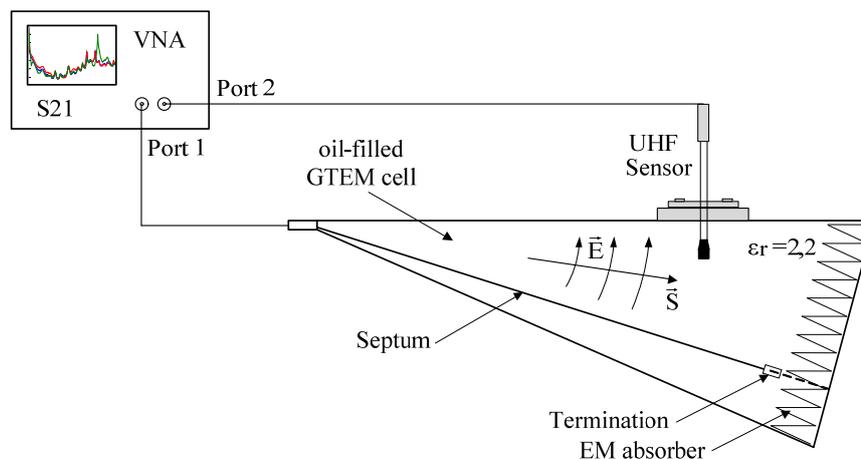


Fig. 1: Messaufbau zur AF-Bestimmung von UHF-TE-Sensoren in einer ölgefüllten GTEM-Zelle.

Test setup for AF determination of UHF antennas using an oil-filled GTEM cell.

▪ **Characterization of UHF Sensors for PD Measurement on Power Transformers**

Dipl.-Ing. Martin Siegel

Common reasons for local failures in power transformers are partial discharges (PD) in the electric insulation. Continuous deterioration over time can lead to a breakdown. The importance of PD measurement is accommodated by standardized electrical measurement according to IEC 60270 which is required for acceptance certificates at routine testing. Alternative measurement methods like the ultra-high frequency (UHF) method gained in importance for transformer diagnosis during the last years. The UHF method is robust against external noise. Therefore, it is suitable as comparative method for example between offsite measurements at factory acceptance tests (FAT) with low ambient noise and site acceptance tests (SAT) after transportation or installation with usually high noise levels onsite. To benefit from this advantage, UHF has to be proven as a reliable testing method. In this case, it can become an accepted quality factor coequal to the electrical measurement. Therefore, a validation of the UHF sensor's sensitivity is required which enables calibration of the UHF method. Otherwise, UHF measurement systems lack comparability. The precondition for calibration is a known antenna factor (AF) for the sensors because it enables general system comparability. An oil-filled Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell (GTEM cell), designed to meet 50 Ω conditions, is built and evaluated, see Fig. 1 and Fig. 2. The final cell is used to determine AFs of UHF Drain Valve Sensors and UHF Plate Sensors mounted using dielectric window. The influence of standardized gate valves on the AF of UHF Drain Valve Sensors is also taken into account. The antenna factor AF is defined for a receiving antenna as

$$AF(f) = \frac{E(f)}{U(f)} \tag{1}$$

where  $U(f)$  is the voltage at the antenna terminal and  $E(f)$  is the electric field strength at the antenna. The AFs of UHF Drain Valve and UHF Plate Sensors are evaluated using the GTEM-cell. Sensors are attached to the cell through its cover plate. The cell is excited with constant signal power on its input port using a VNA, see Fig. 1.

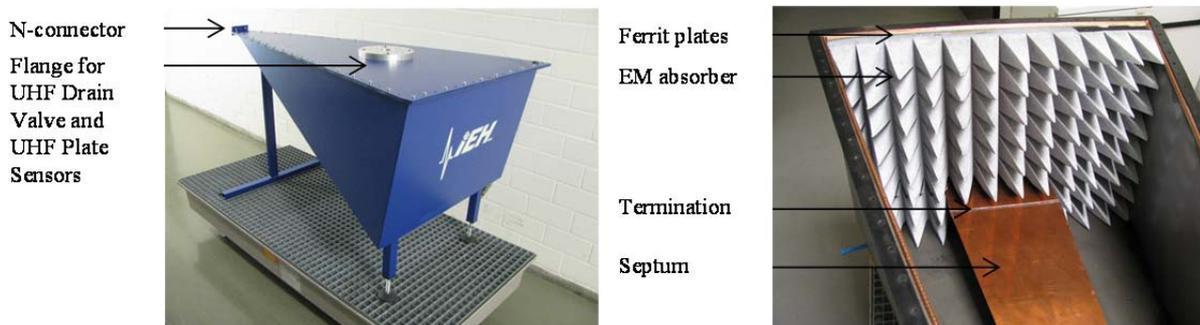


Fig. 2: Ölgefüllte GTEM-Zelle, Außen- und Innenansicht.  
Oil-filled GTEM cell, external and internal view.

Die Zelle wird im Frequenzbereich von 300 kHz bis 3 GHz von einem Vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) angeregt (Fig. 1). Fig. 3 zeigt einen UHF Drain Valve Sensor mit und ohne Flachkeilschieber und einen UHF Plate Sensor, der über ein dielektrisches Fenster direkt in der Kesselwand montiert wird. Der Flachkeilschieber verändert die Geometrie der Massefläche an der Antenne und wird deshalb mit betrachtet. Die Messungen mit dem UHF Drain Valve Sensor werden bei verschiedenen Eindringtiefen durchgeführt. Dabei stellt Pos. 1 eine Position im Rohr des Flachkeilschiebers dar, die aufgrund der Abschirmung durch das Rohr vermieden werden sollte, aber in der Praxis durchaus vorkommen kann. Pos. 2 ist die meist angewandte Einschubtiefe, bei der die Antenne genau hinter der Kesselwand platziert wird. Weiter wird die Antenne meist nicht eingeführt, da genug Abstand zur Hochspannung eingehalten werden muss. In Fig. 4 (links) ist der Einfluss des Flachkeilschiebers auf den AF des UHF Drain Valve Sensors zu sehen und zum Vergleich der AF des UHF Plate Sensors. Der hauptsächliche Einfluss des Flachkeilschiebers ist bei ca. 300 MHz durch eine Resonanzstelle zu sehen. Laut Gleichung (1) ist eine Antenne umso sensitiver, je niedriger der AF ist. Die dargestellten UHF-Sensoren sind zwischen 200 MHz und 1 GHz am empfindlichsten mit  $AF < 40$  dB/m. Der AF des UHF Plate Sensors wird nicht von einem Flachkeilschieber beeinflusst, weshalb das lokale Maximum bei ca. 300 MHz nicht vorhanden ist. Im Frequenzbereich zwischen 500 MHz und 1,6 GHz sind die Sensoren vergleichbar. In Fig. 4 (rechts) wird der Einfluss der Einschubtiefe auf den AF des UHF Drain Valve Sensors mit Flachkeilschieber gezeigt. Generell wird der AF bei größerer Einschubtiefe besser, allerdings sind bei höheren Frequenzen kaum Änderungen festzustellen. Die Resonanzstelle durch den Flachkeilschieber verschiebt sich mit zunehmender Einschubtiefe zu kleineren Frequenzen. Zusammenfassend eignen sich beide UHF-Sensortypen zur TE-Messung im UHF-Bereich am Leistungstransformator. Da beim UHF Plate Sensor keine Resonanzstelle durch einen Flachkeilschieber im wichtigen Frequenzbereich  $f < 1$  GHz auftreten kann, ist dieser leicht im Vorteil.

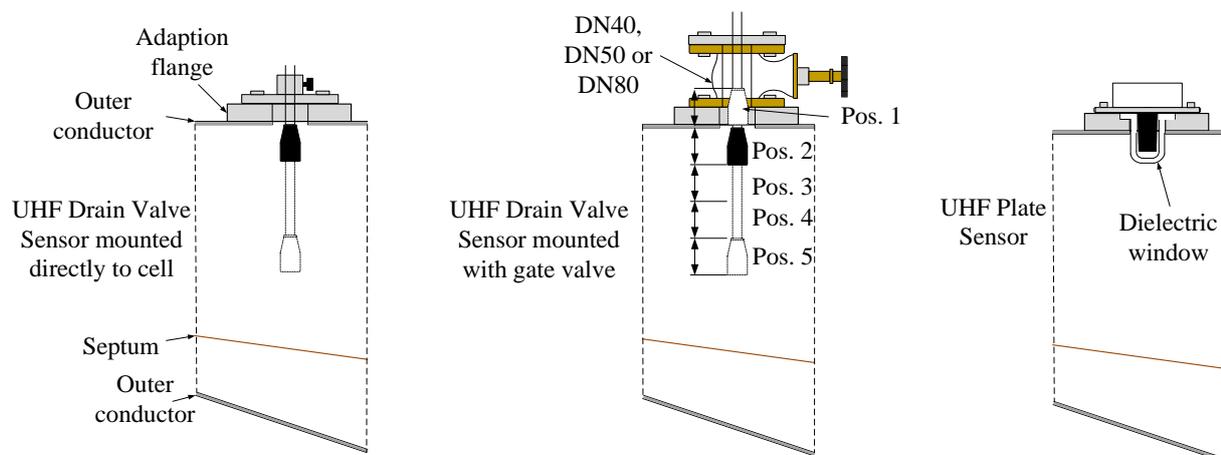


Fig. 3: UHF-Sensorpositionen in der GTEM-Zelle.  
UHF Sensor positions in GTEM cell.

Frequencies are considered from 300 kHz to 3 GHz. Fig. 3 shows the UHF Drain Valve Sensor configurations with and without gate valve and a wall mounted UHF Plate Sensor. The gate valve influences the sensor's ground plane geometry and has to be considered separately. The UHF Drain Valve Sensor test series includes different insertion depths of the antenna. The antenna is still inside the gate valve in Pos. 1, which is an undesirable position, but does occur at practical measurements. Pos. 2 is the most common case for transformer installations. The antenna just reaches into the transformer's tank volume. Further insertion is often not possible because sufficient distance to the HV windings must be maintained to ensure safe isolation. Fig. 4 (left) shows the influence of the gate valve on the resulting AF and in comparison the AF of the UHF Plate Sensor. The gate valve's main influence on the AF is a local maximum at approx. 300 MHz. As equation (1) provides, the lower the AF, the more sensitive is the antenna. The determined UHF Sensors are most sensitive from 200 MHz to 1 GHz with  $AF < 40$  dB/m. For higher frequencies, the AFs are slowly increasing from approx. 40 dB/m to 45 dB/m. The insertion depths of the different sensors are similar, but the UHF Plate Sensor is not influenced by a valve. Therefore, the local maximum at 300 MHz is not present. Both sensors are comparable in the frequency range  $f = 500$  MHz...1.6 GHz. Fig. 4 (right) shows the influence of different insertion depths of an UHF Drain Valve sensor with gate valve. Best AFs are achieved at high insertion depth, see Pos. 5, but improvements are small at frequencies  $f > 1$  GHz. The local maximum caused by the gate valve is shifted to lower frequencies. The worst case installation at Pos. 1 increases the AF in the entire frequency range, for example at the local maximum at 400 MHz. Additionally, new peaks at 1.9 GHz / 2.1 GHz and frequencies  $f > 2.6$  GHz occur. In a general comparison, both sensor types are suited for transformer application. The UHF Plate Sensor is considered slightly advantageous because of its better AF in the usual used frequency range  $f < 1.5$  GHz without an influence of a gate valve.

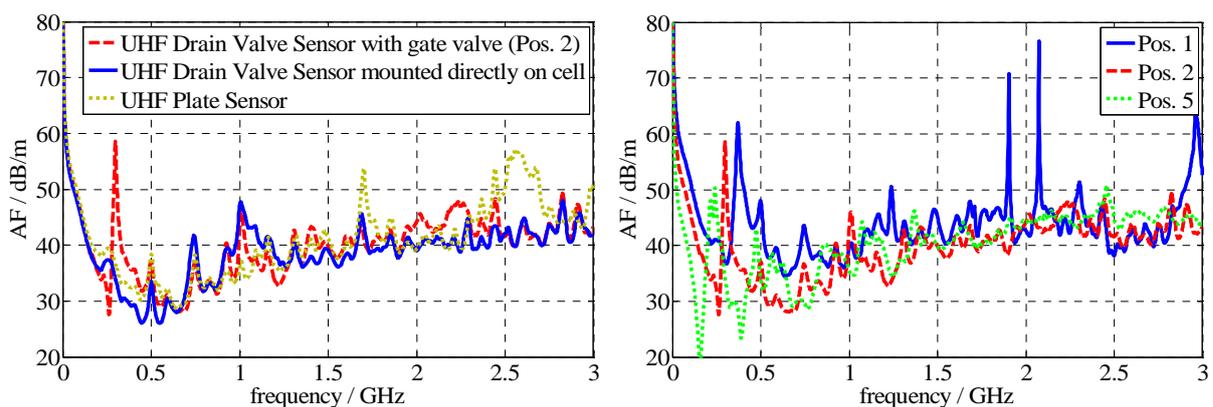


Fig. 4: AF-Vergleich der verschiedenen Setups aus Fig. 3 (links); AF-Vergleich verschiedener Einschubtiefen des UHF Drain Valve Sensors (rechts).  
 AF comparison of Fig. 3's different setups (left side); Comparison of different insertion depths of the UHF Drain Valve Sensor (right side).

## ▪ Einfluss der Feuchtigkeit auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressboard

M. Sc. Farzaneh Vahidi

Mit dem Ausbau erneuerbarer Energien und angesichts der Vorteile, die Hochspannungsgleichstromübertragungsstrecken bieten, gewinnen HVDC-Transformatoren an Bedeutung. Es besteht bei der Feldbetrachtung in Isoliersystemen eine vollständige Analogie zwischen einer angelegten AC-Spannung, die ein dielektrisches Verschiebungsfeld zur Folge hat, und einer angelegten DC-Spannung, durch die ein stationäres Strömungsfeld entsteht. Übergänge wie das Umpolen einer Gleichspannung führen zunächst zu keinem stationären Feld, sondern zu einem Übergangsverschiebungsfeld. Die Verschiebungsdichte  $D$  im Verschiebungsfeld wird dabei durch die Permittivität des Dielektrikums ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ) und die elektrische Feldstärke  $E$  bestimmt, während die Leitungsstromdichte  $J$  im stationären Strömungsfeld von der Leitfähigkeit  $\kappa$  und der Feldstärke abhängig ist. Das Problem bei dieser Feldstärkeverteilung liegt darin, dass sich die Leitfähigkeiten von verschiedenen Stoffen um mehrere Größenordnungen unterscheiden können und dadurch in der Schicht mit niedrigerer Leitfähigkeit nahezu die gesamte Spannung abfällt, während die Schicht mit höherer Leitfähigkeit kaum belastet wird. Aus den voranstehenden Überlegungen folgt die Erkenntnis, dass für eine optimale Isolationsauslegung bei stationären Strömungsfeldern unbedingt die Leitfähigkeiten der Isolierstoffe für alle beeinflussenden Umweltfaktoren bekannt sein müssen. Die Leitfähigkeiten in Abhängigkeit von der Feuchte und Temperatur, gemessen bei 0,5 kV/mm, 1 kV/mm und 3 kV/mm, werden in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt:

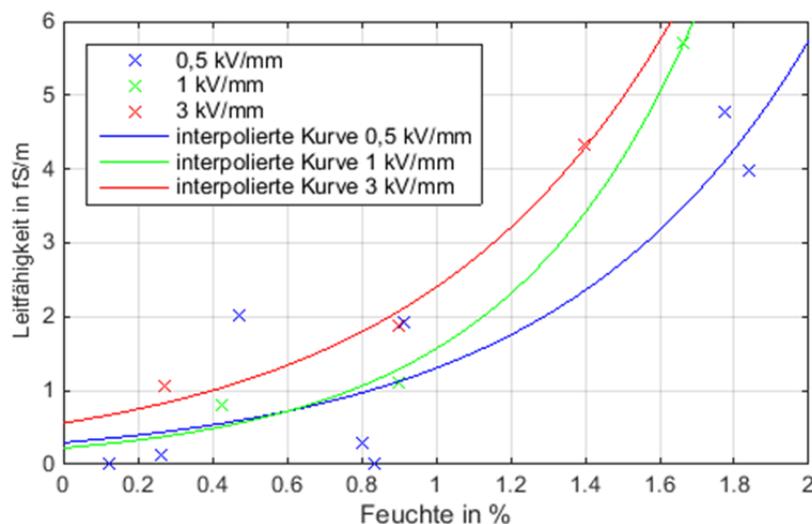


Fig. 1: Leitfähigkeit von ölprägniertem HD-Pressboard bei 30°C in Abhängigkeit von der Feuchte und der Feldstärke.

Moisture dependency of Impregnated HD-pressboard conductivity at  $T=30^\circ\text{C}$  applying different field strengths.

▪ **Influence of Moisture During the Electrical Conductivity Measurement on Impregnated High Density Pressboard**

**M. Sc. Farzaneh Vahidi**

The knowledge of DC behavior of the insulating system is going to be more and more important because of new applications in field of converter transformers. The DC field stresses are determined by means of insulating material conductivity which is normally a combination of oil, paper and pressboard.

One of the parameters which has an influence on the electrical conductivity is moisture content of the insulation material. Water appears in transformers as an unwanted substance which affects transformer life dramatically and leads to decreasing of dielectric strength of insulation. Besides this effect of the moisture, it is also interesting to know if the moisture content of solid insulation has an enormous influence on its electrical conductivity because the variation of electrical conductivity moderates the electric field distribution in the insulation system.

In Fig. 1 the increasing rate of impregnated pressboard conductivity with moisture content of samples is obvious at three different field strengths. The investigation shows that a variation of the moisture up to 0.8% has no observable influences on the conductivity of impregnated pressboards. It is also worthwhile to mention that an exponential increase of the electrical conductivity with moisture is observed for moisture levels higher than 0.8%.

Further investigation is performed to show the influence of temperature on long-term conductivity of impregnated HD-pressboard with low moisture content. An example of conductivity changes dependent on temperature is presented in Fig. 2:

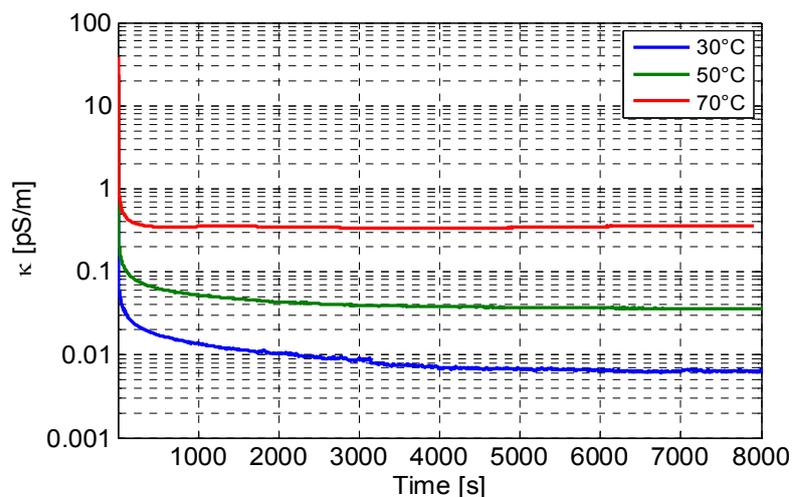


Fig. 2: Zeitabhängige elektrische Leitfähigkeit von ölprägniertem HD-Pressboard bei  $E=1$  kV/mm in Abhängigkeit von der Temperatur.  
 Electrical conductivity of impregnated HD-pressboard over a time period of 10000 s at  $E=1$  kV/mm and different test temperatures.

