### INHALT

| 1. | VOF                                | VORWORT2                                |     |
|----|------------------------------------|---|-----|
| 2. | PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS |   | 6   |
| 3. | LEHRE                              |   |     |
|    | 3.1                                | VORLESUNGEN                             |     |
|    | 3.2                                | PRAKTIKA                                | 12  |
|    | 3.3                                | EXKURSIONEN                             | 13  |
|    | 3.4                                | STUDENTISCHE ARBEITEN                   | 14  |
| 4. | PRC                                | MOTIONEN                                | 31  |
| 5. | FORSCHUNGSARBEITEN                 |   | 32  |
|    | 5.1                                | HOCHSPANNUNGSTECHNIK                    |     |
|    | 5.2                                | SMART POWER GRIDS                       | 76  |
|    | 5.3                                | ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT      | 100 |
| 6. | VER                                | ÖFFENTLICHUNGEN                         | 112 |
| 7. | MIT                                | MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE 118 |     |
| 8. | PRÜ                                | PRÜFEINRICHTUNGEN120                    |     |
| 9. | LAG                                | LAGEPLÄNE 121                           |     |



### 1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2013 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Die Energiewende ist nicht erst seit der Bundestagswahl ins Stocken geraten. So erfolgreich das Erneuerbare-Energie-Gesetz in seiner Anfangszeit war, die ersten Schritte in Richtung einer auf erneuerbare Energien basierenden Stromversorgung zu machen, so problematisch ist es nun, einen Großteil der im Netz installierten Erzeugungseinheiten durch bevorzugte Einspeisung mit für viele Jahre garantierter Vergütung den anderen Marktteilnehmern gegenüber zu bevorteilen. Hier wird eine neue Regelung, die sich mehr an Gesichtspunkten der Marktwirtschaft und der Versorgungssicherheit orientiert, notwendig werden, um der Energiewende wieder neuen Schwung zu verleihen.

Nichtsdestotrotz ist das Interesse an der Energiewende und am Netzausbau aus studentischer Sicht weiter ungebrochen, so dass wir in diesem Jahr hinsichtlich der Anzahl der Studierenden in unseren Vorlesungen und mit über 60 Abschlussarbeiten eine neue Bestmarke aufgestellt haben. Es freut uns daher besonders, dass PD Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion den Ruf auf die W3-Professur "Netzintegration erneuerbarer Energien" angenommen hat. Seit dem 1. Dezember vertritt er das Thema in Forschung und Lehre. Er wird die Auswirkungen auf die Struktur und den Betrieb des elektrischen Netzes sowohl im Offshore- als auch im Onshore-Bereich untersuchen, die sich durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien ergeben. Wir wünschen Herrn Dr. Rudion viel Erfolg und Freude mit unseren Studenten.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Über 40 Veröffentlichungen dokumentieren eindrucksvoll unsere Aktivitäten. Best Paper Awards haben Herr Beltle bei der ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel" vom 14.-16.11.2012 in Fulda und Herr Schneider bei der "EMC Europe 2013" vom 2.-6.9.2013 in Brugge/Belgien bekommen. Herr Reuter hat den "IEEE EMC Best Student Paper Award" beim "International Symposium on Electromagnetic Compatibility" vom 5.-9.8.2013 in Denver/Colorado verliehen bekommen. Einen Großteil dieser Veröffentlichungen können Sie auch auf unserer Homepage (<u>www.uni-stuttgart.de/ieh</u>) finden.

Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns in diesem Jahr fünf neue Mitarbeiter einzustellen, die sich neuer Fragestellungen annehmen werden. M. Sc. Christian Suttner wird auf dem Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit von Mittelspannungs-Schaltanlagen arbeiten. Der Leistungstransformator steht im Mittelpunkt zweier Arbeiten. M. Sc. Mohammad Djamali wird Fragen zum thermischen Monitoring bearbeiten, und M. Sc. Mario Gnädig wird den Einfluss von Gleichströmen auf das Betriebsverhalten untersuchen.



Das Thema Gleichspannung wird auch von Dipl.-Ing. Katharina Frey unter dem Stichwort Betriebsführung von HVDC-Anlagen weiter untersucht werden. M. Sc. Pascal Wiest wird Verfahren zur probabilistischen Netzplanung in der 110kV-Spannungsebene untersuchen.

2014 wird das Institut wieder Gastgeber des traditionsreichen Stuttgarter Hochspannungssymposiums sein, das wir am 11. und 12. März im bekannten Rahmen in der Filderhalle in Leinfelden durchführen werden. Der Umbau der Energienetze wird im Mittelpunkt dieser Veranstaltung stehen. So haben wir als Titel der Veranstaltung "Neue Konzepte und Systemkomponenten für die Netze der Zukunft" gewählt. Dankenswerterweise haben sehr renommierte Experten verschiedener Energieversorgungsunternehmen und Hersteller einen Beitrag zugesagt, so dass der unabhängige und vor allem sehr praxisnahe Charakter dieser Veranstaltung gewahrt bleiben wird. Das ausführliche Programm und weitere Informationen hierzu finden Sie auf unserer Homepage www.uni-stuttgart.de/ieh/symposium. Wir freuen uns schon jetzt auf interessante Beiträge zu diesem hochaktuellen Thema und die traditionell lebhaften Diskussionen.

Allen unseren Freunden möchte ich an dieser Stelle recht herzlich für Ihre Anregun-gen und Ihre Hilfe danken. Mein besonderer Dank gilt jenen Firmen, die uns durch Aufträge und Spenden unterstützt haben. Wir hoffen, dass dieser Jahresbericht auch dazu beiträgt, die bestehenden Kooperationen auszubauen und neue Kontakte zu knüpfen. Dazu möchte ich besonders auf das Kapitel 3.4 Studentische Arbeiten dieses Jahresberichtes hinweisen, in dem wir zu Ihrer Information auch Kurzfassungen der durchgeführten Master- und Diplomarbeiten anführen.

Für das kommende Jahr wünsche ich Ihnen Gesundheit. Glück und alles Gute. auch im Namen von Herrn Dr. Rudion, Herrn Professor Feser und allen Mitarbeitern des Instituts.

Stuttgart, im Dezember 2013 Prof. Stefan Tenbohlen



### PREFACE

Dear friends!

As usual, we would like to inform you about our activities with our annual report 2013.

The growth of renewable energies slowed down in Germany even before the elections to the German Bundestag. In the beginning the Renewable Energy Law was very successful to spread renewable energies into the power grid. But now it is no longer justified to privilege some participants of the electricity market by supporting them with financial benefit and acceptance guarantee.

To strengthen the transition to renewable energies we surely need a change of the regulations taking into account the rules of economy and service security.

Nevertheless we are very glad to see an increasing group of students being interested in the energy turnaround and the electric power grid extension. In 2013 our institute set a new record concerning the number of students in lectures as well as concerning the number of more than 60 graduates.

So we are glad to announce that PD Dr.-Ing. habil. Krzysztof Rudion joined the institute as a professor for grid integration of renewable energies on 1<sup>st</sup> of December. He will analyze the changes of structure and operation in the electric power grid resulting from the increased use of renewable energy, offshore as well as onshore. We wish Dr. Rudion success and pleasure for his work at the University of Stuttgart.

Concerning our scientific work we look back on a very successful year. More than 40 publications show the large variety of our research activities. Three members of our institute received best paper awards: Michael Beltle at the ETG-Symposium "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel" in Fulda in November last year, Daniel Schneider at the EMC Europe 2013 in Brugge/Belgium in September and Martin Reuter got the "IEEE EMC Best Student Paper Award" at the International Symposium on Electromagnetic Compatibility" in Denver/USA in August. You can download most of our publications from our homepage <u>www.uni-stuttgart.de/ieh</u>.

In 2013 a large number of qualified IEH-graduates and a lot of industrial encouragements enabled us to employ five new researchers. M. Sc. Christian Suttner will work in the field of electromagnetic compatibility of MV switchgear. Two research subjects focus their work on power transformers. M. Sc. Mohammad Djamali will be engaged in the thermal monitoring and M. Sc. Mario Gnädig will analyze the operating performance of power transformers under the influence of DC currents. The issue of high voltage direct current transmission will be investigated by Dipl.-Ing. Katharina Frey, focusing her work on the control of HVDC installations. M. Sc. Pascal Wiest explores methods for the probabilistic network planning of the 110 kV voltage level grids.



On March 11 and 12, 2014, the traditional Stuttgart High Voltage Symposium will take place in the Filderhalle in Leinfelden. The Symposium will focus on the conversion of the electric power networks. This year's title will be "New Conceptions and System Components for Future Power Networks". Our conference (including an exhibition) will be supported by several industrial partners. This preserves the independent and very practical character of the symposium. Please find more information and a detailed programme under www.uni-stuttgart.de/ieh/symposium. We look forward to the presentation of new developments and results and to interesting discussions.

Finally I would like to send my sincere thanks to all our friends, who have contributed to our success in many ways. Especially I would like to express my gratitude to all those partners who supported us with research contracts and donations. We hope that our annual report will strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. For this purpose I would like to refer to chapter 3.4, where you find abstracts of our graduate's work.

I am looking forward to continued close contact and co-operation with you also on behalf of Dr. Rudion, Professor Feser and all our members of staff.

Our best wishes accompany you into the next year.

Stuttgart, December 2013 Prof. Stefan Tenbohlen



### 2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

|                         | e-mail:   | Telefon / phone: |
|-------------------------|---|------------------|
|                         | vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de   | +49 (0)711-      |
|                         | firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de  |                  |
| Institutelaitor /       |   |                  |
| Head of Institute:      | Prof. Dr. Ing. Stefan TENROHI EN  | 695 67971        |
|                         | FIOL DL-ING. STEIRIT LINDOTILLIN  | -005-07071       |
| Vertretungs-Professur I | Netzintegration erneuerbarer Energien:<br>PD Dr -Ing_habil                    |                  |
|                         | Krzysztof RUDION (ab 1.12.2013)   | -685-67872       |
| Prof. im Ruhestand:     | Prof. DrIng. Dr. h. c. Kurt FESER   | -685-67870       |
| Lehrbeauftragte:        | DiplIng. Ulrich SCHERER<br>TransnetBW GmbH                                    | -21858-3437      |
|                         | DiplIng. Thomas RUDOLPH<br>Schneider Electric Energy GmbH                     |                  |
|                         | DrIng. Markus PÖLLER<br>Moeller & Poeller Engineering GmbH                    |                  |
| Oberingenieure:         | DrIng. Wolfgang KÖHLER<br>( <i>Leiter des Hochspannungslabors Ostfildern)</i> | -341 2075        |
|                         | DrIng. Ulrich SCHÄRLI   | -685-67878       |
| Akademische Mitarbeite  | er /  |                  |
| Scientific Staff:       | M. Sc. Ahmad ABDEL-MAJEED   | 685-69193        |
|                         | DiplIng. Milos ANDELKOVIC (bis 31.3.2013)                                     |                  |
|                         | DiplIng. Philipp ARNOLD   | 341 2075         |
|                         | DiplIng. Michael BELTLE   | 685-68061        |
|                         | DiplWiIng. Marc BRUNNER   | 685-69197        |
|                         | DiplIng. Dennis BURGER (bis 30.4.2013)  |                  |
|                         | DiplIng. Simon BUROW  | -341 2075        |
|                         | M. Sc. Mohammad DJAMALI (ab 1.6.2013)   | 685-68270        |
|                         | DiplIng. Simon EILENBERGER  | 685-69194        |
|                         | DiplIng. Katharina FREY (ab 6.5.2013)   | 685-67838        |
|                         | M. Sc. Mario GNÄDIG (ab 14.10.2013  | 685-67857        |

| I IEH  | Personelle Besetzung des Instituts   | 7   |
|--|--|---|
|  | DiplIng. Maximilian HEINDL (bis 31.1.2013)<br>DiplIng. Jens HOHLOCH<br>DiplIng. Mark JOVALEKIC<br>DiplIng. Christoph KATTMANN<br>DiplIng. Andreas MÜLLER   | -341 2075<br>-685-67858<br>-685-67874<br>-685-67868   |
|  | M. Sc. Mohsen NEMATI<br>DiplIng. Alexander PROBST (bis 30.11.2013)   | -685-67869  |
|  | DiplIng. Martin REUTER<br>DiplIng. Nicolas SCHMIDT<br>DiplIng. Daniel SCHNEIDER<br>DiplIng. Martin SIEGEL<br>M. Sc. Christian SUTTNER (ab 1.4.2013)<br>M. Sc. Farzaneh VAHIDI<br>M. Sc. Pascal WIEST (ab 18.11.2013)<br>DiplIng. Manuel WILD   | -685-67817<br>-685-67809<br>-685-67889<br>-685-67867<br>-341 2075<br>-685-69195<br>-685-69196<br>-341 2075                            |
| Sekretariat /  |  | -341 2073   |
| Secretary:   | Nicole SCHÄRLI<br>(Institutsteil Stuttgart-Vaihingen)  | -685-67870  |
|  | Renate KINSKI<br>( <i>Hochspannungslabor Ostfildern)</i><br>Hermine LWOWSKI  | -341 2075<br>-685-67876   |
| Technische Angestellte   | e /  |   |
| Technical Staff:   | Erwin BECK, Zentralwerkstattleiter<br>Metin DEMIRHAN, Mechaniker<br>Timon GOLD, Mechanikermeister (ab 1.9.2013)<br>Daniel HARTICH, Auszubildender (ab 1.9.2013)<br>Michael HERDTLE, Mechaniker<br>Herbert KAUSSEN, Elektrotechniker<br>Edona KUQI, Auszubildende (ab 1.9.2013)<br>Dieter MAJEWSKI, Mechaniker<br>Hartmut RÖNISCH, Elektrotechniker<br>Rudolf van de WEYER, Elektromeister<br>Christian WÖLZLEIN, IT-Systemkaufmann | -685-67847<br>-685-67847<br>-685-67847<br>-341 2075<br>-341 2075<br>-685-67847<br>-685-67847<br>-685-67856<br>-341 2075<br>-685-67863 |
| Gastwissenschaftler /<br>Visiting scientists:<br>M. Sc. Alexandra<br>M. Sc. Grzegorz<br>Prof. DrIng. Zo<br>Dr. Steven D. M<br>Dr. Su SU WIN,<br>M. Sc. Mohamad | a CIURIUC, Bukarest (bis 21.10.2013)<br>MALINOWSKI, Poznan (3.630.11.2013)<br>ran RADAKOVIC, Belgrad (19.618.8.2013)<br>ITCHELL, Callaghan (19.819.10.2013)<br>Myanmar (ab 1.11.2013)<br>d GHAFFARIAN NIASAR, KTH Stockholm (ab 1.11   | .2013)  |



### 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 Elektrische Energienetze I

Wintersemester, 2 V, 2 S, für 5. Semester Bachelor

- Aufgaben des elektrischen Energienetzes
- Einpolige Ersatzschaltungen der Betriebselemente f
  ür symmetrische Betriebsweise
- Lastflussberechnung
- Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze
- Kurzschlussströme bei symmetrischem Kurzschluss
- Symmetrische Komponenten
- Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss

#### 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
- Netzrückwirkungen
- HGÜ

#### PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN UND AKADEMISCHE MITARBEITER 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
- Netzqualität und Netzstabilität
- Netzbetriebsführung (z. B. Spannungs- und Frequenzhaltung)
- Netzanschlussbedingungen
- Netzplanung



#### PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN DR.-ING. W. KÖHLER Hochspannungsprüf- und -messtechnik

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

- Erzeugung hoher Prüfspannungen
- Erzeugung hoher Prüfströme
- Messung hoher Spannungen
- Messung hoher Ströme
- Zerstörungsfreie Hochspannungsmessungen
- Prüfvorgänge und statistische Auswerteverfahren
- Abmessungen, Erdung und Abschirmung in Hochspannungslaboratorien

#### PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN DR.-ING. W. KÖHLER

#### Elektromagnetische Verträglichkeit

Sommersemester, 2 V, für 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

#### 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

#### DR.-ING. M. PÖLLER

#### Netzintegration von Windenergie

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

#### PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN 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 wurden von den elektrotechnischen Instituten der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik speziell für dieses Grundlagenpraktikum entwickelt und eingerichtet. Herr Dr. Schärli hat im Auftrag der Fakultät die Gesamtorganisation des Grundlagenpraktikums inne.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

- Sicherheitsseminar
- Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie
- Entladungen bei hohen Spannungen
- *Erzeugung und Messung von Stoßspannungen*

#### DR.-ING. W. KÖHLER Praktische Übungen im Labor

Im Zuge der Umstellung von Diplom auf Bachelor/Master wurde das Fachpraktikum Hochspannungstechnik durch die "Praktischen Übungen im Labor" ersetzt. Diese werden am Institut in Form von kleinen Forschungsarbeiten realisiert, die im Team von max. vier Studierenden bearbeitet werden, betreut von akademischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Die Studierenden eignen sich dabei sowohl fachliche Kenntnisse an als auch das Wissen, wie man ein Projekt im Team plant und bearbeitet. Ebenso werden "Praktische Übungen im Labor" auf dem Gebiet der Elektrischen Netze angeboten.

#### DR.-ING. U. SCHÄRLI / M.SC. MOHSEN NEMATI Praktikum in Erneuerbare Energien

Das Institut bietet für den Studiengang "Erneuerbare Energien" 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 mehrere Institute verschiedener Fakultäten mitwirken, in unserer Hand.



### 3.3 EXKURSIONEN

#### 24. Januar 2013, ganztägig

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

#### 23. April 2013, 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

21. – 25. Mai 2013: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei

- Maschinenfabrik Reinhausen Stufenschalter
- SGB Regensburg Leistungstransformatoren
- Schneider Electric Mittelspannungsschaltanlagen
- E.ON Kraftwerke Besichtigung des Kraftwerks Irsching



Die Exkursionsteilnehmer in Regensburg.



### 3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

#### Abgeschlossene Master-/Diplomarbeiten vom 1.11.2012 bis 31.10.2013:

#### Cassinikos, Philipp

#### Modellierung des thermischen Verhaltens eines natürlich gekühlten Transformators mittels CFD

Die Untersuchung des thermischen Verhaltens eines natürlich gekühlten Transformators wurde mittels der kommerziellen Software ANSYS CFX zur numerischen Berechnung der Strömungsmechanik durchgeführt. Als Ausgangsmodell diente das CAD-Modell einer Transformatorenwicklung. Die zum Aufsetzen der Simulation nötigen Arbeitsschritte umfassten das Optimieren der Geometrie, die Vernetzung sowie die Parametrisierung des Modells. Für die Untersuchung der gemachten Einstellungen wurden zwei Szenarien miteinander verglichen. Im ersten Szenario wurde nur die natürliche Konvektion berücksichtigt, während im Zweiten zusätzlich ein senkrechter Massenstrom durch die Wicklung eingeprägt wurde. Bei der Untersuchung stand die Plausibilität der Ergebnisse und somit die Evaluierung der gemachten Vorgaben im Vordergrund. Eine guantitative Analyse der Ergebnisse wurde unter Hinblick auf das grobe Rechennetz und der daraus resultierenden numerischen Fehler nicht durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgenommenen Einstellungen für das Modell zu plausiblen Ergebnissen führen. Jedoch hat sich gezeigt, dass das Rechennetz zu grob aufgelöst ist und dass die Lage und Einstellungen der Inlets beziehungsweise Outlets für weitere Untersuchungen überarbeitet werden müssen.

# Modeling of the thermal behavior of a naturally cooled transformer by means of CFD

The investigation of the thermal behavior of a naturally cooled transformer was performed using the commercial software ANSYS CFX for the numerical calculation of the fluid dynamics. For this purpose, the model of a transformer winding was provided. The preparation of the simulation included the optimization of the geometry, the meshing and parameterization of the model. In order to evaluate the settings two scenarios were compared. In the first scenario, the flow was assumed to be driven only by free convection while in the second scenario a constant mass flow through the winding was added. The investigation was limited to the verification of the settings and the plausibility of the results. Due to the coarse mesh and the respective numerical errors a quantitative analysis was not performed. The results are in accordance with the expectations and validate the used settings. However, the mesh has proven to be too coarse and the setup of the inlets and outlets should be revised.

#### Freund, Roman

#### Untersuchung aktiver Filter höherer Ordnung für Kfz-Hochvoltsysteme

Der Gegenstand dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung aktiver, analoger Filter höherer Ordnung für Kfz-Hochvolt-Systeme. Die Arbeitsschwerpunkte liegen in erster Linie im Aufbau und Charakterisieren eines Stromsensors, der zur Erfassung pulsförmiger Störungen dienen soll. Des Weiteren werden diverse Filter-Topologien



simuliert und die vorteilhafteste Topologie auf einer Platine aufgebaut. Es folgt ein Vermessen des entworfenen Filters, sowohl mit den Nachbildungen im EMV-Labor des IEH, als auch im realen Aufbau des Komponententest nach CIPSR 25. Eine Auswertung dieser Ergebnisse bestätigt die Filterfunktion des aktiven Teils des Filters und liefert Kenntnisse über das Potential und die Einschränkungen dieses Verfahrens.

Investigation of active higher order EMI Filters in Automotive HV System

The subject of this thesis is the study of higher order analog active filters for automotive high voltage systems. The main focuses primarily are the construction and characterization of a current sensor, which is used to detect pulse-shaped interferences. Further various filter topologies are simulated and the most gainfully designed topology is mounted on a circuit board. It is followed a measurement of the designed filter with both, the emulation of a HV System in the EMC laboratory of the IEH, and in the real component level test setup according to CISPR 25. An analysis of these results confirmed the filter function of the active part of the filter and provides knowledge about the potential and limitations of this procedure.

#### Friedl, Tobias

# Nachbildung des Störverhaltens eines Pulswechselrichters im elektrischen Antriebsstrang

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einem Pulswechselrichter im Hochvolt-Bordnetz für Elektrofahrzeuge. Zunächst wird der frequenzabhängige Impedanzverlauf des Pulswechselrichters im passiven Zustand bestimmt. Dabei soll zudem der Einfluss einzelner Baukomponenten des Inverters auf die entstehenden Resonanzstellen herausgearbeitet werden. Mit Hilfe von Strom- und Spannungsmessungen innerhalb des gesamten elektrischen Antriebsstrangs lässt sich der Impedanzverlauf des Hochvolt-Inverters im aktiven Zustand verifizieren. Das entwickelte Ersatzschaltbild dient als Grundlage zum Aufbau einer Inverter-Nachbildung, welche dasselbe Impedanzverhalten wie der reale Hochvolt-Inverter aufweist. Mit dieser Nachbildung kann die Filterentwicklung zur Reduzierung der leitungsgebundenen Störungen innerhalb des elektrischen Antriebsstrangs deutlich effizienter gestaltet werden.

#### Disturbance Emulation of an Automotive High Voltage Power Inverter

This thesis relates to a pulse width modulated inverter for electric vehicles. It describes how the frequency dependent impedance curve of the inverter is derived in the passive state. This allows a construction of an equivalent circuit diagram, taking account of the resonance effects of individual components within the inverter. The impedance curve is verified by taking voltage and current measurements with the inverter in the active state under operating conditions. With the equivalent circuit diagram an inverter emulation is developed, which has the same impedance behavior as the real inverter. Based on the emulation filter design to reduce conductive emissions within the electric powertrain can be made more effective in the future.



#### Ghourabi, Imen

### Optimierte Betriebsweise von Mikro-BHKW unter Berücksichtigung von Spannungsrestriktionen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Optimierung der Betriebsweise dezentraler Energieerzeuger in Niederspannungsnetzen unter Berücksichtigung von Spannungsrestriktionen. Das Ergebnis der Arbeit ist daher ein optimaler Betrieb der dezentralen Elemente des Niederspannungsnetzes. Durch einen effizienten Einsatz eines steuerbaren dezentralen Energieerzeugers, gezeigt am Beispiel eines Blockheizkraftwerkes und des dazugehörigen Wärmespeichers, wird die Minimierung der durch den Energiefluss aus dem Übertragungsnetz und den Brennstoff entstandenen Kosten und die Glättung der Energiebereitstellung aus dem Übertragungsnetz angestrebt. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Optimierung mit Einhaltung von verschiedenen technischen Restriktionen, wie z.B. der Spannungshaltung, implementiert und hinsichtlich Kosten und technischer Machbarkeit verglichen. Anschließend erfolgt eine Monte Carlo Simulation zur Veranschaulichung des Einflusses des Durchdringungsgrades der Mikro-Blockheizkraftwerke auf das Niederspannungsnetz.