## ▪ Neue Methoden zur Vor-Ort-Teilentladungsmessung von Energiekabelanlagen mit großer Länge

Dipl.-Ing. Manuel Wild

Die Energieübertragung in der Mittel- und Hochspannungsebene ist vielfach auf die Verwendung von isolierten Kabeln an Stelle von Freileitungen angewiesen. Als Isolation werden verschiedene Materialien eingesetzt, welche den spannungsführenden Leiter zu seiner Umgebung hin umschließen. Im Fall von Mittel- und Hochspannungskabeln ist die unmittelbare Umgebung ein elektrisch leitender Schirm mit Erdpotential. Dabei herrschen im Isolationsmedium sehr hohe Feldstärken von mehr als 10 kV/mm. Selbst kleinste Veränderungen (Verschmutzungen, Lufteinschlüsse, Deformierungen, ...), sogenannte Fehlstellen, führen im Bereich der Isolation zu einer lokalen Erhöhung des elektrischen Feldes und somit zu einer stärkeren Beanspruchung des Isolationsmediums. Übersteigt der Wert der Feldstärke die Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmediums an der Fehlstelle, so treten Entladungen in Form von kleinen Durchschlägen auf. Ein solches Vorkommen wird Teilentladung (TE) genannt. Auch wenn dabei die Isolationsstrecke nicht vollständig überbrückt wird, so entsteht durch Zerfallsprozesse und thermische Belastung im Bereich dieser Entladung eine dauerhafte Schädigung der Isolationstrecke.

Zur Bestimmung des Zustandes der Isolation von Mittel- und Hochspannungskabeln kann die Teilentladungsmessung eingesetzt werden. Dabei wird durch geeignete Messtechnik bestimmt, ob im Isolationsmedium eines Kabels Teildurchschläge stattfinden (Fig. 1). Messtechnisch wird hierfür der Vorgang der Ladungsumsetzung in der TE-Fehlstelle ausgenutzt. Jeder Teildurchschlag im Isolationsmedium verschiebt eine gewisse Menge an Ladungsträgern. Diese Ladungsverschiebung regt einen Impuls an, der sich längs des Kabels in beide Richtungen weg von der Fehlstelle ausbreitet. Dieser Impuls ist an den Kabelenden messbar und kann zur Detektion von Teilentladungen verwendet werden.

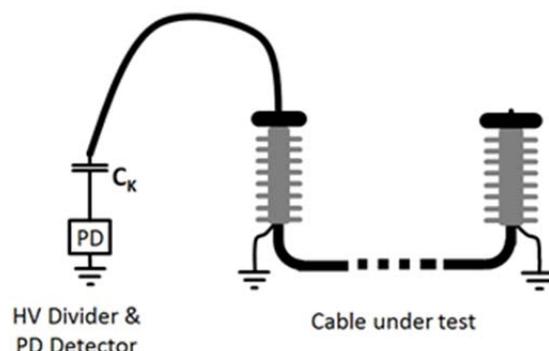


Fig. 1: Einseitige Teilentladungsmessung an einem Kabel.  
Single sided partial discharge measurement.

- **New Methods for Partial Discharge Measurements for On-Site Testing of Cable Systems with Long Lengths**  
Dipl.-Ing. Manuel Wild

The electrical power transmission in the medium- and high voltage levels often relies on the use of insulated cable systems instead of overhead lines. As insulation various materials are used which enclose the live conductor from its surroundings. In the case of medium and high voltage cables the environment is the conducting shield on ground potential. Thereby the electrical field strength is up to 10 kV/mm in the insulating medium. Smallest imperfections (moisture, air enclosures, deformations) can lead to a local increase of the electrical field strength and therefore more stress for the insulation material. If the value of the electrical field strength exceeds the dielectric strength of the material, small discharges occur in the form of small punctures. This process is called partial discharge (PD). Even if the insulation distance does not fully break down, the small discharges degrade the material due to decomposition and thermal processes.

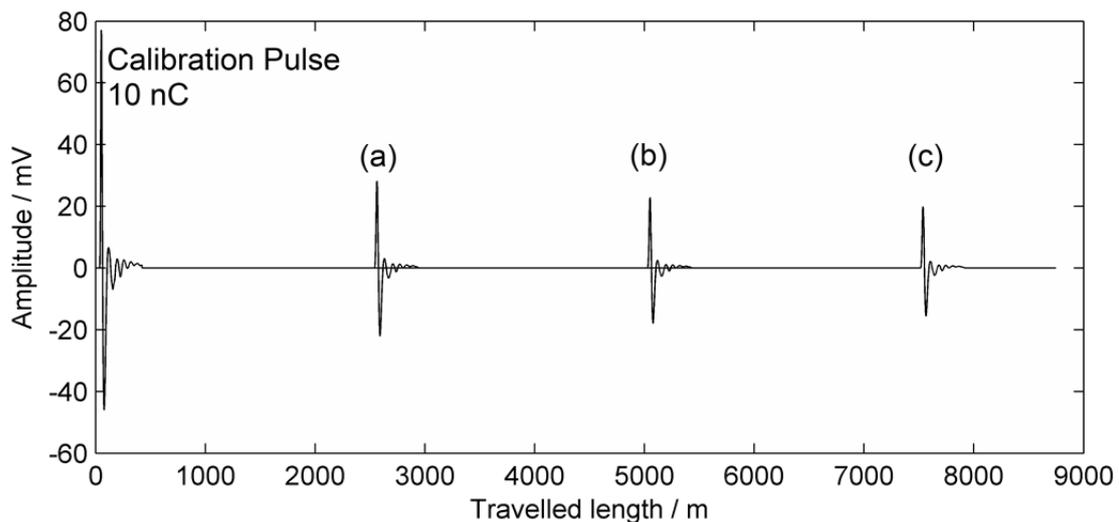


Fig. 2: Kalibrierimpuls mit 10 nC und gemessene Pulse im Abstand 2550 m, 5100 m und 7150 m.  
Calibration pulse of 10 nC and the measured pulses at the distances 2550 m, 5100 m and 7150 m.

The condition of the insulation in medium and high voltage cables can be determined by the partial discharge measurement. The partial discharges can be detected by applicable measurement techniques. Every discharge in the insulation medium displaces a small amount of electric charge. The charge displacement stimulates a pulse that propagates along the cable, in both directions away from the fault. The pulses are detectable at the cable ends and can be used for partial discharge detection.

Mit Kenntnis über die Laufzeit des Teilentladungspulses im Kabel, also die Zeitdauer, welche ein Puls zum Zurücklegen der Strecke zwischen Entstehungsort und Messgerät benötigt, kann die Fehlerstelle exakt geortet werden. Da der Zeitpunkt der Teilentladung unbekannt ist, kann die Laufzeit vom Entstehungsort zum Messgerät nicht direkt ermittelt werden. In Vor-Ort-Messungen, bei vom Netz getrennten Kabelanlagen, ist das vom Messgerät entfernte Ende in der Regel offen. Der dort eintreffende Puls erfährt eine Reflexion und wird sich zurück in Richtung Messgerät ausbreiten (Fig. 4). Nun kann die Differenz zwischen direktem und reflektiertem Puls ( $t_A - t_B$ ) ermittelt werden und damit der Ort der Fehlerstelle (Abstand  $X_{PD}$  vom Messgerät).

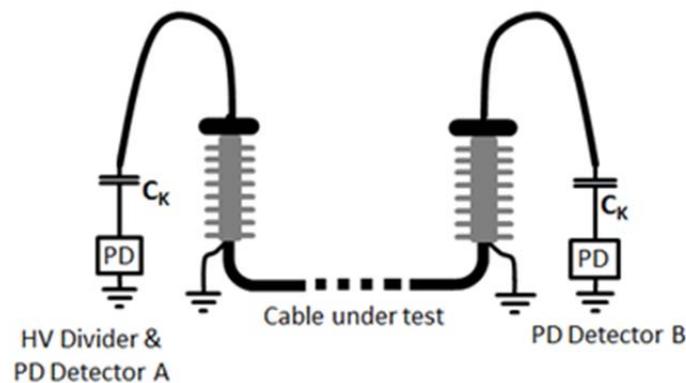


Fig. 3: Zweiseitige TE-Messung an einem Kabel.  
Double-sided PD measurement on a cable.

Bei langen Kabeln ist die messtechnische Erfassung des reflektierten Pulses jedoch nicht immer möglich, da die Pulse bei ihrer Ausbreitung im Kabel eine Dämpfung und Dispersion erfahren. Ist der direkt ausgebreitete Impuls noch über dem Rauschpegel erkennbar, so kann der reflektierte Impuls, welcher mindestens die einfache Kabellänge zu durchlaufen hat, oft nicht mehr detektiert werden. Abhilfe schafft hier eine zusätzliche Messstelle, die zum Beispiel am Ende des Kabels angeschlossen wird (Fig. 3). Durch Synchronisierung können die beiden Messdaten, mit einem zeitlichen Versatz der einfachen Pulslaufzeit zwischen den beiden Messstellen, kombiniert werden und dieselbe Berechnungsmethode wie oben beschrieben angewendet werden. Diese Methode steigert die Empfindlichkeit von Vor-Ort-Messungen und ermöglicht präzisere Aussagen zum Zustand des Kabelsystems.

Using the travelling time of the partial discharge pulse between the PD origin and the measurement device, the fault can be localized exactly. Since the absolute time of the pulse excitation is unknown, the travelling time from the fault location to the measurement device could not be determined directly. In most cases of on-site measurements, the far end of the cable is disconnected from the grid and has an open end (high-impedance) character. Then the far end reflects the incoming pulse and the reflection is detectable at the measurement device on the left side (Fig. 4). Now the time difference of the direct and reflected pulse can be determined ( $t_A - t_B$ ) and the fault location can be calculated (distance  $X_{PD}$  from the measurement device).

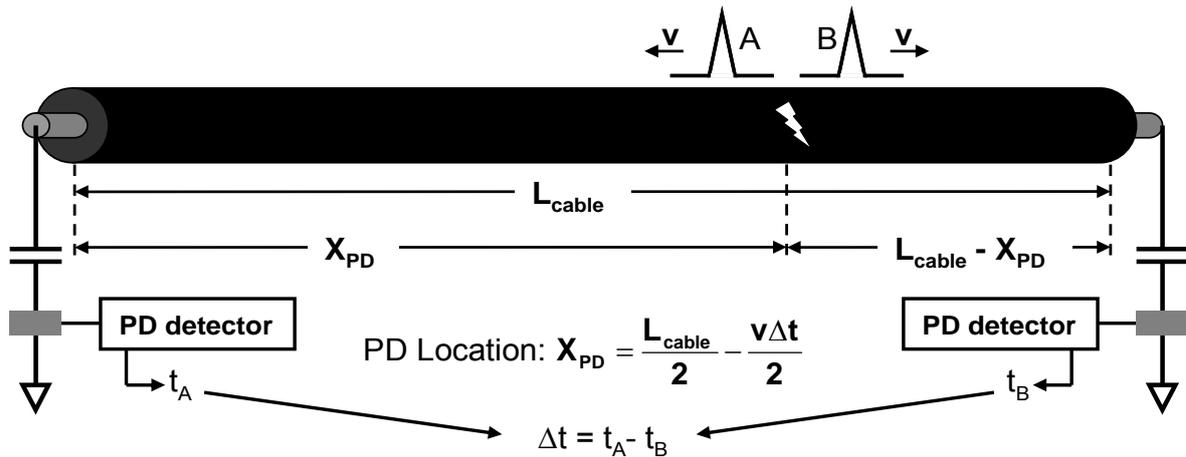


Fig. 4: Zweiseitige Teilentladungsmessung an einem Kabelstück mit Fehlstellenortung durch Laufzeitbestimmung und synchronisierte TE-Detektoren.  
 Double sided partial discharge measurement on a cable with fault location detection by time domain reflectometry (TDR) with synchronous PD-detectors.

The detection of the reflected pulse on long cables is not always possible because of attenuation and dispersion for the travelling pulse through the cable. Even if the directly propagated pulse is well detectable, the reflection at the far end could disappear in the noise level of the measurement device. The measurement can be improved by using a second measurement device at the far end of the cable (Fig. 3). Knowing the travelling time through one cable length, the two measurement signals can be combined with a time delay and the same calculation method as above mentioned can be used. This method improves the sensitivity of on-site measurements and affords more precise PD measurements at large cable lengths and thereby a better condition assessment.

## 5.2 ENERGIEVERSORGUNG / SMART GRIDS

### ▪ Forschungsprojekt „grid-control“

**Laufzeit: Juli 2015 – Juni 2018**

Im Forschungsprojekt grid-control wird, in einem Konsortium von insgesamt 9 Partnern aus Industrie und Wissenschaft, ein Gesamtkonzept für zukunftsfähige Stromnetze erforscht. Die Förderung des Forschungsprojekts erfolgt durch die Initiative „Zukunftsfähige Stromnetze“ und ist Teil des 6. Energieforschungsprogramms der



Bundesregierung. Das Ziel ist die Ausgestaltung eines Zusammenspiels der Verbraucher und neuartiger Prosumenten, des Energiemarktes und des Verteilnetzbetreibers. Hierfür wird die Koordination der Netznutzung und dezentraler Erzeugung in kritischen Situationen, die Bereitstellung von Systemdienstleistungen, die Netzplanung sowie die Überwachung des Netzzustandes untersucht.

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. Die im Projekt installierte Sensorik dient dabei der Validierung und Gütebestimmung der Schätzungsergebnisse. Dies verfolgt das Ziel, die notwendige Sensorik zur Schaffung einer Beobachtbarkeit des Systems zu verringern. Um die Netznutzung zukünftig ressourceneffizient zu gestalten und insbesondere neuartige Konzepte zur Engpassbewirtschaftung anwenden zu können, wird im Projekt ein neues Netzplanungsverfahren mittels zeitreihenbasierten, probabilistischen Methoden entwickelt. Damit soll untersucht werden, ob dezentrale Netzregelungsverfahren als Alternative zum konventionellen Netzausbau ökonomisch sinnvoll sind.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Projektkonsortium beim Startworkshop im Netzlabor Freiamt.

- **Research project “grid-control”**

**Period: July 2015 – June 2018**

The research topic of grid-control is an overall concept for future-compliant electric power systems. The consortium consists of 9 partners of industry and science. The research project is sponsored by the 6. energy research program “future-compliant electric power systems” of the German federal government. The objective is the arrangement of interactions between consumer or new prosumer, energy market and distribution system operator. Therefore, the coordination of the grid components and decentral generation, the provision of ancillary services, network expansion planning and state estimation is investigated.

The main emphasis of IEH in grid-control is 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. The installed sensors in the project are used for validation and determination of good quality of the state estimation. By the investigation of a new method for network expansion planning, based on time-series and probabilistic methods, the usage of the power system will be resource efficient in future. Especially, new concepts for power flow management in bottle neck situations will be part of the planning method. Here, the question is whether power flow control concepts are an alternative to conventional network reinforcement.

Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag

## ▪ Hybrides Smart Grid Labor

M. Sc. Manswet Banka

Mit zunehmender Komplexität der elektrischen Netze und den damit verbundenen Herausforderungen kommen neue Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Dazu gehört die sogenannte Echtzeitsimulation. Echtzeitfähige Simulationsumgebungen (englisch Digital Real Time Simulators) sind besonders hilfreich bei der Entwicklung von Steuerungsalgorithmen, die meist zeitkritisch sind. Darüber hinaus ermöglichen solche Umgebungen während der Simulation eine Interaktion mit realen Geräten. Dank der I/O-Karten der Simulatoren ist es möglich, Steuerungssignale (analog und/oder digital) zu Geräten - Hardware under Test (HuT) - zu senden und Antworten zu empfangen. Auf diese Weise wird ein Teil des Modells in Software simuliert, während der andere aus Hardware besteht. Sollen nur Steuerungssignale (niedrige Energie) ausgetauscht werden, so spricht man von Controller in the Loop (CHiL). Darüber hinaus ist es auch möglich, Leistungsanlagen wie Erzeuger, Lasten, Speicher etc. in den Simulationen zu berücksichtigen. In solchen Fällen ist eine spezielle Schnittstelle in Form von Leistungsverstärkern zwischen den I/O-Karten der Simulatoren und den Leistungsanlagen notwendig. Dieser Einsatz heißt Power Hardware in the Loop (PHiL), siehe Fig. 1.

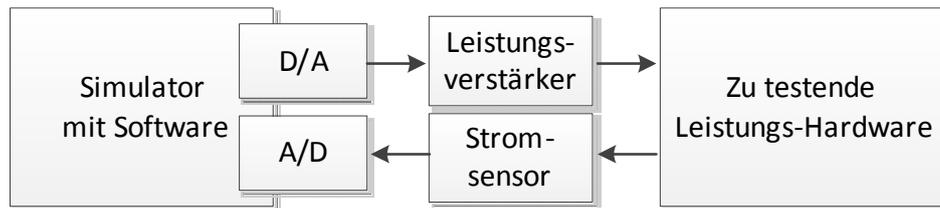


Fig. 1: Darstellung der Idee des Power Hardware in the Loop Konzeptes.

Das HiL-Konzept ermöglicht die Berücksichtigung von Anlagen, deren Modelle ungenau oder überhaupt nicht bekannt sind. Typischerweise zählen Schutzgeräte und Steuerungsgeräte dazu. Ein weiterer Vorteil gegenüber einer klassischen Offline-Simulation ist die Möglichkeit, Geräte des gleichen Typs von unterschiedlichen Herstellern bei gleichen Bedingungen zu untersuchen. Die Unterschiede sind mit generischen Softwaremodellen nicht nachzubilden. Zusätzlich bietet HiL eine Möglichkeit, verschiedene Störungfälle in beliebigen Zeitpunkten und unter reproduzierbaren Bedingungen zu simulieren, was in realen Systemen nicht möglich wäre.

Am IEH wird ein Hybrides Smart Grid Labor, welches das PHiL-Konzept einsetzt, mit einem OP5600-Echtzeitsimulator und der Software eMEGAsim aufgebaut. Der Hardwareteil soll sowohl aus PV-Emulator, Windkraftanlage-Emulator, netzbildendem Synchrongenerator als auch aus zahlreichen Schutz- und Steuerungsgeräten bestehen.

▪ **Hybrid Smart Grid Laboratory**

**M. Sc. Manswet Banka**

Along with an increasing complexity of electrical power grids and its challenges new methods for the investigation of such systems are coming. One of the most important developments in electrical systems simulation in recent years are real time simulations. Simulation systems of this kind, called Digital Real Time Simulators, are especially useful while developing control algorithms since they are normally critical in terms of time. Furthermore the simulators allow an interaction with real hardware during the simulations. Thanks to I/O card of the simulator it is possible to send control signals (analog or digital) to the hardware - called Hardware under Test (HuT) - and to receive its responses. Thus a part of the model is simulated in software and another part consists of hardware. When only control (low energy) signals are exchanged between the simulator and HuT, the setup is called Controller Hardware in the Loop (CHiL). On the other hand it is also possible to use in the simulations power devices, like generators, load, energy storage systems, etc.. In this case power amplifiers are needed as a special interface between simulator's I/O card and power devices. This approach is called Power Hardware in the Loop (PHiL), see Fig. 1.

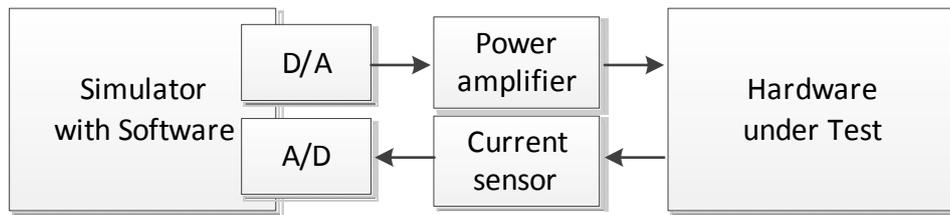


Fig. 1: Idea of Power Hardware in the Loop set-up.

The Hardware in the Loop approach allows to take into account even devices with unknown models. Typical examples are protection devices or control units. Another advantage over classic offline software simulation is the fact, that it is possible to compare operation of devices of different vendors when exposed to the same conditions. Such differences are not possible to be modelled using generic software models. Additionally PHiL allows testing of different kinds of faults and insecure states of power systems at any time and with constant conditions which would not be possible in case of a real system.

At the IEH is set up a Hybrid Smart Grid Laboratory which implements the concept of Power Hardware in the Loop with an OP5600 as digital real time simulator and eMEGAsim as software. The hardware part of the laboratory should consist of photovoltaic emulator, wind power plant emulator and synchronous machine as grid forming generator, as well as various protection devices and controllers.