**Optimal control of micro-CHP with special consideration to voltage restrictions** This thesis aims at developing an optimization program for distributed generation units in a low-voltage network with taking voltage restrictions into consideration. To achieve an optimal operation of the low voltage network using effectively the advantages of controllable distributed energy generators such as combined heat and power units (CHP) and the associated heat storage, the costs of the energy flow from the transmission network and the fuel costs to cover the electrical energy demand and heat demand, are minimized. Moreover a second optimization is done to minimize the fluctuation of the electric energy exported from the transmission network. Additionally, two approaches to accomplish the optimization with respecting various technical restrictions are implemented and compared. Subsequently, a Monte Carlo simulation is performed in order to study the influence of the integration of the CHP units on the low voltage grid operation.

#### Gnädig, Mario

### Untersuchung des Transformatorverhaltens bei Gleichstromeinkopplung in Wechselstromübertragungsleitungen

Die Arbeit beinhaltet eine Analyse des Betriebsverhaltens von Transformatoren durch Störung der symmetrischen Wechselspannung im Übertragungsnetz durch Gleichstromeinkopplungen. In einer Literaturrecherche werden die Effekte der GIC (geomagnetically induced currents) und ACDC-Hybrid-Übertragungsleitungen als mögliche Ursache genauer betrachtet. Die Entstehung von Gleichströmen durch von Hochspannungsleitungen ionisierte Moleküle wird untersucht und anhand von Literaturangaben und Simulationen wird ein Fallbeispiel bearbeitet. Beide Effekte werden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die elektrischen Netze bewertet und gegenüber gestellt. Im zweiten Teil der Arbeit wird mit Matlab-Simulink ein Simulationsmodell für 3- und 5-Schenkel-Transformatoren erstellt. Das Modell erlaubt



vom Nennbetrieb abweichende Szenarien mit beliebigen Quellspannungen und – strömen mit Gleichanteil. Transformatorkerne können durch Gleichströme in Übertragungsnetzen magnetisch in Sättigung geraten. Mit dem Modell wird das Verhalten von Transformatoren unter dem Einfluss überlagerter Gleichstromkomponenten in den Wicklungen sowie die Verlustleistung im Eisenkern untersucht.

# Investigating the Impact of DC-Injection into AC-Transmission-Lines on Transformer Behavior

Electrical equipment in transmission and distribution grids is designed for pure sinusoidal and symmetric alternating voltage. Any deviation can cause malfunction and failure of electrical components. This work is a research on the influence of direct current components in transmission lines and its effect on transformers. A literature research investigates GIC and ACDC-hybrid-transmission lines as origin of direct current components. For hybrid transmission lines the focus is on corona discharge and ion movement. Both effects, GIC and hybrid transmission lines, are analyzed and compared regarding their influence on electrical grids. In a second step a Matlab-Simulink model for three phase, three and five limb transformers is introduced. It provides information on transformer behavior under conditions which differ to normal operation. The influence of various direct current components on transformer behavior and iron core losses is investigated.

#### Hurst, Sascha

## Analyse einer Pre-Compliance-Prüfmethode zur Bestimmung der Abstrahlung von Kfz-Komponenten mittels multiplen Transferfunktionen

Diese Masterarbeit befasst sich mit einer Pre-Compliance-Prüfmethode zur Vorhersage abgestrahlter elektrischer Felder von Kfz-Komponenten. Es wird ein Verfahren vorgestellt, wie mithilfe multipler Transferfunktionen und der Messung des Common-Mode-Stromes die Abstrahlung von Kabelbäumen berechnet werden kann. Die Untersuchungen werden mit Singleund Multi-Segment-Transferfunktionen durchgeführt, welche jeweils auf verschiedene Störer angewandt werden. Als Störer kommen schmal- und breitbandige Pulsgeneratoren zum Einsatz sowie ein Scheibenwischermotor. Einflüsse des Messaufbaus auf die Vorhersagen werden separat überprüft und für die gemessenen Größen wird eine Messunsicherheitsbetrachtung durchgeführt. Es lassen sich Vorhersagen für die elektrischen Felder der Störer erstellen, welche mit Abbildungen und Fehlermatrizen gegenübergestellt werden.

### Analysis of a Pre-Compliance Test Method for the Calculation of Radiated Emissions of Automotive Components Using Multiple Transfer Functions

This thesis deals with a pre-compliance test method for the prediction of radiated electric fields of automotive components. Presented is a method how to use multiple transfer functions and the measurement of the common-mode current to calculate the emission of the wire harnesses. The tests are performed with single-and multi-segment transfer functions, which are respectively applied to various interferences. As disturbers influences the measurement setup are narrow and broadband pulse generators for use as well as a windshield wiper motor. Onto the predictions are



verified separately and for the measured variables, a measurement uncertainty analysis is performed. It is possible to make predictions for the electric fields of interferers, which are compared with figures and error matrices.

#### Kayser, Georg

#### Probabilistische Simulation der Betriebsmittelbelastung eines Niederspannungsnetzes unter Erhöhung der Erzeugerleistung und hoher zeitlicher Auflösung

durch die Die Einspeisung elektrischer Energie dezentral installierten Photovoltaikanlagen spielt eine immer größer werdende Rolle. Die Auswirkungen auf das Netz darzustellen ist Ziel dieser Arbeit. Zu diesen Auswirkungen gehören insbesondere Spannungsanhebungen sowie Betriebsmittelbelastungen, welche in dieser Arbeit anhand eines bestehenden probabilistischen Netzmodells der Gemeinde Sonderbuch simuliert werden. Hierbei wird insbesondere darauf eingegangen, welche Leistung zugebaut werden kann. Um auch die Netzauswirkungen von stark wechselhaftem Wetter abbilden zu können, wird anhand eines Verfahrens zur Umrechnung der Globalstrahlung in eingespeiste Leistung eine höhere Messwertauflösung und somit eine höhere Auflösung der Simulationszeit ermöglicht. Deren Notwendigkeit für die Simulation weiterer Wettersituationen wird untersucht.

## Probabilistic simulation of component loadings in a low voltage grid under the influence of increasing generation power and high temporal resolution

As the decentralized infeed of electric energy through photovoltaic devices have a growing influence on the low voltage grid, the aim of this work is to display the impacts on the low voltage grid. Within these impacts especially are the rise of voltage levels and the load of electrical equipment, which are simulated on the basis of an existing probabilistic grid model of the town Sonderbuch. Especially it is considered, which amount of installed power can be installed. In order to display the grid influences of changeful weather, there is a way to convert the global radiation to a power infeed with a higher temporal resolution.

#### Kolke, Artur

### Einfluss der Batterieimpedanz auf EMV–Störgrößen eines Pulswechselrichters für Elektroantriebe

Die Lithium-Ionen-Batterie findet bei den Hybrid- oder Elektrofahrzeugen ihren Einsatz und versorgt die elektrischen Antriebsysteme mit Strom. Die Aufgabe dieser Diplomarbeit besteht in der Entwicklung und dem Testen einer Batterienachbildung der Lithium-Ionen-Batterie. Hierfür wird die bereitgestellte S-Parametermessung einer Lithium-Ionen-Batterie eines RLC-Modells aus diskreten Bauelementen ausgewählt und mit Hilfe des Programms ADS simuliert. Der Aufbau des Batteriemodells erfolgt durch die ermittelten Bauelementwerte. Die EMV-Messungen werden nach CISPR 25 der leitungs- und feldgebundenen Störgrößen durchgeführt und die Batterienachbildung mit der Bordnetznachbildung verglichen.



# Influence of a Battery's Input Impedance on EMC Disturbances of an Inverter for Electric Driven Vehicles

The Lithium-Ion-Battery is installed in hybrid or electric vehicles, to supply the electrical power drive systems. The task of this diploma thesis consists of the development and testing of a battery model. Therefore with provided S-Parameter measurements of a Lithium-Ion-Battery, a RLC model with lumped elements is selected and then with the help of the program ADS simulated. The battery model is built and tested with the determined element values of the simulation. Furthermore the EMC measurements are executed according to CISPR 25 in comparison to the battery model with the Line Impedance Stabilization Network of conducted and field coupled disturbances.

#### Ma, Jun

#### Modellierung eines dreiphasigen Zustandsschätzers

Die Zunahme des regenerativ erzeugten Anteils an elektrischer Energie erschwert den stabilen Betrieb. Somit ist die Zustandsschätzung ein wirksames Instrument zum automatischen Management und zur Steuerung komplexer Niederspannungsnetze. Eine direkte Übertragung der traditionellen Zustandsschätzung auf das Niederspannungsnetz ist durch die fehlenden Messungen sowie die Besonderheit im Verteilnetz nicht möglich. Niederspannungsnetze haben in der Regel eine begrenzte Anzahl von Messungen, auf die zurückgegriffen werden kann. Die Arbeit dokumentiert die Entwicklung eines mathematischen Algorithmus zur dreiphasigen Zustandsschätzung im Niederspannungsnetz. Der Algorithmus wird in Matlab integriert.

#### Modeling of Three Phase State Estimator

The increase in the share of electricity generated from renewable energy makes it difficult to stabilize the distribution system operation. Thus, the state estimation is an effective tool for automatic management and control of complex especially for low-voltage networks. A direct transfer of the traditional state estimation on the low voltage network is not possible due to the lack of measurements and the specificity in the distribution networks. In general, the number of measurements in low voltage networks is limited. This paper documents the development of a mathematical algorithm for three-phase state estimation in the low voltage network. This algorithm is integrated in Matlab, Furthermore, a method is developed, which allows to estimate the state of three-phase systems from the available measurements.

#### Mohr, Franziska

#### Netzplanung mittels probabilistischer Lastflussrechnung auf Hochspannungsebene

In dieser Arbeit wird die probabilistische Lastflussrechnung auf der Hochspannungsebene eingesetzt, um den neuen Herausforderungen in der Netzplanung durch den steigenden Anteil an erneuerbaren Energien zu begegnen. Durch statistische Lastund Erzeugermodelle werden alle möglichen Kombinationen berechnet und nicht nur, wie bisher, bestimmte Szenarien. Die Ergebnisse spiegeln somit alle möglichen Netzsituationen wider. Durch die Berücksichtigung der Auftrittswahrscheinlichkeit von



Lasten und Erzeugerleistungen kann das Überlastungsrisiko von Leitungen und Transformatoren berechnet werden. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Ausbaumaßnahmen hinsichtlich des Überlastungsrisikos zu vergleichen. Weiterhin kann die Notwendigkeit für Netzausbaumaßnahmen anhand der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der kritischen Netzsituationen bewertet werden.

# Power system planning via probabilistic load flow calculation on high voltage level

A probabilistic load flow calculation is used on the high voltage level. The aim is to meet new challenges in power system planning which are caused by the increasing influence of renewable energy. Using statistic models for loads and generating units, all possible combinations are calculated. Before, only several scenarios have been considered. The results show all possible situations in the grid. Because the probability of load and generation is considered, the risk of overloading transformers and lines can be estimated. Now you can compare different development procedures regarding the risk of overloading in each case. Furthermore, the need of development procedures can be assessed by means of the probability of critical grid situations.

#### Pacholek, Marco

#### Beitrag von Wärmepumpen zur Netzintegration Erneuerbarer Energien

Gegenstand dieser Arbeit ist der Beitrag von Wärmepumpen zur Netzintegration Erneuerbarer Energien. An einem Beispielnetz werden die Auswirkungen eines Ausbaus von Wärmepumpen in einzelnen Haushalten auf das Gesamtnetz untersucht. Hierzu werden drei Szenarien dargestellt, die einmal das Netz ohne Wärmepumpen, dann auf Basis einer konservativen Prognose mit einem Durchdringungsgrad von 10% und schließlich auf Basis einer optimistischen Prognose mit einem Durchdringungsgrad von 18% Wärmepumpen abbilden. Letztendlich soll gezeigt werden, inwiefern der Ausbau von Wärmepumpen dazu beiträgt das Netz zu entlasten und durch die frei werdenden Kapazitäten eine erweiterte Einspeisung von Erneuerbaren Energien fördert.

# Contribution of Heat Pumps for the Integration of Renewable Energies into Power Grids

This work describes the contribution of heat pumps to the integration of renewable energies into the power grid. Using an example grid, the impacts of an extension of heat pumps in individual households to the power grid are examined. For this purpose, three scenarios are presented which illustrate in a first step the power grid without heat pumps, then, in a second step, the grid based on a conservative forecast with a penetration rate of 10%, and finally on the basis of an optimistic prognosis with an 18% penetration of heat pumps. Ultimately, it will be shown how far the development of heat pumps helps to relieve the grid and in which way the free capacities of the grid will promote an expanded supply of renewable energy.



#### Petrusch, Anja

Integration von Wärmepumpen und Mini-BHKWs in das Niederspannungsnetz Im Zuge dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Netzintegration von Wärmepumpen und Mini-Blockheizkraftwerken (BHKWs) untersucht. Zu diesem Zweck wurden in Matlab Haushalte modelliert, die neben diesen Anlagen noch einen Wasserspeicher und ein Heizgerät enthalten. Den Modellen wurden Standardlastprofile für den Verbrauch von elektrischer Energie und Wärmeenergie übergeben. Anschließend wurden verschiedene Szenarien für die Zukunft entworfen, welche die wachsenden Durchdringungsgrade der Technologien beschreiben. Diese Szenarien wurden mit dem Netzberechnungsprogramm Matpower für ein Niederspannungsnetz simuliert und so der Einfluss dieser zunehmenden dezentralen Einspeisung auf die Spannung bestimmt. Des Weiteren wird verglichen, inwiefern sich die Speicherdimensionierung und eine Spannungsregelung auf das System auswirken.

Integration of heat pumps and CHP into the low voltage distribution grid

In the course of this work the effects of the integration of heat pumps and micro combined heat and power units (CHP) into the electric power grid are examined. For this cause systems have been implemented in Matlab, which contain heat storages and additional heaters besides the heat pumps and the CHP units. Subsequently different scenarios for the future have been developed, which describe the growing degree of pervasion of these technologies. These scenarios have been simulated for a low voltage network and in this way the impact of the increasing feed-in of distributed power is analyzed. Furthermore, the influence of the size of the water storage and the effect of a voltage control on the system is studied.

#### Ritter, Roman

#### Entwicklung und Aufbau eines digitalen, aktiven EMV-Filters für Hochvolt-Antriebe von Elektrofahrzeugen

Die Unterdrückung von elektromagnetischen Störungen ist ein wichtiges Ziel in der Automobiltechnik, um Sicherheit und Funktionsfähigkeit aller elektronischen Systeme zu gewährleisten. Im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs ergeben sich neue, leistungsstarke Störquellen. Steile Schaltflanken bei großen Strömen und Spannungen erzeugen sehr breitbandige Störungen mit hohen Amplituden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines aktiven, digitalen EMV-Filters für die Integration in den elektrifizierten Antriebsstrang. Dabei soll eine Plattform entwickelt werden, die durch eine variable Programmierung verschiedene Filter implementieren kann. Ein weiteres Ziel ist die Evaluierung der Praktikabilität einer solchen Filterung. Die Funktion eines solchen digitalen Filters wird durch theoretische Überlegungen hergeleitet und durch Messungen bestätigt. Eine zusätzliche Analyse dieser Ergebnisse gibt Aufschluss über die Möglichkeiten und Grenzen dieses Systems.

# Development of a digital active EMI Filter for Automotive High Voltage Systems of Electric Driven Cars

The suppression of electromagnetic interferences is an important objective in the automotive industry, ensuring safety and functionality of all electronic systems. As



part of the electrification of the powertrain, new powerful sources arise. High slew rates with high currents and voltages produce very broadband interference of high amplitudes. Topic of this work is the development of an active digital EMC filter for the integration into the electrified powertrain. Such a platform has to be developed able to implement various filter characteristics through a variable programming. A further aim is to evaluate the feasibility of such filtering. The function of such a digital filter is derived by theoretical considerations and confirmed by measurements. Additional analysis of these results provides information on the possibilities and limitations of this system.

#### Semar, Daniel

## Untersuchung von nanokristallinen Ringen und einer induktiven Anordnung zur Dämpfung von VFTs in GIS

In der vorliegenden Masterarbeit werden zwei Ansätze zur Dämpfung von schnellen transienten Überspannungen (VFTs) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) untersucht. Die im Labor erzeugten VFTs besitzen dabei Spannungsamplituden von mehreren hundert Kilovolt. Im ersten Ansatz werden die Dämpfungseigenschaften von verschiedenen Ringbandkernen aus einer nanokristallinen Legierung genauer untersucht. Die Ergebnisse der Hochspannungsversuche zeigen, dass VFTs zuverlässig durch die nanokristallinen Ringbandkerne gedämpft werden können. Die größte Dämpfung wird dabei durch die Ringbandkerne mit größter Permeabilität erzielt. Im zweiten Ansatz zur Dämpfung der VFTs wird eine induktive Anordnung mit unterschiedlicher Anzahl von Ableitern verwendet. Auch hier konnte eine deutliche Dämpfung der VFTs nachgewiesen werden. Die Versuche zeigen, dass eine optimale Dämpfung bei einem bestimmten Verhältnis von Induktivität der Anordnung zu Ableiteranzahl erreicht wird.

# Investigation of nanokrystalline rings and an inductive arangement for VFTO damping

This paper deals with two possibilities of suppressing very fast transients (VFT) in gas insulated substations (GIS). The investigated VFTs have amplitudes of several hundred kV. In the first approach, the damping properties of toroidal cores of nanocrystalline alloys are analyzed closely. The results of the high-voltage tests show that VFTs can be reliably damped by nanocrystalline cores. The best damping factor is achieved by cores with the highest permeability. In the second approach, an inductive arrangement with different numbers of arresters is used for damping VFTs. The results of the high-voltage tests show also a good attenuation of the VFTs. The experiments show that an optimal damping factor is achieved by a specific ratio between inductance of the arrangement and the number of arresters.

#### Strandberg, Johan

#### Automatische Klassifizierung von Wetterzuständen durch Analyse von Globalstrahlmessdaten zur Verwendung in Netzsimulationen

Durch den Ausbau von Photovoltaikanlagen, vor allem im privaten Bereich, ist die Belastung auf die Stromnetze stark gestiegen. Da die Erzeugerleistung dabei maß-



geblich vom Wetter abhängt, werden in dieser Arbeit Globalstrahlungsmessdaten im Zeitraum von ca. einem Jahr untersucht, um daraus geeignete Parameter zur Wetterklassifizierung zu definieren. Auf Basis dieser Klassifizierungen wird anschließend in MATLAB eine Benutzeroberfläche zur automatischen Verarbeitung, Analyse und Klassifizierung von Globalstrahlungsmessdaten entwickelt. Diese sollen dann bei Lastflusssimulationen eingebunden werden, um daraus wetterabhängige Szenarien zu untersuchen. Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse zeigen, dass die maximalen Wirkleistungs- und Spannungsspitzen an Tagen mit wechselhaftem Verhalten auftreten.

# Automatic classification of weather conditions by analyses of global irradiance measurements for low voltage grid simulations

Through the development of photovoltaic systems, especially in the private sector, the strain on the electrical grid increases. Since the generated power is directly dependent on weather conditions, this thesis examines global radiation in a period of approximately one year, in order to classify different types of weather conditions. Based on these classifications an automatic MATLAB user interface is implemented to process, analyze and define the global radiation measurement data. These results can be integrated in load-flow simulations, to examine weather dependent scenarios. The results shows, that changeable weather conditions are responsible for the biggest real power and voltage peaks.

#### Su, Xiao

## Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Transferfunktionsmethode mit CST Microwave Studio®

Die Norm CISPR25 legt die Testmethoden und Grenzwerte der elektromagnetischen Strahlung fest. Um Störfaktoren auszuschließen muss die Messung in einer Absorberhalle durchgeführt werden. Die Methode ist allerdings an viele Ressourcen gebunden und kostspielig. Um hohe Kosten zu vermeiden und schnelle Abschätzungen der Störemissionen zu erhalten, kann ein Berechnungsmodell mit Transferfunktionen verwendet werden, das alle Einflussfaktoren nach CISPR 25 berücksichtigt. Aus dem Verhältnis der gemessenen elektromagnetischen Strahlung und des Stroms auf den Kabeln wird eine Transferfunktion gebildet. Mithilfe der Transferfunktion kann die elektromagnetische Strahlung durch wesentlich einfachere Strommessung berechnet werden. In der vorliegenden Arbeit wird das Berechnungsmodell mit dem Simulationstool CST Microwave Studio® untersucht.

## Parameter Analysis of the Transfer Function Method Using CST Microwave Studio ${\ensuremath{\mathbb S}}$

The norm CISPR25 specifies the test methods and limit values of electromagnetic radiation. To exclude interfering factors the measurements must be performed in an anechoic chamber. The electric field, radiated from a harness connected to a device, is detected with complex instrumentation. The method needs many resources and is expensive. To avoid high costs and obtain rapid estimates of electric field a calculation model with transfer functions can be used. A transfer function is derived from the ratio of the measured electromagnetic radiation and the current on the



cables. The electromagnetic radiation can be calculated from simpler current measurement by using the transfer functions. In the thesis, the calculation model is studied with the simulation tool CST Microwave Studio®.

#### Suttner, Christian

#### Entwicklung eines UHF TE Monitoring Systems

Zur Beurteilung des Zustandes eines Leistungstransformators ailt die Teilentladungsanalyse als wichtiges Hilfsmittel. Diese Teilentladungen entstehen an Fehlstellen in der Isolation und emittieren u.a. elektromagnetische Wellen im UHF-Bereich. Das Ziel dieser Arbeit ist die technische Verbesserung eines Systems zur kontinuierlichen Erfassung von Teilentladungen, welches am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart entwickelt wurde. Durch die Verfügbarkeit aktueller Mikroprozessoren und Rapid Prototyping Systeme war es möglich den Schaltungsaufwand sowie die Produktionskosten zu reduzieren und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit deutlich zu steigern. Die Anderungen betreffen das komplette Hardware-Design und erforderten umfangreiche Anpassungen der Firmware des Mikrocontrollers.

#### Developement of an UHF PD Monitoring System

For the evaluation of the condition of a power transformer's insulation, the partial discharge analysis is considered to be an important utility. The partial discharges occur at insulation breakdowns and issue electromagnetic radiation in the UHF-frequency range. The intent of this thesis is the technological improvement of a system for continuous monitoring of partial discharges, which was originally developed at the institute for energy transmission and high-voltage technology of the University of Stuttgart. Due to the availability of modern microcontrollers and rapid prototyping systems the complexity and the production costs of the system were reduced while the performance was increased significantly. The changes affect the entire hardware design and required substantial adaptions of the microcontroller's firmware.

#### Walker, Gerhard

#### Eine Untersuchung verschiedener probabilistischer Ansätze zur Lastflussberechnung in Niederspannungsnetzen unter dem Einfluss eines regelbaren Ortsnetztransformators

Der Ausbau der dezentralen erneuerbaren Energiequellen hat in den letzten Jahren Forschung in Richtung wirtschaftlicher und technisch sinnvoller Lösungen vorangetrieben. Im Kern behandelt diese Arbeit das Erstellen zweier Ansätze zu probabilistischen Simulationsmodellen mit Hilfe derer alle gemessenen Netzzustände simuliert werden können. Dies erlaubt besonders in Niederspannungsnetzen eine kosteneffektive Netzplanung. Desweiteren werden die Modelle zur Verifikation der Funktionalität eines regelbaren Ortsnetz-Transformators angewendet. Die Ergebnisse dieser Simulation zeigen, dass der regelbare Ortsnetz-Transformator die Spannungsprobleme im Beispielnetz positiv beeinflusst.



# A Study of Different Probabilistic Simulation Approaches for Load Flow Calculations in Low Voltage Grids under the Influence of a Controllable Distribution Transformer

The recent increased integration of distributed renewable energy sources has spurred research into economically justifiable solutions that allow operation of an aging grid in a new energy era. This thesis highlights two different approaches to generate a probabilistic simulation model. Probabilistic simulation approaches allow the observation of all measured grid states and therefore a more costeffective planning, especially in low voltage grids. The models will be used to verify the functionality of a controllable distribution transformer (CDT) as a smart grid expansion. Results show that the CDT is a valid smart grid expansion for the simulated grid. [CIRED]

#### Wiest, Pascal

## Spannungshaltung mit einem Einspeisemanagement für Photovoltaikanlagen im Niederspannungsnetz

Der stetige Ausbau der Erneuerbaren Energien gestaltet die Integration in das Energienetz zunehmend schwieriger. Um die Systemstabilität nicht zu gefährden, müssen hierfür neue Regelkonzepte gefunden werden. Ein Ansatz ist es, die Einspeiseleistung temporär zu reduzieren, um Netzengpässen vorzubeugen. Für Photovoltaikanlagen kann dies anhand der Knotenspannung detektiert werden. In dieser Arbeit werden zwei Konzepte vorgestellt, um eine Begrenzung im Zuge des Einspeisemanagements vorzunehmen. Dabei wird zuerst die Funktionsweise detailliert vorgestellt und anschließend anhand von Simulationen überprüft. Im weiteren Verlauf wird die jährliche Ausfallarbeit für einen weiteren Zubau an Photovoltaikleistung ermittelt. Abschließend wird ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen Netzausbau und Einspeisemanagement angestellt.

## Voltage stability with an active power management system for Photovoltaics in a Low Voltage Grid

The increase of renewable energy involves problems with the integration in the electric grid. Therefore new control concepts are needed to improve the system stability. One is the tempo-rarily reduction of the current feed-in power. In case of photovoltaic this can be detected by the voltage. Two concepts for such a power management system are presented in this work. First the functionality is accurately described and verified. For a power increase of photovoltaic the yearly energy that cannot feed in is calculated. Finally, an economic comparison is employed. This is used to compare a network expansion with a power management system.

#### Ying, Ziran

#### Lastmodellierung von Haushalten und Beeinflussung externer Parameter

In dieser Arbeit werden in Niederspannungsnetzen durch Smart-Meter gemessene Haushaltslasten analysiert. Dabei wird untersucht, wie die Last sich in Abhängigkeit externer Parameter, wie z.B. Temperatur, Wetter und Strompreis, verhält. Die Analyse wurde anhand der Korrelation, Kreuzkorrelation, Verteilungsfunktion und des



Gleichzeitigkeitsfaktors räumlich verteilter PV-Einspeisung und der Stromtarif-Last-Beziehung durchgeführt. Außerdem wurden auch die erstellten Ladeprofile von Elektrofahrzeugen miteinbezogen.

#### Load modeling of households and influence of external parameters

The objective of this master thesis is the modeling of household loads using recorded measurement data and energy-price data. Furthermore it is analyzed how external parameters such as temperature, weather and dynamic electricity price, influence the loads. The study is done by looking into correlation, cross-correlation, distribution functions and coincidence factors of the load und energy-price. Additionally it is looked into photovoltaics feed in and the consumption of electric vehicles.

### Abgeschlossene Bachelor-/Studienarbeiten sowie Forschungsarbeiten (\*) vom 1.11.2012 bis 31.10.2013:

| NAME             | ТНЕМА   |
|------------------|---|
| Abdulamir,       | Teilentladungsuntersuchungen mit Transformatorölen.       |
| Mohammed         | Partial discharge investigations with transformer oils.   |
| Adiyaman, Fatih  | Entwicklung eines Systems zur Langzeitmessung von         |
|                  | akustischen Teilentladungssignalen.                       |
|                  | Development of a long-term measurement system for         |
|                  | acoustic partial discharge signals.                       |
| Baranek, Dustin  | Tool zur Ermittlung kostenoptimaler Netzausbaumaß-        |
|                  | nahmen.   |
|                  | Tool to determine cost optimal grid expansion measures.   |
| Beilharz, Daniel | Entwicklung und Test einer Frequenzweiche zur Vibrations- |
|                  | und Teilentladungsmessung.                                |
|                  | Development and Evaluation of a Frequency Diplexer for    |
|                  | Simultaneous Vibration and PD Measurements.               |
| Bessler, Felix   | Entwicklung und Optimierung eines                         |
|                  | Batteriemanagementsystems in Mikronetzen.                 |
|                  | Development and optimization of a battery management      |
|                  | system in microgrids.                                     |
| Bolsinger,       | Abschätzung der EMV-Störgrößen von Komponenten im HV-     |
| Christoph (*)    | Bordnetz von Elektrofahrzeugen.                           |
|                  | Estimation of EMC Disturbances of Automotive High Voltage |
|                  | Components in Electric Driven Cars.                       |
| Böttcher, Martin | Untersuchung einer Transferfunktionsmethode zur Pre-      |
|                  | Compliance von verzweigten Systemen bis 30 MHz.           |
|                  | Analysis of a Transfer Function Method for the Pre-       |
|                  | Compliance of Distributed Systems up to 30 MHz.           |



| NAME                | THEMA   |
|---------------------|---|
| Church, Peter       | Platzierung von Spannungsmessungen im                                 |
|                     | Niederspannungsnetz.  |
|                     | Voltage measurement placement in low voltage network.                 |
| Grammer, Stephan    | Entwicklung und Bau eines netzwerkfähigen, dreiphasigen               |
|                     | Leistungsmessgerätes.   |
|                     | Construction of a network-compatible, 3-phase Power Meter.            |
| Heyne, Jens         | Entwicklung einer Webanwendung für die Feuchtigkeits-                 |
|                     | diagnose von Transformatoren.   |
|                     | Development of a web application for transformer moisture             |
|                     | analysis.   |
| Huber, Simon        | Messung der druckabhängigen Durchschlagspannung von                   |
|                     | Bio- und Mineralöl.   |
|                     | Measurement of pressure dependent breakdown voltage of                |
|                     | natural ester and mineral oil.  |
| Hurst, Sascha       | Dämpfung von Ferritmaterialien bei überlagertem                       |
| ,                   | Gleichstrom.  |
|                     | Ferrite attenuation with direct current offset.                       |
| Hurst, Sascha (*)   | Untersuchung aktiver EMV-Filter für Hochvolt-Komponenten              |
|                     | in Elektrofahrzeugen.   |
|                     | Investigation of Active Filter Concepts for Automotive HV             |
|                     | Components.   |
| Kayser, Georg       | Ermittlung photovoltaischer Einspeiseleistung durch                   |
|                     | Globalstrahlungsmessung.  |
|                     | Calculation of generated photovoltaic power based on global           |
|                     | irradiance measurements.  |
| Kienzler, Christoph | Einfluss der Netzimpedanz in elektrischen Kfz-Antrieben auf           |
|                     | die Dämpfung von EMV-Filtern.   |
|                     | Influence of Network Impedance within the electric drive train        |
|                     | on EMI filter attenuation.  |
| Körner, René (*)    | Qualifizierung möglicher alternativer Isolieröle für den              |
|                     | Einsatz in einem ölgefüllten Hochspannungskabelend-                   |
|                     | verschluss.   |
|                     | Qualification of alternative insulating liquids for use in oil filled |
|                     | HV cable terminations.  |
| Krampfl, Rinat (*)  | Entwicklung und Inbetriebnahme eines                                  |
|                     | Hochspannungsteilers.   |
|                     | Development and Testing of a High Voltage Divider.                    |
| Kuhn, Konstantin    | Korrelation von der gemessenen scheinbaren Ladung mit der             |
|                     | TE-Position entlang einer Transformatorwicklung.                      |
|                     | Correlation of the Apparent Charge along the transformer              |
|                     | winding.  |
| Lambidis, Ioannis   | Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit von                       |
|                     | Elektroisolieröl "Nynas Nytro Lyra X" auf verschiedene                |
|                     | Abhängigkeiten.   |
|                     | Investigation of different dependencies of electrical                 |
|                     | conductivity of mineral oil "Nynas Nytro Lyra X".                     |
|                     |   |



| NAME                       | ТНЕМА   |
|----------------------------|---|
| Litke, Eduard              | Vergleich eines analytischen Modells zur Pre-Compliance<br>von CISPR 25 Messaufbauten mit Messungen in einer  |
|                            | Absorbernalle.<br>Comparison of an Analytic Modell for the Pre-Compliance of<br>CISPR 25 setups with Measurements in an anechoic<br>chamber.  |
| Marchenko,<br>Mykhailo (*) | Entwicklung eines integrierten TE-Ortungssystems basierend<br>auf einem akustischen Sensorarray.<br>Development of an integrated PD localization system based<br>on an acoustic sensor array.   |
| Marxer, Matthias           | Optimierung thermischer Energiesysteme.<br>Optimization of Thermal Energy Systems.  |
| Maurer, Andreas            | Vibrationsuntersuchungen an Leistungstransformatoren.<br>Determination of Vibrations on Power Transformers.   |
| Mertyn, Anton              | Dielektrische Antwortmessung alternativer Isoliersysteme.<br>Dielectric response measurement of alternative insulating<br>systems.  |
| Miller, Julian             | Entwicklung und Untersuchung dreiphasiger, dynamischer<br>Modelle für Mikronetzanwendungen in Matlab-Simulink.<br>Development of 3-Phase dynamic models for microgids<br>components in Matlab-Simulink.   |
| Mohammad, Karim            | Studie von verschiedenen Optimierungsmethoden zur<br>Implementierung eines Energiemanagementsystems für ein<br>Mikronetz.<br>Study of different optimization methods for implementation of<br>energy management system for microgrids.  |
| Nägele, Haiko              | Entwicklung und Untersuchung der Optimierungsverfahren<br>für das Unit Commitment und Economic Dispatch in<br>Microgrids mittels MILP bzw. Genetischen Algorithmen.<br>Development of optimization method for unit commitment<br>and economic dispatching in microgrids with MILP and GA. |
| Palazova, Katya            | Vergleich der Analysegenauigkeit verschiedener<br>Messverfahren zur Bestimmung der gelösten Gase.<br>Accuracy analysis of different measurement methods for the<br>determination of dissolved gases.  |
| Passow, Daniel             | Untersuchung der Möglichkeit von Datenübertragung über<br>Energiekabel.<br>Investigation of data communication over power cables.   |
| Renz, Philipp              | Entwicklung eines Optimierungsalgorithmus zur<br>wirtschaftlichen Auslegung von Batteriespeichern für Peak<br>Shaving.<br>Development of an optimization algorithm for economic<br>integration of battery for peak shaving in microgrids.   |
| Ritter, Roman              | Entwicklung eines DDS-basierten Frequenzgenerators.<br>Development of a DDS based Frequency Generator.  |
| Ritz, Jochen               | Entwicklung eines integrierten akustischen Teilentladungs-<br>Ortungssystems.<br>Development of an integrated acoustical partial discharge<br>localization system.  |



| NAME               | ТНЕМА   |
|--------------------|---|
| Rosenhauer,        | Erstellung probabilistischer Niederspannungsnetze in          |
| Max Josef          | MatPower.   |
|                    | Creation of probabilistic low voltage networks in Matpower.   |
| Saur, Roland       | Modellierung von Pseudo-Messungen.                            |
|                    | Modelling of Pseudo Measurements.                             |
| Schimmelmann,      | Entwicklung von Lademanagementkonzepten für Elektro-          |
| Marie-Christine    | autos.  |
|                    | Development of load management concepts for electric          |
|                    | vehicles.   |
| Schmid, Alexander  | Spannungsfall mit probabilistischen Modellen für              |
|                    | Elektroautos.   |
|                    | Voltage drop with probabilistic models for electric vehicles. |
| Schuler, Marc      | Entwicklung eines Mikrocontroller basierten Systems zum       |
|                    | Vibrationsmonitoring von Leistungstransformatoren.            |
|                    | Development of a Microcontroller based System for Vibration   |
|                    | Monitoring of Power Transformers.                             |
| Semar, Daniel      | Untersuchung neuer Methoden zur Dämpfung von VFT.             |
|                    | Further development of different new VFTO mitigation          |
|                    | methods.  |
| Spudic, Boris      | Dimensionierung einer GTEM-Zelle zur                          |
|                    | Antennenfaktorbestimmung von UHF-Sensoren unter Öl.           |
|                    | Design of a in Oil GTEM-cell for Antenna Factor               |
|                    | determination of UHF-sensors.                                 |
| Stamenkovic,       | Entwicklung eines Modells zur Messfehlerkompensation          |
| Vladimir (*)       | eines Überwachungssystems für Hochspannungsdurch-             |
|                    | führungen.  |
|                    | Development of a model for compensation of measurement        |
|                    | errors for a bushing monitoring system.                       |
| Steub, Verena      | Modelle einphasiger Wechselrichter und Regler für             |
|                    | Mikronetze.   |
|                    | Single phase models of inverters and controllers for          |
|                    | microgrids.   |
| Teichmann, Vincent | Entwicklung eines Tool zur Berechnung der optimalen           |
|                    | Position und Kapazität einer Batterie in Mikronetzen.         |
|                    | Development of an optimization tool for sizing and placement  |
|                    | of batteries in microgrids.                                   |
| Todorov, Todor     | Current Injection und LISN Injection Transferfunktions-       |
|                    | analyse einer Pre-Compliance-Prüfmethode zur                  |
|                    | Abschätzung gestrahlter Emissionen bei KFZ-                   |
|                    | Komponententests.   |
|                    | Current Injection and LISN Injection Transfer Functions       |
|                    | Analyses of a Pre-Compliance Test Method for the              |
|                    | Estimation of Radiated Emissions during the Automotive        |
|                    | Component Tests.  |
| Wei, Lai           | Temperaturabhängigkeit des Lösungsvorgangs von                |
|                    | Fehlergasen.  |
|                    | Temperature dependency of fault gas dissolution process.      |
|                    | Temperature dependency of fault gas dissolution process.      |





| NAME              | THEMA   |
|-------------------|---|
| Weng, Yintao      | Modellierung und Simulation einer Testzelle für                 |
|                   | Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von                 |
|                   | Isolierölen.  |
|                   | Modeling and simulation of a test cell to investigate the       |
|                   | electrical properties of insulating oil.                        |
| Yang, Zongnan (*) | Parameterstudien zur Durchschlagfestigkeit von Isolieröl.       |
|                   | Studies about dielectric breakdown strength of insulating oils. |
| Zhao, Chong (*)   | Untersuchung der Durchschlagspannung in Abhängigkeit            |
|                   | des Gasgehalts der Isolierflüssigkeit.                          |
|                   | Breakdown voltage analysis in dependence on the gas             |
|                   | content of the insulating fluid.                                |
| Zhu, Jie          | Batteriemanagementsysteme in Mikronetzen.                       |
|                   | Battery Management Systems in Microgrids.                       |



### 4. **PROMOTIONEN**

# Analyse von Netzpendelungen im kontinentaleuropäischen Verbundsystem

#### Dipl.-Ing. Joachim Lehner

Hauptberichter: Mitberichter: Tag der mündlichen Prüfung: Prof. Dr. G. Scheffknecht Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen 26.04.2013

# Condition Assessment on Power Transformers using Dielectric Response Analysis

#### M. Eng. Michael Jaya

| Prof. DrIng. T. Leibfried  |
|----------------------------|
| Prof. DrIng. S. Tenbohlen  |
| Prof. DrIng. G. Langhammer |
| 10.12.2013                 |
|                            |



### 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 den Umbau der elektrischen Energieversorgung durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien betreffen. Ein besonderer Schwerpunkt der Forschungstätigkeit ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei energietechnischen und elektronischen Systemen.

#### Hochspannungstechnik

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

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

Hinsichtlich des *Designs* hochspannungstechnischer Betriebsmittel werden neue Isolierstoffe (z. B. natürliche und synthetische Ester) auf Ihre physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften hin geprüft. Durch den Einsatz moderner Softwarewerkzeuge, z. B. Finite Elemente Methode (FEM) und Computational Fluid Dynamics (CFD), wird der Ölstrom und das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren untersucht. Das Forschungsgebiet Gasförmige Isolationssysteme ist geprägt durch Themenstellungen wie die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von 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 with tasks from the field of high-voltage insulation performance and condition assessment but also with requirements 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.



#### Smart Power Grids / Intelligente Stromversorgungssysteme

In diesem Forschungsgebiet werden Methoden, Konzepte und Verfahren zur ganzheitlichen Analyse, Betriebsführung und Auslegung des zukünftigen dezentralen Stromversorgungssystems mit hohem Anteil erneuerbarer Energien (Smart Grids) entwickelt. Wesentliche Forschungsthemen sind dabei:

- Regelungsverfahren und Betriebsführungsmethoden für dezentrale regenerative Erzeuger, stationäre Speicher, Elektrofahrzeuge und steuerbare Lasten
- Konzepte f
  ür flexible, dezentrale Netzarchitekturen und Verfahren f
  ür deren optimierte Auslegung
- Regelungsverfahren und Betriebsführungsmethoden (inkl. der Zustandsschätzung) für den Betrieb dezentraler Stromversorgungssysteme
- Methoden zur Komplexitätsreduktion von Simulations-, Optimierungs- und Betriebsverfahren bei interdisziplinärer, sparten- und spannungsebenenübergreifender Betrachtung

#### Elektromagnetische Verträglichkeit

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren ein wichtiger Schwerpunkt. Zunächst standen 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 aktuell laufenden 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.

Weitere Aktivitäten laufen seit Jahrzehnten auf dem Gebiet der potentialfreien Messung elektrischer und magnetischer Felder. In jüngster Zeit wurden auch hier Neuentwicklungen gemacht, wobei der Einsatz neuartiger VCSEL-Laserdioden mit sehr geringem Stromverbrauch im Vordergrund stand.



#### **Smart Power Grids**

In this research area new methods, concepts and procedures are developed for the analysis, operation and design of the future decentralized power system with large shares of renewable energies (smart grids). Most relevant topics are:

- Control and operation approaches for distributed generators, storage systems, electrical vehicles and controllable loads
- Concepts for flexible decentralized power system architectures and approaches for their optimized design
- Control and operation approaches (incl. state estimation) for decentralized power systems
- Methods for reduction of complexity in simulation, optimization and operation approaches with regard to interdisciplinary analysis across voltage levels and energy sectors.

#### **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.

Last but not least our activities in the potential-free electric and magnetic field measurement have to be mentioned. Since several decades some of our colleagues have been very successful in this domain. In the last few years there have been made significant developments and improvements, especially by the use of VCSEL laser diodes with small operating currents and a high bandwidth.



### 5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

# Bewegungsformen freibeweglicher, leitfähiger Partikel im elektrischen Gleichfeld SF<sub>6</sub>-isolierter GIS

#### Dipl.-Ing. Philipp Arnold

Die elektrische Festigkeit einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) kann durch geringfügige Verunreinigungen bereits nennenswert herabgesetzt werden. Lose, leitfähige Partikel stellen eine besonders große Gefahr dar, Durchschläge im gasgefüllten einer GIS zu zünden (Fig. 1). Elektrodenzwischenraum Die Problematik partikelgezündeter Gasdurchschläge steht in engem Zusammenhang mit dem Bewegungsverhalten freibeweglicher Partikel. Abhängig von der Spannungsform fällt die Partikelbewegung unterschiedlich aus hinsichtlich Bewegungsform, Geschwindigkeit und bevorzugtem Aufenthaltsort einer Partikel. Verglichen mit Wechselspannung zeiat sich unter Gleichspannung eine intensivere Partikelbewegung: Die von einer Partikel zurückgelegten Distanzen sind wesentlich größer, der Aufenthaltsort einer Partikel wechselt häufiger und unregelmäßiger.

Unter Gleichspannung sind Spannungsamplitude, Partikeleigenschaften und SF<sub>6</sub>-Gasdruck wesentliche Einflussgrößen der Bewegung. In experimentellen Untersuchungen ließen sich vielfältige Formen der Partikelbewegung beobachten (Fig. 2). Im Zuge der Partikelbewegung kann sich der Ladungswert einer leitfähigen Partikel ändern. Ferner wirkt eine ortsabhängige elektrische Feldstärke auf eine geladene Partikel. Daraus ergeben sich kontinuierlich veränderliche Bedingungen an einer Partikel, wodurch es zu Änderungen an deren Bewegungsform kommt.

Die beobachteten Bewegungsformen lassen sich in gewissem Maße reproduzieren, jedoch gestaltet sich das gezielte Herbeiführen einer bestimmten Bewegungsform schwierig. Beim Variieren der Prüfspannung durchläuft eine Partikel verschiedene Bewegungsformen. Wird die angelegte hohe Gleichspannung konstant gehalten, ändert sich die Partikelbewegung selten. Die Änderung der Bewegungsform ist hauptsächlich auf veränderte lokale elektrische Feldstärkewerte an unterschiedlichen Partikelaufenthaltsorten zurückzuführen.



Fig. 1: Partikelgezündeter Gasdurchschlag am Innenleiter einer SF<sub>6</sub>-isolierten GIS. Particle-triggered flashover at the inner conductor of a SF<sub>6</sub>-insulated GIS.


# Movement Patterns of Loose, Conductive Particles in Electrostatic Fields of SF<sub>6</sub>-Insulated GIS

Dipl.-Ing. Philipp Arnold

The dielectrical strength of gas insulated substations (GIS) can be lowered by contaminants of little account significantly. Loose, conductive particles pose a serious threat to trigger flashovers in the gas gap of a GIS (Fig. 1). Particle-triggered breakdowns are strongly related to the movement of loose particles. Depending on the voltage shape, the particle motion varies concerning mechanical movement, velocity and preferred position of a particle. Compared with AC voltage, particle movements become more intensive at DC voltage: Distances of particle movements get longer, the particle position changes more often and unsteadily.

At DC, voltage magnitude, particle properties and  $SF_6$  pressure are substantial influencing factors of particle motion. In experimental investigations, manifold shapes of particle movements have been observed (Fig. 2). Within the movement process, the electrical charge of a particle can change. Moreover a position-dependent electrical field strength acts on a charged particle. Therefore the outer conditions of a particle movement can change continuously and the shape of particle movement changes.

The observed particle movement patterns were showing repeatability in some degree, but certain shapes could not be repeated instantly. While varying the voltage magnitude, a particle performs several movement shapes. Under constant voltage condition, changes in the movement shape appear seldom. Changes of motion patterns are explained by altered local electrical field strength magnitudes at different particle positions.



Fig. 2: Einzelbildauswertung typischer Partikelbewegungen unter Gleichspannung. Step motion analysis of typical particle movements under DC field application.



# Diagnostische Auswertung von Vibrationen an Leistungstransformatoren

#### Dipl.-Ing. Michael Beltle

Der zuverlässige Betrieb von Leistungstransformatoren ist ein wesentlicher Faktor für die Versorgungssicherheit in elektrischen Energienetzen. Mögliche Schädigungen des Aktivteils, beispielsweise hervorgerufen durch mechanische Deformationen oder Lockerungen des eingespannten Kerns müssen möglichst frühzeitig erkannt werden. Die daraus folgende Änderung des Schwingungsverhaltens wird diagnostisch bewertet. Mechanische Vibrationen in Transformatoren haben zwei Hauptursachen. Zum einen die spannungsabhängige Magnetostriktion der Kernbleche, zum anderen elektrodynamische Kräfte der stromdurchflossenen Wicklungen im Magnetfeld. Beide führen zu einer mechanischen Grundfrequenz, die der doppelten elektrischen Frequenz entspricht. Periodische Auslenkungen führen zu Longitudinalwellen, die sich auf die Kesselwand übertragen. Die Kesselauslenkung kann mit Beschleunigungssensoren gemessen werden.