▪ **Erhöhung des Eigenverbrauchs und Unterstützung elektrischer Netze mit Hilfe von Smart Homes**

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

Vor dem Hintergrund einer sinkenden Einspeisevergütung für Leistung aus erneuerbaren Energien wie beispielsweise heimischer PV-Anlagen wird der Eigenverbrauch des selbst erzeugten Stroms wirtschaftlich zunehmend attraktiv. Zudem entlastet die Nutzung des Stromes direkt am Ort seiner Entstehung die elektrischen Netze, da dieser nicht durch das Netz zu anderen Verbrauchern geleitet werden muss. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwiefern eine intelligente Laststeuerung in künftigen, sogenannten Smart Homes einerseits den Eigenverbrauch selbst erzeugten Stromes erhöhen können und andererseits, inwiefern sich dies positiv auf elektrische Netze auswirkt. Konkret soll dies am Beispiel einer intelligenten Betriebsführung von Wärmepumpen-Photovoltaik-Systemen mit Hilfe eines gekoppelten, elektrisch-thermischen Simulationsmodells untersucht werden.

Hierzu wurde im Rahmen des gekoppelten Simulationsmodells eine Optimierung durchgeführt und die Zielfunktion derart formuliert, dass die im Haushalt installierte Wärmepumpe jeweils möglichst der PV-Einspeisung des Haushalts in Zeiten ihrer maximalen Einspeisung folgt. Hierdurch wird einerseits der Eigenverbrauch der Haushalte erhöht andererseits aber auch die Netzbelastung durch eine Reduktion der maximalen Rückspeisung des Gebäudes verringert.

Fig. 1 zeigt - differenziert für verschiedene Monate des Jahres - die Ergebnisse hinsichtlich des Eigenverbrauchs für eine nicht-optimierte und eine optimierte Betriebsweise.

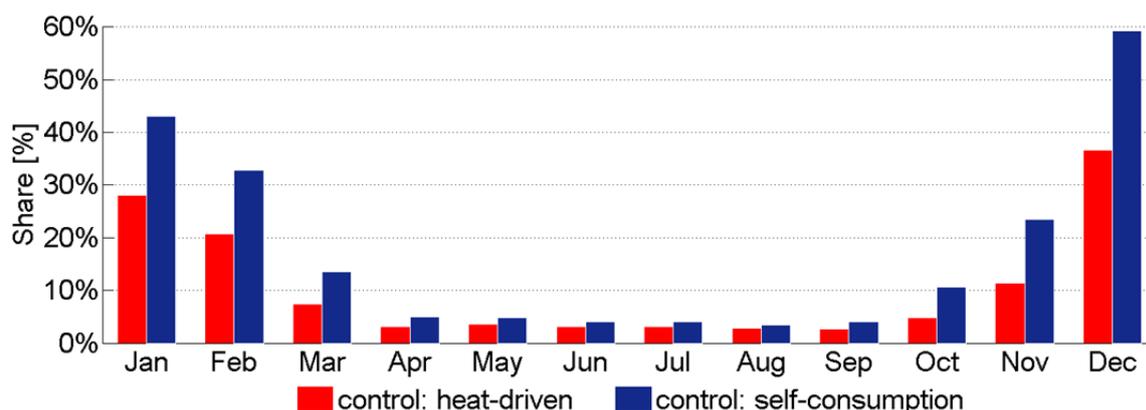


Fig. 1: Eigenverbrauchsquoten für verschiedene Betriebsweisen und verschiedene Monate für einen exemplarischen Haushalt.  
Self-consumption rates for different modes of operation and months for one exemplary household.

- **Increasing Self-Consumption and Supporting Electrical Power Grids with Smart Homes**

**Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner**

Given the continuously lowered feed-in tariffs for energy coming from photovoltaic units, self-consumption is becoming more and more attractive. Moreover, consuming the power where it is produced reduces the grid load as the power is not transferred through the electrical power grid. In this context the question arises, to what extent a demand-side management is capable of increasing the locally produced power and in what way this turns out to have a positive effect onto the underlying power grids. Concretely, this will be examined given the example of a heat pump-PV-system using a coupled, electrical-thermal simulation model.

For this purpose, an optimization was conducted using the electrical-thermal simulation model. Given the objective of the optimization problem, the algorithm controls the heat pump in a way that it follows the PV infeed when the infeed is preferably at its maximum. By doing so, on the one hand side the self-consumption of households is levered and on the other hand side, a reduction of the overall grid load seems to be likely, as the maximum backfeed of the household into the grid is reduced.

Fig. 1 demonstrates the results regarding the self-consumption, separated for different months throughout one year.

Two modes of operation are being compared in this context: a so-called heat driven mode of operation and an optimized control. Whenever the heat pump is operated in the heat driven mode, the actual infeed coming from the PV unit is neglected. In contrary, the optimized control additionally considers the PV infeed in order to achieve the underlying objectives. The thermal energy demand for domestic hot water is considered in the simulations, as this demand mainly constitutes the only thermal energy demand throughout the warm months of the year.

The results within Fig 1 demonstrate that a suitable control of heat pumps raises self-consumption, depending on the actual month considered. Additionally it can be seen that by applying an appropriate control, an augmentation of self-consumption also becomes possible throughout summer due to the consideration of the thermal energy demand for hot water.

If this mode of operation is assumed for various buildings within a low voltage distribution network, the influence of such a mode of operation onto the power grid can be examined by performing load flow calculations. Fig. 2 depicts the results by looking at the voltage levels arising within the low voltage grid examined. In order to so, a penetration rate of heat pumps of 20 % was considered. The results are shown as boxplots.

In Fig. 1 werden zwei Betriebsweisen verglichen: Bei einer wärmegeführten Betriebsweise der Wärmepumpen bleibt die aktuelle PV-Einspeisung unberücksichtigt. Im Rahmen der optimierten Betriebsweise fließt diese jedoch zusätzlich mit ein, so dass die genannten Ziele erreicht werden. Bei allen Betrachtungen wurde neben dem Bedarf für Raumwärme zudem der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitstellung berücksichtigt, da dies im Wesentlichen den einzigen thermischen Energiebedarf während der warmen Jahreszeit darstellt.

Es wird deutlich, dass durch eine geeignete Betriebsführung der Eigenbedarf der Anlagen je nach Monat erhöht werden kann. Zudem wird deutlich, dass durch die Berücksichtigung des Energiebedarfs für Warmwasser durch eine optimierte Betriebsweise auch im Sommer eine Erhöhung des Eigenverbrauchs möglich ist.

Wird ein optimierter Betrieb innerhalb mehrerer Gebäude eines Niederspannungsnetzes angenommen, kann durch Lastflussrechnungen der Einfluss eines solchen Betriebs auf elektrische Netze untersucht werden. Fig. 2 zeigt die Ergebnisse hinsichtlich aller im Netz auftretenden Spannungen unter der Annahme, dass 20% der im Netz abgebildeten Haushalte bzw. Gebäude mit Wärmepumpen beheizt werden und über eine PV-Anlage auf dem Dach verfügen. Die Ergebnisse sind hierbei als Boxplots dargestellt.

Es zeigt sich auch bei einer Betrachtung auf Netzebene, dass neben der Erhöhung des Eigenverbrauchs eine Reduktion der Netzbelastung, hier am Beispiel der im Netz auftretenden Spannungen dargestellt, erreicht werden kann.

Insgesamt wird deutlich, dass die Einbindung von Wärme in künftigen Smart Homes nennenswerte Potentiale sowohl auf wirtschaftlicher als auch auf technischer Seite birgt. Dies zeigt sich zum einen darin, dass der Eigenverbrauch durch eine geeignete Betriebsführung der Anlagen erhöht werden kann, was direkte monetäre Vorteile für den Anlagenbetreiber nach sich zieht. Umgekehrt wirkt sich eine solche Betriebsweise auch positiv auf das Netz aus.

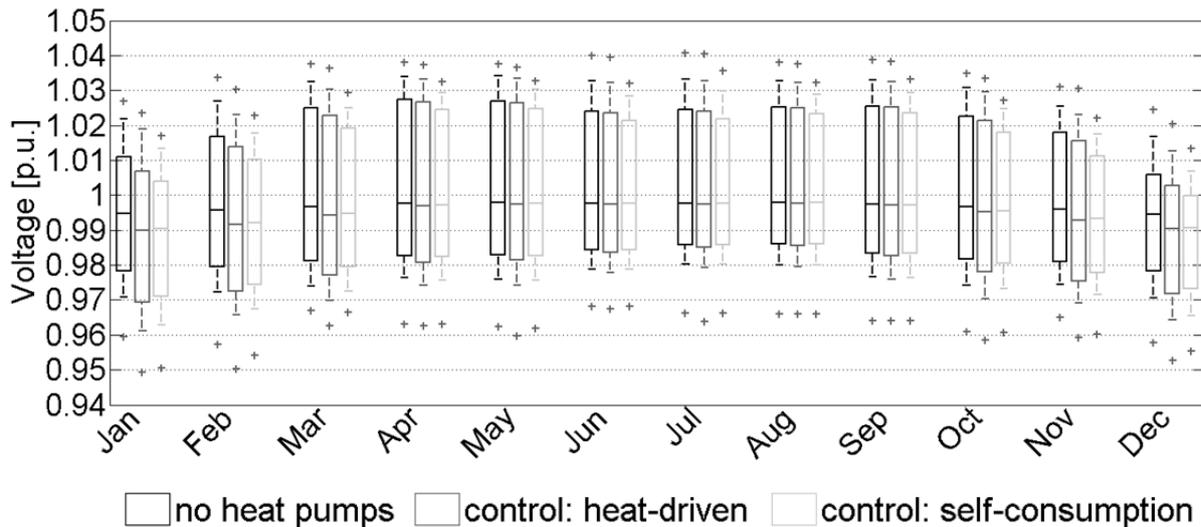


Fig. 2: Darstellung der im Netz auftretenden Spannungsniveaus für ein Szenario mit und ohne Wärmepumpen, jeweils differenziert nach Betriebsweise.

Demonstration of the occurring voltage levels within a power grid for a scenario with and without heat pumps, each differentiated by the mode of operation.

Not only at building level but also at grid level it can be observed that the described mode of operation has a stabilizing effect onto the underlying low voltage power grid which is demonstrated by the different voltage levels for different modes of operation.

In general it can be said that the consideration of heat within future smart homes has noteworthy effects on both, the economical and the technical side. On the one hand side, this can be seen when looking at the raised rate of self-consumption - which is monetarily beneficial for the operators of the units. On the other hand side this is also beneficial for the underlying power grid.

## ▪ Beiträge dezentraler Anlagen zu Systemdienstleistungen

M. Sc. Simon Eberlein

In den elektrischen Energieversorgungsnetzen hat sich in den letzten Jahren der Trend zu einer großen Anzahl an dezentralen Erzeugern, die auf Verteilnetzebene einspeisen, weiter fortgesetzt. Es ist abzusehen, dass es in Zukunft immer häufiger zu Situationen kommen wird, in welchen ein Großteil der erzeugten Leistung durch viele kleine Anlagen in den unteren Spannungsebenen, anstatt wie früher, durch wenige große, an das Höchstspannungsnetz angeschlossene Anlagen, bereitgestellt wird. In solchen Fällen müssen die dezentralen Anlagen (DA) Systemdienstleistungen übernehmen, welche bisher von Großkraftwerken bereitgestellt werden.

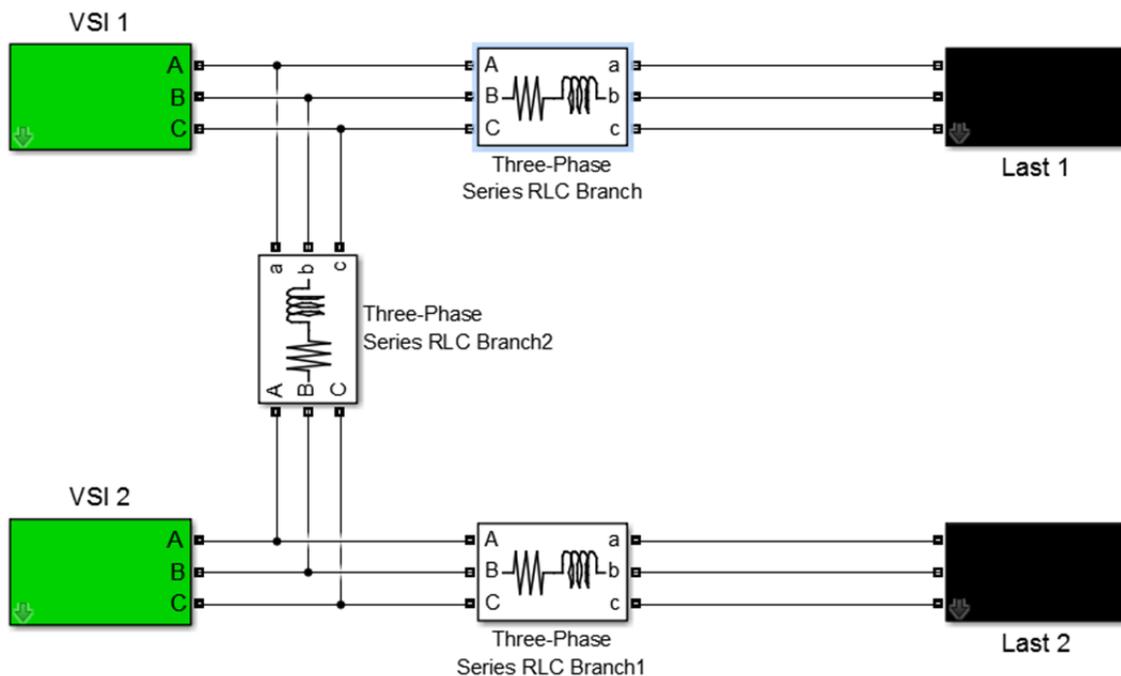


Fig. 1: Mikronetz mit zwei netzbildenden Voltage Source Invertern in Simulink.  
Microgrid with two grid forming voltage source inverters in Simulink.

Dazu gehören Maßnahmen zur Frequenz- und Spannungshaltung wie die Bereitstellung von Momentanreserve und Regelenergie, Blindleistungseinspeisung, fault-ride-through-Fähigkeit und die Bereitstellung ausreichender Kurzschlussströme. Diese Anforderungen werden durch die DA bisher nur bedingt bzw. gar nicht erfüllt, weshalb untersucht wird, wie die Hard- und Software der DA in dieser Hinsicht verbessert werden können. Weiterhin können in Zukunft Teile des Verteilnetzes als autonome Netzzellen, so genannte Mikronetze (Fig. 1), betrieben werden, beispielsweise wenn das Verbundnetz wegen einer Störung ausfällt.

## ▪ Contribution of Distributed Generators to Ancillary Services

M. Sc. Simon Eberlein

In the last years, the trend towards a larger number of distributed generators (DG) in the distribution system has progressed. It is foreseeable that in future, situations will be increasingly common where a large share of the generated power comes from many small generators, which are located in the lower voltage levels, instead of few large power plants, that feed into the transmission system, like in the past. In such situations the DG have to provide ancillary services, which used to be provided by large power plants. This includes measurements to keep the frequency and the voltage stable, like the provision of instantaneous reserve und control energy, reactive power provision, fault-ride-through capability und the infeed of sufficient short circuit currents. Today, these requirements are not sufficiently, or even not at all, met by DGs. Therefore, it is investigated how hard- and software of DGs can be improved in this regard. Furthermore, in future, parts of the distribution system can be run as autonomous islands named microgrids (Fig. 1), if, for example, the bulk power system is faulted. Here also, the requirements for the DGs to run an island network autonomously have to be investigated and tested. In Fig. 2 for example, the high stator current of a synchronous generator during the synchronisation of a microgrid with the bulk power system is shown.

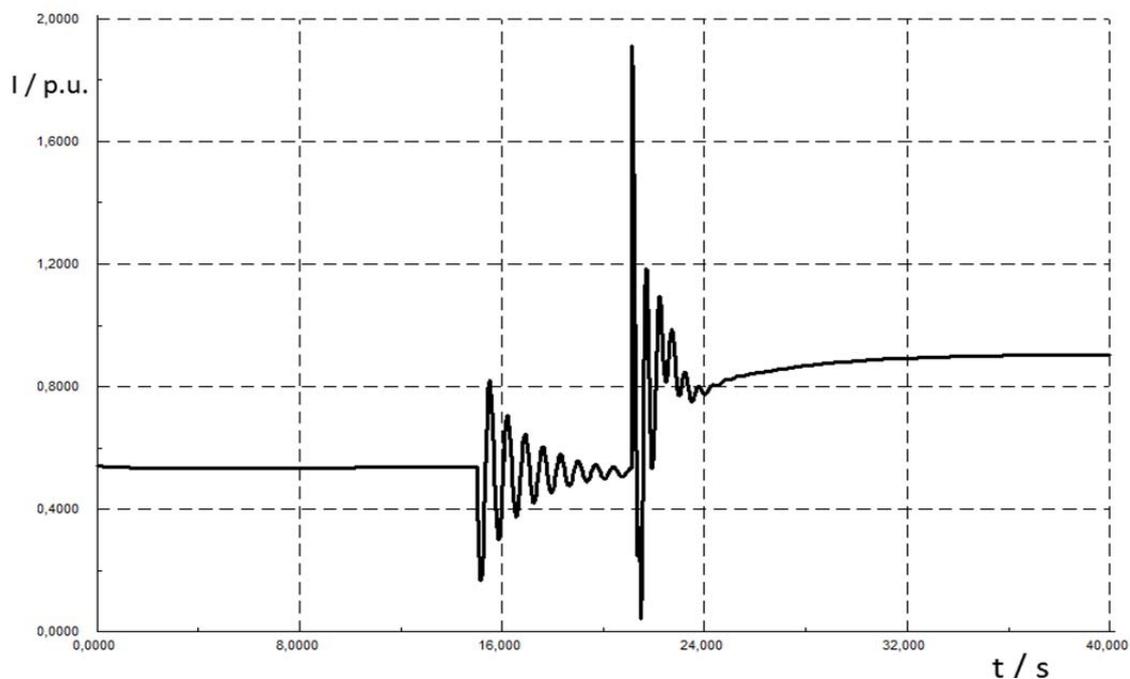


Fig. 2: Verlauf des Stromes eines Synchronengenerators bei der Resynchronisation eines Mikronetzes mit Verbundsystem (Kuppelschalter schließt bei  $t=21$ s).  
Current of a synchronous generator during resynchronisation of a microgrid with the bulk power system (circuit breaker closes at  $t=21$ s).

Auch hier müssen Anforderungen an die DA, um ein Inselnetz autonom zu betreiben, überprüft und getestet werden. In Fig. 2 ist beispielsweise die Belastung eines Synchrongenerators durch hohe Statorströme während eines Synchronisationsvorgangs eines Mikronetzes mit dem Verbundsystem dargestellt.

Ein erster Schritt ist die Erstellung geeigneter Modelle für simulative Untersuchungen, wobei der Fokus auf zwei der wichtigsten Netzkoppelprinzipien von DA, Inverter (z.B. PV, Batterie, Windkraftanlage mit Vollumrichter) und Windkraftanlagen mit doppelt-gespeister Asynchronmaschine, liegt. Die Modelle werden in Simulink und in PowerFactory erstellt, um vergleichende Simulationen zuzulassen. Dabei müssen Normen zur Modellierung von DA berücksichtigt werden, um valide Simulationsergebnisse zu erhalten.

Im nächsten Schritt müssen geeignete Regelstrategien für die entwickelten Modelle gefunden werden. Hier liegt der Fokus zunächst auf invertergespeisten Mikronetzen, die ohne synchrone Erzeuger betrieben werden können. Dazu wird das Prinzip der so genannten Droop-Regelung und mit Erweiterungen verwendet. Hierbei ahmen die Inverter das Verhalten von Synchronmaschinen nach, um eine ausgeglichene Aufteilung von Lastschwankungen zu erreichen. Danach sollen auch für Windkraftanlagen mit doppelt-gespeisten Asynchronmaschinen Regelverfahren zur Unterstützung der Stabilität von Mikronetzen gefunden werden. Schließlich kann die Abstimmung der Regelungen verschiedener Komponenten im Mikronetz untersucht werden. Interessant ist hier beispielsweise die Ermittlung der Kleinsignalstabilität mit Hilfe von Pol-Nullstellen-Diagrammen.

In a first step, suitable models for the simulations are developed. The focus lies on two of the most important principles to connect DGs to the grid, inverters (e.g. PV, batteries, wind power plants with full-size converter) and wind power plants with doubly fed induction generator (DFIG). The models are created in Simulink and PowerFactory to allow for comparative simulations. Standard specifications for modelling of DGs have to be taken into account to get validated simulation results.

In the next step, suitable control strategies for the models created have to be found. At first, microgrids solely fed by inverters, operating without any synchronous generators, are investigated. The principle used is the so called droop control and its extensions. Here, inverters mimic the behavior of synchronous machines in order to balance the power deviations due to the volatility of loads. Later, control strategies for wind power plants with DFIG to support the stability of microgrids will be found. Finally, the coordination of the control of multiple components in a microgrid is investigated. Here, an interesting approach is the analysis of the small-signal behavior using pole-zero-diagrams.

- **Analyse des Systemverhaltens von Smart Grids und Entwicklung von Komponentenreglern für einen optimierten Verteilnetzbetrieb**

**Dipl.-Ing. Simon Eilenberger**

Von der Gesetzgebung getrieben wird durch den kontinuierlichen Zubau von erneuerbaren Energieerzeugern (EE), technisch gesehen, ein neues Zeitalter der Energieversorgung eingeleitet. Da die photovoltaische Anschlussleistung mit 90 % vorwiegend im Niederspannungsnetz anfällt, ist bei stetiger Integration naheliegend, dass besonders die Verteilnetzstrukturen deutliche Auswirkungen spüren.

Bereits heute führt eine ausgeprägte lokale, solare Einstrahlung zu rückwärtigen Energieflüssen. So entstehen regional und zeitlich begrenzte Netzsegmente, die als Netto-Stromlieferanten fungieren. Dies ruft hauptsächlich an exponierten Netzknoten Spannungen hervor, welche sonst so nicht entstehen könnten. Speziell im Einspeisefall steigt die Auslastung, aber vor allem die Spannung am Ende der durch starke Einspeisung geprägten Netzstränge deutlich über die im Lastfall möglichen höchsten Spannungswerte hinaus.

Folgen dieses veränderten Systemverhaltens sind u.a. potenzielle Spannungsbandverletzungen in Hochzeiten der Erzeugung. Hinzu kommt eine grundsätzliche Änderung für den Netzbetreiber bezüglich des optimalen Verteilnetzbetriebs, da das klassische Top-Down-Versorgungsprinzip aufgebrochen wird. Annäherungen an normativ vorgegebene Grenzen zwingen Netzbetreiber vorwiegend zu Investitionen in den konventionellen Netzausbau. Diese signifikanten Kosten können aber teils durch den gezielten Einsatz neuartiger Komponenten und Techniken vermieden werden. Gegenstand dieser Arbeit ist unter anderem die Untersuchung solcher Komponenten und deren Beeinflussungspotenziale, die ein Verzögern und Vermeiden von klassischen, kostenintensiven Netzausbauten ermöglichen können.

Die Möglichkeiten reichen neben Batteriespeichersystemen (BSS) und Spannungslängsreglern (SLR) bis zu regelbaren Ortsnetztransformatoren (rONT) und in der Wirk- und Blindleistung steuerbaren PV-Wechselrichtern. Diese Komponenten können je nach Technologie lokale bis regionale Beiträge zur Spannungsqualität leisten. Die Beeinflussungsmöglichkeiten, welche vorwiegend auf die Spannungsanhebung zielen, wurden in einer umfassenden Simulationsumgebung implementiert. Durch das Erfassen und Verarbeiten von realen Smart Meter Messwerten und weiteren Messdatensätzen stehen eine Vielzahl empirischer Modelle für unterschiedlichste Anwendungen zur Verfügung. Das ermöglicht eine realitätsgetreue Nachbildung des Systemverhaltens in der vorliegenden Simulationsumgebung. Im Rahmen dieser Arbeit werden an Hand des Modells unterschiedliche Reglereinflüsse auf technische Effektivität untersucht.

- **Analysis of the System Performance of Smart Grids and their Changing Requirements for an Optimized Distribution Network Operation**

**Dipl.-Ing. Simon Eilenberger**

Pushed by legislation, the continuous expansion of renewable energy sources in Germany leads to a new era of decentralized electrical power supply. Because 90% of connected generation in low voltage grids is photovoltaic, it is easy to understand that there is a big influence on the low and middle voltage grid.

It is already happening today, that a regional high solar irradiation is reversing the load flow in the lower grid levels changing the grids behavior from a consumer to a power supplier. Because of these reversed load flows the voltage deviations increase significantly at the outer nodes, like this would have never occurred before. At least in case of generation the voltage at the feeders rises to values, barely not exceeding voltage limitations but being much higher than ordinary voltage levels at the sub-station in case of consumption.

Consequences of these changed load flows and voltage conditions are potential violations of voltage band limitations during peak generation periods. Over and above changing requirements for an optimized distribution network operation have to be faced by the network operator because of fundamental changes to the classical top-down supply principle. The resulting load flow fluctuations induced in the grid are driving the distribution network more often close to exceeding the voltage limits, enforcing sumptuous capital expenditures for grid operators in terms of a system expansion. But could these possibly be avoided or postponed by adding novel components and techniques into the distribution grid scenery? Subject of this work is amongst others the analysis of these grid components and influencing methods, which are possibly able to delay or even avoid classical, cost intensive grid reinforcements.

Potential technologies to be considered here are battery energy storage systems (BSS), voltage regulation transformers, controllable distribution transformers (rONT) and PV inverters, which could contribute to power quality / voltage stability issues by providing (re-) active power management services. These possibilities, which are mostly aiming towards the pure influence on voltage levels, were implemented in a comprehensive simulation environment. With the recording and processing of real measurement data provided by smart meters and other data sets computed within this project, a multitude of empirical models for a variety of applications became available. This enabled the implementation of a realistic emulation of the system behavior in the present simulation environment.

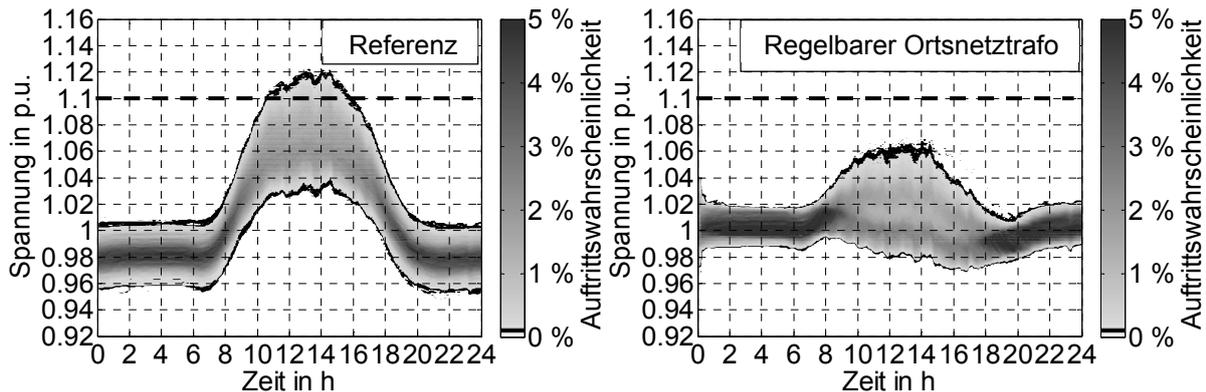


Fig. 1: Spannungsverteilung im Teilnetz Kirche für die Fälle „Referenz“ (links) und „Regelbarer Ortsnetztransformator“ (rechts).  
 Voltage Distribution in the subgrid Kirche for the cases „Reference“ (left) and „Controllable Distribution Transformer“ (right).

Eine einfache Beurteilungsform der Simulationsergebnisse stellt ein Vergleich mit einer Referenzkurve dar. Die in Sonderbuch vorliegende Verteilung der auftretenden Spannungspegel im Ausbauszenario 2030 ist für das Teilnetz im Wirkungsbereich des regelbaren Ortsnetztransformators in Fig. 1 links dargestellt. Die Kurve stellt die Auftrittswahrscheinlichkeit von Spannungswerten über dem Tagesverlauf dar. Zu Grunde liegen hier 1000 simulierte Tage. Auf der rechten Seite ist der mögliche Spannungsbandgewinn gezeigt, der durch den Betrieb eines regelbaren Ortsnetztransformators mit optimal parametrierter Regelkurve an dieser Station möglich ist. Die Spannungsbeeinflussung durch eine Blind- und Wirkleistungsregelung auf Komponentenebene ist in Fig. 2 dargestellt. Auch in diesen beiden Fällen ist eine Spannungshaltung ohne Überschreiten der zulässigen Grenzbereiche möglich. Während der rONT durch Variation des Übersetzungsverhältnisses eine lokale Netzentkopplung ermöglicht und sogar noch weiteren Zubau von PV-Anlagen zuließe, ist bei der Blindleistungsregelung das Zubaupotenzial durch die Betriebsgrenzen der Wechselrichter (maximal mögliche Bereitstellung von Blindleistung) bereits erreicht. Eine weitere Abregelung von Wirkleistung ist direkt mit weiteren Kosten für die Ausfallenergie verbunden, wobei Simulationen gezeigt haben, dass durch eine Abregelung der solaren, eingespeisten Jahresenergiemenge um bis zu 5 % eine Verdopplung der Aufnahmekapazität für PV-Anlagen erreicht werden kann. Die genannten Komponenten und Techniken können also das Integrationspotenzial von EE-Anlagen in bestehenden Netzstrukturen erhöhen und bieten Möglichkeiten, einen konventionellen Netzausbau zumindest zu verzögern, indem sie aktiv zur Spannungshaltung beitragen. Die angerissenen Untersuchungen zeigen Potenziale neuartiger Technologien, die für eine Energiewende „aus dem Verteilnetz“ heraus teils notwendig sind. Deswegen müssen schon heute Modellregionen analysiert werden, um bereits bestehende Probleme zu verstehen, zukünftige Anforderungen an intelligente Netze zu identifizieren und mit dem gewonnenen Wissen einen effizienten Übergang zum intelligenten, aktiven Netz entsprechend schneller und effizienter zu gestalten.

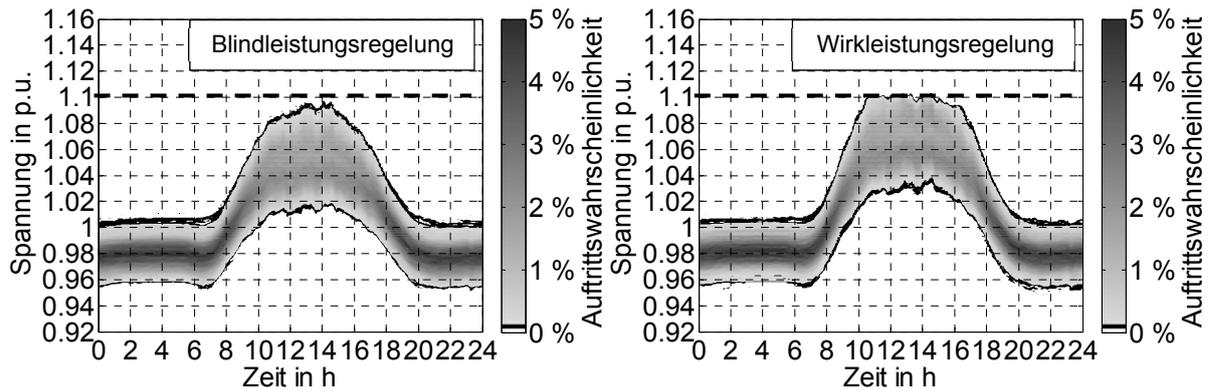


Fig. 2: Spannungsverteilung im Teilnetz Kirche für die Fälle „Blindleistungsregelung“ (links) und „Wirkleistungsregelung“ (rechts).  
Voltage Distribution in the subgrid Kirche for the cases „Reactive Power Management“ (left) and „Active Power Management“ (right).

In this work, different control methods and control modules will be examined and rated according to their technical efficiency. A rather simple form of evaluating the simulation results is to compare them with a reference. Therefore, the resulting voltage levels for the scenario 2030 in Sonderbuch in the partial grid which is affected by the controllable distribution transformer are depicted in Fig. 1 on the left hand side. The plot shows the probability of occurrence of all voltage values over the course of the day. The evaluation is based on a simulation of 1000 days. On the right hand side the possible advantage gained by the operation of a controllable distribution transformer with an optimized set of controlling parameters is shown. The influence on the voltage levels of the reactive and the active power management is shown in Fig. 2. In these cases achieving voltage stability without exceeding any limits is possible. Although the potential to install further photovoltaic devices in the case of the reactive power management is already utilized because of the inverters providing the maximum reactive power possible, the controllable distribution transformer generates yet unused potential to integrate further photovoltaic devices by decoupling the voltage levels locally at the substation. Any further active power management will result in increasing costs for energy loss, although simulations showed that a doubling of the installed photovoltaic capacity is possible while restricting only 5 % of the yearly generated energy of the photovoltaic devices.

The above mentioned components and techniques could increase the potential to increase the photovoltaic capacity in existing grid structures and offer opportunities to postpone or avoid classical grid expansions. The marked out researches also allow a glance at the technological potential of these new technologies which are of immense value for an energy revolution “out of the distribution grid”. Therefore, the necessity of analysing exemplary regions exists already today in order to understand existing problems, identify future requirements in smart grids and finally, with this knowledge, to shape a fast and highly efficient transition to an intelligent, active grid.

- **Automatisierte Betriebsführung von HGÜ-Verbindungen in einem vermaschten Drehstromnetz**

**Dipl.-Ing. Katharina Frey**

Die Energiewende und der damit verbundene Ausbau des deutschen Übertragungsnetzes stellen eine Herausforderung für die Übertragungsnetzbetreiber dar und bietet gleichzeitig die Möglichkeiten den Netzbetrieb effizient und sicher zu gestalten.

Die geplanten Hochspannungsgleichstromübertragungsleitungen, die vom Norden Deutschlands in den Süden Deutschlands führen, können die zu übertragende Leistung direkt vorgeben und einstellen. Basierend auf den tagesaktuellen Prognose- daten für Last und Windeinspeisung kann ein Fahrplan berechnet werden, der die HGÜ-Leistung möglichst optimal vorgibt. Da diese Prognosen jedoch gewissen Fehlern unterliegen und ungeplante Ereignisse, wie z.B. Leitungsausfälle nicht integriert werden, ist ein automatisiertes Konzept zur Ermittlung des optimalen Arbeitspunktes vorteilhaft. Dieses Konzept sollte wenige Eingangsdaten benötigen, den tatsächlichen Netzzustand berücksichtigen und gleichzeitig einen möglichst optimalen Arbeitspunkt berechnen. Mithilfe des Konzeptes sollen Leistungsauslastungen vermieden und Übertragungskosten minimiert werden. Im Fall von Kapazitätsengpässen der Leitungen kann durch den entsprechenden Einsatz der HGÜ-Leitung eventuell ein kostenintensiver Redispatch der Kraftwerke vermieden werden.

Die Integration des Netzzustands erfolgt mithilfe der Spannungswinkel an den Anschlussknoten der HGÜ-Umrichter. Die Differenz der Spannungswinkel steht im direkten Zusammenhang zur Leistung, die zwischen diesen Knoten übertragen wird. In Abhängigkeit von diesen Winkeln kann die HGÜ-Leistung direkt vorgegeben und beispielsweise eine möglichst verlustarme Übertragung realisiert werden. Da die Spannungswinkel direkt auf den aktuellen Netzzustand reagieren, wird dieser auch im Betriebsführungskonzept eingebunden, und die HGÜ-Leistung reagiert direkt auf Veränderungen der Netztopologie, wie z.B. ungeplante Leitungsausfälle.

Weiterhin wird die Leistungsübertragung zwischen diesen Anschlussknoten in einem zweiten Konzept möglichst gering gehalten, und dementsprechend auch die Auslastung der Drehstromleitungen, die diese Anschlussknoten verbinden.

- **Automated Control of HVDC Links within an Interconnected Power System**

**Dipl.-Ing. Katharina Frey**

The change in the German energy system and the associated expansion of the German transmission network is a challenge for the transmission system operators. At the same time, it offers new possibilities to operate the grid efficiently and safe.

With the planned high-voltage direct current transmission lines that expand from Northern to Southern Germany, the operator can set directly the power to be transmitted. Based on the daily updated forecast data for load and wind infeed, a schedule can be calculated, which determines the optimal HVDC power. However, since this data is subject to certain errors and unplanned events, such as line failures which are not integrated, an automated operation concept is advantageous. This approach should require few input data, take the actual network status into account and simultaneously calculate the operating point as optimal as possible. The concept should avoid overloading of transmission lines and minimize transmission losses. In the case of capacity bottlenecks, an expensive redispatch of the power plants can possibly be avoided by the proper use of the HVDC line.

The current state of the transmission grid is included using the voltage angles at the connection nodes of the HVDC converters. The difference between these voltage angles is directly related to the power that is transferred between these nodes. Depending on the angles, the HVDC power can be directly specified and a transmission with low losses is realized. Furthermore, the HVDC power responds directly to changes in the network topology, such as unplanned line failures.

A second concept keeps the power transmission between the connecting nodes of the DC links at a minimum. Therefore, the line loadings of the lines connecting those nodes are as low as possible.

The combination of both concepts through weighting factors includes both objectives: the minimization of line loadings and the minimization of the transmission losses. The weighting factors depend on the current network status. During a very high network loading, the concept which minimizes the line loadings is enhanced; during a lower network load, the losses can be minimized. The use of weighting factors allows the operator to include more objectives in the future, e.g. avoiding loop-flows in the network or the cost-optimal operation of the network.

Kombiniert werden beide Konzepte über Gewichtungsfaktoren. Die Gewichtungsfaktoren werden abhängig vom aktuellen Netzzustand vorgegeben. Bei einer sehr hohen Netzauslastung wird das Konzept zur Leitungsentlastung stärker gewichtet, und während einer geringeren Netzauslastung können die Verluste minimiert werden. Die Verwendung der Gewichtungsfaktoren erlaubt es zukünftig auch weitere Größen zur Optimierung heranzuziehen. Dabei kommen z.B. die Vermeidung von Ringflüssen im Netz oder ein möglichst kostenoptimaler Netzbetrieb in Betracht.

Abbildung 1 zeigt die maximal auftretenden Leitungsauslastungen eines Tages in Stundenschritten. Als Referenz dient das Betriebsoptimum der Zielfunktion „Minimierung der Leitungsauslastung“. Zusätzlich sind die Leitungsauslastungen dargestellt für das Optimum mit der Zielfunktion „Minimierung der Übertragungsverluste“ und die Ergebnisse mit den Winkeldifferenzkonzepten, jeweils mit der Zielfunktion „Minimierung der Leitungsauslastung“ und „Minimierung der Übertragungsverluste“. In Abb. 2 sind die Verluste der Methoden aufgetragen. Gezeigt werden wiederum die Verluste, die im Betrieb mit minimalen Leitungsauslastungen, im Betrieb mit den minimalen Verlusten als Optimum und dem Betrieb anhand der Winkeldifferenzen auftreten.

Die Ergebnisse zeigen, dass der automatisierte Betrieb die Vorteile der HGÜ-Leitung, wie z.B. die direkte Vorgabe der Übertragungsleistung besser nutzt, indem der aktuelle Netzzustand miteinbezogen wird. Der Betrieb nach den Winkeldifferenzen ermöglicht die Entlastung der Leitungen und, wenn die Auslastung der Drehstromleitungen dies zulässt, auch die Minimierung der Übertragungsverluste. Leitungen, die dennoch überlastet sind, müssen durch weitere Maßnahmen entlastet werden. Zukünftig muss noch der gleichzeitige automatisierte Betrieb mehrerer HGÜ-Leitungen untersucht werden.

Fig. 1 shows the maximum line loadings over one day in hourly time steps. The reference used is the operating optimum of the objective function "minimize the line loading". In addition, the line loadings are shown for the optimum with the objective function "minimize transmission losses" and the results with the angular difference concepts with the objectives "minimization of the line loadings" and "minimization of transmission losses". Additionally, the results of the combined method via weighting factors are shown.

In Fig. 2 the losses of the methods are shown. Again, the losses, which occur during operation with minimum line loadings, in the optimal operation with minimal losses and the operation based on the angle differences, are shown separately for both objectives and the combined method via weighting factors.