Fig. 1 zeigt den zeitlichen Verlauf von Vibrationen eines 125 MVA Transformators sowie den entsprechenden Laststrom bzw. die gemessene Öltemperatur (Top-oil) über der Zeit. Dargestellt sind die einzelnen Frequenzanteile, die einhüllende Kurve repräsentiert die gesamte Signalleistung zu jedem Messzeitpunkt. Eine Korrelation zwischen Last bzw. Temperatur und der mechanischen Vibration benötigt eine breitere Datenbasis und den Vergleich verschiedener Transformatoren, wie sie in den Fig. 2 und 3 dargestellt sind. Beide zeigen als Punktwolke die 100 Hz Amplitude vieler Einzelmessungen aufgetragen gegen die Last, siehe Fig. 2/3a) und die Öltemperatur, Fig. 2/3b). Als Vergleich dient ein 525 MVA ODWF Transformator.



Fig. 1: Frequenzanteile der mechanischen Vibrationen über der Zeit bei wechselnden Lastzuständen als Flächenplots; die Einhüllende entspricht der Signalleistung. Frequency components of vibrations over time at changing load conditions. Frequencies shown as area plot, the envelope represents the entire signal power.



## Diagnosis of Power Transformers using Vibration Measurement

#### Dipl.-Ing. Michael Beltle

The surveillance of electric resources gains importance. Power transformers in service suffer from obsolescence. Therefore, different approaches for permanent monitoring and assessment are discussed both in academic and industrial domains. Long-term measurement and evaluation of vibrations represents one of these scopes. Mechanical oscillations are caused by the voltage-dependent Joule magnetostriction of the single core sheets and load-dependent effects driven by the conducting windings within the magnetic field. Both effects lead to a basic mechanical frequency of doubled electric frequency superimposed by non-linear harmonics and normal modes. The oscillations couple into the insulating oil and are transferred to the tank as longitudinal waves. Therefore, vibration measurement is usually performed outside tank wall using accelerometer sensors which provides easy mounting and low costs for sensors within the required frequency range.

Fig. 1 shows the vibration power signal of single frequencies and the overall power over time of a 125 MVA transformer. Additionally, load current and top oil temperature are shown for comparison. Load changes lead to an alternating behavior of vibrations. Direct correlation between temperature and load to the vibration signal is shown in Fig. 2 for the 125 MVA and in Fig. 3 for a 525 MVA OFWF transformer. Both show the 100 Hz component of many single measurements as scatter plot vs. load, see Fig. 2/3a) and vs. top oil temperature, see Fig. 2/3b).





- a) 100 Hz Komponente aufgetragen gegen den Laststrom.
- b) 100 Hz Komponente aufgetragen gegen die Öltemperatur (gleicher Datensatz, insg. ca. 49.000 Messungen in 2,5 Jahren).
- a) 100 Hz component of vibrations over load current.
- b) 100 Hz component of vibrations over temperature (both with same dataset ~ 49,000 measurements in 2.5 years).



Höhere Frequenzanteile werden nicht betrachtet, da sie geringe oder keine Abhängigkeiten zum Laststrom oder der Temperatur zeigen und daher keine statistischen Vergleichsmöglichkeiten zum Betriebszustand bieten. Ihre Quellen sind zum einen Nichtlinearitäten der Magnetostriktion, zum anderen Eigenmoden der mechanischen Strukturen der Kesselflächen. Daher ist auch die diagnostische Verwertbarkeit der Harmonischen verglichen mit der Grundfrequenz geringer einzuschätzen. Der Vergleich beider Transformatoren zeigt die starke Abhängigkeit des Vibrationsverhaltens von den jeweiligen Betriebsmitteln. Die Grundfrequenz des 125 MVA Transformators lässt sich mit der Öltemperatur korrelieren, wohingegen der 525 MVA Transformator eindeutig Lastabhängigkeiten aufweist. Eine allgemeine Vergleichbarkeit verschiedener Transformatoren ist damit nicht gegeben.

Fig. 3 zeigt auch, dass die 100 Hz Komponente, gemessen an zwei unterschiedlichen Stellen (Seitenwand CH2 und Boden CH1) desselben Transformators, in ihrem Verlauf vergleichbar ist. Die exakte Positionierung von Sensoren am Kessel ist damit für die Aussagekraft der Messungen weniger entscheidend, was Untersuchungen an weiteren Transformatoren bestätigen. Für eine Langzeitüberwachung kann somit an einer oder mehreren Positionen am Kessel die Vibration gemessen und in ihrer Entwicklung verfolgt werden. Fig. 4 zeigt einen solchen Verlauf anhand des 125 MVA Transformators. Erkennbar ist ein konstantes Vibrationsverhalten der Grundfrequenz über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren mit gleichbleibender Streuung der Messwerte. Neuere Messungen zeigen eine dauerhafte Erhöhung des Pegels um ca. 80%, siehe markierter Bereich in Fig. 4. Eine tendenzielle Betriebsmittelbeurteilung über eine Kesselmessung im Sinne eines Vergleichs mit einem bekannten Referenzverhalten (Footprinting) kann einen zusätzlichen Beitrag zum Assessment eines Transformatorparks leisten.





- a) 100 Hz Komponente aufgetragen gegen den Laststrom
- b) 100 Hz Komponente aufgetragen gegen die Öltemperatur
- a) 100 Hz component of vibrations over load current
- b) 100 Hz component of vibrations over temperature



Harmonics of higher order do provide little information due to low levels, high variance and weak or no dependency to load current or temperature. Sources of harmonics of higher order are non-linear effects of the Joule magnetostriction and mechanical modes of the structure, mainly the tank. Hence, the correlation to the structural behavior of the active part can be considered as negligible.

Comparison of the basic frequency of both transformers illustrates the strong dependency on the particular asset. Whereas the dependency on the oil temperature is obvious at the 125 MVA OFAF transformer (Fig. 2), the 525 MVA transformer ODWF (Fig. 3) shows an expected quadratic behavior correlated to the load current. Hence, a general comparison of different assets cannot be made. Fig. 3 also shows the 100 Hz vibration being comparable if measured on the same transformer but at different positions (side tank wall, CH2 vs. bottom structure, CH1). Hence, the specific sensor position is of lower importance for long term measurement which is validated by tests on additional transformers.

Long term monitoring can be performed using sensors on various positions. An example is given in Fig. 4. The 125 MVA transformer shows constant behavior over a time period of 2 years (grey measurements) with constant variance of the 100 Hz component. Measurements after 2012 (black) show an increase in amplitude of approximately 80%, see marks in Fig. 4, and a slight rise in variance. Further investigations assign these changes not to all operational conditions but to specific load currents.

Transformer assessment in terms of long term trend analysis using simple vibration sensors outside tank wall can provide an additional benefit for lifecycle management. Established procedures from transformer diagnostics like footprinting are also applicable for the presented approach.



Fig. 4: Langzeitentwicklung der 100 Hz Komponente über der Temperatur. Grau: Messdaten 2010- 2012, Schwarz: erhöhte Werte von 2012 bis 2013. 100 Hz component comparison vs. temperature. Grey: 2010 –2012, black: 2012 until 2013 with increased levels.



## Entwicklung von Konzepten zur Dämpfung von "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTs) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS)

#### Dipl.-Ing. Simon Burow

Gasisolierte Schaltanlagen sind in elektrischen Energieverteilungssystemen weit verbreitet. Die platzsparende Bauweise, hohe Zuverlässigkeit und der geringe Wartungsaufwand sind Eigenschaften, die eine gasisolierte Ausführung von Schaltanlagen nicht nur für Spezialanforderungen interessant machen. In den letzten Jahren entstanden gasisolierte Schaltanlagen mit Nennspannungen im Höchstspannungsbereich (UHV) von über 1000 kV.

Vor allem Schalthandlungen von Trennern, aber auch Störfälle mit Überschlägen, können in gasisolierten Schaltanlagen zu transienten Ausgleichseffekten führen. Diese hochfrequenten Überspannungen werden auch "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTs) genannt und können Amplituden besitzen, die einem Vielfachen der Nennspannung entsprechen. Durch die hohen Amplituden der VFTs werden die Isoliersysteme sowohl innerhalb der GIS als auch in angrenzenden elektrischen Betriebsmitteln stark beansprucht. Vor allem bei Anlagen im UHV-Bereich können die VFT-Amplituden die Nenn-Steh-Blitzstoßspannung überschreiten und dadurch zum limitierenden Faktor bei der dielektrischen Dimensionierung der Betriebsmittel werden.

Ziel der Arbeit ist eine Dämpfung dieser transienten Überspannungen mit möglichst einfachen und zuverlässigen Mitteln, die die Zuverlässigkeit von GIS nicht beeinträchtigen. Dazu werden unterschiedliche Ansätze verfolgt und u.a. Versuche in einem 550 kV-GIS-Versuchsaufbau durchgeführt.

Mit dem Einsatz von Ferritringen, die auf dem Innenleiter der GIS angeordnet werden (Fig. 1), ließ sich keine Dämpfung der VFTs erzielen. Das Ferritmaterial gerät bei Strömen von über 10 kA in Sättigung und verliert dadurch seine dämpfenden Eigenschaften.



Fig. 1: Versuchsanordnung der Ferritringe. Test arrangement of ferrit rings.



## Development of conceptions to damp "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTOs) in Gas Insulated Substations (GIS)

#### Dipl.-Ing. Simon Burow

Gas insulated substations are widely spread in energy distribution systems. Less required space, high reliability and low maintenance effort are some of the advantages of GIS. These properties make them not only suitable for special applications. During the last years ultra high voltage (UHV) GIS with a rated voltage up to more than 1000 kV were engineered.

The main source for so called "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTOs) are switching operations of disconnector switches. But also flashovers inside a GIS could cause these steep transient equalisation effects. The VFTOs have very high frequency components and their amplitudes could reach a multiple of the rated voltage. Insulating systems in GIS and in joined devices next to the GIS are stressed or may be damaged by these high amplitudes of overvoltages. Especially for UHV GIS the VFTO amplitude could exceed the rated lightning impulse withstand voltage (LIWV). If the maximum VFTO is higher than the LIWV, it is necessary to consider the VFTO level as dimensioning criteria.

With simple methods and without a loss of reliability a decline of these overvoltages should be achieved. Therefore different options are persecuted and high voltage tests in a 550 kV GIS were carried out.

The application of ferrite rings, which are arranged on the inner conductor of GIS (Fig. 1), yields to no damping effect. Current of more than 10 kA cause a deep saturation of the ferrite material. Thereby the damping characteristic of the ferrite rings gets lost.



Fig. 2: Hohlraumresonator um einen GIS-Innenleiter. Resonator around a inner conductor of a GIS.



Ein zweiter Ansatz sind speziell angepasste Hohlräume (Hohlraumresonatoren) innerhalb der GIS, die durch die VFTs zum Schwingen angeregt werden. Dazu muss die Resonanzfrequenz des Hohlraums auf die Hauptkomponenten des VFT-Spektrums, das im Wesentlichen von der Ausdehnung und Schaltzustand der GIS abhängig ist, abgestimmt sein. Um die VFTs zu dämpfen, muss diesem schwingenden System Energie entzogen werden. Dazu müssen Widerstände in den Hohlraumresonator integriert werden. In einem entsprechenden Versuchsaufbau (Fig. 2) wurde zunächst die Resonanzfrequenz des Resonators an das Frequenzspektrum der VFTs angepasst. Anschließend wurden verschiedene Studien zur Integrierung und Dimensionierung eines Widerstände konnte eine leichte Dämpfung erzielt werden.

Eine weitere Dämpfungsoption besteht aus einem spiralförmig geschlitzten Innenleiter und dazu parallel installierten Metalloxidvaristoren im Inneren des Leiterrohrs (Fig. 3). Über dieser Anordnung fällt auf Grund der Induktivität des geschlitzten Leiterrohres und der hochfrequenten VFTs Spannung ab. Übersteigt sie die Bemessungsspannung der Ableiter fließt durch die Ableiter Strom. Dabei wird den VFTs Energie entzogen und die Amplituden werden gedämpft. In zahlreichen Versuchen und mit einem SPICE-Modell konnte die Dämpfung nachgewiesen werden und der Funktionsmechanismus beleuchtet werden.



Fig. 3: Spiralförmig geschlitzter Innenleiter mit Metalloxidvaristoren. Helical sliced conductor with surge arrestor.

Eine vielversprechende Möglichkeit sind nanokristalline Materialien. Dünne Bänder aus diesem Werkstoff sind zu Ringbandkernen (Fig. 4) verarbeitet und können über dem Innenleiter platziert werden. Durch den Einsatz von einigen nanokristallinen Ringen konnten in zahlreichen Hochspannungsversuchen in der 550 kV-Versuchsanlage bereits sehr gute Ergebnisse erzielt werden (Fig.5). Die optimale Wahl verschiedener Werkstoffparameter sowie ein grundlegendes Verständnis des Dämpfungsmechanismus sind Themen verschiedener Studien.



A second approach uses a special formed cavity (resonator) in the GIS. VFTOs, which are traveling through the cavity, cause electromagnetic resonances in this cavity. Therefore the resonant frequency must be equal to the dominant harmonic component of the VFTOs formed by the GIS setup and switching conditions. For a successful damping the energy in the resonator has to be dissipated by resistors. A special resonator was built and adjusted to the GIS setup (Fig. 2). By means of different studies the dimension and arrangement of the damping resistor were investigated. A slight damping was achieved by an ideal arrangement of the resistor.

A further option is a helical slit conductor with parallel metal oxide arrestors (Fig. 3). The slit conductor serves as an inductance. By the high frequency of the VFTO, a voltage drop across the slit conductor occurs. As it exceeds the rated voltage of the arrestor, current flows through the arrestors and the VFTOs get damped. The damping potential was verified by tests and a SPICE simulation.



Fig. 4: Ringe aus nanokristallinen Materialien. Rings of nanocrystalline materials.

Nanocrystalline materials are a very promising option for VFTO damping. Thin layers of this material are winded to rings (Fig. 4) and placed on the inner conductor of a GIS. By means of these nanocrystalline rings a pretty good VFTO mitigation was achieved in many high voltage tests (Fig 5). The points of interest are the ideal parameters of this material and a basic understanding of the damping mechanism.



Fig. 5: Dämpfung durch Ringe aus nanokristallinem Material: mit Ringen (durchgezogene Linie) und Referenzmessung (gepunktete Linie). Damping by means of nanocrystalline rings: with rings (continuous line) and reverence measurement (dashed line).



## Influence of Acids and Water on Transformer Vegetable Oil's Conductivity

#### M. Sc. Alexandra CIURIUC

In recent years, the vegetable oil for power transformers has attracted much interest not only due to its biodegradability, but also to the good influence that it has proved to have on the paper. The purpose of this contribution is to determine the influence of free fatty acids and water on the dc conductivity of vegetable oil. In order to perform this study, new vegetable oil samples were contaminated with different concentrations of fatty acids and water and the dc conductivity was measured.

FR3 vegetable oil samples were subjected to fatty acids and water contamination. In recipients that contained 600 ml of new dry vegetable oil with a water content of 35 ppm were added different fatty acid quantities (4.5 ml, 6 ml, 9 ml and 12 ml) (samples A). After being left over night on the magnetic stirrer in order to have a homogeneous mixture, the dc conductivity of the oil was determined. The same samples were left over night in uncovered recipients in order to allow them to absorb water from the environment and after they reached a water content of 180 ppm (samples B), the dc conductivity was measured again.



Fig. 1: Variation of dc conductivity with time for new vegetable oil samples with different water contents (A – 35 ppm, B – 180 ppm) and different acid numbers:

1 (0.05 mg KOH/g), 2 (1.28 mg KOH/g), 3 (2.15 mg KOH/g), 4 (3.15 mg KOH/g), 5 (4.07 mg KOH/g).



| Sample A               | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     |
|------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| σ <sub>DC</sub> [pS/m] | 4    | 4.32 | 5.36  | 9.65  | 11.1  |
| Sample B               | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     |
| σ <sub>DC</sub> [pS/m] | 7.99 | 9.85 | 13.23 | 18.39 | 22.08 |
| Sample A, B            | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     |
| TAN [mg<br>KOH/g]      | 0.05 | 1.28 | 2.15  | 3.15  | 4.07  |

Table 1: DC conductivity and acid number values (TAN) for samples A and B.

Fig. 1 and Table 1 show the variation of dc conductivity with time for samples A and B with different acid numbers. It can be seen that the dc conductivity increases with the increase of acidity in oil. This could be due to the fatty acids dissociation in oil which forms ions that participate to the conduction phenomenon.



Fig. 2: Variation of dc conductivity with total acid number for dry contaminated vegetable oil samples A and B.

Fig. 2 shows the dc conductivity variation with the total acid number for samples A and B. It can be seen that  $\sigma_{DC}$  increases linearly with the acidity in oil. It seems that the free fatty acids present in the vegetable oil have an influence on its conductivity values. Also, if the water content is high, the fatty acids' influence becomes more important. This facilitates the vegetable oil's state estimation based on the total acid number value.



## Calculation of Top Oil Temperature of Power Transformer Based on Physical Models

### M. Sc. Mohammad DJAMALI

Power transformers are very important devices in power systems. Hence, monitoring of power transformers has economic justification. Moreover, thermal monitoring of transformer is important in order to predict the breakdown (especially insulation breakdown) of the transformer. Top oil temperature is one of the most important parameters to define transformer characterization, since the calculation of the hot spot temperature - which has considerable effects on insulation health - and calculation of overload capability of transformer will be possible using the top oil temperature value.

It is shown in the literature that the variation of top oil temperature under transient conditions of loading and ambient temperature can be described as a first order differential equation. There are several models which have been proposed to calculate top oil temperature of power transformer based on this fact. The most common models are namely: IEEE C57, Linear, IEC 60354, IEC 60076-6, Swift, Susa, One body. These models are called physical models.

In top oil temperature models there are some unknown parameters. Although there are examples or recommendations for these parameters in the standards they can be estimated based on measurement data. Moreover, the unknown parameters can be considered as constant values or as temperature dependent values. It means that in the former case, the unknown values are considered as intrinsic characteristics of transformer which remain constant in any loading and ambient temperature; nevertheless, in the latter case, the unknown parameters change with the variation of the transformer's temperature. Certainly, the accuracy of the model depends extremely on the estimated parameters which means that suitable parameters and suitable measuring data have to be selected for estimation.

On the other side, the top oil temperature models provide results of a complex physical phenomenon in the form of a simple numerical solution. Hence, in order to evaluate the accuracy of the model and regarding the fact that the nature of input data of the models is stochastic, some statistical indices need to be considered or properly defined. The most common indices of accuracy evaluation are Mean absolute error, Root mean square error, Maximum Error and Non-dimensional error index.

To develop the conventional and common models, some attempts have been made at IEH based on consideration of temperature dependent thermal resistance for Onebody model, and the results were acceptable. This research mainly focuses on the other models. Fig. 1 and Fig. 2 illustrate the mean absolute error and the maximum error between measured and calculated top oil temperature of conventional models for four different datasets of an ONAN 31.5 MVA transformer, respectively.



Mean Absolute Error (K)



Fig. 1: Mean absolute error of conventional models for different datasets considering constant estimated value.

It is worthwhile to note that the estimated parameters in these results were considered as constant values. As can be seen, none of the models is good for all datasets. It means that the adequacy and accuracy of modeling and estimation depend on the training datasets. The figures imply that there is a demand for a model based on conventional models whose results are appropriate for every dataset.



Maximum Error (K)

Fig. 2: Maximum error of conventional models for different dataset considering constant estimated value.



## Eigenschaften alternativer Isolieröle im Öl-Papier Isoliersystem

#### Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Im vergangenen Jahr wurde die Forschung an Isolierölen und am Öl-Papier-Isoliersystem weiter vorangetrieben. Das IEH hatte zwei Wissenschaftler aus Rumänien (Bukarest) und Polen (Poznan) als Gast in den Öl- und Hochspannungslabors. Frau Alexandra Ciuriuc untersuchte das Alterungsverhalten von natürlichen Estern und Mineralöl in Kombination mit Kraftpapier. Es konnten die Aussagen der Esterhersteller, wonach Papier in Kombination mit Pflanzenölen langsamer altert, ganz klar bestätigt werden. Gleichzeitig war die Säurezahl der Ester wesentlich höher als beim Mineralöl. Es können aufgrund ihrer unschädlicheren Wirkung (langkettige Fettsäuren) und keinem miteinhergehendem Verlust der elektrischen Festigkeit des Öls höhere Grenzwerte toleriert werden. Herr Malinowski aus Poznan beschäftigte sich mit der Durchschlagspannung von Isolieröl bei langen Strecken und Kriechanordnungen bis 50 mm. Mit den Ergebnissen konnten neue Weidmann- bzw. Kappelerkurven für Mineralöl, natürliche Ester und synthetische Ester berechnet werden.

Die dielektrische Diagnostik (Impedanzspektroskopie, FDS) wurde für alternative Isoliersysteme weiterentwickelt. Es ist nun eine vollständige feuchtigkeits- und temperaturabhängige Datenbasis für FR3 imprägniertes Kraftpapier und HD-Pressboard verfügbar. Sie dient später der Feuchtigkeitsbewertung der Papierisolation FR3 gefüllter Transformatoren.

Ein weiteres Thema war die Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Pflanzenöl bei tiefen Temperaturen, genauer im Bereich des Stockpunkts und deutlich unterhalb. Diese Fragestellung wird aufgeworfen, da der Stockpunkt eines natürlichen Esters (hier: FR3) bei -21°C liegt und solche Temperaturen durchaus im Betrieb von Transformatoren oder Wandlern auftreten können. Dazu wurden ölgefüllte Messzellen mit VDE-Kalotten Elektroden bis zu -35°C gekühlt. Die Kontraktion des Materials wurde berücksichtigt, so dass bei jeder Temperatur 2 mm Elektrodenabstand erreicht wurden. Zu Vergleichszwecken wurden die Tests auch mit Mineralöl gemacht. Die Prüfspannung ist eine Wechselspannung mit 60 Hz und einer Spannungssteigerungsrate von 2 kV/s bis zum Durchschlag mit Schnellabschaltung. Alle Messungen wurden mindestens zehn Mal wiederholt, und gestockte Proben wurden immer ausgetauscht, da die entstandenen Durchschlaggase nicht entweichen konnten. In Bild 1 erkennt man beim Mineralöl den typischen Verlauf, dass mit tieferen Temperaturen bei konstanter Gewichtsfeuchte die relative Feuchte steigt und somit die Durchschlagspannung sinkt. Genauso bewirkt eine Erhöhung des absoluten Wassergehalts eine Festigkeitsverringerung.



# Properties of alternative Insulating Liquids in Oil/Paper insulating Systems

### Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

In the past year further progress has been achieved in the research area of insulating liquids and oil-paper insulating systems. The institute had two guests from Romania (Bucharest) and Poland (Poznan) in the oil- and high-voltage laboratories. Mrs. Alexandra Ciuriuc investigated the ageing behaviour of natural esters and mineral oil in combination with Kraft paper. Publications from ester manufacturers, which show that paper degrades more slowly with natural ester, could be confirmed. Although the acid number of esters was higher, no damaging or negative effect could be observed. Mr. Malinowski from Poznan worked in the field of dielectric strength of insulating liquids - especially the strength of long oil gaps and creep configurations up to 50 mm. With these results new Weidmann respectively Kappeler curves could be calculated for mineral oil, natural and synthetic esters.

The development of dielectric diagnosis (frequency domain spectroscopy) has also been continued for alternative insulating systems. A complete moisture and temperature dependent database for FR3 impregnated paper and HD pressboard has been produced. This is necessary for moisture assessment of FR3 filled transformers.

A further topic was the investigation of natural ester's performance at low temperatures, to be more specific near the pour point and significantly below. This question is raised because the pour point of natural esters (here: FR3) is specified at  $-21^{\circ}$ C. Such a low temperature is not uncommon. For the tests oil filled test cells with VDE calotte electrodes have been cooled down to -35°C. The contraction of the material has been considered, so that for each temperature the electrode gap is 2 mm. Mineral oil has also been tested as a reference. The test voltage is AC with 60 Hz and a voltage rise of 2 kV/s until breakdown. All measurements were repeated at least ten times. After a breakdown the oil was completely removed and new oil was frozen again. The reason was that fault gases from breakdown couldn't dissolve and subsequent tests are affected. Figure 1 shows the typical behaviour of mineral oil. With lower temperature and constant absolute moisture content the relative moisture rises and thus the breakdown voltage is reduced. Also higher water content leads to a lower breakdown voltage. Natural esters behave the same way at room temperature, as long as they are liquid. In the gel-like state breakdown voltage is improved (more than 80 kV at 2 mm). This happens independently from the water content. At -35°C a significant reduction occurs. In order to investigate this effect in more detail a new series of breakdown tests was conducted with smaller temperature steps (see figure 2). Approaching the pour point, the breakdown voltage gets better and better. The oil behaves different than one would expect from insulating liquids. At -30°C the dielectric strength is still good, but with lower temperatures the loss of strength can be observed.





Fig. 1: Durchschlagspannung bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten (links: Mineraöl MO, rechts: natürliche Ester (NE)) Breakdown voltage at different temperature and moisture content (left: mineral oil (MO), right: natural ester (NE))

Natürliche Ester verhalten sich ebenso bei Raumtemperatur, solange sie flüssig sind. Im gelartigen Zustand steigt die Durchschlagspannung stark an (über 80 kV bei 2 mm). Dies ist unabhängig vom Wassergehalt. Bei -35°C tritt eine starke Reduktion auf. Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurden die Temperaturschritte bei trockenem Pflanzenöl verkleinert (siehe Bild 2). Man erkennt, dass ausgehend von Raumtemperatur die elektrische Festigkeit in Richtung Stockpunkt zunimmt. Das Öl verhält sich nicht wie man es von Isolierflüssigkeiten erwarten würde. Außerdem wird deutlich, dass bis -30°C die Festigkeit noch gut ist und ab dieser Temperatur der Reduktionseffekt beginnt. Die Ursache hierfür ist noch unklar. In einem weiteren Versuch sollte - wie nach einem Kaltstart - untersucht werden, ob die reduzierte Durchschlagspannung reversibel ist. In Bild 3 erkennt man, dass nach langsamem Auftauen die elektrische Festigkeit wieder sehr gut wird. Bei beschleunigtem Auftauen konnte sich das Wasser nicht so schnell im Öl lösen und verursacht die niedrigere Durchschlagspannung. Nach mehrstündiger Wartezeit wird der Ursprungswert fast wieder erreicht. Wichtig ist festzustellen, dass die natürlichen Ester im Vergleich zum Mineralöl die gleiche Leistungsfähigkeit besitzen.

Abschließend ist festzuhalten, dass natürliche Ester bis zu -30°C eine sehr gute Durchschlagspannung besitzen. Beim Kaltstart eines Transformators muss allerdings das Verhalten des gesamten Isolationssystems betrachtet werden und nicht nur das Öl alleine. Außerdem ist die gemessene Durchschlagspannung keine Dimensionierungsgröße bei der Auslegung von Isoliersystemen, sondern entspricht eher einer Ölqualitätsmaßzahl.



The cause of this effect is still uncertain. In a further experiment the regaining of dielectric strength after freezing at  $-35^{\circ}$ C is investigated. Figure 3 shows that the effect for slow defrosting is reversible. For fast defrosting a temporary smaller breakdown voltage than the original one can be measured. After a waiting time of a couple of hours the original BDV was almost reached. The reason for this behaviour is that the water in the oil couldn't dissolve as quickly as the oil heated up. Important to note is the fact that natural esters have the same performance compared to mineral oil.

Concluding, natural esters have a very good breakdown voltage down to  $-30^{\circ}$ C. Recommendations for cold start of a transformer should consider the whole insulating system and not the oil alone. It should be noted that this breakdown voltage is not meant for dielectric design, but it is a value, which describes oil quality.



Fig. 2: Durchschlagspannung von Pflanzenöl bei tiefen Temperaturen Breakdown voltage of natural ester at low temperatures



Fig. 3: Durchschlagspannung nach dem Auftauen von −35°C Breakdown voltage after defrosting from −35°C.



# Dielectric Strength of new insulating Liquids and Kappeler curves

#### M.Sc. Eng. Grzegorz Malinowski

For over one hundred years mineral (and petrol based) oils are the basic cooling and insulating medium in power transformers. From couple of years there is a tendency to substitute mineral oil with vegetable based oils. The biggest advantage of vegetable based oil versus mineral oils is being environmentally friendly and having much higher flash point. Although vegetable based oils are currently used in some power transformers, still there is much to learn about this new insulating medium.

The goal of this research was to determine the Kappeler curves for mineral oil, synthetic and natural ester. Kappeler curves describe PD inception voltage in oil ducts, as the distance between the electrodes increases. They were introduced in 1958 for homogeneous field (Fig. 1).

For this research three different kinds of oils were tested: mineral oil, synthetic and natural ester. Three usual oil ducts were investigated. Measurements were done in quasi-homogeneous field setup (point-plate configuration) in cylindrical container (Fig. 2) at ambient room temperature.



Fig. 1: Kappeler curves (based on Moser H.P. "Transformerboard 1", p. 50, 1979)





Fig. 2: Test cell with overspark (left) and the electric field distribution inside (right)

The Normal and Weibull 1- and 50% voltage withstand strength were calculated, resulting in plotting the probability function. The maximum and average electrical strength were calculated in FEM software, resulting in determining the inhomogeneity factor. It was done by dividing the maximum electric field strength (at the tip of the electrode) by the average value. Having the average electrical strength calculated, the Kappeler curves, for the 1- and 50% (Normal and Weibull) withstand voltage could be plotted.

The problem is that the original Kappeler curves were measured in homogeneous field setup, while investigated setup was quasi-homogeneous. The original were also the function of PD inception voltage versus oil duct. Because of those two major differences, plotted curves and "old" Kappeler curves cannot be compared in a strict manner. While the original Kappeler curves were measured for the very low distance, and extrapolated for bigger distances, the curves from the research are actual measured values, and they vary just a little bit from the original ones.

Based on the investigation and plotting the Kappeler curves, it can be concluded, that the electric strength of mineral oil is greater than the one of natural ester and the electric strength of natural ester is greater than the one of a synthetic ester (both Normal and Weibull distribution, while the Weibull distribution is always on the "safe side" – lower values of breakdowns). This means for example for the constructors, that when designing new transformer, the dimensions of a new unit should be bigger than the one designed for mineral oil. It also has to be taken into consideration, that the "old" Kappeler curves are based on an extrapolation (at bigger distances the electric field distribution is more inhomogeneous), while investigated and plotted curves are actually measured, therefore they are more accurate. Also for the "old" Kappeler curves there is no data about the moisture so there is no solid point of reference to results done earlier.



## Fehlergasverluste über das Ausdehnungsgefäß eines freiatmenden Leistungstransformators

#### Dipl.-Ing. Andreas Müller

Um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb von Leistungstransformatoren zu ermöglichen, wird auf verschiedene Diagnose-Techniken zurückgegriffen. Vor allem die etablierte Gas in Öl Analyse (Dissolved Gas Analysis, DGA) kann wichtige Informationen über Fehler im Inneren eines Transformators liefern. Durch natürliche Alterung sowie durch thermische oder elektrische Fehler entstehen Gase, die sich im umgebenden Öl des Transformators lösen. Bei der Diagnose der Gaswerte wird vermehrt auf die Gasgenerationsraten verwiesen. Dabei spielt der Verlust an Gasen eine wichtige Rolle, da er die gemessenen Werte verfälschen kann. Sein Einfluss ist aber nicht bekannt.

Der Verlust an Fehlergasen findet überwiegend über das Ausdehnungsgefäß eines frei-atmenden Leistungstransformators statt. Frei-atmend heißt in diesem Zusammenhang, dass das Öl im Ausdehnungsgefäß in direktem Kontakt zu Luft steht. Hierbei findet ein Gasaustausch statt. Fehlergase (z. B. H<sub>2</sub> oder C<sub>2</sub>H<sub>x</sub>) werden an die Luft im Ausdehnungsgefäß abgegeben und Luftgase (O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>) werden im Öl gelöst. Dabei spielt die Menge des Ölaustausches und somit auch die Menge des Fehlergasaustausches zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß eine große Rolle. Der Ölaustausch kann je nach Bauart und Betriebsweise des Transformators variieren.

Eine Veränderung der Gaskonzentration des Kessels wirkt sich dabei auf die Konzentration im Ausdehnungsgefäß aus und umgekehrt. Ein System aus zwei Differenzialgleichungen wird verwendet, um die Verluste zu modellieren. Damit wird die Ableitung jeder Konzentration durch die Konzentration im Kessel und im Ausdehnungsgefäß beeinflusst. Dies führt zu einem Gleichungssystem für die Konzentrationen im Kessel und Ausdehnungsgefäß mit Konstanten, die vom Volumen, dem Verlustfaktor des Gases im Ausdehnungsgefäß und dem Ölaustausch zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß abhängen. Die Lösung dieser Differenzialgleichungen beschreibt den Transport der Fehlergase und den Fehlergasverlust des gesamten Systems.

In Fig. 1 ist die Simulation der Verluste eines generischen Transformators dargestellt. Er hat ein Ölvolumen von 46000 I und ein frei-atmendes Ausdehnungsgefäß von 3900 I. Im Kesselöl sind 250 ppm Wasserstoff gelöst, das Öl im Ausdehnungsgefäß enthält zu Beginn keinen Wasserstoff. In der Abbildung sind die zeitlichen Verläufe der Wasserstoffkonzentration in Kessel und Ausdehnungsgefäß für zwei verschiedene Ölaustauschraten (20 und 40 l/h) dargestellt.



## Loss of Fault Gases through the Conservator Tank of freebreathing Power Transformers

#### Dipl.-Ing. Andreas Müller

To ensure a safe and secure operation of transformers various diagnosis techniques are known. Especially, the well-established dissolved gas analysis (DGA) can provide important information about faults inside a transformer. Natural aging, thermal and electrical failures generate typical fault gases, which dissolve in the surrounding oil. To assess the dangerousness of an upcoming fault, the gassing trend gains importance. However, the loss of fault gases plays a significant role because it may falsify the measured values. Nevertheless, its influence is yet unknown.

The loss of fault gases is predominantly caused by the free-breathing conservator tank of a transformer. At free-breathing transformers, the oil in the conservator tank is in direct contact to air. Fault gases (like  $H_2$  or  $C_2H_x$ ) volatilize to the air in the conservator tank and air gases ( $O_2$  and  $N_2$ ) dissolve in the oil. The exchange rate and consequently the amount of transported fault gases between main and conservator tank affect the process. The influence may vary depending on the type and the operation mode of the transformer.

A system of two differential equations is used to model the losses. Changes of the gas concentration in the main tank influence the concentration in the conservator tank and vice versa. Thus, the derivative of each concentration is affected by the concentrations in main and conservator tanks. This leads to a system of equations for the concentration in the main and conservator tank with constants. The constants depend on the volume, the loss factor of gases in the conservator and the oil exchange rate between main and conservator tank. The solution of this differential equation describes both, the transport of gases and the loss of fault gases of the entire system.

In Fig. 1 the simulation of losses of a generic transformer can be seen. It has an oil volume of 46000 I. The conservator tank of this transformer is free-breathing and has a volume of 3900 I. At the beginning, the main tank contains a concentration of 250 ppm hydrogen dissolved in the oil. There is no hydrogen in the conservator tank. In Fig. 1 the concentration trend of hydrogen in the main and conservator tank is shown with two different oil exchange rates (20 and 40 l/h).

The oil concentration of hydrogen in the main tank decreases exponentially. In the conservator, the concentration first rises and then decreases exponentially. The losses rise at a higher oil exchange rate. At a concentration of 250 ppm  $H_2$  and an oil exchange of 20 l/h the initial loss would correspond to 2.1 ppm per day.



Die Konzentration des Wasserstoffs im Kesselöl verringert sich exponentiell. Im Ausdehnungsgefäß steigt die Konzentration erst an und fällt danach ebenfalls exponentiell. Bei einem größeren Ölaustausch steigen die Verluste an. Bei einer Konzentration von 250 ppm  $H_2$  und einem Ölaustausch von 20 l/h ergibt sich zu Beginn ein Verlust von ca. 2.1 ppm pro Tag.



Fig. 1: H<sub>2</sub> Konzentrationsverlauf bei verschiedenen Ölaustauschraten. H<sub>2</sub> concentration trend at different oil exchange rates.

Nun soll im Labor der Verlust an Fehlergasen nachgestellt werden. Hierzu wird ein Laboraufbau verwendet (siehe Fig. 2, links). Er besteht aus einem ölgefüllten Tank aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit einem Volumen von 626 I und einem metallenen Ausdehnungsgefäß mit einem Volumen von 60 I. Eine Pumpe wird für einen kontinuierlichen Ölfluss zwischen dem Tank und dem Ausdehnungsgefäß verwendet. Das Öl wird dabei aus dem Tank in den Ausdehner gepumpt und fließt wieder zurück in den Tank. Der Ölfluss wird mit einem Flowmeter gemessen und über ein Nadelventil eingestellt. Ein online DGA System misst jede Stunde die gelösten Gase im Tank.

Für das Experiment werden 700 I Mineralöl getrocknet, gefiltert und entgast. Nach dem Entgasen wird ein Fehlergasmix im Öl mit Hilfe einer porösen PTFE Plastik gelöst. Danach wird die Pumpe gestartet und das Öl zirkuliert im Experiment. Das gelöste Fehlergas wird langsam aus dem Tank in das Ausdehnungsgefäß und in die umgebende Luft befördert. Fig. 2 (rechtes Diagramm) zeigt den Verlauf der Wasserstoffkonzentration. Im ersten Fall fördert die Pumpe das Öl über das Ausdehnungsgefäß mit 1 l/min. Im zweiten Fall wird das Öl ebenfalls gepumpt, allerdings nur im Tank und nicht über das Ausdehnungsgefäß. Ein Verlust der Wasserstoffkonzentration tritt nur im ersten Fall auf. Die Konzentration im Tanköl verringert sich dabei exponentiell. Im anderen Fall bleibt sie konstant.





Fig. 2: Links: Laboraufbau eines frei-atmenden Leistungstransformators. Rechts: Trend der H<sub>2</sub> Konzentration bei unterschiedlichen Pump-Einstellungen.

Left: Laboratory model of a free-breathing power transformer. Right:  $H_2$  concentration trend at different pumping setups.

In the next step, the loss of fault gases should be emulated at the laboratory. Therefore, a laboratory setup is used (see Fig. 2, left picture). It consists of a glass fiber reinforced plastic tank with a volume of 626 I filled with mineral oil. In addition, a metal conservator tank with a volume of 60 I is used. To get a continuous and constant oil flow between conservator and main tank a pump is used. The oil is extracted at the bottom of the main tank, pumped into the conservator and flows again down to the main tank. The oil flow is measured by a flow meter and controlled by a needle valve. An online DGA system measures the dissolved gases every hour.

For the experiment, 700 I of mineral oil are dried, filtered and degassed. After degassing, a fault gas mix is dissolved in the oil using a porous PTFE plastic. Afterwards, the pump is switched on and the oil starts circulating in the experiment. The dissolved fault gas is slowly carried from the tank to the conservator tank and finally to the surrounding air. Fig. 2 (right diagram) shows the trend of hydrogen concentration. In the first setup, the oil is pumped across the conservator with 1 l/min. In the second setup, the oil is pumped as well but without including the conservator. A loss of hydrogen concentration can only be seen at the first setup. The concentration in the tank decreases exponentially. In the second setup it stays constant.



# Untersuchung der Temperaturverteilung in Öl-gekühlten Leistungstransformatoren

### Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Transformatoren stellen eine Schlüsselkomponente bei der Verteilung elektrischer Energie in Stromnetzen dar. Ihre Belastbarkeit und Lebensdauer hängt maßgeblich von thermischen Gesichtspunkten ab. Obwohl heutige Transformatoren bereits sehr effizient sind, müssen ihre Kühlsysteme beträchtliche Mengen an Wärme abführen, die in den Wicklungen während des Betriebs freigesetzt werden. Je höher das aus einer bestimmten Belastung resultierende Temperaturniveau liegt, desto schneller altern die verwendeten Isolationsmaterialien bei dieser Belastung. Dabei verdoppelt sich die Alterungsgeschwindigkeit von Isolationsstoffen auf Celllulosebasis durch einen Temperaturanstieg von lediglich 6 bis 8 K. Ausschlaggebend für einen thermischen Fehler ist dabei allerdings nicht der durchschnittliche Alterungszustand der gesamten Isolation. Detaillierte Kenntnisse über die Temperaturverteilung im Inneren einer Transformatorwicklung stellen daher eine entscheidende Voraussetzung für die zweckmäßige Bestimmung der Nennleistung und Lebensdauer von Transformatoren dar.

Für die Untersuchung der Temperaturverteilung innerhalb einer Transformator-wicklung können prinzipiell verschiedene Ansätze verfolgt werden. Untersuchungsmethoden mit Hilfe von direkten Temperaturmessungen beispielsweise bringen jedoch einige Herausforderungen mit sich, die zum Teil schwer zu meistern sind. Neben monetären Aspekten sind dabei die Bestimmung der vorherrschenden Randbedingungen und die Genauigkeit von Messgeräten zu nennen, welche für eine Anwendung innerhalb eines im Betrieb befindlichen Transformators geeignet sind. Aus diesem Grund werden für die thermische Analyse von Leistungstransformatoren experimentelle und numerische Wicklungsmodelle herangezogen.

Um den baulichen bzw. numerischen Aufwand eines Wicklungsmodells zu reduzieren, ist es möglich, vorhandene Symmetrien des Aufbaus von Transformatorwicklungen auszunutzen. Fig. 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Scheibenwicklung, wie er häufig in Leistungstransformatoren anzutreffen ist. Um einen definierten Abstand zwischen jeweils zwei Scheiben zu erzeugen, werden dabei in Umfangsrichtung in regelmäßigen Abständen sogenannte Spacer eingesetzt. Zur weiteren Stabilisierung können darüber hinaus in Abhängigkeit der Transformatorgröße auch Stäbe zwischen jeweils zwei Spacern zum Einsatz kommen. Durch die Anordnung der Spacer entstehen symmetrische Abschnitte in Umfangsrichtung, welche die horizontalen und vertikalen Kühlkanäle beherbergen.



## Investigation of the Temperature Distribution in Oil Cooled Power Transformers

### Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Power transformers are key components in electrical power networks. Their power rating and life-cycle characteristics are strongly dependent on thermal aspects. Although today's transformers are highly efficient, their cooling systems still have to discharge non-negligible amounts of heat dissipated in their windings. The higher the evolving temperature levels at a given loading rate are settling, the faster the insulation materials will age at that loading rate. A temperature increase of only 6 to 8 K doubles the depolymerisation rate of cellulose-based insulation materials. Moreover, a thermal failure results not from the overall condition of the insulation but from the most degenerated part of the insulation caused by the highest local temperatures. Therefore, a profound knowledge about the temperature distribution inside a transformer is crucial for an appropriate assessment of the component's power rating and life-cycle.

For the investigation of the temperature distribution within the windings of an oil cooled transformer, different approaches can be pursued. Direct temperature measurements inside power transformers pose several challenges that may be difficult to meet. The determination of prevailing boundary conditions and the accuracy of measurement equipment suitable for an application inside a transformer in operation are notable examples in addition to monetary aspects. Consequently, experimental and numerical winding models are applied for the thermal analysis of power transformers.

The design of transformer windings usually offers symmetries that can help to reduce the connected efforts in creating numerical or experimental winding models.



Fig. 1: Exemplarischer Aufbau einer Scheibenwicklung Design example of a disc-type winding



Die Untersuchung der Einflüsse, welche aus Randbedingungen wie dem Ölmassenstrom, der Eintrittstemperatur des Öls und den Verluste in den Leitern resultieren, kann daher mit Wicklungsmodellen erfolgen, welche lediglich einen solchen symmetrischen Abschnitt einer Wicklung repräsentieren.

Bei der Untersuchung eines numerischen Wicklungsmodells kann die numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, *kurz:* CFD) herangezogen werden. Dieses Verfahren umfasst dabei in einem ersten Schritt die Erstellung eines numerischen Modells, welches die zweckmäßige Darstellung des zu untersuchenden Bereichs ermöglicht. Wie bei technischen Betrachtungen üblich, müssen dabei gegebenenfalls Vereinfachungen angewandt werden, um den Rechenaufwand auf ein vertretbares Maß begrenzen zu können. Fig. 2 zeigt einen Ausschnitt eines zweidimensionalen Modells einer Niederspannungswicklung sowie eine vergrößerte Darstellung der hierfür gewählten Diskretisierung. Das Wicklungsdesign greift dabei auf sogenannte Washer zurück, die den Ölstrom in bestimmten Abschnitten in radialer Richtung umlenken.



Fig. 2: Numerisches Modell einer Unterspannungswicklung mit Diskretisierung Numerical model of a low voltage winding with discretization

Nach der Diskretisierung des zu untersuchenden Bereichs erfolgt die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen, welche die Bewegung des Ölstroms analytisch beschreiben. Die daraus resultierende Geschwindigkeitsverteilung ist für einen Abschnitt einer Transformatorwicklung beispielhaft in Fig. 3 links dargestellt. Wird darüber hinaus bei der Berechnung auch die von der Ölstromverteilung abhängige Wärmeübertragung mitbetrachtet, kann damit die in Fig. 3 rechts dargestellte Temperaturverteilung bestimmt werden. Um die Ergebnisse der numerischen Analyse belegen zu können, wurden am IEH bereits mehrere experimentelle Wicklungsmodelle erstellt.



Fig. 1 shows an example for the design of a disc-type winding commonly applied in power transformers. To create a defined distance between two adjacent discs, so-called spacers are assembled in periodic distances in circumferential direction. Depending on the transformer size intermitting sticks might be applied for additional stabilization. The alignment of the spacers results in symmetrical sections in circumferential direction containing the horizontal and vertical cooling channels. Therefore, the investigation of influences resulting from boundary conditions as the oil flow rate, the inlet oil temperature or the electrical losses inside the conductors might be carried out with a winding model representing a single, symmetrical section.

One possible approach to investigate a winding model numerically is the application of computational fluid dynamics (CFD). In a first step, this method comprises the creation of a numerical model representing the domain of interest. As for most engineering purposes, this model applies appropriate simplifications required to keep the computational efforts within reasonable range. Fig. 2 shows details of a two dimensional model of a low voltage winding with an enlargement of the chosen discretization. As displayed, the winding design applies so called washers forcing the oil to change its radial direction. After discretization of the domain of interest, the Navier-Stokes equations describing the motion of a fluid flow are solved numerically, giving the detailed velocity distribution as shown in Fig. 3 on the left. In addition, the heat transfer depending on the mass flow distribution can be calculated simultaneously, resulting in the temperature distribution as displayed in Fig. 3 on the right. For the purpose of a proper validation of the numerical results several experimental winding models were investigated at the IEH.