The results show that the automated operation includes the advantages of the HVDC link, such as the direct setting of the transfer power. Furthermore, the current network status is incorporated. The operation according to the angle differences allows the unloading of the AC lines and also minimizes the transmission losses if possible. In the future, the simultaneous operation of several automated HVDC lines needs to be investigated.

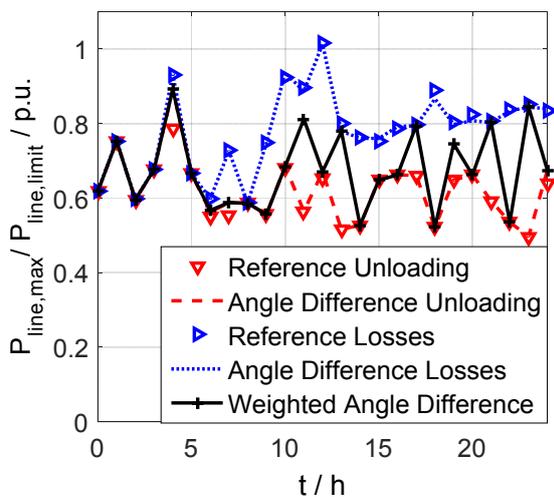


Fig. 1: Maximale auftretende Leitungsauslastung über einen Tag.  
Maximum line loading of one day.

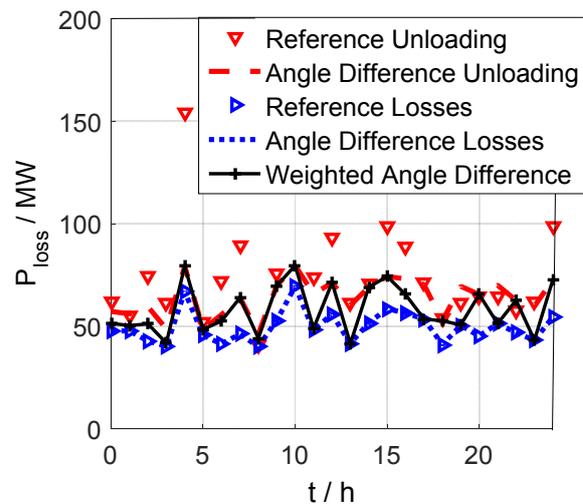


Fig. 2: Übertragungsverluste eines Tages.  
Transmission losses of one day.

## ▪ **Zustandserkennung in Verteilnetzen**

**M. Sc. Daniel Groß**

Die Zunahme von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) 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, die Lastflussumkehr von den unteren Netzebenen in die oberen Netzebenen auf Verteilnetzseite zu. Die Auswirkungen durch lokale Einspeisung aus DEA machen sich im Mittelspannungs (MS)- und Niederspannungs (NS)-Netz vorwiegend durch Spannungsanhebungen und somit eventuellen Verletzungen der durch die Norm EN 50160 vorgegebenen Spannungsbänder bemerkbar. Die herkömmliche Variante, den genannten Auswirkungen entgegenzuwirken, ist der klassische Netzausbau.

Neben dem traditionellen Netzausbau besteht für die Verteilnetzbetreiber jedoch auch die Möglichkeit mit Hilfe neuer intelligenter Technologien und Lösungen, wie bspw. regelbaren Ortsnetztransformatoren, den Netzbetrieb so zu optimieren, dass auch zukünftig eine sichere Versorgung gewährleistet wird.

Grundvoraussetzung für die Umsetzung solcher Konzepte ist es, den aktuellen Zustand des Netzes zu kennen. Der Netzzustand kann grundsätzlich durch die komplexen Spannungen (Beträge und Winkel der Spannungen) an den einzelnen Netzknoten und der anschließenden Ermittlung der Ströme sowie Leistungsflüsse bestimmt werden. Um den Netzzustand korrekt darzustellen wäre es nötig, diese Parameter an jedem Netzknoten, jeder Last und jeder installierten DEA zu erfassen. Ein Verteilnetz besitzt jedoch eine sehr große Anzahl an Knotenpunkten mit Lasten und DEA, weshalb es unwirtschaftlich ist, jeden dieser Knotenpunkte mit Messgeräten auszustatten. Um dennoch einen Einblick in das Verhalten von Verteilnetzen zu erhalten, wird seit einigen Jahren versucht die Netzzustände im Verteilnetz auf Basis der Zustandsschätzung (ZS) zu ermitteln. Am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) wird an Algorithmen für die ZS auf Verteilnetzebene geforscht. Eine ZS bestimmt dabei auf Basis der Netztopologie in Kombination mit vorhandenen Messwerten einen, im Rahmen einer vorgegebenen Genauigkeit, berechneten Netzzustand.

Die Weiterführung der entwickelten ZS-Algorithmen ist eines der wesentlichen Ziele der Zustandserkennung in Verteilnetzen. Dabei soll durch die Implementierung praxisnaher Zustandsschätzer eine Validierung unter Einbeziehung realer Messwerte durchgeführt werden. Eine solche praxisnahe Implementierung ist im Forschungsprojekt „grid-control“ vorgesehen, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird.

## ▪ **State Estimation in Distribution Grids**

**M. Sc. Daniel Groß**

The increase of renewable energy sources (RES) in the last few years lead to a change in the load flow of power supply systems. In the classical power system the direction of the current flow was from the transmission grid to the lower voltage levels of the distribution grid. Nowadays, depending on the local feeding situation, the load flow could turn around and could go from the lower voltage levels of the distribution grid into the superimposed voltage levels. The impact of the local injection of different RES will increase the voltage in the medium and low voltage grids and maybe violate the voltage levels defined in the EN 50160 standard. The conventional way to antagonize the named impacts is the classical grid expansion.

But there are also other options for distribution grid operators besides. For example a controllable distribution transformer can be used to optimize the grid operation for a safe power supply.

The basic requirement for an implementation of such concepts is the knowledge of the grid's actual state. Basically, the grid state can be described by the complex voltages (magnitudes and angles) at each grid node. The complex voltages then can be used to calculate the resulting current- and load-flow. For the description of the correct grid state it would be necessary to measure these parameters at each node, each load and each RES. A distribution grid normally includes a huge number of nodes with loads and RES. Therefore the installation of measuring devices at all nodes isn't accepted due to economic reasons. However, to get a look inside the behavior of a distribution grid, the research goes towards an implementation of state estimation (SE) methods since several years.

At the Institute of Power Transmission and High Voltage Technology researchers are developing algorithms and methods suitable for the state estimation in medium and low voltage grids. State estimation determines the grid state by considering a defined accuracy including the network topology and available measurement data.

The further development of the algorithms is a substantial aim of the state estimation in distribution grids. Thereby a validation should be conducted by the implementation of a practical state estimator including real measured values. Such an implementation will be realized during the research project "grid-control", supported by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

## ▪ **Effiziente Lastflussrechnung in Niederspannungsnetzen**

**Dipl.-Ing. Christoph Kattmann**

Lastflussberechnungen sind die Basis der elektrischen Netzsimulation. Für die Beurteilung von Netzausbauoptionen, die Parametrierung der Regler von erneuerbaren Erzeugungsanlagen oder für die optimale Steuerung von Lastfluss sind diese Berechnungen unerlässlich. In der Vergangenheit waren diese Aufgaben in der Regel auf höhere Spannungsebenen beschränkt. Nieder- und weitestgehend auch Mittelspannungsnetze wurden meist nicht detailliert modelliert, sondern als Gesamtverbraucher mit angenommener Abnahmeleistung dargestellt. Durch die Verbreitung von dezentralen Photovoltaikanlagen, Erzeugern wie Biogas- oder Blockheizkraftwerke und die zu erwartende Popularität von Elektrofahrzeugen sind diese Annahmen nicht mehr zu halten. Auch in niederen Spannungsebenen ergeben sich heute komplexe Situationen und Verletzungen der zulässigen Spannungsbänder und Leitungsauslastungen.

Die in den 70er Jahren entwickelten und bis heute verbreiteten Lösungsalgorithmen für die Lastflussberechnung sind aber auf die Berechnung von Übertragungsnetzen optimiert. Viele der im Übertragungsnetz bekannten und angewandten Vereinfachungen sind für das Verteilnetz im Allgemeinen bzw. das Mittel- und Niederspannungsnetz im Besonderen aufgrund der unterschiedlichen Topologien und Impedanzverhältnisse nicht anwendbar. Deshalb werden am IEH in einem grundlegenden Forschungsprojekt Möglichkeiten erforscht, Lastflussberechnungen auch in unteren Spannungsebenen und kleineren Netzen zu beschleunigen. Im Vordergrund stehen hier Monte-Carlo Simulationen, bei denen sehr viele einzelne Lastflusssituationen berechnet werden und das Ergebnis als statistische Verteilung interpretiert wird. Diese können besonders von einer beschleunigten Lastflussberechnung profitieren.

Methodisch werden dabei Ansätze auf mehreren Ebenen verfolgt. Zunächst hat die Wahl der grundsätzlichen Lösungsmethode großen Einfluss auf die Berechnungszeit. Die klassische Newton-Raphson-Methode ist für kleinere Netze langsamer als die einfachere Stromiteration. Im Weiteren können Topologievereinfachungen wie die Reduktion von langen Strängen auf wenige Knoten eingesetzt werden. Zuletzt kann auch die Verwendung moderner algebraischer Bibliotheken, die Optimierung des Compilers und die Wiederverwendung von Ergebnissen (Caching) die Berechnung deutlich beschleunigen.

▪ **Efficient Load Flow Simulation in Low Voltage Grids**

**Dipl.-Ing. Christoph Kattmann**

Load flow calculations are the basis of electrical grid simulations. In order to evaluate grid expansion options, configure load controllers of distributed generators, or optimally route the power flow itself, these calculations are indispensable. In the past, these tasks were mostly carried out for the higher voltage levels. Low and middle voltage grids were usually not precisely modeled, but seen as loads with an assumed or measured consumption. Because of the expansion of dispersed photovoltaic plants, distributed energy producers like biogas and combined heat and power plants, and the anticipated popularity of electric vehicles, these assumptions are no longer valid. Today, low voltage grids experience complex situations and are subject to violations of voltage bands and line utilizations. The solution algorithms for load flow calculations were developed in the seventies and are used, mostly unchanged, until today. However, they are mostly optimized for high voltage and transmission grids. Many of the known simplifications are not applicable to low voltage grids because the topologies and impedances differ. Therefore the IEH investigates possibilities to accelerate load flow calculations in smaller grids and low voltage grids. Especially, research focuses on Monte-Carlo simulations, where thousands of individual load flow situations are calculated and the result is interpreted as a statistical distribution. These profit the most from an accelerated load flow calculation. Methodically, different approaches on different levels are applied. Firstly, the general solution method has a big influence on calculation times. For smaller grids, the conventional Newton-Raphson method is slower than the more simple current iteration. Next, reductions in the topology can be used, like the reduction of a radial grid to just a few nodes. Lastly, modern algebraic libraries, compiler optimization and caching of results can significantly accelerate load flow calculations.

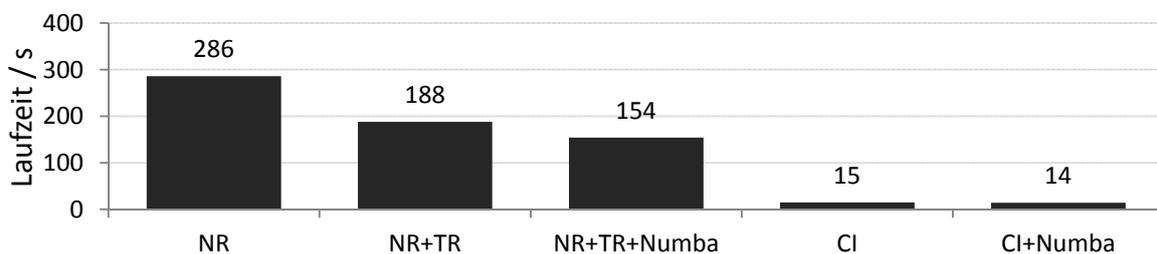


Fig. 1: Laufzeiten eines Lastflussproblems (NS-Netz mit 100 Knoten, 35040 Zeitpunkte) (NR: Newton-Raphson, TR: Topologiereduktion, CI: Stromiteration, Numba: schneller JIT-Compiler).

Runtimes of a load flow problem (low voltage grid with 100 nodes, 35040 times) (NR: Newton-Raphson, TR: topology reduction, CI: current iteration, Numba: fast JIT-Compiler).

- **Dynamische und stationäre Betriebsoptimierung von Mikronetzen durch ein Energiemanagementsystem**

**M. Sc. Mohsen Nemati**

Auf der Mittel- und Niederspannungsebene können vernetzte Generatoren eine neue Klasse von Versorgungssystemen bilden, das Mikronetz. Ein Mikronetz besteht aus regelbaren Erzeugern, Energiespeicher, Lasten und Monitoring-System bzw. Energiemanagementsystem. Ein privater Haushalt mit eigener Photovoltaikanlage kann ein kleines Mikronetz darstellen, ebenso wie beispielsweise ein Industrienetz oder sogar ein ganzes Niederspannungsnetz.

Durch die Anbindung an das übergeordnete Versorgungsnetz werden zwei Betriebsarten möglich. Zum einen kann das Mikronetz im Netzparallelbetrieb laufen, wobei eine Verbindung zum Versorgungsnetz durch Point of Common Coupling (PCC) besteht. Zum anderen ist der Betrieb als eigenständige Insel möglich: im Fall einer Störung im übergeordneten Netz erlaubt das Mikronetz-Konzept das Öffnen des Verbindungsschalters am Verknüpfungspunkt, sodass das Mikronetz als Inselnetz stabil weiterbetrieben werden kann und somit die Versorgungssicherheit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Netzes erhöhen kann.

Wichtige Herausforderungen beim Betrieb von Mikronetzen im dynamischen Bereich bestehen beim Wechsel zwischen Insel- und Verbundbetrieb sowie in der Stabilisierung von Spannung und Frequenz im Inselnetzbetrieb. D.h., das Konzept der Mikronetze stellt hohe Anforderungen an die Regelstrategie, damit Frequenz- bzw. Spannungstoleranzbänder nicht verletzt werden. Dazu wurden einphasige und dreiphasige Komponentenmodelle (DC, AC) für RMS-Bereiche in Matlab-Simulink, PSS@Netomac und PSS@SINCAL entwickelt. Zusätzlich wurden diverse Methoden und Verfahren zur schnellen Regelung der Wirk- bzw. Blindleistung in Mikronetzen weiterentwickelt. Die Reglermodelle der verschiedenen Erzeuger können die Frequenz und die Spannung im Inselnetzbetrieb, im Verbundnetzbetrieb und die Übergangsmodi bei symmetrischen bzw. unsymmetrischen Mikronetzen sicherstellen.

Im stationären Bereich ist das zentrale Energiemanagementsystem (EMS) des Mikronetzes in erster Linie für die Optimierung des Betriebs innerhalb des Mikronetzes verantwortlich. Ziel ist es, den Energiebedarf unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und technische Rahmenbedingungen, zu decken. Fig. 1 zeigt die Mehrdimensionalität des optimalen Systembetriebs. Die entscheidenden Ziele einer optimalen Betriebsführung differieren je nach Interessenvertreter und stehen eventuell in Konflikt zueinander. Die Betriebsentscheidungen werden allgemein als Unit Commitment (UC) bzw. Economic Dispatch (ED) bezeichnet.

- **Dynamic and Steady State Operation of a Microgrid by a Smart Energy Management System**

**M. Sc. Mohsen Nemati**

Microgrids are especial concepts of medium and low voltage grids with distributed generators, together with controllable loads, local storage devices, integrated Monitoring systems and an energy management system (EMS). For example a private household with own photovoltaic modules, electrical grid of a hospital or also entire low voltage grid can build different microgrids.

The main feature of microgrids is that, although they operate mostly connected to the distribution network, they can be automatically transferred to an islanded mode in case of faults in the upstream network and can be resynchronized after restoration of the upstream network voltage. So the operation of microgrids offers distinct benefits to customers and utilities, i.e. increasing security of supply, reduction of overall energy consumption, improved energy efficiency, losses reduction and improvement of supply reliability.

The major challenge in the operation of microgrids in dynamic time-scale is the transition between two main modes, from islanded mode to connected mode and vice versa. The stability of microgrids and frequency and voltage quality are maybe most important points in microgrids investigations. In order to fully exploit the possible advantages of inverter-based islanded microgrids, adequate control strategies that are specifically designed for the Inverters in the islanded microgrid, are needed to be developed. Therefore the controlling concepts, methods and strategies, which play a significant role in operation quality of these neoteric grids have been investigated. Single-phase and 3-phases inverter models are developed for dynamic AC components for RMS concept in Matlab-Simulink, PSS®Netomac and PSS®SINCAL. Additionally, various techniques and possibilities to control the active and reactive power in microgrids have been integrated. The controller models of the different distributed generators can stable and enhance the frequency and voltage in the islanded, connected and transition modes for balanced and unbalanced microgrids.

The microgrid EMS is a first-line service in operation optimization inside this distribution network. It allows planning the integration of different distributed generators and storage systems into the grid. The aim is to supply the critical loads (energy demand) taking into consideration such aspects as economic efficiency, environmental compatibility and technical constraints. It is generally described as Unit Commitment (UC) and Economic Dispatch (ED). The UC includes solutions on which kind of generators should be in use in appropriate time interval in order to cover the loads under the technical conditions. These decisions take place hourly. ED tries to distribute the necessary energy production in a possible economic way in compliance with active units.

Das UC beinhaltet Entscheidungen darüber, welche Generatoren im jeweiligen Zeitintervall in Betrieb gehen sollen, um die auftretende Last unter Berücksichtigung technischer Rahmenbedingungen zu decken. ED versucht die erforderliche Erzeugung möglichst wirtschaftlich auf die bereits laufenden Einheiten zu verteilen. Der Betrachtungszeitraum für UC/ED liegt meist im Minuten- bis Stundenbereich. Weiterhin muss das EMS Entscheidungen über den Bezug und Verkauf von Elektrizität aus dem bzw. an das Verbundnetz treffen. Werden zudem erneuerbare Energien zur Strom- oder auch Wärmeerzeugung genutzt, gilt es Prognosen und Vorhersagen über deren Erzeugungsverhalten zu treffen und diese im Fahrplan der regelbaren Generatoren entsprechend zu berücksichtigen. Sind regelbare Verbraucher an das MG angeschlossen, werden diese ebenfalls vom EMS mit dem Ziel einer optimalen Betriebsführung gesteuert. Die genannten Aspekte unterscheiden ein Microgrid-EMS von jenen in herkömmlichen Energiesystemen und machen die Betriebsoptimierung zu einer komplexen Aufgabe.

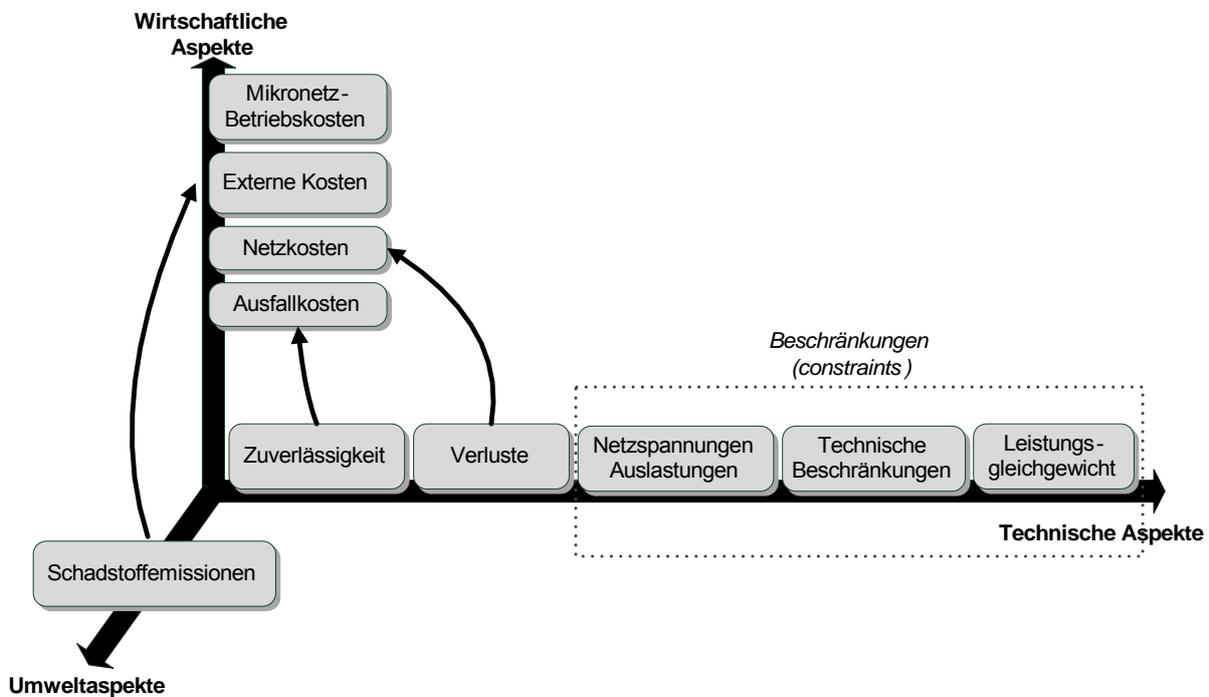


Fig. 1: Wichtigste Aspekte einer optimalen Mikronetz-Betriebsführung.  
 Important considered aspects of microgrid's optimal operation.

Ziel der Forschung am IEH im Bereich der Mikronetze war ein intelligentes, flexibles EMS zu entwickeln, das den Betrieb des Systems in verschiedenen Zeitbereichen (Sekunden, Minuten, Stunden bis Tage) steuern und optimieren kann. Für diesen Zweck wurden verschiedene Optimierungsmethoden für den stationären Fall entwickelt und mit dynamischen Modellen und Verfahren verbunden. Zwei Methoden, basierend auf Mixed Integer Linear Programming und genetischem Algorithmus, wurden für diesen Zweck entwickelt. Fig. 2 zeigt den Zusammenhang zwischen verschiedenen zentralen und dezentralen Steuerungseinheiten in EMS.

Furthermore the EMS has to take a decision concerning purchase and sell of electricity from the interconnecting network. If renewable energy will be used to power and heat generation, the prognosis and forecast models of energy generation will be used to schedule the controllable generators. If controllable consumers exist in MG, they managed from EMS with the aim to optimize the operation of system (in this case DSM). These mentioned aspects differentiate a microgrid-EMS from the conventional energy systems and make the optimization problem too complicated. The various important objectives of optimum operation differentiate in compliance with perspective of system study or use cases and sometimes they are in conflict with each other.

The main aim of researches in this field in IEH is, to develop smart, flexible and modular EMS, which is able to control and enhance the operation of system in different time scales (seconds, minutes and hours to days). For this purpose some of promising methods like mixed integer linear programming and genetic algorithm have been tested and developed in an adopted concept.

Furthermore the dynamic models of renewable energy sources and storages and their proper local control concepts in RMS time scale have been connected to the steady state concept. For reliable and economic operation of the microgrids both central and local management and control units should work in a smart cooperated way to ensure the advantages of microgrids.

Fig. 2 shows simplified developed control and management system of the microgrid.

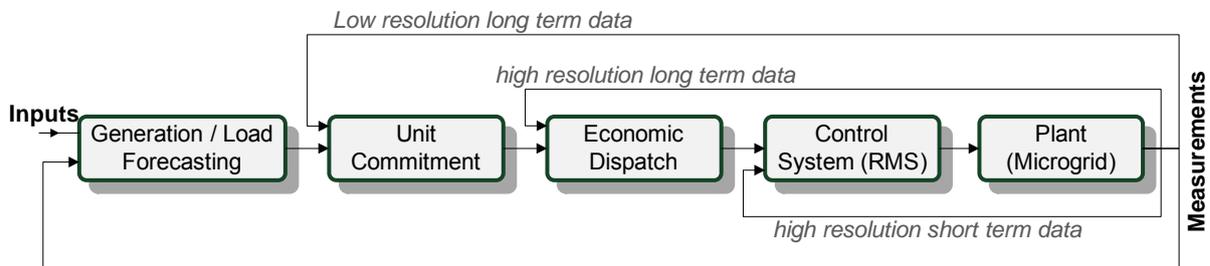


Fig. 2: Vereinfachtes entwickeltes Energiemanagementsystem des Mikronetzes.  
Simplified developed energy management system of a microgrid.

## ▪ **Zeitreihenbasierte probabilistische Netzplanung im Hochspannungsnetz**

**M. Sc. Pascal Wiest**

Durch den fortschreitenden Ausbau der erneuerbaren Energien wandelt sich das Verteilnetz vom passiven zum aktiven Netz. Daraus resultieren neue Anforderungen an die Verteilnetzplanung, um den hohen Anteil an erneuerbaren Energien in das Netz zu integrieren. Bislang erfolgt die Planung der elektrischen Netze mit einem deterministischen Verfahren, bei dem nur eine geringe Anzahl an Last- und Erzeugungssituationen berücksichtigt werden. Üblicherweise werden lediglich zwei Szenarien verwendet, eines für hohe Last mit niedriger Erzeugung und eines für niedrige Last mit hoher Erzeugung. Aufgrund der hohen Durchdringung mit dezentralen Erzeugungsanlagen, vorzugsweise aus erneuerbaren Energien, bilden diese zwei Szenarien die Extremsituationen im Netz nur unzureichend ab. Besonders im vermaschten Hochspannungsnetz kann dies dazu führen, dass einzelne Leitungsabschnitte unterdimensioniert sind und somit zukünftig ein sicherer Betrieb nicht gewährleistet ist, sofern dies innerhalb des Planungsprozesses nicht durch die Erfahrungen der Ingenieure abgefangen wird.

Der Einsatz von zeitreihenbasierten probabilistischen Methoden bietet den Vorteil, dass die elektrischen Energienetze nicht mehr auf zwei Extremfälle dimensioniert werden, sondern für die Netzplanung jegliche Betriebsfälle berücksichtigt werden. Dadurch können nicht nur die Auslastungen der zukünftigen Netzsituationen, sondern auch deren Auftretswahrscheinlichkeit detaillierter analysiert werden, wodurch wiederum eine effizientere Netzplanung möglich wird. Das IEH untersucht hierfür sowohl die Berechnung der zeitlichen Leistung an den Umspannwerken unter Berücksichtigung von Ausbauprognosen der erneuerbaren Energien, die Berechnungen im Planungsprozess als auch der Einsatz neuer Betriebsmittel als alternative zum klassischen Netzausbau. Dadurch wird ein vollständiger neuer Planungsprozess geschaffen.

Die Verwendung von Ausbauprognosen der erneuerbaren Energien erfolgte in der deterministischen Planung mittels Gleichzeitigkeitsfaktoren. Diese berücksichtigen bei volatilen Einspeisern die maximale Gleichzeitigkeit zwischen der Einspeiseleistung mehrerer Erzeugungsanlagen und beruhen auf den Erfahrungswerten der Netzbetreiber. Für die am IEH entwickelten Verfahren ist dieser Ansatz nicht verwendbar, da der zeitliche Verlauf der Wirk- und Blindleistungen benötigt wird. Hierfür ist eine Methodik entwickelt worden, die mit räumlich aufgelösten Daten eines Klimamodells die Einspeiseleistung von erneuerbaren Energien berechnet und in einem stochastischen Prozess mit den Lastverläufen an den Umspannwerken kombiniert. Ein Überblick über diesen Vorgang mit dem Ergebnis für ein Umspannwerk zeigt Fig. 1.

▪ **Time-Series Based Probabilistic Grid Planning in High Voltage Distribution Grids**

**M. Sc. Pascal Wiest**

Increasing power capacity of renewable energy sources leads to a change from passive to active grid. This causes new demands for the planning of the distribution grid to integrate the high penetration of renewable energy sources. Today, a deterministic approach is used for grid planning with a small number of worst case conditions. Usually, only two scenarios are considered, one for maximum load with minimum generation and one the other way around. Based on the high penetration of distributed generation units, the deterministic approach do not always represent the most critical case. This can lead to an under dimensioning of particular lines, especially in the high voltage distribution grid, if this is not compensated by heuristic knowledge of the grid planner.

A benefit of time-series based probabilistic methods is that all load and generation scenarios are considered and the grids are not furthermore planned using two deterministic scenarios. Therefore, all grid conditions are considered in the grid planning and their probabilities of occurrence can be analyzed. This allows a more efficient planning process. The IEH investigates the calculation of time-series for the active power at substation under consideration of weather data. Additionally, the calculation within the planning process and the integration of intelligent grid components as an alternative way to classical grid reinforcement is investigated. This results in a new planning process.

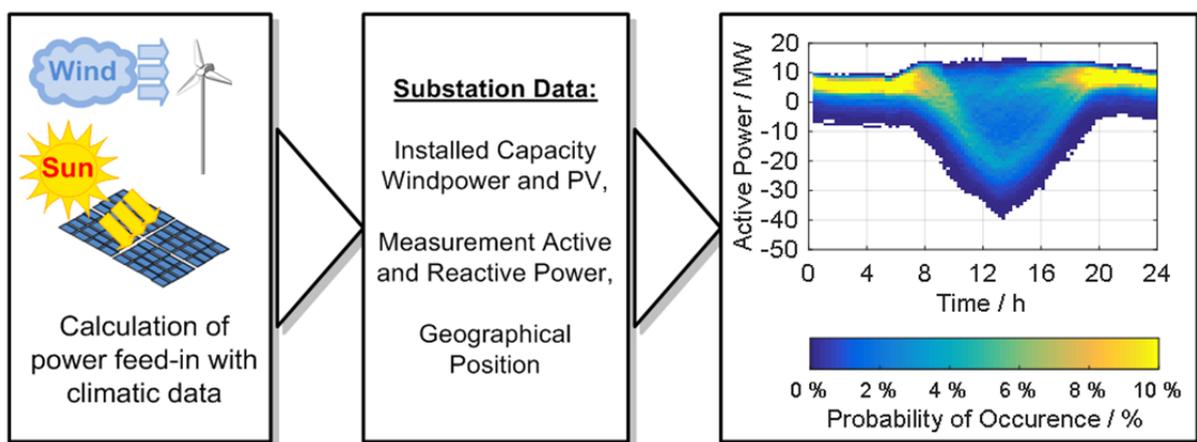


Fig. 1: Stochastische Modellierung der zeitlichen Wirkleistungsverläufe an den 110 kV-Umspannwerken.

Stochastic Modeling of time-series for active power at 110 kV substations.

Forecasts for the installed capacity of renewable energy sources are used which consider the simultaneity factors in the deterministic approach. Therefore, the maximum simultaneity is considered between all volatile generation units. Those factors are based on the experience of the distribution system operators.

Die Klimadaten bieten den Vorteil, dass die räumliche Korrelation und damit die Einspeiseleistung realistisch abgebildet wird. Das Ergebnis dieses Prozesses ist in Fig. 1 auf der rechten Seite für ein beispielhaftes Umspannwerk dargestellt. Dabei wird ein zeitlich aufgelöstes Histogramm der Wirkleistung gezeigt. In den nicht gefüllten Bereichen treten dabei keine Werte auf und der Kontrast zeigt die Auftrittswahrscheinlichkeit. Es ist zu erkennen, dass zu den Mittagsstunden vermehrt negative Wirkleistungen, dies entspricht einer Rückspeisung von der unterlagerten Spannungsebene in das Hochspannungsnetz, auftreten. Dies ist vermehrt auf die Einspeisung von Photovoltaik zurückzuführen. Da der absolute Wert der Wirkleistung für die Rückspeisung größer als im Lastfall ist, kann davon ausgegangen werden, dass dies relevanter für die Netzplanung ist.

Nach den Planungsgrundsätzen für das Hochspannungsnetz muss dieses (n-1)-sicher geplant werden. Zusätzlich wird damit eine betriebliche Reserve ermittelt, welche für einen sicheren Betrieb notwendig ist. Aufgrund des hohen Rechenaufwands ist eine Ausfallanalyse, wie dies im deterministischen Ansatz erfolgt, für jede Last- und Erzeugungssituation nicht möglich. Ein Forschungsschwerpunkt am IEH ist daher die Anwendung der Ausfallanalyse in probabilistischen Lastflussrechnungen. Eine Möglichkeit hierfür ist die Auswahl der individuellen Auslastungsmaxima einer jeder Leitung im betrachteten Netzgebiet. In Fig. 2 ist ein Vergleich der Auslastungen im (n-1) Fall gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass beim deterministischen Ansatz eine (n-1)-Sicherheit nicht in jedem Zustand vorhanden ist. Jedoch sind die Auftrittswahrscheinlichkeiten für sehr hohe Auslastungen aufgrund der volatilen Einspeisung sehr gering. Dadurch wird ein Einsatz von Flexibilitätsoptionen, wie z.B. ein Einspeisemanagement, sehr interessant und stellt den nächsten Schwerpunkt dieser Forschung dar.

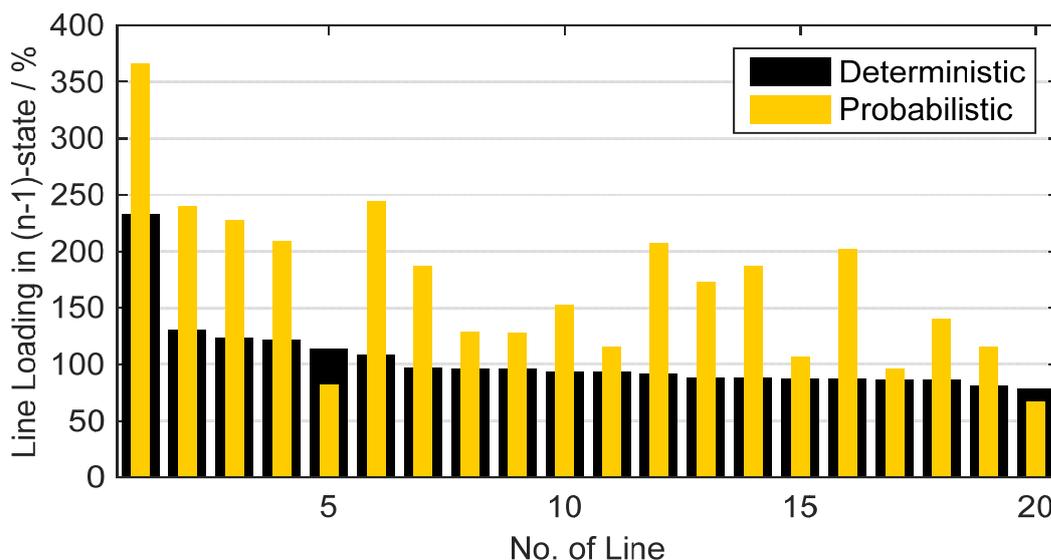


Fig. 2: Vergleich der Ausfallanalyse zwischen probabilistischer und deterministischer Netzplanung.  
 Comparison of Contingency Analysis between probabilistic and deterministic grid planning.

For the approach developed at IEH, this is not available since time-series are used. The new method is shown in Fig. 1. The developed methodology calculates the power feed-in from renewable energy sources using the regionally defined weather data and combines it stochastically with the measurements of active power at the substations. The spatial correlation is modelled by using the regionally defined weather data.

The result of the substation modelling is shown on the right side of Fig. 1. Here, a histogram is shown with a temporal resolution. In the not filled area has no values occur and the contrast show the probability of occurrence. There is a higher probability of occurrence for negative values at midday which correspond to reverse power flow situations with energy flowing from the downstream network to the 110 kV-grid. This is a result of the high installed capacity of photovoltaic systems. The reverse power flow situations will be more crucial for the grid planning since their total value is higher than in the load situations.

The high voltage distribution grid is planned with a (n-1)-security. This results in a reserve in transport capacity for the operation of distribution grids, since reconfigurations in the structure are sometimes necessary for maintenance tasks, like e.g. testing of circuit breakers. A contingency analysis for all scenarios in the probabilistic approach is not possible since the computational burden would be too high. One priority of the research at IEH is the usage of the contingency analysis within probabilistic load flow calculations. One approach is to perform a contingency analysis for each load scenario that result in a maximum loading of a particular line. Fig. 2 show a comparison of the line loading in the (n-1)-state of both approaches. Obviously, it is possible that the deterministic approach can lead to grids that do not fulfill the (n-1)-criterion in every situation. However, the probabilities of occurrence are very low since the power feed-in is very volatile. Therefore, the usage of intelligent grid components, like e.g. active power management of renewable energy sources, will be interesting as alternative to classical grid reinforcement since the curtailed energy can be low. This will be addressed in future work at the IEH.

## 5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

### ■ Simulation leitungsgebundener Störungen eines KFZ Inverters im Frequenzbereich

M. Sc. Philipp Hillenbrand

Der elektrische Antriebsstrang eines Elektrofahrzeuges (EF) besteht heute typischerweise aus einer HV-Batterie, einem Inverter und einer elektrischen Maschine. Im Inverter wird die Batteriegleichspannung mit Hilfe von Leistungshalbleitern in einen dreiphasigen Wechselstrom gewandelt, um die elektrische Maschine anzutreiben. Schnelle Schaltzeiten bei der Wandlung gewährleisten einen hohen Wirkungsgrad und vermeiden eine Überhitzung der Halbleiter. Diese Schaltvorgänge erzeugen leitungsgebundene und feldgebundene Störungen, die vom Automobilhersteller gegebene Grenzwerte nicht überschreiten dürfen. Die Vorhersage dieser Störungen spielt im Entwicklungsprozess des Antriebsstrangs daher aus zwei Gründen eine zentrale Rolle. Zum einen korreliert eine frühe Entdeckung der Grenzwertüberschreitung mit einer Kosteneinsparung. Zum anderen geben die Simulationsmodelle Aufschlüsse über die Ursache der Störung und vereinfachen damit die Problemlösung.

Dieser Beitrag beschäftigt sich damit, wie die leitungsgebundenen Störungen im Bordnetz eines EF entstehen. Dazu wird mit dem in Fig. 1 abgebildeten Testaufbau untersucht, wie Gleichtakt- und Gegentaktstörungen im Antriebsstrang eines EF entstehen und wie diese anhand einfacher Simulationsmodelle nachgebildet werden können. Während des Betriebs des Inverters werden die leitungsgebundenen Störungen anhand der Störspannungen an der Bordnetznachbildung (BNN) gemessen. Das Störspannungsspektrum wird mittels der vorgestellten Simulationen im Frequenzbereich von 150 kHz bis 110 MHz nachgebildet und erklärt.

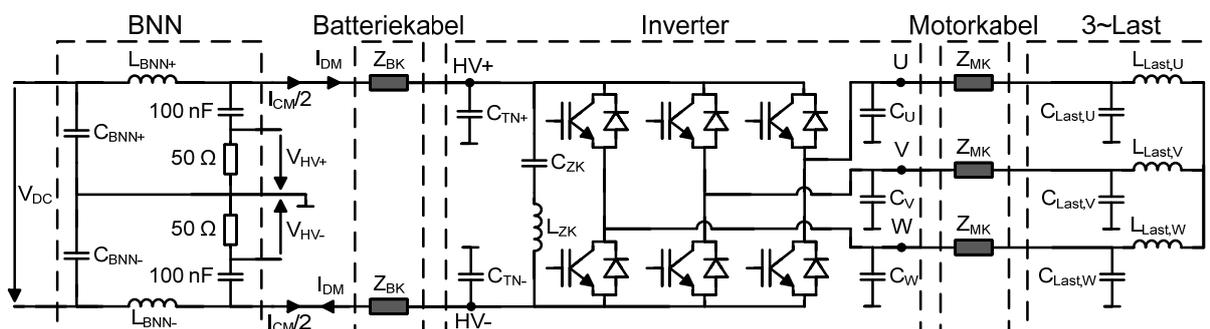


Fig. 1: Ersatzschaltbild des Testaufbaus bestehend aus BNN, Inverter und 3~ Last.  
Equivalent circuit of test setup consisting of two LISNs, inverter and 3~ load.

Es wird untersucht, welchen Einfluss die Ansteuerung des Inverters und der Testaufbau auf das Störspektrum haben. Fig. 2a zeigt, dass der Betriebspunkt des Inverters hauptsächlich den Pegel der Störspannung beeinflusst. Der Aufbau, beispielsweise die Art der verwendeten Kabel, beeinflusst dagegen die Form und die Resonanzstellen des Spektrums (vgl. Fig. 2b).