Oil flow velocities and temperature distribution inside a transformer winding

85

81

77

73



## Kombinierter Sensor zur Vibrationsmessung und zur Teilentladungsdetektion im akustischen und ultrahohen Frequenzbereich im Transformatorkessel

Dipl.-Ing. Martin Siegel

Um lokale Schäden in Leistungstransformatoren frühzeitig erkennen zu können und zu somit die Gefahr eines Ausfalls minimieren, gewinnen regelmäßige Zustandsprüfungen zunehmend an Bedeutung. Diese können Aufschluss über das Ausfallrisiko und die Restlebensdauer eines Transformators geben. Hierzu werden verschiedene Parameter von Leistungstransformatoren zu Diagnose und Monitoring herangezogen. Für eine Langzeitüberwachung eignet sich die Vibrationsanalyse, welche die mechanischen Schwingungen des Aktivteils auswertet. Der Fokus dieser Methode liegt auf der Detektion von mechanischen Änderungen, wie beispielsweise nachlassende Einspannkräfte der Wicklungen. Für Untersuchungen der elektrischen Eigenschaften etablieren sich neben der konventionellen Teilentladungsmessung nach IEC 60270 auch zunehmend Messmethoden, die sich nicht auf die Zuordnung der Teilentladung (TE) zu einer Wicklung beschränken, sondern eine genauere Ortung zulassen. Die bekannteste Methode ist die akustische Messung, welche das von TE erzeugte Schallsignal nutzt. Die akustischen Signale übertragen sich über das Isoliermedium auf die Kesselwand und können dort mit Körperschallsensoren erfasst werden. Durch die bekannte Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Öl und die Laufzeitdifferenzen der Signale zu den verteilten akustischen Sensoren lässt sich eine TE-Position errechnen. Für beide Diagnoseverfahren ist das Finden geeigneter Positionen für akustische Sensoren auf der Kesselwand von Leistungstransformatoren häufig ein langwieriger Prozess. Der steife, selbst tragende Kessel besitzt eine stark ortsabhängige akustische Kopplung, was häufig zu geringen Signalamplituden führt. Zudem erschweren Umbauungen des Kessels mit verschiedenen Hilfseinrichtungen oder Geräuschdämmwände die Messungen. Das vorgestellte Messverfahren nimmt die Akustik von Kernvibrationen und TE nicht in Form von periodischen Änderungen der Beschleunigung der Kesselwand auf, sondern misst Druckänderungen über einen piezoelektrischen Effekt im Öl des Transformators durch ein Hydrophon. Eingesetzt wird ein Sensor, der sich gleichzeitig für die Vibrationsmessung und akustische TE-Messung eignet. Der Frequenzbereich reicht von einigen Millihertz bis etwa 180 kHz. Außerdem wird mit diesem Sensor (Fig. 1a) die elektromagnetische Abstrahlung von TE im ultrahohen Frequenzbereich (UHF: 300 MHz – 3 GHz) gemessen, die sich aufgrund ihrer geringen Störanfälligkeit für dauerhaftes TE-Monitoring an Leistungstransformatoren eignet. Da mit diesem Sensor drei unterschiedliche Frequenzbereiche gleichzeitig gemessen werden, wird eine Signaltrennung notwendig. Dies geschieht mit einer aktiven Frequenzweiche, deren Transferfunktionen in Fig. 1b) zu sehen sind.



## Combined In-Oil Sensor for Vibration Measurement and Partial Discharge Detection using Acoustic and Electromagnetic Emissions

### Dipl.-Ing. Martin Siegel

Reliable operation of power transformers is essential for supply security. Damages to the insulation of power transformers, like local defects, must be recognized at an early stage to provide time for action. Different diagnostic methods have been established to meet the corresponding demands. Considered methods are acoustic and ultra-high frequency (UHF: 300 MHz – 3 GHz) detection of partial discharges and measurement of transformer vibrations during service. Common acoustic partial discharge (PD) and vibration measurements use sensors attached on the outside tank wall of transformers. Hereby, tank structures can lead to severe signal damping which in practice often leads to acoustic PD signals below noise level. Scope of the work is an acoustic and UHF detection of PD and additional recording of transformer vibrations during service without tank influences. For in-oil measurements a combined sensor (Fig. 1a) is developed which is sensitive in a wide frequency range. A diplexer is integrated into the combined sensor to separate frequency spectra of vibrations, PD acoustic and UHF PD signals (Fig. 1b).

Prototype tests at laboratory conditions in a small tank filled with mineral oil determine sensor qualities.



Fig. 1: a) Kombinierter Sensor; b) Transferfunktion der Frequenzweiche. Tiefpass für Vibrationsmessung; Bandpassfilter für akustische TE-Signale (beide aktiv); Hochpass für ultrahochfrequente TE-Messung (passiv).
a) Combined Sensor; b) transfer function of diplexer: low pass filter for vibration measurement; band-pass filter for acoustic PD (both active); high pass filter for UHF PD (passive).



Ein Prototyp des Kombisensors wird unter Laborbedingungen in einem mit Mineralöl gefülltem Tank getestet. Es werden reproduzierbare synthetische TE-Signale eines akustischen Signalgenerators und eines UHF-Pulsers verwendet. Die Anregung der Vibrationen erfolgt durch eine kleine Wicklung, die mechanisch angeregt wird. Der kombinierte Sensor wird mit Körperschallsensoren und UHF-Sensoren verglichen. Die Positionen des UHF-Sensors und des kombinierten Sensors bei der UHF-Vergleichsmessung sind in Fig. 2a) zu sehen. Dabei wird ein Doble UHF-Sensor als Referenz verwendet. Die aufgezeichneten Signale zeigt Fig. 2b). Verglichen wird dabei der Ausgang der passiven Frequenzweiche des Kombisensors mit dem Ausgang des UHF-Sensors. Der UHF-Sensor zeigt dabei sowohl etwa doppelte Signalamplitude als auch doppeltes Rauschen, d.h. der SNR ist vergleichbar. Es ist möglich auf beide Signale zu triggern. Bei der akustischen TE-Messung werden hauptsächlich die Signallaufzeiten zur Lokalisierung der TE ausgewertet, weshalb der Fokus hier auf der Startzeitbestimmung liegt. Im Messaufbau (Fig. 3a) wird ein synthetisches akustisches TE-Signal mit einer Grundfrequenz von 150 kHz verwendet. Gleichzeitig wird das Wicklungsmodell mit 100 Hz mechanisch angeregt, um die Vibrationen von Transformatoren zu simulieren. Als Referenz wird ein Körperschallsensor an der Kesselwand angebracht. In Fig. 3b) sind die aufgezeichneten akustischen TE-Signale beider Sensoren zu sehen. Die gezeigten Signale sind Einzelmessungen ohne Mittelung oder Rauschunterdrückung. Beide Signale sind um 40 dB verstärkt und haben einen klar erkennbaren Startzeitpunkt. Der kombinierte Sensor zeigt einen steileren Signalanstieg, was bei der Startzeiterkennung von Vorteil ist. Die Rauschpegel sind vergleichbar. Beide Kanäle zeigen lokale Maxima, die auf Reflektionen an der Kesselwand hindeuten. Es ist möglich, in beiden Signalen die Startzeit korrekt zu bestimmen. Aufgrund des steileren Signalanstiegs kann der kombinierte Sensor in Öl bei schwachen Signalen vorteilhaft sein.



- Fig. 2: a) Laboraufbau für kombinierte TE- und Vibrationsmessung (Draufsicht).
  b) UHF-TE-Signal gemessen von kombiniertem Sensor und UHF-Sensor.
  a) Laboratory test setup for combined PD and vibrations measurement (top view).
  - b) UHF PD signal measured by combined sensor and UHF sensor.



Therefore, the setup uses reproducible, synthesized PD signals generated by an acoustic signal generator. UHF signals come from an UHF pulser. Vibration measurements are performed with a small winding, which is mechanically excited. The combined sensor is compared to common acoustic accelerometers and UHF antennas. For UHF comparison the positions of the combined sensor and UHF antenna can be seen in Fig. 2a). A Doble UHF antenna acts as reference. A single shot is shown in Fig. 2b). The output of the passive UHF filter from the combined sensor and the UHF antenna output are compared. The distances between source and sensors are equal. The UHF antenna shows nearly double levels at approx. double noise amplitude compared to the combined sensor, thus SNR is comparable. With both sensors UHF triggering is possible. Acoustic PD measurements are mostly used for localization purposes by determining run-time differences. Therefore, focus lies on the detectability of the starting time of acoustic signals. The measurement setup (Fig. 3a) uses a synthetic signal with a basic oscillating frequency of 150 kHz. Simultaneously, the winding fragment is excited with 100 Hz to simulate transformer vibrations. As reference an acceleration sensor is installed at the tank wall. Fig. 3b) shows the recorded acoustic PD signals of both sensors. The signals are triggered on the reference output of the signal generator. The signals show single shot measurements, no averaging for noise reduction is used. The delays between signal start and trigger are caused by the sonic speed in oil of approx. 1400 m/s. Both sensor output signals are amplified by 40 dB and show a well detectable start time (marked by the arrows at 250 µs for in-oil and 350 µs for tank-wall measurement). The combined sensor has a steeper derivation, which is advantageous for start time detection. The noise levels are approximately equal. Both channels show multiple local maxima, indicating reflections on the tank wall. Eventually, both signals are suited for start time detection.



 Fig. 3: a) Laboraufbau für kombinierte TE- und Vibrationsmessung (Seitenansicht);
 b) Akustisches TE-Signal gemessen von kombiniertem Sensor und Körperschallsensor.

a) Laboratory test setup for combined PD and vibrations measurement (side view);

b) Acoustic PD signal measured by combined sensor and acceleration sensor on tank wall.



# Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Temperatur und Feldstärke bei Isolierflüssigkeiten

### M. Sc. Farzaneh VAHIDI

Das Isolationssystem von Transformatoren hat eine Schlüsselrolle beim optimierten Design und sicheren und langfristigen Betrieb dieser Netzkomponenten. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) und den damit verbundenen Mischbeanspruchungen ist das Wissen über das grundsätzliche Verhalten der Isoliermaterialien bei Gleichspannung notwendig. Unabhängig davon, ob eine reine DC-Beanspruchung oder eine Mischfeld-Beanspruchung vorliegt, muss für das vollständige Verständnis der Vorgänge in einem HGÜ-Isoliersystem nicht nur die Permittivität, sondern vor allem auch die Leitfähigkeit aller Komponenten hinsichtlich ihrer Größe und ihres Verhaltens im Betrieb bekannt sein. Dies trifft besonders für die Leitfähigkeit von flüssigen Isolierstoffen zu. Daher haben die Grundlagen der Leitfähigkeitsmechanismen von unpolaren, dielektrischen Flüssigkeiten eine zentrale Bedeutung, ebenso die Messung von sehr großen Widerständen, was gleichbedeutend mit der Bestimmung von sehr kleinen Leitfähigkeiten ist. Dieses Wissen fließt in die Entwicklung der HGÜ-Isolationssysteme ein.

Die Untersuchungen zeigen die Einflüsse von Temperatur und Feldstärke bei Mineralöl Nynas Nytro Lyra X unter Gleichspannungsbeanspruchung. Die Messungen (Fig. 1) deuten eine Zunahme der Langzeit-Leitfähigkeit mit der Temperatur an.



Fig. 1: Temperaturabhängigkeit der Langzeit-Leitfähigkeit bei drei unterschiedlichen Feldstärken.

Temperature dependency of long duration electrical conductivity measured at three different field strengths.



## Investigation of the Temperature and Electric Field Dependency of electrical Conductivity of insulating Liquid M. Sc. Farzaneh VAHIDI

The insulation system of power transformers is a key topic which has to be taken into account in order to achieve an optimized design and safe long-term operation. The design of feasible insulation for high voltage direct current (HVDC) transformers requires the understanding of field distributions in insulating materials in both AC and DC operation because the transient stresses are depending on conductivities, permittivities and geometry. The steady state DC field stresses are determined by the conductivity of the insulating material which is normally a combination of oil and paper. Therefore knowledge about the oil's conductivity is of great importance for design and safe operation in DC case. The complex conduction mechanisms in dielectric liquid lead to an enormous amount of empirical information about the fundamental properties of these materials. For a better understanding of the phenomena, different parameter dependencies of oil conductivity can be investigated. Using this information, the basic process occurring in insulating liquid can be understood and this knowledge will be used in design and optimization of HVDC converters. One way to investigate the conduction processes is the development of a measurement setup for low level current measurements. The conductivity of insulating material depends on several parameters, e.g. time, temperature, electrical field strength and the geometry of the arrangement. This contribution deals with the temperature influence on electrical conductivity of insulating oil Nynas Nytro Lyra X and it covers the low, medium and high electric field strengths.

The influence of temperature on long-term conductivity is presented in Fig. 1.

As discussed, temperature is an important dependency of conductivity because of physical phenomena which occur in oil. Higher temperatures lead to an increasing mobility of ions in insulating liquids. The faster movements of charge carriers with temperature and higher dissociation rate of impurities affect the conduction process directly. The dependency of long duration conductivity on temperature is observable at three field strengths in Fig. 1.



Höhere Temperaturen führen zu zunehmender Mobilität von Ladungsträgern und beschleunigen die Dissoziation von Verunreinigungen in Isolierflüssigkeiten. Diese Änderung hat den Anstieg der Leitfähigkeit mit der Temperatur zur Folge.

Um den Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Leitfähigkeit zu zeigen, wurden zwei Gruppen von Messungen bei T=30°C und T=90°C durchgeführt. Die Langzeit-Leitfähigkeitswerte sind in Fig. 2 dargestellt.

Die unterschiedlichen Leitfähigkeitswerte sind auf Polarisationsströme bei den verschiedenen Beanspruchungen zurückzuführen. Unter dem Einfluss des DC-Feldes beginnen die Ladungsträger, sich zu den Elektroden hin zu bewegen. Je höher die Feldstärke ist, desto mehr Ionen haben die Möglichkeit, an den Elektroden neutralisiert zu werden. Diese Tatsache kann die Abnahme der Leitfähigkeit bei steigender Feldstärke erklären. Ein minimaler Leitfähigkeitswert kann für Mineralöl bei Feldstärken zwischen 2 bis 3 kV/mm festgestellt werden. Dieser Wert wird für die Abschätzung der maximalen Beanspruchung innerhalb des Isolationssystems von HGÜ-Transformatoren verwendet. Noch höhere Feldstärken können zur Erzeugung neuer Ladungsträger zwischen zwei Elektroden führen. Dieses Phänomen ist am steigenden Trend der Langzeit-Leitfähigkeit zu erkennen.

Bisher wurden die Messungen für ein Mineralöl durchgeführt. Der nächste Schritt der Forschung wird sich auf andere Isolierflüssigkeiten konzentrieren. Ihr Verhalten bei verschiedenen Testbedingungen wird untersucht und beschrieben. Diese Messdaten können später für die Erstellung eines empirischen Ölmodels verwendet werden.



There are two groups of measurements which are performed to show the influence of electric field strength on conductivity. The measurements are performed at high temperature (T=90°C) and at ambient temperature (T=30°C). The values of long-term conductivity at two different temperatures are shown in Fig. 2:



Fig. 2: Langzeit-Leitfähigkeit bei niedrigen, mittleren und hohen elektrischen Feldstärken. Die blaue Kurve zeigt die Ergebnisse bei T=30°C, die rote Kurve bei T=90°C.

The long duration conductivity at low, medium and high electric field strengths. The blue curve shows the values measured at  $T=30^{\circ}C$  and the red curve shows the test results at  $T=90^{\circ}C$ .

The development of conductivity curves applying a constant stress confirms the decrease of polarization current with the time. Under the influence of the applied DC field the ions begin to move towards the electrodes. Thus, the concentration of ions in the gap will be reduced and this fact can explain the decreasing current during the measurements. Concentrating on long-term conductivity values dependent on applying stresses, a minimum conductivity around 2-3 kV/mm can be distinguished. This value will be used for the estimation of maximum stresses within the insulation system of HVDC converter transformers. Higher stresses lead to increasing conductivity values because of charge carrier generation in the insulation gap. This investigation is performed for one high grade mineral oil. The next stage of our research will be the investigation of other insulating liquids regarding to their behavior at different test conditions to provide a data base for completing an oil model which can describe the electrical conductivity and its properties.



## 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 anstatt des Einsatzes von Freileitungen angewiesen. Als Isolation werden verschiedene Materialien eingesetzt, welche den spannungsführenden Leiter zu seiner Umgebung hin umschließen. Im Fall von Mittelund Hochspannungskabeln ist die unmittelbare Umgebung ein elektrisch leitender Schirm mit Erdpotential. Dabei herrschen im Isolationsmedium sehr hohe Feldstärken als 10 kV/mm. Selbst kleinste Veränderungen von mehr (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.



Fig. 1: Einseitige Teilentladungsmessung an einem Kabel mithilfe eines Testsystems mit gedämpft oszillierender Wechselspannung. Single sided partial discharge measurement of a cable with damped alternating current test system.

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. Messtechnisch wird hierfür der Vorgang der Ladungsumsetzung in der TE-Fehlstelle ausgenutzt. Jeder Teildurchschlag im Isolationsmedium verschiebt eine gewisse Menge an Ladungsträger. Diese Ladungsverschiebung regt einen Impuls an, der sich längs des Kabels in beiden Richtungen weg von der Fehlstelle ausbreitet.


# New Methods for Partial Discharge Measurements for Onsite Testing of Cable Systems with long Lengths

## Dipl.-Ing. Manuel Wild

The electrical power transmission in the medium- and high voltage level often relies on insulated cable systems instead of overhead lines. The insulation material surrounds the conductor, which is under high potential and enclosures it to the environment. 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 imperfection (moisture, air enclosures and deformations) cause a local increasing of the electrical field and thus more stress for the insulation material. If the value of the electrical field strength exceeds the breakdown capability of the material, small discharges occur. 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 von 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 could be determined by the partial discharge measurement. The partial discharges could be detected by applicable measurement techniques. Therefore the transfer of charge in the PD fault could be measured. Every discharge in the insulation medium displaces a small amount of electric charge. This process emits two impulses in the cable, one into each direction, away from the fault origin. The pulses are detectable at the cable ends and could be used for partial discharge detection.



Dieser Puls ist an den Kabelenden messbar und kann zur Detektion von Teilentladungen verwendet werden. Mit Kenntnis der Laufzeit des Teilentladungspulses im Kabel, also der Zeitdauer, die 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 Reflektion 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<sub>PD</sub> vom Messgerät).





Double-sided PD measurement data with PD origin 220 m from the left side.

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. Auch wenn der direkt ausgebreitete Impuls noch über dem Rauschpegel erkennbar ist, 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. 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 knowledge about the travelling time of the partial discharge pulse between the PD origin and the measurement device, the fault could be exactly localized. Since the absolute time of 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 could be determined ( $t_A$ - $t_B$ ) and the fault location could 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 with 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 over 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 (right side in Fig. 4). Knowing the travelling time through one cable length, the two measurement signals could 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 on long lengths cables and thereby a better condition assessment.



## 5.2 SMART POWER GRIDS

# Platzierung von Messstationen zur Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen

#### M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

Eine präzise und verlässliche Zustandsschätzung von Verteilnetzen ist der Schlüssel für eine dynamische Steuerung und die Kontrolle aktiver Smart Grids. Durch den immer größer werdenden Anteil an dezentralen Erzeugungseinheiten in den Niederspannungsnetzen wird der Netzbetrieb zunehmend komplexer. Echtzeitüberwachung und Überprüfung durch Zustandsschätzung ist bei den Übertragungsnetzbetreibern auf Grund verfügbarer Messdaten eine Routineaufgabe. Verteilnetzbetreiber hingegen suchen noch nach Möglichkeiten, ihr Monitoring für Mittel- und Niederspannungsnetze zu erweitern, um zukünftige Smart Grid Anwendungen einsetzen zu können. Mit der Markteinführung von Smart Metern, die als ein entscheidender Faktor für zukünftige Smart Grids betrachtet wird, sollten in Zukunft genügend Messdaten (Spannung, Strom, Wirk- und Blindleistungsverbrauch und -erzeugung) an jedem Verbraucherknoten verfügbar sein, um diese Anwendungen umsetzen zu können. Die Arbeit hat das Ziel, einen Lösungsansatz für die Platzierung von Smart Metern in Bezug auf die Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen aufzuzeigen. Die verwendete Methode zeigt, welche Messdaten der jeweiligen Smart Meter im Zustandsschätzalgorithmus betrachtet werden müssen, um eine Verbesserung der Genauigkeit der geschätzten Spannung und des geschätzten Phasenwinkels an jedem Knoten im Netzwerk zu erzielen.

Eine Platzierung der Messgeräte nach der traditionellen Zustandsschätzmethode kann nicht direkt auf Niederspannungsnetze übertragen werden. Der Grund liegt in den unterschiedlichen Charakteristiken des Übertragungs- und Verteilnetzes. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit der sich eine Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen realisieren lässt. In Anlehnung an die aktuell vorhandenen Smart Meter wird aufgezeigt, welche Messdaten für den Zustandsschätzalgorithmus entscheidend sind, um die relativen Fehler (prozentualer Fehler zwischen geschätztem und tatsächlichem Netzzustand), die Residuen (Abweichung zwischen Messdaten und geschätzten Daten) und die Unsicherheit (prozentuale Abweichung, die sich über die Rückrechnung mit den Messwerten an den jeweiligen Knoten aus der Standardabweichung ergibt) der Zustandsvariablen (Spannung und Winkel) an jedem Knoten zu minimieren. Die Grenzwerte zu den genannten Faktoren beziehen sich auf die Besonderheiten des Niederspannungsnetzes.

# **Measurement Placement in Low Voltage Network**

## M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

Accurate and reliable state estimation is the core stone for a flexible operation and control of active smart grids. Through the expansion of integrating DG units in low voltage networks, the network operation is becoming more complex than before. However, real-time monitoring and control through state estimation is a routine task for the transmission system operators (TSO) due to the availability of measurement data. The distribution system operators (DSO) are trying to extend their monitoring and control for medium and low voltage network in order to enable smart grid applications. With the current rollout of smart meters, which are considered as a key component of future smart grids, there would be enough metering data in the distribution networks (voltage, current, active and reactive power consumption and generation) available at every customer connection point. This project aims to develop a method to solve the problem of meter placement for low voltage system state estimation through deciding which measurement data from the installed smart meters should be considered in the state estimation algorithms in order to improve on the uncertainty of the estimated voltage and its phase angle at every node in the network.

However, in distribution networks there are only few measurement points in the network compared to the number of nodes. A direct transfer of the traditional state estimation metering placement method to the low voltage network is not possible due to the different network characteristics between transmission and distribution networks.

Taking the current rollout of the smart meter into consideration, this problem can be solved by using the real time measurements from smart meters. The distribution system operators may not need to install a smart meter at every customer connection point, or to communicate with all smart meters to use their measurement data for state estimation. So the target of this work is to develop a method which can help the DSO to choose the best measuring point to place a smart meter or to communicate with a smart meter which is already installed there.

The suggested placement method is based on the multiplication of the Jacobian Matrix transpose H' with the inverse of the covariance matrix  $R^{-1}$  and with the Jacobian matrix H. The resulted diagonal elements of the matrix S contain the standard deviation of the state variable (voltage amplitude and phase angle) as shown in the following equation.



Die Platzierungs-Methode basiert auf der Multiplikation der Transponierten der Jacobi-Matrix H mit der Inversen der Kovarianz-Matrix R und der Jacobi-Matrix H. Die Ergebnismatrix S enthält die Daten der Standardabweichung der Zustandsvariablen Spannungsamplitude und Spannungswinkel. Sie berechnet sich wie folgt:  $S = H^T * R^{-1} * H$ 

Die Anzahl der Zustandsvariablen ergibt sich aus der Anzahl N der Netzknoten, exklusive dem als Referenz definierten Slack-Knoten. Die Matrix S hat somit (2N-2)x(2N-2) Einträge. Unter der Verwendung eines Monte Carlo Algorithmus werden die einzeln berechneten Matrizen S einer jeden Simulation iterativ addiert. Nachdem alle Monte Carlo Simulationen durchgeführt wurden, wird der Mittelwert dieser Additionsmatrix bestimmt, indem die Matrix durch die Anzahl der Monte Carlo Simulationen geteilt wird. In der Berechnung dieses Entscheidungskriteriums fortfahrend, wird als nächstes für jeden Knoten k des Netzes eine 2x2-Untermatrix P gebildet. Die Untermatrix enthält als Diagonalelemente je einen Eintrag für die Zustandsvariable der Spannungsamplitude sowie des Spannungswinkels. Die beiden Nebenelemente der Matrix stehen für die Korrelation der beiden Zustandsvariablen.

$$P = \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} \\ S_{ji} & S_{jj} \end{bmatrix}$$

Nun berechnet man für jeden Knoten im Netz die Determinante det(P). Mit ihrer Hilfe ist eine Entscheidung zu treffen, an welchem Knoten eine Messeinrichtung platziert werden sollte. Da die Standardabweichung möglichst klein sein sollte, sollten auch die Matrizenelemente möglichst klein sein. Die Messstation sollte also an dem Knoten platziert werden, für den gilt

$$D = \sqrt{\det(P)} \stackrel{\text{\tiny def}}{=} Max,$$

Fig. 1 zeigt das Vorgehen bei der Platzierung von Messstationen in einem betrachteten Netz anhand eines Flussdiagramms.