## ■ Simulation of Conducted Emissions of an Automotive Inverter in the Frequency Domain

M. Sc. Philipp Hillenbrand

The electrification of the automotive drive train brings new challenges related to electromagnetic compatibility. A state of the art drive train of an electric vehicle (EV) consists of a high voltage battery, an inverter and an electric machine. Power semiconductors are used in the inverter to convert the battery DC voltage into a three-phase AC current. Fast switching times are needed to increase the efficiency of the inverter however they cause radio frequency (RF) spectral components with high amplitude. These disturbances propagate through various coupling paths throughout the drive train and can disturb other electric devices, such as sensors and mobile communication. Therefore, EMC engineering is fundamental, not only to ensure the security of the occupants, but also to establish the internal comfort of the vehicle. The prediction of the EMC performance of a component of the electric drive train is important for car and component manufacturers because an early estimation of the emissions occurring is directly related to cost reduction. Therefore, a good estimation of the disturbance voltage at the Line Impedance Stabilization Network (LISN) and a profound knowledge about all influencing effects is desirable. This contribution presents a test setup, shown in Fig. 1 to investigate the conducted emissions of the inverter. The conducted emissions are caused by common-mode (CM) and differential-mode (DM) currents. The disturbance voltages at the LISN are measured during operation of the inverter. Subsequently, a profound knowledge about the excitation and propagation of the CM and DM currents is developed. Therefore, a frequency domain simulation is performed. Based on the simulation results, the shape and the resonances of the disturbance voltage can be explained by the resonant circuits in the simulation model. Below, the influence of the control algorithm of the inverter and the components of the test setup on the disturbance voltage at the LISN is investigated.

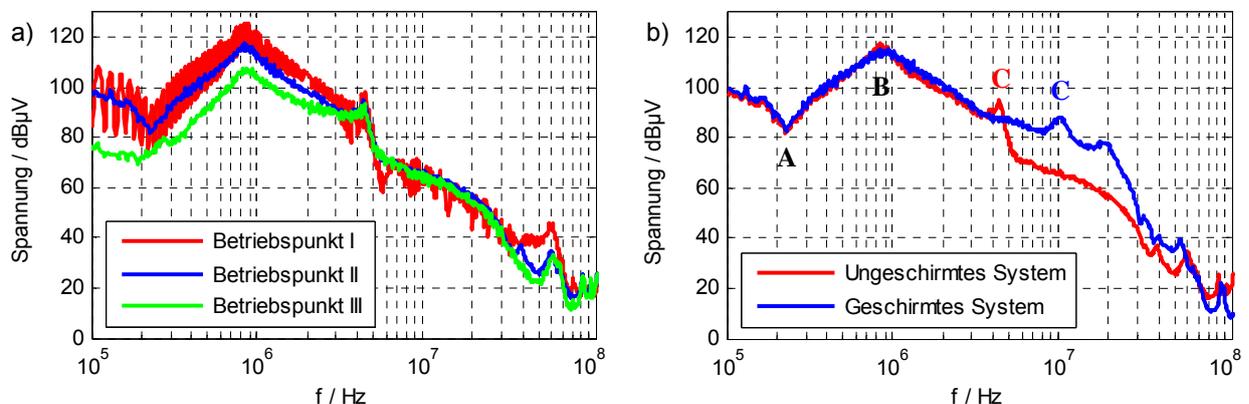


Fig. 2: Störspannung in Abhängigkeit des Betriebspunkts (a) und der Kabel (b).  
Disturbance voltage for different operating points (a) and different cables (b).

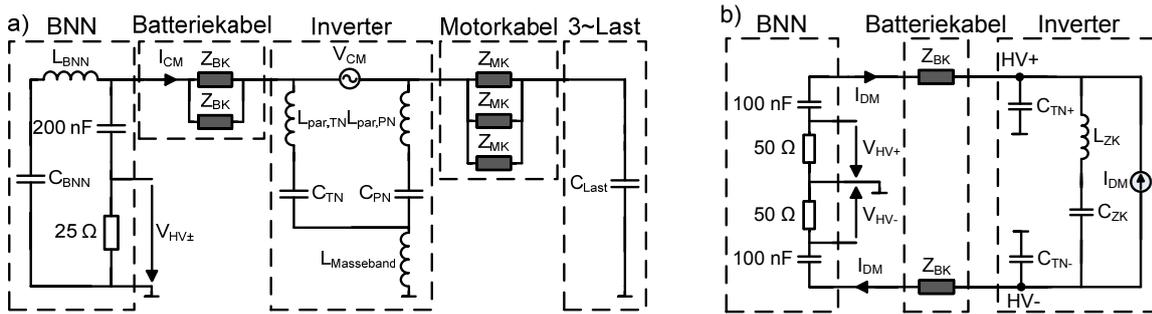


Fig. 3: Verwendete Simulationsmodelle der Gleich- (a) und der Gegentaktstörung (b).  
Used simulation models for Common- (a) and Differential-Mode currents (b).

Zur Simulation der leitungsgebundenen Emissionen des Inverters werden getrennte Simulationsmodelle für Gleich- und Gegentaktstörung verwendet. Für die Gleichtaktstörung wird davon ausgegangen, dass während des Schaltvorgangs eines Leistungsschalters durch die Potentialänderung an U, V und W die parasitären Kapazitäten gegen die Bezugsmasse geladen werden. Der dadurch resultierende Strom schließt sich über die BNN und erzeugt dort die Störspannungen  $V_{HV+}$  und  $V_{HV-}$ . Nachgebildet werden kann dieser Vorgang mit der in Fig. 3a dargestellten Gleichtaktquelle zwischen den kurzgeschlossenen Batterie- und Motorabgängen des Inverters. Durch die Symmetrie des Testaufbaus lässt sich ein einphasiges Gleichtaktersatzschaltbild erzeugen. Zur genauen Nachbildung der Störung mittels dieses Modells sind die folgenden zwei Aspekte zu beachten: Die Gleichtaktquelle und die Systemimpedanzen. Die Impedanzen der einzelnen Systemkomponenten werden mit einem Impedanzanalysator oder Netzwerkanalysator bestimmt. Die Quelle der Gleichtaktstörung kann entweder im Zeit- oder Frequenzbereich charakterisiert werden.

Fig. 4a zeigt die Spannung zwischen U und HV<sup>-</sup> beim Ein- und Ausschalten des dazugehörigen Leistungsschalters. Die Steilheit der Spannungsflanke und die überlagerte Schwingung verändern sich abhängig von Spannung und Strom, die durch den Schalter geschaltet werden. Diese Abhängigkeiten spiegeln sich im Frequenzbereich wieder (Fig. 4b) und müssen im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Mittels des Modells können die in Fig. 2b markierten Resonanzstellen erklärt werden. Resonanz A wird durch die Impedanz der BNN verursacht. Resonanz B entsteht durch einen Serienschwingkreis aus der Induktivität in der BNN zusammen mit den parasitären Kapazitäten im Inverter und der Last. Diese beiden parasitären Kapazitäten oszillieren bei Resonanz C mit der Induktivität der Motorkabel. Da geschirmte Koaxialkabel eine geringere Induktivität aufweisen als isolierte Kabel, tritt diese Resonanz im geschirmten System bei höheren Frequenzen auf als im ungeschirmten System.

Der Gegentaktstrom entsteht hauptsächlich durch den Strom im Zwischenkreis Kondensator und dem daraus resultierenden Spannungsabfall zwischen HV<sup>+</sup> und HV<sup>-</sup>. Dieser Spannungsabfall erzeugt einen Ausgleichsstrom, der sich über die Batterieleitungen und die BNN schließt. Die Störungsart kann mit dem in Fig. 3b dargestellten Modell nachgebildet werden und ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

Fig. 2a shows that the operating point of the inverter mainly influences the level of the noise voltage at the LISN. On the other hand the components of the test setup, for example the type of the used cables, affects the shape and resonance points of the spectrum (see Fig. 2b).

Different simulation models for CM and DM interferences are used to simulate the conducted emissions of the inverter. The origin of the CM current is the falling and rising edge of the voltage between  $HV^{+/-}$  and U, V and W respectively. The resulting current creates the disturbance voltages  $V_{HV+}$  and  $V_{HV-}$  at the LISN. This effect can be modeled with a common-mode source between the short-circuited battery and motor side of the inverter shown in Fig. 3a. Due to the symmetry of the test setup a single-phase common mode equivalent circuit can be found. Two main aspects have to be considered for an exact replication of the CM currents with this model. These are the CM source and the system impedances. The impedances of the individual system components can be measured with an impedance- or network analyzer. The source of the common mode noise can be characterized in the time or the frequency domain. Fig. 4a shows the voltage between U and  $HV^-$  in the time domain during switching of the corresponding half bridge. The rise and fall time as well as the eclipsed oscillation change as a function of the switched voltage and current. These dependencies are reflected in the frequency domain as well (Fig. 4b) and must be taken into account for the simulation model. The marked resonance A, B and C in Fig. 2b can easily be explained with the presented model. Resonance A is caused by the impedance of the LISN. Resonance B is caused by a series resonant circuit of the inductor inside the LISN together with the parasitic capacitances in the inverter and the load. These two parasitic capacitances oscillate at resonance C with the inductance of the motor cable. Since shielded coaxial cables have a lower inductance than isolated cables, this resonance point occurs in the shielded system at higher frequencies than in the unshielded system.

The DM currents come mainly from the voltage ripple across the DC-link capacitor,  $C_{ZK}$ , and its parasitic inductance,  $L_{ZK}$ . This voltage drop generates a current, flowing over the battery cables and the LISN. The resulting disturbance voltage can be simulated with the model illustrated in Fig. 3b and is the subject of current work.

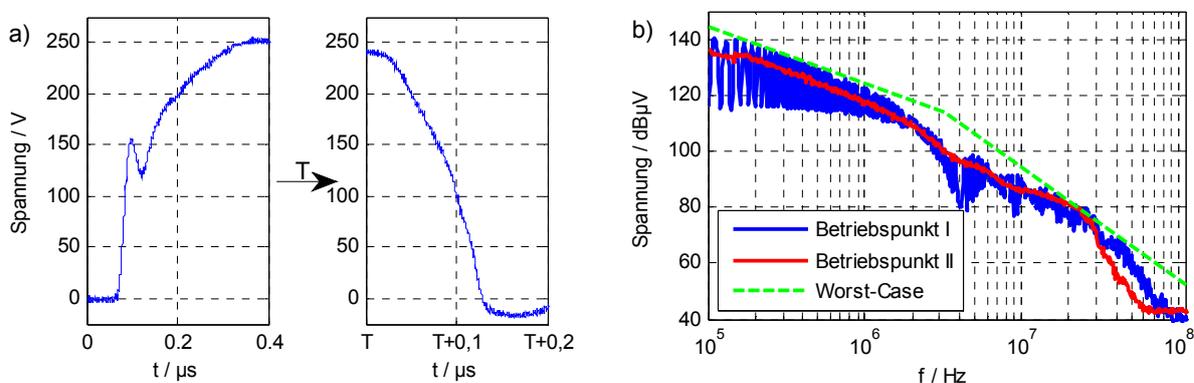


Fig. 4: Quelle der CM-Störung im Zeit- und Frequenzbereich (Betriebspunkt I und II).  
Source of CM currents in time / frequency domain (operating point I and II).

## ▪ Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen

M. Sc. Christian Suttner

Mittelspannungsschaltanlagen werden in elektrischen Verteilnetzen eingesetzt, um in der Mittelspannungsebene Erzeuger und Lasten zu schalten. Der Bereich der Mittelspannung umfasst in der elektrischen Energietechnik Spannungen von 1 kV bis 40 kV. Durch den Einsatz von Vakuumschalttechnik und Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) als Isolationsmedium können praktisch wartungsfreie Schaltfelder mit sehr geringem Platzbedarf realisiert werden. Aus Sicht der Elektromagnetischen Verträglichkeit bringen diese Technologien jedoch, insbesondere im Hinblick auf die Einführung kompakter Sensoren und moderner Kommunikationstechnologien, neue Herausforderungen mit sich. Einerseits erzeugen sowohl Vakuumleistungsschalter als auch gasisolierte Trennschalter, aufgrund der höheren Durchschlagfeldstärke gegenüber Luft, deutlich breitbandigere transiente Störgrößen. Andererseits sind durch die geringeren Isolationsabstände Primär- und Sekundärelemente näher zusammengedrückt, wodurch effektivere Koppelpfade auf die Sekundärtechnik entstehen.

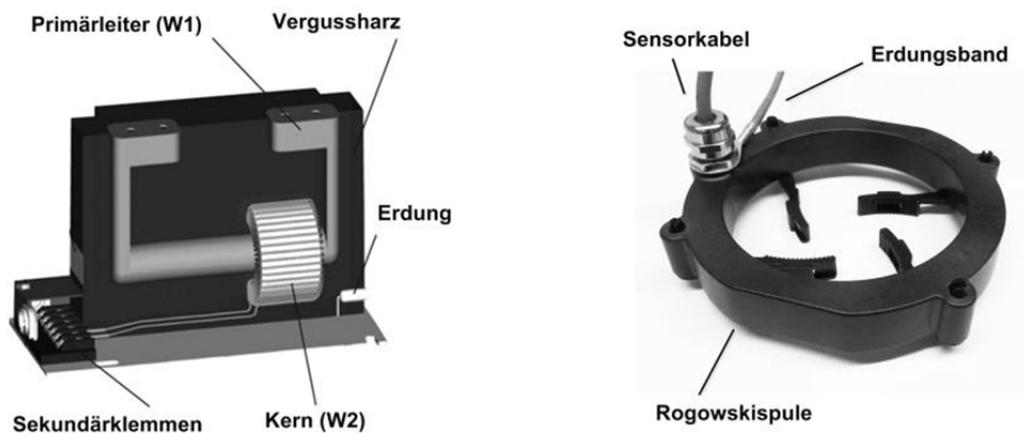


Fig. 1: Konventioneller Stromwandler (links) und kernloser Stromsensor (rechts).  
Conventional current transformer (left) versus rogowski sensor (right).

Die zunehmende Verbreitung von leichten kernlosen Strom- und Spannungssensoren mit niedrigen Signalpegeln sowie der Einsatz von modernen Kommunikationssystemen zur Messwertübertragung in der direkten Umgebung der Schaltfelder verschärfen diese Problematik zusätzlich.

Ziel der Forschungsarbeit ist es, umfassende Klarheit über die elektromagnetischen Vorgänge während Schaltvorgängen in Mittelspannungsschaltanlagen zu schaffen. Es sollen Konzepte zur Überprüfung und Sicherstellung der EMV abgeleitet werden und die bestehenden normativen EMV-Anforderungen auf ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf die neue Sensorgeneration untersucht werden.

## ▪ Electromagnetic Compatibility of Medium Voltage Switchgear

M. Sc. Christian Suttner

Medium voltage switchgear is used in power distribution grids to connect and disconnect electric energy consumers and producers to the medium voltage network. In power grids the medium voltage level ranges from 1 kV up to 40 kV. By the use of vacuum technology and sulphur-hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) as an insulating medium, nearly maintenance-free panels can be realised with very little use of space. From the perspective of electromagnetic compatibility these technologies have led to some new challenges, particularly with regard to the introduction of new current sensors and advanced communications technologies.

On the one hand vacuum breakers and gas insulated disconnectors generate more broadband transients due to the higher breakdown field strength of their insulating medium compared to air. On the other hand due to the reduced insulation distances the primary and secondary parts of the equipment moved closer together. Therefore the electromagnetic interference levels on the secondary side become more severe.

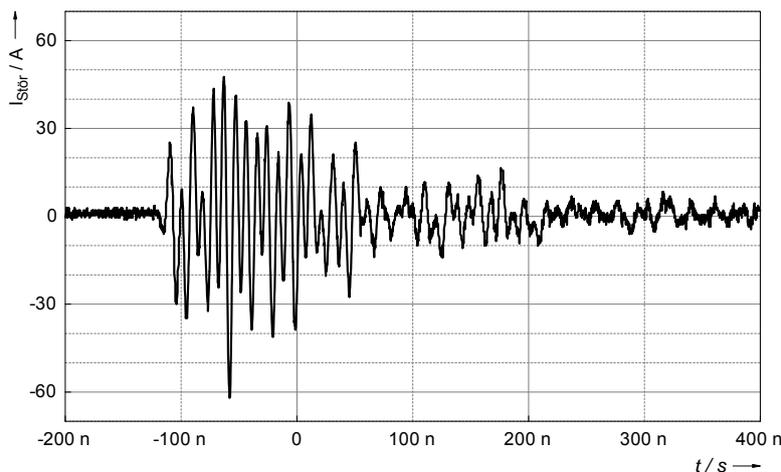


Fig. 1:  
 Transienter Gleichtakt Störstrom auf der Stromsensorleitung (sekundärseitig) während der Trennung eines leerlaufenden Sammelschienenabschnitts.  
 Transient common mode disturbance current in the secondary wiring of the current sensor during a disconnector's opening operation.

The increasing spread of small coreless current and voltage sensors with low signal levels as well as the installation of modern communication bus systems in the close surrounding of the panels intensify this problem further.

The aim of this research is to establish comprehensive clarity on the electromagnetic processes during switching operations in medium voltage switchgear. Concepts for the verification of the EMC shall be derived. Furthermore the existing normative requirements shall be examined for their applicability to the new generation of unconventional voltage and current sensors.

## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN

Die folgenden Beiträge können im Internet unter [www.uni-stuttgart.de/ieh](http://www.uni-stuttgart.de/ieh) abgerufen werden.

L. Rupp, M. Brunner, S. Tenbohlen

*Einfluss dezentraler Wärmepumpen auf die Netzausbaukosten des Niederspannungsnetzes.*

IEEE Power and Energy Summit (PESS) 2015, Dortmund, 13.-14. Januar 2015

P. Hillenbrand, S. Tenbohlen

*Ursachen leitungsgebundener Störungen eines KFZ-Inverters im CISPR25-Komponententest.*

Elektrotechnik & Informationstechnik, Heft 3.2015, S. 149-154, Springer Verlag, Wien

M. Nemati, T. Zöller, S. Tenbohlen, L. Tao, H. Müller, M. Braun

*Optimal Energy Management System for Future Microgrids with Tight Operating Constraints.*

12th Int. Conference on the European Energy Market (EEM), Lissabon, Portugal, May 19-22, 2015, session S20

K. Frey, K. Rudion, J. Christian

*Optimal Operation Strategy for VSC HVDC Links within an Interconnected Power System.*

CIGRE International Symposium: Across Borders – HVDC Systems and Market Integration, Lund, Schweden, 26.-27. Mai 2015, Paper No. 342

M. Brunner, K. Rudion, S. Tenbohlen

*Voltage Support in Distribution Grids Using Heat Pumps.*

CIREN 2015, 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Lyon, Frankreich, June 15-18, 2015, Paper No. 1303

G. Walker, H. Nägele, F. Kniehl, A. Probst, M. Brunner, S. Tenbohlen

*Application of Cluster Reference Grids For An Optimized Grid Simulation.*

CIREN 2015, 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Lyon, Frankreich, June 15-18, 2015, Paper No. 0753

C. Kattmann, K. Rudion, S. Tenbohlen

*Clustering of Smart Meter Data for Data Compression and Fast Power Flow Computation.*

CIREC 2015, 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Lyon, Frankreich, June 15-18, 2015, Paper No. 1298

P. Wiest, K. Rudion, A. Probst

*New Hybrid Planning Approach For Distribution Grids with a High Penetration of RES.*

CIREC 2015, 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Lyon, Frankreich, June 15-18, 2015, Paper No. 1110

P. Seitz, E. Gulski, M. Wild, F. de Vries

*Long lengths transmission power cables on-site testing up to 500 kV by damped AC voltages.*

Jicable 2015, 9th International conference on Insulated Power Cables, Versailles, France, June 21-25, 2015, Paper No. D2.2

D. Schneider, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen, W. Koehler

*Radiated Emissions of an Electric Drive System Estimated on a Bench Using Disturbance Currents and Transfer Functions.*

IEEE Transactions on EMC, Vol. 57, No. 3, June 2015, pp. 311-321,  
doi: 10.1109/TEMC.2015.2401735

ETG-Taskforce Wärmemarkt, Mitwirkung von M. Brunner an der VDE-Studie

*Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungsanlagen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien.*

Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt, Juni 2015

M. Nemati, K. Benimmar, S. Tenbohlen, L. Tao, H. Müller, M. Braun

*Optimization of microgrids short term operation based on an enhanced genetic algorithm.*

IEEE PowerTech conference, Eindhoven, Niederlande, June 29 - July 2, 2015,  
Paper No. 476823

S. Eilenberger, D. Groß, K. Rudion, S. Tenbohlen, I. Berber

*Modern Voltage Regulation Methods for Network Planning and Operation in Low Voltage Grids.*

PowerTech 2015, Towards Future Power Systems and Emerging Technologies, Eindhoven, Niederlande, June 29 - July 2, 2015, Paper No. 474136

P. Wiest, K. Rudion, A. Probst

*Weather Data-based Load Profile Modeling for Grid Expansion Planning.*

PowerTech 2015, Towards Future Power Systems and Emerging Technologies, Eindhoven, Niederlande, June 29 - July 2, 2015, Paper No. 456708

K. Frey, K. Rudion, J. Christian

*Betriebsführungsstrategien für die optimale Integration von HGÜ-Strecken in Deutschland.*

ew Magazin für die Energiewirtschaft, Heft 07/2015

C. Suttner, S. Tenbohlen, W. Ebbinghaus

*Impact of Rogowski Sensors on the EMC performance of medium voltage power substations.*

Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden, August 16-22, 2015, Paper ID 5141, pp. 203-208

P. Hillenbrand, C. Keller, S. Spanos, S. Tenbohlen

*Understanding Conducted Emissions from an Automotive Inverter Using a Common-Mode Model.*

Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden, August 16-22, 2015, Paper ID 5182, pp. 685-690

M. Djamali, S. Tenbohlen

*A Dynamic Top Oil Temperature Model for Power Transformers with Consideration of the Tap Changer Position.*

19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Tschechien, August 23-28, 2015, Conference Proceedings, Paper No. 273

M. Djamali, S. Tenbohlen, G. Walker

*Assessment of the Dynamic Overload Capability of Distribution Transformers.*

19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Tschechien, August 23-28, 2015, Conference Proceedings, Paper No. 275

M. Beltle, S. Tenbohlen

*Diagnostic Interpretation of Mechanic Oscillations of Power Transformers.*

19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Tschechien, August 23-28, 2015, Conference Proceedings, Paper No. 508

M. Beltle, M. Schühle, S. Tenbohlen

*Influences of Direct Currents on Power Transformers Caused by AC - HVDC Interactions in Hybrid Grids.*

19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Tschechien, August 23-28, 2015, Conference Proceedings, Paper No. 300

F. Vahidi, S. Tenbohlen, M. Roesner, Ch. Perrier, T. Stirl

*The influence of moisture during the electrical conductivity measurement on the high density impregnated pressboard.*

19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Tschechien, August 23-28, 2015, Conference Proceedings, Paper No. 386

A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen, K. Rudion

*Effects of State Estimation Accuracy on the Voltage Control of Low Voltage Grids.*

2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST) / CIGRE SC C6 Colloquium, Vienna, Austria, September 8-11, 2015, paper in session SS02

M. Beltle, S. Tenbohlen

*Power Transformer Diagnosis based on Mechanical Oscillations.*

CIGRE SC A2 Colloquium 2015, Shanghai, China, Sept. 20-25, 2015, Paper No. FP0669

M. Siegel, S. Tenbohlen, S. Coenen, B. Dolata, G. Luna, S. Louise

*Practical Sensitivity of online UHF PD Monitoring on Large Power Transformers.*

CIGRE SC A2 Colloquium 2015, Shanghai, China, Sept. 20-25, 2015, Paper No. FP0696

S. Tenbohlen, M. Djamali

*A Dynamic Top Oil Temperature Model for Online Assessment of Overload Capability of Power Transformers.*

CIGRE SC A2 Colloquium 2015 (participation of SC A3 & SC B3), Shanghai, China, Sept. 20-25, 2015, Paper No. FP0672

S. Tenbohlen, J. Jagers, G. Bastos, B. Desai, B. Diggin, J. Fuhr, J. Gebauer, M. Krüger, J. Lapworth, P. Manski, A. Mikulecky, P. Müller, C. Rajotte, T. Sakai, Y. Shirasaka, F. Vahidi

*Development and Results of a Worldwide Transformer Reliability Survey.*

CIGRE SC A2 Colloquium 2015, Shanghai, China, Sept. 20-25, 2015, Paper No. FP0684

A. Abdel-Majeed, D. Groß, K. Rudion, S. Tenbohlen

*Optimale Integration von erneuerbaren Energien mittels Zustandsschätzung in Verteilnetzen.*

Ingenieurspiegel, Heft 4/2015, S. 44-46

K. Frey, K. Rudion und J. Christian

*Optimale Integration von HGÜ-Leitungen in das deutsche Verbundsystem.*

Ingenieurspiegel, Heft 4/2015, S. 48-49

S. Beckler, J. Lehner, A. Arnold, A. Kaptue Kamga, K. Frey, K. Rudion

*DC Fault Currents for FB-MMC HVDC with Bipolar Configuration.*

International ETG-Congress 2015, Bonn, 17.-18. November 2015, Poster 1.45

M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. Shayegani-Akmal, H. Mohseni

*Effect of Terminating and Shunt Resistors on the FRA Method Sensitivity.*

International Power System Conference, Teheran, Iran, November 23-25, 2015

T. Stirl, J. Harthun, C. Perrier, F. Devaux, C. Carlon, S. Tenbohlen, N. Schmidt  
*Experiences with Green Power Transformers.*

Matpost 2015, Lyon, France, November 24-25, 2015, Session 3, Paper No. 0033

S. Tenbohlen, J. Jagers, G. Bastos, B. Desai, B. Diggin, J. Fuhr, J. Gebauer, M. Krüger, J. Lapworth, P. Manski, A. Mikulecky, P. Müller, C. Rajotte, T. Sakai, Y. Shirasaka, F. Vahidi

*Transformer Reliability Survey.*

Brochure 642, WG A2.37 (CIGRE), December 2015

## 7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- seit 2013 VDE ETG Task Force „Strom im Wärmemarkt“: M. Brunner.  
Die Studie der Task Force wurde im Juni 2015 veröffentlicht.
- 29.-30.1.15 Vortrag bei der 5. Internationalen ETP-Konferenz Unterirdische  
Hochleistungsübertragung: „Moderne Vor-Ort Prüfung und  
Zustandsbestimmung von Erdkabeln“, Prof. Tenbohlen
- 12.2.15 ERA-Net Smart Grids Plus Workshop, Karlsruhe, Prof. Rudion
- 19.2.15 Workshop von DKE und ETG / Taskforce Gleichspannungs-  
verteilnetze, Frankfurt, Allianz-Gebäude, Prof. Rudion
- 24.-25.2.15 Sitzung der CIGRE JWG A2/D1.51 in Dresden,  
Teilnehmer: Prof. Tenbohlen, M. Siegel
- 3.-4.3.15 Schwetzingener Energiedialog, Prof. Tenbohlen
- 5.-6.3.15 1. Jahreskonferenz von SmartGridsBW, „Flexibilität ist ein Produkt“,  
Mannheim, Prof. Tenbohlen, A. Abdel-Majeed, S. Eberlein
- 13.4.15 Sitzung des FB Q2 beim VDE in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 21.-22.4.15 Teilentladungen in elektrisch hoch beanspruchten Isolierungen 2015,  
Technische Akademie Esslingen (TAE),  
Beiträge: S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Wild, Teilnehmer: B. Adam
- 28.4.15 Sitzung des ETG-Vorstands in Frankfurt/Main, Prof. Tenbohlen
- 20.5.15 Kongresszentrum Karlsruhe: Smart-Grids-Gespräche über Forschung  
und Lehre – Aktuelle Entwicklungen und künftige Bedarfe,  
Prof. Tenbohlen, P. Wiest
- 26.-27.5.15 CIGRE International Symposium: Across Borders – HVDC Systems  
and Market Integration, Lund, Schweden,  
Teilnehmer/Beiträge: K. Frey
- 11.6.15 Energiewirtschaftlicher Innovationstag der Stadtwerke Heidelberg:  
Einstiegsvortrag zum Thema Zukunft der  
Energieversorgung/Energieinfrastruktur/Smart Grid, Prof. Tenbohlen
- 15.-18.6.15 23rd International Conference & Exhibition on Electricity Distribution  
(CIRED), Lyon, Frankreich, Teilnehmer/Beiträge:  
Prof. Rudion, M. Brunner, C. Kattmann, P. Wiest
- 25.6.15 DAK CIGRE SC C4-Sitzung in Stuttgart,  
Prof. Tenbohlen
- 29.6-2.7.15 PowerTech 2015, Towards Future Power Systems and Emerging  
Technologies, Eindhoven, Niederlande,  
Teilnehmer/Beiträge: Prof. Rudion, S. Eilenberger, M. Nemati, P.  
Wiest

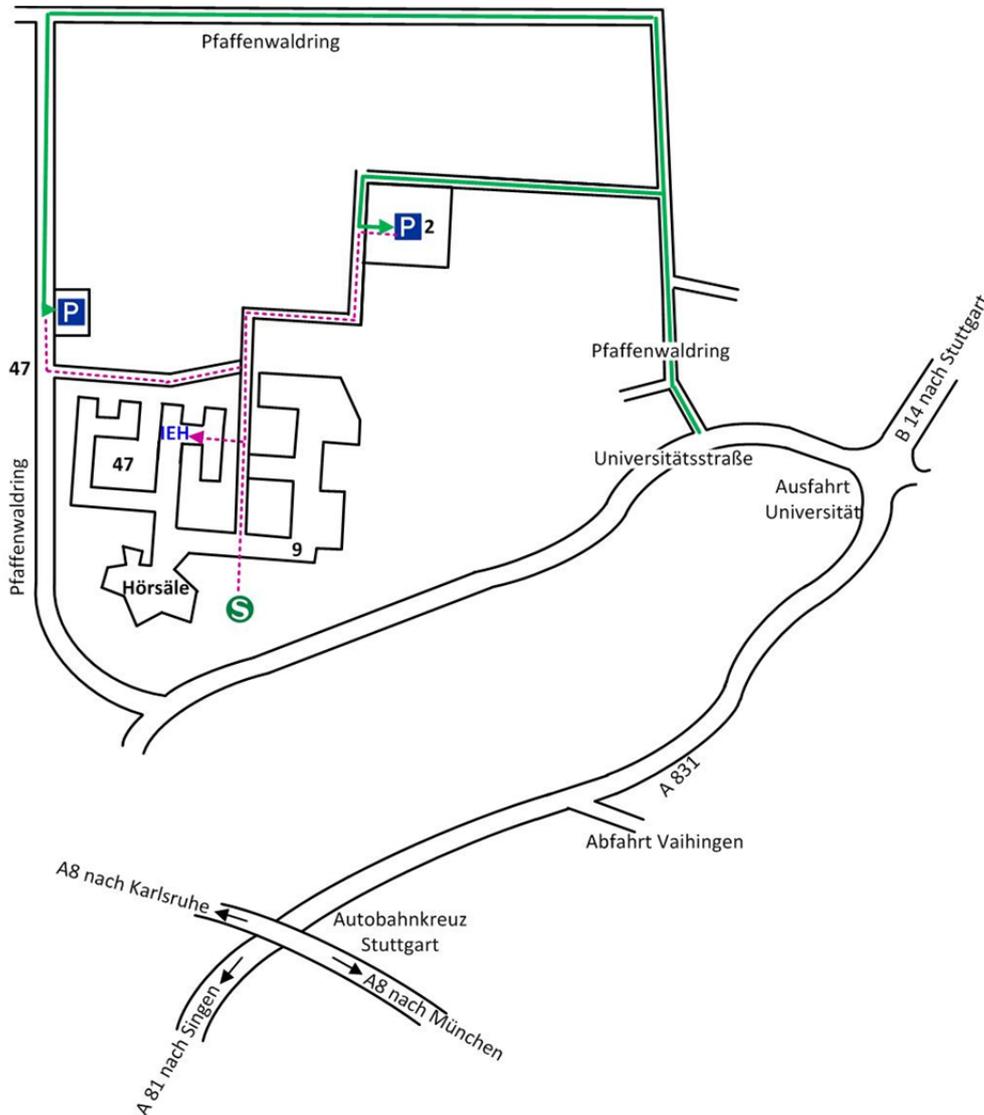
- 3.7.15 Vorbereitungssitzung für die EMV 2016 in Düsseldorf bei Mesago, Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 24.7.15 Fest-Kolloquium „60 Jahre Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik“ an der Universität Stuttgart
- 26.-30.7.15 IEEE PES General Meeting in Denver, USA, Prof. Rudion
- 29.-30.7.15 Sitzung der CIGRE Arbeitsgruppe D1.63 „Partial discharge detection under DC voltage stress“ in Berlin, Beitrag von P. Arnold
- 17.-21.8.15 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden, Teilnehmer/Beiträge: C. Suttner, P. Hillenbrand, D. Schneider, Prof. Tenbohlen
- 23.-28.8.15 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Tschechien, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, M. Beltle, M. Djamali, F. Vahidi
- 25.8.15 CIGRE JWG A2/D1.51 Meeting, Pilsen, Tschechien, Teilnehmer: Prof. Tenbohlen, M. Beltle
- 8.-11.9.15 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST) / CIGRE SC C6 Colloquium, Vienna, Austria, Teilnehmer/Beitrag und Session Chairman: A. Abdel-Majeed
- 20.-25.9.15 CIGRE SC A2 Colloquium „Challenges of the future for transformers & other substation equipment“, Shanghai, China, Prof. Tenbohlen
- 7.10.15 DAK CIGRE A2, Berlin, Prof. Tenbohlen
- 21.10.15 DK CIGRE, Mannheim, Prof. Tenbohlen
- 11.-12.11.15 International Energy Systems in Transition: Perspectives from Science and Industry - The 15th IERE General Meeting & German Forum, Berlin, Prof. Rudion
- 19.11.15 ETG Vorstandssitzung, Bonn, Prof. Tenbohlen
- 24.-25.11.15 Sitzung VDE ETG V2, Essen, Prof. Rudion
- 25.11.15 Fachdialog „Spannungsschwankungen / kurze Versorgungsunterbrechungen“, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Stuttgart, Beitrag: C. Kattmann
- 1.-2.12.15 Vorträge bei Technische Akademie Esslingen, Prof. Tenbohlen
- 2.12.15 Kongress „Energiewende mit intelligenten Netzen - Smart Grids in Baden-Württemberg“ in Fellbach, Teilnehmer: Prof. Rudion, Prof. Tenbohlen

## 8. PRÜFEINRICHTUNGEN

Stoßspannungsanlagen	bis 2000 kV, 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
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluftantenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m <sup>3</sup> (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-Prüfgeräte	div. kleinere für die Nachbildung elektrostatischer Entladungen, Einkopplung von Störspannungsimpulsen ins Netz zur Prüfung von Bauteilen und Geräten
EMV-Absorberräume	10 m und 3 m Messabstand, mit Leistungsverstärkern, div. Antennen, Feldmesssystem, Videoüberwachung über LWL, Messempfänger bis 3 GHz, TEM-Messzelle
Klimakammer	3 x 3 x 3 m <sup>3</sup> , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C
Einpolige SF6-Anlage	Un = 525 kV, Länge mit Abzweigen ca. 25 m
Einpolige SF6-Anlage	Un = 245 kV, Länge mit Abzweigen ca. 5 m
Digitale und analoge Messgeräte	für periodische und einmalige Vorgänge mit Abtastraten bis über 20 GHz, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren
Teilentladungsmessgeräte	zur phasenaufgelösten Messung und Interpretation
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlagspannungsmessgerät, Gaschromatographen
Power Quality Analyzer	dreiphasige Strom- und Spannungsmessung bis zur 50. Harmonischen, Transienten bis 2 MHz

## 9. LAGEPLÄNE

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

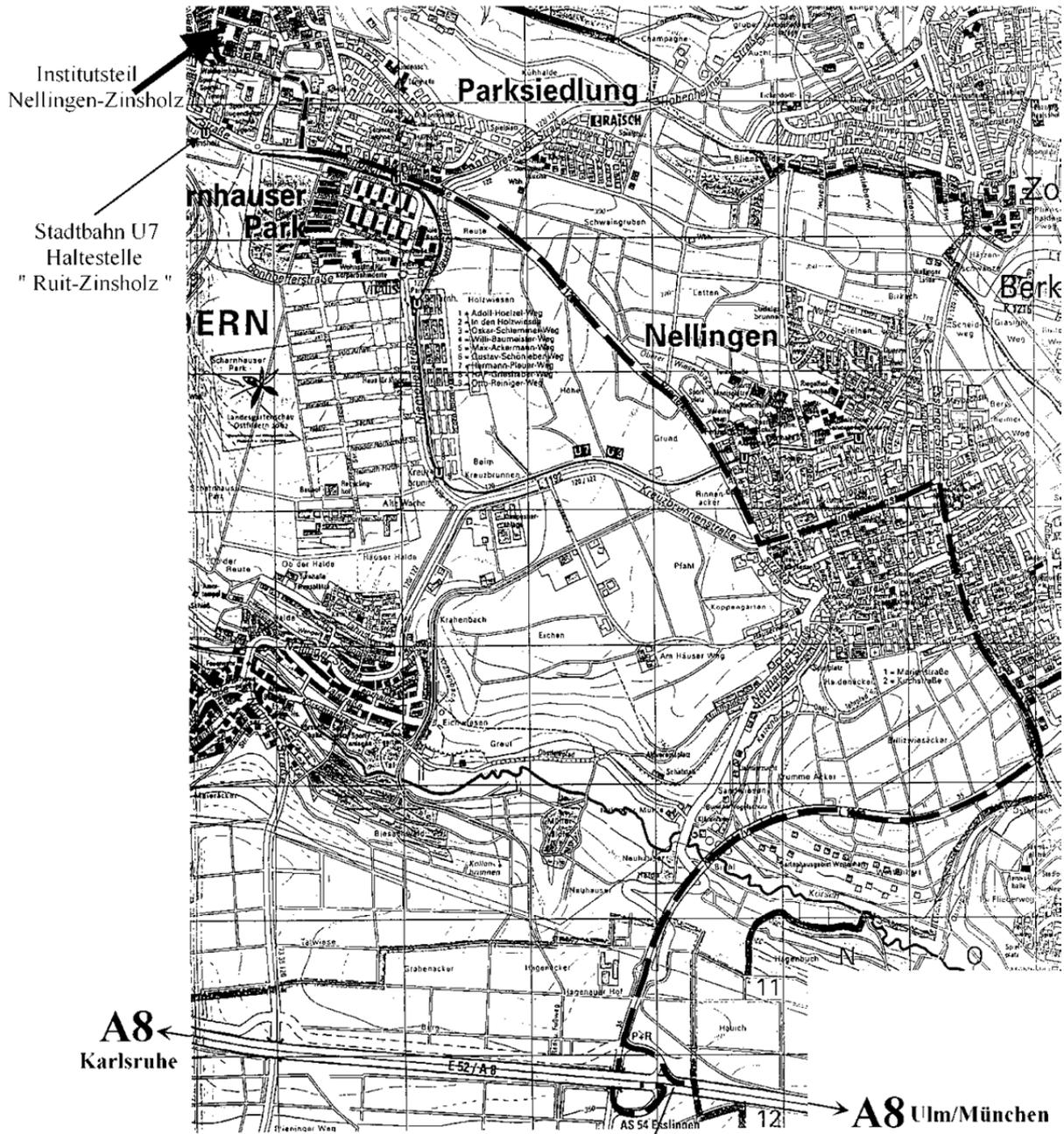


### Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

S-Bahnen der Linien S1, S2 und S3

Haltestelle „Universität“, Ausgang „Universitätszentrum“

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



**Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:**

Von Stuttgart Hauptbahnhof: Stadtbahn U7  
(Fahrtdauer 20 Min.)

**Anschlußstelle  
54 Esslingen/Ostfildern**