Das Vorhaben wird unterstützt durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg im Rahmen des Juniorprofessoren-Programms.



The number of the state variables is based on the number of the nodes (n) in the network, by excluding the state variables of the slack node, the matrix S has (2n-2)x(2n-2) elements. Using Monte Carlo Algorithms, the mean value from all Monte Carlo simulations of each matrix element is then calculated. Afterwards a 2x2 sub-matrix P for each node can be created where the diagonal elements represent the standard deviation of the state variables for one node (voltage amplitude and phase angle). The off diagonal elements represent the correlation between both state variables.

$$P = \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} \\ S_{ji} & S_{jj} \end{bmatrix}$$

Now, the determinant of P will be calculated for all nodes. It is suggested to choose the node with the highest value D as the best placement location.

$$D = \sqrt{\det(P)} \stackrel{\text{\tiny def}}{=} Max,$$

Fig. 1 shows the flow chart of the suggested placement method.



Fig. 1: Flussdiagramm zur Platzierung von Messstationen. Flow diagram for the measurement placement method.



## Integration von Wärme in elektrische Verteilnetze

#### Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

Wärme- und Kälteanwendungen haben innerhalb Deutschlands über alle Sektoren (Haushalte, Industrie, Gewerbe und Verkehr) einen Anteil von ca. 50 % am Bruttoendenergieverbrauch. Große Teile dieses Energiebedarfs werden bisher durch Gas oder Öl gedeckt. Es erscheint daher im Vergleich zu einer ausschließlich elektrischen Betrachtung plausibel, dass die simultane Berücksichtigung der Wärmebereitstellung bei der Auslegung und Berechnung von elektrischen Verteilnetzen flexiblere Möglichkeiten des elektrischen Netzbetriebs bzw. der elektrischen Netzplanung bietet.

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten wurde ein auf Matlab basierendes Modell entwickelt, das die Auswirkungen einer dezentralen Erzeugung von Wärme auf elektrische Verteilnetze simulieren kann. Hierzu werden der jeweiligen elektrischen Verteilnetztopologie an den relevanten Netzanschlusspunkten jeweils Lasten bzw. Erzeuger hinzugefügt, die sich elektrisch wie die jeweiligen wärmeerzeugenden Technologien verhalten. Dieses Verhalten wird im Rahmen eines elektrischen und eines thermischen Anlagenmodells individuell berechnet. Folgende Abbildung verdeutlicht die Interaktion der Module Netzberechnung, thermisches Anlagenmodell und elektrisches Anlagenmodell:



Fig. 1: Interaktion der Teilmodule am Beispiel von Wärmepumpen mit angeschlossenen Wärmespeichern (Quelle: ähnlich wie in Brunner, Braun, Tenbohlen, ETG-Kongress 2013, Berlin) Interaction of the submodels on the example of heat pumps with connected thermal heat storages (source: similar to Brunner, Braun, Tenbohlen, ETG Kongress 2013, Berlin)



# Integration of Heat in Electrical Distribution Grids

#### Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

The demand for heating and cooling energy makes up for approximately 50 % of Germany's final energy demand across all sectors (households, industry, trade and traffic). So far, the major part of this demand is covered by gas or oil. Therefore, it seems plausible, that compared to an exclusively electrical view, more flexible possibilities for the operation and planning of the grid arise when considering the thermal heat demand simultaneously with the design respectively the calculation of the power grid.

Based on previous work, a Matlab model has been developed which is capable of simulating the effects of a dispersed heat generation on electrical distribution grids. In order to do so, loads respectively generators are being added to the relevant grid connection point. These added elements have the same electrical behavior compared to their corresponding heat generating units. Their behavior is determined within the electrical and thermal submodel of the unit individually. Fig. 1 illustrates the interaction of the submodels grid topology/load flow calculation, thermal submodel and electrical submodel.

As shown in Fig. 1 within the electrical submodel, the system control receives signals originating from the thermal submodel (e.g. temperatures within the heat storage) and the load flow calculation (voltages, loads etc.). Additionally, a separate module for the calculation of the thermal behavior of heat storages is being considered within the thermal submodel.

Fig. 2 shows the simulation results of an exemplary application of the model in order to control the weighted transformer loading by heat pumps.



Fig. 2: Beeinflussung der Transformatorauslastung durch Wärmepumpen (Quelle: ähnlich Brunner, Braun, Tenbohlen, IEEE PES PowerTech 2013, Grenoble) Influence of heat pumps on the transformer loading (source similar to: Brunner, Braun, Tenbohlen, IEEE PES PowerTech 2013, Grenoble)



Wie in der Abbildung innerhalb des elektrischen Anlagenmodells deutlich wird, erhält der Anlagenregler sowohl Signale vom thermischen Anlagenmodell (zum Beispiel die Temperaturen innerhalb des Wärmespeichers) als auch aus der Netzberechnung (Spannungen, Netzlast etc.). Zudem wird im thermischen Anlagenmodell ein eigenes Modul für die Berechnung des thermischen Verhaltens von Wärmespeichern berücksichtigt.

Abbildung 2 zeigt die Simulationsergebnisse einer exemplarischen Anwendung des Modells zur Regelung der gewichteten Transformatorenauslastung mit Hilfe von Wärmepumpen. Ziel der Anlagenregelung war es, diese durch zeitliche Verlagerungen der Leistungsaufnahme der Wärmepumpen so zu senken, dass nur noch in Ausnahmefällen eine gewichtete mittlere Auslastung von 50 % der Ortsnetztransformatoren überschritten wird.

Diese, den Grenzwert von 50 % berücksichtigende Regelung, wurde als "dsm controlled" bezeichnet. Der Verlauf der Kurve "soc controlled" zeigt eine identische Simulation, ohne dass die Regelung der Wärmepumpen jedoch den genannten Grenzwert von 50 % berücksichtigte. Es zeigte sich, dass - basierend auf den Modellannahmen - Wärmepumpen durch einen "netzgeführten Betrieb" in der Lage sind, ihre elektrische Leistungsaufnahme so zu verlagern, dass diese überwiegend in lastschwachen Zeiten betrieben werden und sich so die auftretenden Lastgradienten betragsmäßig verringern. Dies wiederum wirkt sich positiv auf den Netzbetrieb aus. Innerhalb der Anlagenregelung wurde zudem sichergestellt, dass die nachgefragte Wärmelast der Haushalte zu jeder Zeit gedeckt wurde. Obwohl dies den Betrieb der Wärmepumpen einschränkte, war eine Lastverlagerung wie beschrieben dennoch möglich. Ermöglicht wurde dies durch die Berücksichtigung häufia von Wärmespeichern, deren Temperaturverteilungen simultan berechnet wurden und als zusätzliche Regelgröße eingeflossen sind.

Aus Sicht des Projektes "Dynamische Simulation und Optimierung dezentraler Energiekonzepte", in welches die oben genannte Arbeit eingebettet ist, wird das beschriebene Modell mit einem überregionalen Modell seitens des Instituts für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER) gekoppelt. Hierdurch lassen sich volkswirtschaftlich optimale Ausgestaltungsvarianten einer künftigen, regenerativen Energieversorgung unter Berücksichtigung mehrerer Energieformen wie Strom, Wärme und Gas innerhalb Baden-Württembergs ableiten ohne jedoch Netzrestriktionen auf Verteilnetzebene zu vernachlässigen.

In diesem Vorhaben sollen methodische Weiterentwicklungen für die Modellierung, Simulation und Optimierung dezentraler Energiekonzepte durchgeführt werden. Das Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) arbeitet bei diesem Vorhaben mit dem Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER) zusammen. Das Projekt ist ein mit dem Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SimTech) assoziiertes Projekt. Die Förderung des Vorhabens erfolgt durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.



The objective of the control is to lower the electrical power consumption of heat pumps in a way that - only in a state of emergency - the weighted average transformer loading exceeds the limit of 50 %.

The control taking this threshold of 50 % into account is called "dsm controlled". The curve "soc controlled" illustrates an identical simulation without respecting the above mentioned threshold by the control. Based on model assumptions, it showed that with a "grid based operation mode" (dsm control) heat pumps were capable of deferring their electrical power consumption to periods of low overall grid load. By doing so, the magnitude of load gradients was reduced within the simulation. This in turn has a positive effect on the grid operation. The control furthermore ensured the coverage of the local heat demand at all times. Although this limited the operation of the heat pumps, it showed that the deferral of load could nevertheless be achieved many times as described above. This became possible by the incorporation of thermal heat storages. The distribution of the temperatures within the heat storages has been computed simultaneously and was considered as an additional control variable.

From the perspective of the project "Dynamic simulation and optimization of decentralized energy concepts", to which the above mentioned work is assigned to, the developed model will be connected to a "supraregional" model developed by the Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER). By doing so, the optimal design of a future renewable energy system under special consideration of multiple forms of energy such as electricity, heat and gas in Baden-Wurttemberg can be derived from an economical point of view. This will be possible without neglecting the constraints arising at distribution grid level.

The key issue of this project is to methodologically improve means to model, simulate and optimize decentralized energy concepts. The Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) collaborates with the Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER). The project is associated with the Stuttgart Research Centre for Simulation Technology. It is funded by the Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.



## Analyse des Systemverhaltens zukünftiger Smart Grids und deren veränderte Anforderungen für einen optimierten Verteilnetzbetrieb

#### Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

Durch den von der Gesetzgebung getriebenen, kontinuierlichen Zubau von erneuerbaren Energieerzeugern sowie weiterer dezentraler Erzeuger wird, technisch gesehen, ein neues Zeitalter der Energieversorgung eingeleitet. Da ungefähr 90% der Anschlussleistung im Niederspannungsnetz auf Photovoltaikanlagen entfällt, ist leicht einzusehen, dass speziell die Verteilnetzstrukturen deutliche Auswirkungen bei der Integration von Photovoltaik auf der Mittel- und Niederspannungsebene spüren.

Bereits heute kann eine hohe solare Einstrahlung regional den Energiefluss in den unteren Netzebenen umkehren und aus dieser Region zeitweise einen Netto-Stromlieferanten machen. Durch rückwärtige Energieflüsse treten hauptsächlich an den äußeren Netzknoten Spannungen auf, welche ohne diese Lastflüsse so nicht entstehen würden. Gerade im Einspeisefall steigt die Spannung am Ende der durch Einspeiser geprägten Netzstränge deutlich über die im Lastfall ursprünglich höchsten Spannungswerte an der Ortsnetzstation hinaus.

Die Folgen durch diese neuen Last- und Spannungsverhältnisse sind potenzielle Spannungsbandverletzungen in Hochzeiten der Erzeugung. Hinzu kommt ein grundsätzlicher Wandel der Anforderungen an den Netzbetreiber im Sinne des optimalen Verteilnetzbetriebs, da das klassische Top-Down Versorgungsprinzip aufgebrochen wird. Die Annäherung an normativ vorgegebene Spannungsbandgrenzen zwingt Netzbetreiber zu aufwendigen Investitionen in den konventionellen Netzausbau. Diese signifikanten Kosten können aber unter Umständen durch den gezielten Einsatz neuartiger Komponenten und Techniken vermieden werden. Gegenstand dieser Arbeit ist unter anderem die Untersuchung der genannten Netzkomponenten und Beeinflussungsmöglichkeiten, die ein Verzögern und Vermeiden von klassischen, kostenintensiven Netzausbauten ermöglichen können.

Möglichkeiten, die hier in Frage kommen, sind neben Batteriespeichersystemen (BSS) und regelbaren Ortsnetztransformatoren (rONT) ebenso steuerbare PV-Wechselrichter, welche durch Wirk- und Blindleistungsmanagement einen Beitrag zur Spannungsqualität leisten können. Während das BSS Energiemengen aus kritischen Tageszeiten verlagern kann, hat der Transformator die Möglichkeit, durch Variation das Übersetzungsverhältnis im laufenden Betrieb günstiger zu wählen. Durch vereinzeltes Begrenzen von PV-Leistung oder die Beaufschlagung der Wechselrichter mit Blindleistung kann die Spannung ebenfalls beeinflusst werden.



## Analysis of the System Performance of future Smart Grids and their changing Requirements for an optimized Distribution Network Operation

## Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

Pushed by legislation, the continous annex 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 can already happen today, that a regional high solar irradiation is reversing the load flow in the lower grid-levels changing the behaviour from a consumer to a power supplier. Because of these reversed load flows the voltage deviations increase significantly at the outer nodes, which would have never happened 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 substation 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 load flow fluctuations induced in the grid more often are resulting in exceeding voltage limits, enforcing sumptuous capital expenditures for grid operators in terms of a system expansion. But could they be possibly 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 concidered are besides battery energy storage systems (BSS) and controllable distribution transformers (rONT) the PV inverters which could make a contribution to power quality / voltage stability issues by providing (re-) active power management services. Whereas battery energy storage systems are able to e.g. shift amounts of energy away from photovoltaic peak times at noon, the controllable distribution transformer enables a change of the transformation ratio in active operation. By limiting PV infeed in rare situations or providing reactive power, the PV inverters could improve the voltage stability, too. All components or methods (Fig. 1) can participate in influencing the voltage bands in their own specific way that physical limitations to a distribution grid operation are not exceeded. In some cases it is possible to integrate more renewable feeders than before. Therefore digging tons of copper wire in streets can be dispensable or delayable.





Fig. 1: Schematische Darstellung eines Niederspannungsnetzes mit PV-Einspeisern sowie neuen Netzkomponenten und deren Wirkungsweise. Schematic illustration of a distribution network with PV devices and new network components and their potential effect.

Alle genannten Komponenten oder Techniken ermöglichen dem Verteilnetzbetreiber die Spannung an aktuelle Netzsituationen teilweise anzupassen. Es ist somit teilweise möglich, bei selber installierter Erzeugerleistung die ungewollte Spannungsbandbeeinflussung zu reduzieren, im Umkehrschluss also bei selber Spannungsbeeinflussung mehr Erneuerbare Energien Anlagen [EEA] zu integrieren.

Alle Methoden (Fig. 1) können somit ein Vergraben von Kupfer im Boden vermeiden oder zumindest verzögern. Fig. 2 zeigt das Konzept eines dezentralen Ansatzes zur Begrenzung der Wirkleistungseinspeisung von PV-Anlagen. Dabei stellt die PV-Anlage die eingespeiste Leistung am Netzanschlusspunkt und die dort herrschende Spannung fest. Beim Überschreiten eines Schwellwerts wird die Anlagenleistung reduziert. Hierbei werden an wenigen Tagen im Jahr die Spitzen der erzeugten Leistung abgeschnitten. Das führt zu einer Reduktion der Spannung im Vergleich zum unbeeinflussten Fall. Fig. 2 (rechts) zeigt die Spannung im unbeeinflussten Fall. Fig. 3 zeigt die Spannung nach der Wirkleistungsbegrenzung – hier exemplarisch auf 1.07 p.u. Diese Methode ist zwar von Seiten der Gesetzgebung für PV-Anlagen so noch nicht durchführbar, bietet aber Potenzial, die Spannung in kritischen Situationen innerhalb der Grenzen zu halten. So wurde beispielsweise in einem Niederspannungsnetz festgestellt, dass bei einer Abregelung in Höhe von 5 % der Jahresenergiemenge ca. 50 % mehr PV-Anlagen im selbem Netz integriert werden könnten. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die dadurch entstehenden Kosten gering gegenüber einem stellenweisen Netzausbau wären, der zu einer ähnlichen Spannungsverteilung führen würde.

Aus diesem Grund müssen schon heute Modellregionen, die diese Problematik zumindest ansatzweise nachbilden können, untersucht und modelliert werden, um aussagekräftige Daten zu sammeln. Durch Abbildungen in Simulationsprogrammen können weitere Anforderungen an die intelligenten Netze der Zukunft heraus-kristallisiert werden. Nach einer Identifikation von Gemeinsamkeiten können bereits heute innovative Lösungsansätze und Entwicklungsetappen festgehalten werden. Ein Übergang zum intelligenten, aktiven Energieversorgungsnetz kann dann entsprechend schneller und effizienter gestaltet werden, notwendige da Zwischenschritte auf dem Weg zu einem Smart Grid bereits bekannt sind.





Fig. 2: Konzept zur dezentralen Leistungsbeeinflussung von PV-Anlagen, Spannungsverteilung im unbeeinflussten Zustand (rechts) Concept for decentral power management of PV devices, Voltage distribution in unaffected state (right)

Fig. 2 shows a decentralized concept of power management (left) and the voltage distribution in 24 hours on a node in a low voltage grid where this power management system was applied to. The right side of Fig. 2 shows the voltage distribution without any affect of the power management system.





Fig. 3 shows the voltage distribution at the same node with the activated power management. The system monitors the power infeed and the voltage. At a certain voltage level it limits the power infeed. By using this method the voltage does not rise further and can be kept in the limited band. Further research showed that by limiting 5 % of year's energy about 50 % more PV devices could be integrated. Moreover a grid expansion would be more costly. For this reason it is important to model and analyze exemplary regions accounting for these challenges already today in order to obtain significant data. With simulations it is possible to analyze and emerge further requirements of the future intelligent or "smart" grids. After identifying similarities it is possible to retain cutting-edge approaches and evolution stages. With this, a changeover to an intelligent, active electrical network can accordingly be formed faster and more efficient because the needed intermediate steps to a smart grid are known already.



# Steuerungskonzepte und Abbildung des Systemverhaltens von HGÜ-Strecken

## Dipl.-Ing. Katharina FREY

Die Abschaltung der konventionellen Atomkraftwerke und der stetige Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie im Norden Deutschlands, werden zu Engpässen im deutschen Übertragungsnetz führen. Eine mögliche Gegenmaßnahme ist ein großflächiger Netzausbau. Hierbei wird auch in Betracht gezogen, die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) einzusetzen. Diese Technologie ist insbesondere bei langen Strecken und großen Energiemengen verlustärmer als die Drehstromtechnologie. Zusätzlich werden weniger Kabel und eine geringere Trassenbreite benötigt, so dass sie sich für die Versorgung der städtischen Lastzentren anbietet.

Die Voltage Source Converter (VSC)-Technologie bietet die Möglichkeit, neben der reinen Wirkleistungsübertragung auch andere Systemdienstleistungen bereit zu stellen, da Wirk- und Blindleistung der Konverter unabhängig voneinander eingestellt werden können. Somit kann eine HGÜ-Konverterstation auch zur Spannungsstützung eingesetzt werden und im Fehlerfall zur Netzstabilisierung beitragen. Im Zuge der Einführung der Hochspannungsgleichstromübertragung in Deutschland ist es nötig, im Vorfeld die Interaktionen einer HGÜ-Verbindung mit dem Wechselstromnetz zu untersuchen. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf der Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Konverter und dem Anschlusspunkt des Wechselstromnetzes.

Zunächst muss das dynamische Verhalten der Konverterstation entsprechend den Anforderungen modelliert werden. Im Anschluss kann das Netzverhalten bei Fehlern mithilfe des dynamischen Modells simuliert werden. Damit wird die gegenseitige Beeinflussung des AC- und des DC- Netzes bereits im Vorfeld untersucht und in eine geeignete Steuerung der HGÜ-Anlage einbezogen. Mit Hilfe des Modells kann außerdem geprüft werden, welcher Standort als Verbindungsstelle zwischen Drehstromnetz und HGÜ-Konverterstation in Frage kommt.

Mit Blick in die Zukunft sollte das gesamte Konzept so ausgelegt werden, dass eine Erweiterung durch weitere Komponenten und die Anpassung des Steuerungssystems möglich ist. Der Zusammenschluss mehrerer HGÜ-Verbindungen zu einem Multiterminal HGÜ-Netz bietet neue Möglichkeiten in Bezug auf die Nutzung erneuerbarer Energien europaweit.



# Control Concepts and Modelling of the System Behavior of HVDC-Lines

#### Dipl.-Ing. Katharina FREY

The shutdown of conventional nuclear power plants and the continuing expansion of renewable energy, particularly wind energy in the north of Germany, will lead to bottlenecks in the German transmission grid. A large-scale network expansion can counteract, in which the use of high voltage direct current (HVDC) technology is considered. This technology has lower losses when large amounts of energy are transmitted over long distances, compared to the three phase alternating current technology. In addition fewer cables and smaller line widths are required which matches the supply of urban load centers.

Especially the Voltage Source Converter (VSC) technology offers many opportunities to provide other ancillary services in addition to the active power transfer, since it allows setting both the active and the reactive power of the converter independently. Thus, the HVDC converter station can also be used for voltage support and is able to stabilize the grid in case of faults. With the introduction of high voltage direct current transmission in Germany the interaction between the HVDC transmission and the AC grid has to be examined. The work focusses on the study of the dynamic behaviour of converters and the connection point to the AC network.

First, the dynamic behavior of the converter station must be modeled according to the requirements. Following, the network behavior can be simulated for different fault cases using the dynamic model. Mutual influences of the AC and the DC network can be studied in advance and be involved in a suitable control for HVDC system. The model can be further used to test which site is suitable for the connection of the three-phase supply and the HVDC converter station

Looking to the future, the whole concept should be designed for future expansions of the components, as well as the control system. The connection of multiple HVDC links to a multi-terminal HVDC system opens up new possibilities in Europe for the use of renewable energies.



# Simulation und Modellreduktion elektrischer Netze mit intelligenten Elementen

## Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Mit der Verbreitung von Photovoltaikanlagen, elektrischen Fahrzeugen mit intelligenten Ladestrategien und anderen Technologien wie Demand-Side-Management wandelt sich die Rolle der Niederspannungsnetze bei der Energieversorgung. Waren in den Netzen der untersten Spannungsebene bisher fast ausschließlich passive, ungeregelte Verbraucher zu finden, sind in Zukunft aller Voraussicht nach zunehmend aktive und dynamische Elemente angeschlossen, die abhängig von Spannungs- und Lastzustand sowie externen Signalen wie einem dynamischen Strompreis ihren Verbrauch und ihre Erzeugung anpassen können.

Diese neuen Freiheitsgrade der Netzführung erfordern eine gründliche Erprobung der bei der Steuerung dieser Elemente verwendeten Algorithmen. Da aus Sicherheitsgründen eine Felderprobung nur eingeschränkt in Frage kommt, gewinnt eine umfassende Simulation der Netzelemente und ihrer Auswirkungen auf den Netzzustand an Bedeutung. Die schiere Anzahl der zu betrachtenden Netze und der darin installierten Elemente macht eine vollständige Simulation aller integrierten Elemente sehr aufwändig.

Im Forschungsprojekt "Dynamische Simulation und Optimierung dezentraler Energiekonzepte", das vom IEH und IER in Kooperation mit dem Exzellenzcluster Simulation Technology durchgeführt und vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg gefördert wird, sollen deshalb Möglichkeiten untersucht werden, die Lastflussberechnung in Niederspannungsnetzen zu beschleunigen.

Dafür werden mehrere Ansätze untersucht. Die herkömmliche Lösung der Lastflussgleichung mittels des Newton-Verfahrens ist genau, aber zu langsam, insbesondere bei der Berechnung von Netzen mit dynamischen Elementen. Diese Elemente kann man aber durch ihren Einfluss auf die Spannung charakterisieren. Dadurch geht allerdings vor allem in Extremsituationen (hohe Lasten sowie besonders kleine Impedanzen) die Genauigkeit stark zurück.

Eine weitere Möglichkeit ist die Vorberechnung einer großen Anzahl an Lastflusssituationen, um eine Datenbank aufzubauen. Da bei vielen verschiedenen Netzen in vielen verschiedenen Situationen zwangsläufig viele Lastflussprobleme ähnlich sind, kann dadurch die Gesamtzahl der zu berechnenden Netze reduziert werden. Dieses Verfahren kann durch eine Vorverarbeitung der Netze stark verbessert werden, insbesondere durch eine Reduktion der Knotenzahl des Netzes.



# Simulation and Model Reduction of Electrical Grids with Intelligent Elements

#### Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

The increasing distribution of photovoltaic systems, electric vehicles and other technologies like demand side management changes the role of low-voltage grids in the energy supply. Until now these grids consisted almost exclusively of passive, non-controlled consumers but now and in the future there will be more and more active and dynamical elements that adapt their consumption or production based on the voltage or load and depending on external signals like a dynamic electricity tariff.

These new degrees of freedom in grid operation call for a thorough testing of the algorithms used to control the new elements. For security reasons, a trial in real grids is possible only in limited bounds. Therefore, a comprehensive simulation of active grid elements and their effect on the state of the grid gains in significance. The enormous number of different grids and dynamic grid elements renders a comprehensive simulation very difficult and computationally expensive.

The research project "Dynamic Simulation and Optimization of Decentralized Energy Concepts", which is conducted by the IEH and IER in cooperation with the Cluster of Excellence Simulation Technology and funded by the Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden Württemberg aims to develop and explore possible ways to accelerate power flow simulation.

Several methods are examined to achieve this. The traditional approach of solving the load flow equations using the newton iteration is very accurate but too slow, especially when dynamic elements have to be taken into account. These elements can be characterized by their influence on the voltage. This can however reduce the accuracy, especially in extreme load or impedance situations.

Another approach is pre-calculation of a high number of load flow situations in order to construct a database. Because many of the load flow situations are similar, the total number of load flow problems to solve can be lowered significantly. This approach can be improved by pre-processing grids, particularly by reducing the number of nodes in the grid.



# Energiemanagementsystem für optimalen Betrieb der zukünftigen Mikronetze

## M.Sc. Mohsen Nemati

Mikronetze sind kleine in sich geschlossene Verteilnetze, die meistens durch eine Schnittstelle mit einem übergeordneten Netz verbunden sind. Sie sind modular aufgebaut und verfügen über eigene dezentrale Erzeuger, Speichersysteme, Lasten sowie über ein Kontrollsystem. Über das Kontrollsystem ist es möglich, das Microgrid (MG) auf zwei verschiedene Arten zu betreiben. Man unterscheidet zwischen dem Parallelbetrieb, wenn das Mikronetz mit dem übergeordneten Netz verbunden ist und Leistung ausgetauscht werden kann, und dem Inselnetzbetrieb, in dem das Mikronetz autark arbeitet. Kommt es zu einer Störung im übergeordneten Netz, kann auf diese Weise in den Inselnetzbetrieb gewechselt werden. Dadurch ist eine hohe Versorgungssicherheit und Versorgungsqualität möglich. Typische Anwendungsfälle sind Krankenhäuser, Militärstützpunkte, Universitätsgelände sowie große Industriekomplexe.

Das Mikronetz-Kontrollsystem (EMS) dient in erster Linie der Optimierung des Betriebs innerhalb des Mikronetzes. Dies bedeutet, den Einsatz der verschiedenen Erzeugungs- und ggf. Speichereinheiten zu planen. Ziel ist es, den Energiebedarf unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte, wie Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und technische Rahmenbedingungen, zu decken. Dies wird allgemein als Unit Commitment (UC) bzw. Economic Dispatch (ED) bezeichnet. Das UC beinhaltet Entscheidungen darüber, welche Generatoren im jeweiligen Zeitintervall in Betrieb gehen sollen, um die auftretende Last unter Berücksichtigung technischer Rahmenbedingungen zu decken. Diese Entscheidungen werden in stündlichen Intervallen stattfinden. ED versucht, die erforderliche Erzeugung möglichst wirtschaftlich auf die bereits laufenden Einheiten zu verteilen. Der Betrachtungszeitraum für das 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 (hier DSM) gesteuert. Die Steuerung und das Zusammenführen der hierfür benötigten Daten durch das EMS erfordert wiederum einen hohen Aufwand an Informations- und Kommunikationstechnologie.

Fig. 1 zeigt das vereinfachte entwickelte Steuerungs- bzw. Managementsystem von Mikronetzen.



# Energy Management System for Optimal Operation of Future Microgrids

#### M.Sc. Mohsen Nemati

The microgrids are small, bordered distribution networks, which are mostly connected with a main grid in the Point of Common Coupling (PCC). They are modularly built and contain decentralized generators, storage systems, loads as well as control system. It is possible to operate the microgrid in two different modes by means of the control system. There is a parallel operation mode when the microgrid is connected with a main grid and the power can be transmitted, and an islanded mode, in which the microgrid can operate as isolated system. If there is a failure in the main grid, the microgrid will be able to work further as an islanded grid. Hence it is possible to provide high-level security, reliability and quality of supply. Typical use cases are applied to hospitals, military regions, university campuses as well as industrial complexes.

The microgrid control system 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.

Fig. 1 shows simplified developed control and management system of the microgrid.



Fig. 1: Vereinfachtes entwickeltes Energiemanagementsystem des Mikronetzes Simplified developed energy management system of microgrid

The considered time interval for ED consists typically of minutes to hour. Furthermore the EMS has to take a decision concerning purchase and selling of electricity from the interconnecting network.



Diese Aspekte unterscheiden ein Microgrid-EMS von jenen in herkömmlichen Energiesystemen und machen die Betriebsoptimierung zu einer komplexen Aufgabe. Die entscheidenden Ziele einer optimalen Betriebsführung differieren je nach Interessenvertreter und stehen eventuell in Konflikt zueinander. So wäre beispielsweise das Ziel eines Netzbetreibers, Netzverluste zu minimieren und die Spannungsqualität zu sichern. Für private Besitzer dezentraler Erzeugeranlagen (DEA) hingegen stünde, ungeachtet des Einflusses auf das Netz, der Profit aus dem Verkauf der erzeugten Energie im Vordergrund. Als Endkunde wäre schließlich die Höhe der Stromrechnung von entscheidender Bedeutung. Die Optimierungsziele können demzufolge von technischen, ökonomischen oder auch ökologischen Aspekten abhängig sein. Fig. 2 verdeutlicht die Mehrdimensionalität einer optimalen Betriebsführung unter den zu berücksichtigenden Aspekten.



Fig. 2: Wichtigste berücksichtigte Aspekte einer optimalen Betriebsführung in MGs Important considered aspects of optimum operation of MGs

Die Forschungsthemen am IEH im Bereich Mikronetze befassen sich mit verschiedenen Optimierungsverfahren für die Einsatzplanung der Erzeugungs- bzw. Speichereinheiten. Im Mittelpunkt der Optimierungsaufgaben stehen hierbei das UC und ED. Die Optimierungsmethoden und Techniken in einem elektrischen Energiesystem können grob in mathematische und heuristische Methoden unterteilt werden. Drei Techniken als Vertreter aus den genannten Kategorien, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Genetische Algorithmen (GA) und Dynamic Programming, wurden formuliert und für die Anwendung in MGs im Detail betrachtet und die Ergebnisse ausgewertet. Die Untersuchung der Einflüsse vom Prognosefehler, Blindleistungsregelung und Demand Side Management auf UC und ED sind die Beispiele von laufenden Themen in diesem Bereich.



If in addition renewable energy are used for 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 are managed from EMS with the aim to optimize the operation of system (in this case DSM). The transmission and gathering of respectful data via EMS need high rate of information and communication technology. These aspects distinguish a microgrid-EMS from the conventional energy systems and make the optimization problem 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.

For example one of the goals of the system operator may be the minimization of losses in microgrid or getting the satisfied power quality in grid. At the same time the owner of decentralized energy generators, without any care about the network, wants to have the maximum profit of his generators. And finally the consumer wants to have the lowest energy costs.

The optimization objectives can be categorized in three major groups. They can be considered as technical, environmental and economic aspects.

Fig. 2 shows some of the considered aspects of an optimal energy management system of microgrids.

The research work at IEH in the field of microgrids involve the various optimization methods for coordination and planning of distributed generators and storage systems. The optimization focusses on unit commitment and economic dispatching problems.

The optimization methods and techniques in this field are based on two main categories, mathematical and heuristic methods. As representative solutions among these categories we used three effective methods: Mixed Integer Linear Programming (MILP), Genetic Algorithms (GA) and Dynamic Programming (DP). After implementation of these methods in UC and ED problems in the results have been evaluated. The current research topics in this sphere are the investigation of influences of prognosis uncertainties, reactive power control / dispatch and demand side management on UC and ED in future microgrids.



# Berücksichtigung von Netzbetriebsstrategien in der Netzplanung am Beispiel Elektromobilität

## Dipl.-Ing. Alexander Probst

In der konventionellen Netzplanung werden Stromnetze auf einen ausgewählten Last- und Einspeisefall ausgelegt. Dabei kann es passieren, dass dies zum Teil zu Überdimensionierungen führt, wie beispielsweise die Richtlinie VDE AR-N 4105 deutlich macht. Sie schreibt vor, dass für den Anschluss von Photovoltaikanlagen eine Spannungserhöhung von 3 % nicht überschritten werden darf. Dabei wird der Fall betrachtet, dass alle Erneuerbaren im Netz mit 100 % einspeisen. Dieser Fall tritt aufgrund von unterschiedlicher Ausrichtung und Neigung der Anlagen jedoch so gut wie nie auf. Genau so kann es passieren, dass in der konventionellen Netzplanung teilweise Betriebsmittel unterdimensioniert werden, da belastendere Fälle auftreten können. Darüber hinaus war es bisher kaum möglich Netzbetriebsstrategien, wie zum Beispiel ein Lademanagement für Elektroautos, zu berücksichtigen. Über die Betrachtung und Simulation von Zeitreihen im Rahmen einer probabilistischen Lastflussrechnung können diese drei Nachteile ausgeglichen werden.

Ziel der Arbeit am IEH ist es, den Einfluss von Elektromobilität auf die Stabilität des Stromnetzes zu untersuchen und gleichzeitig abzuschätzen, inwieweit es Möglichkeiten zur Unterstützung bei Netzdienstleistungen gibt. Dies wird erst durch das neue Verfahren der probabilistischen Netzplanung ermöglicht.



Fig. 1: Erstellung synthetischer Lastprofile für Elektroautos Creation of synthetic load profiles for electric vehicles

Zu diesem Zweck müssen zukünftige Lastprofile von Elektroautos abgeschätzt werden, wozu die Vorgehensweise in Fig. 1 skizziert ist. Hierzu ist es notwendig, Annahmen über zukünftige Ladeleistungen und Durchdringungsgrade von Elektroautos zu treffen.



# Strategies for Power Network Planning taking into account Electric Mobility and Network Operation

## Dipl.-Ing. Alexander Probst

In conventional network planning grids are designed for a selected load case. This, however, sometimes may lead to over-dimensioning, such as with the directive VDE AR-N 4105. This states that for the connection of photovoltaic systems a voltage increase of 3 % must not be exceeded, which is analyzed by using a load case of 100 % feed in of photovoltaics without any load. This case, however, is very unlikely to occur because of the different angle and orientation of each PV system. In the same way it might happen that certain entities are undersized because load cases with more load than considered in conventional grid planning might occur. In addition, up till now it is very difficult to take network operation into account, as a load management system for electric vehicles might reduce the necessary grid reinforcement. These three disadvantages can be overcome by simulation of time series in the context of a probabilistic load flow calculation.

The aim of the work at IEH is to examine the influence of electric vehicles on the stability of the power grid and simultaneously to assess to what extent it is possible to support grid services. This is made possible for the first time by the use of this new method of probabilistic network planning.



Fig. 2: Beispielhaftes Lademanagement mit Kommunikationskanälen Exemplary load management with communication channels

To this end, future load profiles of electric vehicles must be estimated, which is outlined in Fig. 1. For this it is necessary to make assumptions about the charging power and market penetration of electric vehicles.



Darüber hinaus wird das Mobilitätsverhalten heutiger Autofahrer berücksichtigt, um abzuschätzen, wann ein Fahrzeug nach Hause kommt und geladen wird und wie weit es gefahren ist, um die nachzuladende Energiemenge festzustellen. Weiterhin könnte ein Lademanagement, wie in Fig. 2 skizziert, genutzt werden, um die Spannung über Wirk- und Blindleistungsregelung zu stabilisieren. Durch diese Vorgehensweise wird weniger Netzausbau benötigt. Auf der anderen Seite wird durch eine Abregelung des Wirkleistungsbezugs das Fahrzeug nicht in der kürzest möglichen Zeit geladen, sondern beispielsweise erst in der Nacht vollgeladen, wenn die Netzbelastung nachgelassen und die Spannung sich erholt hat.

Fig. 3 zeigt exemplarisch, welche Kosten in Abhängigkeit der Häufigkeit des Einsatzes eines Lademanagements entstehen. Je häufiger es eingesetzt wird, desto geringer sind die benötigten Netzausbaukosten. Jedoch steigen die Komforteinbußen auf Seiten der Fahrzeughalter, die beispielsweise vom Netzbetreiber entgeltlich kompensiert werden könnten. Somit steigen die Kosten, die mit der Lastverschiebung durch das Lademanagement assoziiert werden können. Betrachtet man die Gesamtkosten als Summe dieser beiden Kostenarten, lässt sich ein Optimum finden, welches von der Höhe der Kompensationszahlungen und der Netzausbaukosten abhängt. Ziel der Arbeit am IEH ist es, hier den optimalen Kompromiss zwischen Abregelung von Erzeugern bzw. Verbrauchern und konventionellem Netzausbau zu finden.

Zukünftige Untersuchungen werden sich darauf konzentrieren, die Methodik zur Analyse von Netzen auf ihre Tauglichkeit hin zu verfeinern. Darüber hinaus soll untersucht werden, wie das Verfahren der probabilistischen Netzplanung auch auf Hochspannungsebene eingesetzt werden kann.



In addition, the mobility behavior of today's car owners is taken into account to estimate the starting time and duration of charging, which depend on the arrival time at home and the daily travelled distance. Furthermore, a load management, like depicted in Fig. 2, could be used to control the voltage by supplying active and reactive power accordingly. This can reduce the costs associated with grid reinforcements. However, by reducing the active charging power of the vehicle, it is not charged in the shortest possible time frame but, for example, during the night, when the load on the network decreased and the voltage rose again.

Fig. 3 shows as an example, which costs arise depending on the frequency of use of load managements. The more often it is used the lower are the required network expansion costs. However, on the other side there is the loss of comfort of the vehicle owner, because the charging time increases. This, for example, might be compensated by the distribution system operator, which produces costs for the displacement of the electric vehicle loads.



Fig. 3: Reduktion der Netzausbaukosten durch Einsatz eines Lademanagements Reduction of grid reinforcement costs due to use of load management system

Looking at the total costs as the sum of these two types of costs, one can find an optimal frequency of usage of the load management system, which depends on the compensation costs and grid expansion costs. Aim of the work is to find the best compromise between grid reinforcement and incorporating network operation strategies.

Future work will focuse on improving the methodology for the analysis of a broad number of networks. In addition, the suitability of this methodology on high voltage network planning is investigated.



# 5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

## Elektromagnetische Verträglichkeit von KFZ-Hochvolt-Bordnetzen

#### Dipl.-Ing. Jens Hohloch

Mit dem Einsatz von elektrischen Fahrantrieben in Kraftfahrzeugen muss das Fahrzeugbordnetz für die Übertragung höherer Leistungen ausgelegt werden. Im herkömmlichen Kraftfahrzeugen wird deshalb Vergleich zu eine weitere Bordnetzebene mit höheren Spannungen im Bereich mehrerer hundert Volt verwendet (HV-Bordnetz). Aufgrund der hohen Zahl von elektrischen und elektronischen Komponenten auf engstem Raum erhält die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eine große Bedeutung. Ein großes Störpotential stellen Stromund Spannungsänderungen dar, die durch Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter verursacht werden. Der Spannungsverlauf eines solchen Schaltvorgangs ist beispielhaft in Fig. 1 dargestellt.





Um eine Beeinflussung verschiedener Fahrzeugkomponenten zu verhindern, müssen diverse Entstörmaßnahmen wie z.B. die Schirmung von HV-Leitungen und HV-Komponenten ergriffen werden. Für die Charakterisierung der Schirmwirkung und des elektromagnetischen Verhaltens von Komponenten des HV-Bordnetzes wie Leitungen und Steckverbindungen werden verschiedene Messverfahren untersucht. Bei den Messanordnungen wird am Prüfling ein äußeres Mess- bzw. Speisesystem aufgebaut. Die Beurteilung der Schirmwirkung erfolgt über die Messung des frequenzabhängigen Kopplungsverhaltens (Fig. 2) der beiden Systeme mittels eines Vektor-Netzwerkanalysators (VNA), die aus den Innenleitern, einem äußeren Leiter der Messvorrichtung und dem Kabelschirm als gemeinsame Impedanz gebildet werden.



# Electromagnetic Compatibility of High-Voltage Automotive Networks

#### Dipl.-Ing. Jens Hohloch

The use of electrical drive systems in motor vehicles requires an electrical power system which is designed for the transmission of higher power. Compared to conventional automotive electrical systems, there are used higher voltages in the range of several hundred volts. Due to the high number of electrical and electronic devices and components in a limited space, the electromagnetic compatibility in motor vehicles is an important issue. Steep voltage and current edges caused by switched power semiconductors in the high-voltage network are a major source of disturbances. The voltage curve of a switching operation is shown in Fig. 1 as an example.

Several measures, such as shielding of HV cables and components, must be taken to avoid those interferences between different devices of the electrical system. For the qualification of the screening effectiveness and the characterization of the electromagnetic behavior of components of the HV-network different measurement methods are investigated. For the experimental set up an external system is built up around the device under test (DUT) which is used as feeding respectively measuring circuit. The evaluation of the screening effectiveness is done by measuring the frequency dependent coupling transfer function (Fig. 2) between the two systems by means of a vector network analyzer (VNA). These systems are formed by the inner conductors of the HV-cable, the cable screen and the external conductor of the measuring device. The cable screen of the DUT acts as common impedance.



Fig. 2: Kopplungsverhalten zwischen innerem und äußerem System einer geschirmten HV-Komponente im Frequenzbereich von 300 kHz bis 1 GHz. Coupling behavior between the inner and external system of a shielded HV componenent in the frequency range from 300 kHz to 1 GHz.



Da alle HV-Komponenten (wie z.B. DC/DC-Wandler, HV-Batterie, elektrischer Zuheizer) in der Regel Steuerung- und Überwachungsanschlüsse besitzen, Fahrzeug verschiedene Kopplungspfade auch innerhalb existieren im von Komponenten, die zur Ausbreitung von elektromagnetischen Störungen beitragen. Von großer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang z.B. in einer HV-Batterieeinheit die Sensoren für Strombzw. Spannungsmessungen, die Isolationsüberwachung des HV-Bordnetzes sowie Schütze, mit denen das HV-Bordnetz von der Batterie getrennt werden kann. Um die Ausbreitung von Störungen über die einfachen, ungeschirmten Leitungsstrukturen im LV-Bordnetz (12 V-Ebene) zu minimieren, muss bei der Entwicklung von HV-Komponenten auf eine hohe Entkopplung der beiden Bordnetzebenen geachtet werden.

Aufgrund dieser Tatsache wird das Kopplungsverhalten einem an Fahrzeuggesamtsystem, an einem Systemaufbau und an einzelnen Komponenten untersucht. Zur Messung der Kopplungseigenschaften wird ein HF-Signal an einer Steckverbindung des HV-Systems eingespeist. Gleichzeitig kann das ins LV-Netz eingekoppelte Signal frequenzselektiv an einer Schnittstelle oder an einem Kabelbaum gemessen werden. Die Messungen werden mit Hilfe eines Netzwerkanalysators durchgeführt. Um eine ausreichende Messdynamik zu erreichen, wird ein HF-Verstärker verwendet. Die ins HV-System eingekoppelte Leistung kann z.B. mit einem Richtkoppler ermittelt werden. Die Ein- bzw. Auskopplung kann in aktiven Betriebszuständen entweder kapazitiv über entsprechend dimensionierte Blockkondensatoren oder induktiv durch Verwendung einer Stromzange erfolgen.



Fig. 3: HF-Störsignaleinkopplung im Common- bzw. Differential-Mode. RF signal coupling in Common respectively Differential Mode.

Die in Fig. 4 dargestellten Transferfunktionen zeigen die Abhängigkeit der Kopplung vom Betriebszustand einer HV-Komponente (elektrischer Zuheizer). Sowohl bei Einspeisung im Common-Mode als auch im Differential-Mode ist Kopplung zwischen dem HV- und dem LV-Teil im eingeschalteten Zustand bis zu einer Frequenz von 10 MHz deutlich größer und somit kritischer zu bewerten.



Since all HV-components (for example DC/DC-converters, HV-batteries, electrical heaters) provide connections for control and monitoring, there a several coupling paths in the vehicle and also within the component which contribute to the propagation of disturbances. In this context the current and voltage sensors of a battery unit, the insulation monitoring of the HV system and the HV contactor which is used to disconnect the HV-battery from the power network are of great interest. To avoid the propagation of disturbances in the LV wiring system (12 V vehicle electrical system) via simple and unshielded cables, it is necessary to ensure a sufficiently high decoupling between the HV- and the LV-part of a component.

Due to this fact the coupling behavior between different voltage levels is examined at a complete vehicle system, at a system configuration and on component level. For the measurement of the frequency-dependent coupling, a RF signal is fed into the HV system while the RF signal is measured for example at a plug connection or a wiring harness on the LV-side. The measurement is done with help of a network analyzer. An amplifier is used in order to achieve a high dynamic range. The effective RF power fed into the network can be determined with a directional coupler. In order to allow active operation modes of the devices and components, blocking capacitors (capacitive coupling) or injection probes (inductive coupling) are used for the signal feed-in.

The diagram in Fig. 4 shows transfer functions measured at the electric heater during different operation modes. Independent from the type of feeding there is a larger coupling between the HV- and the LV-system up to 10 MHz if the component is in active operation mode. In the higher frequency range between 10 and 100 MHz the curve shapes get very similar.



Fig. 4: Induktive Signalauskopplung am LV-Kabelbaum des elektrischen Zuheizers. Inductive signal decoupling at the LV harness of the electric heating.



# Einfluss der Netzimpedanz auf leitungsgebundene Störgrößen in elektrischen Kfz-Antrieben

## Dipl.-Ing. Martin Reuter

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von elektrischen Kfz-Antrieben stellt eine besondere Herausforderung dar: Schnelle Taktflanken in der Leistungs-Elektronik werden für eine möglichst hohe Effizienz benötigt. Im sperrenden bzw. leitenden Zustand sind die Verluste in den Leistungshalbleitern gering, aber während der Zustandsänderung erreicht die Verlustleistung kurzzeitig einige Kilowatt. Um die Verluste und damit auch die Erwärmung gering zu halten, wird versucht mit steilen Taktflanken den Schaltvorgang möglichst schnell ablaufen zu lassen. Durch steile Taktflanken entstehen allerdings hochfrequente Spektralanteile, die bis in den Frequenzbereich von Funkdiensten reichen. In empfindliche elektronische Systeme können diese Störungen einkoppeln und deren Funktionalität beeinträchtigen.

Ein Lösungsansatz zur Verringerung der abgestrahlten Funkstörungen besteht in der vollständigen Schirmung des Hochvolt-Bordnetzes (HV-BN). Dieser Schirm verändert aber den heute üblichen Kabelbaum aus ungeschirmten Einzeladern zu einer geschirmten Koaxialanordnung und dadurch auch die Eingangsimpedanz des Leistungsbordnetzes. Leitungen befindlichen Die auf Störströme und Störspannungen einer Komponente, wie etwa ein Pulswechselrichter (PWR), hängen stark von der Impedanz ab, mit der die Störguellen innerhalb der Komponente belastet werden. Deshalb sollte die Eingangsimpedanz der Fahrzeugnachbildung während der EMV-Messung möglichst ähnlich der Lastimpedanz sein, die die Komponente später im Kfz "sieht", nämlich der Eingangsimpedanz des HV-BN.

Derzeit wird die EMV von HV-Komponenten nach der Norm CISPR 25 gemessen. Bei dem verwendeten Messaufbau stellt die Eingangsimpedanz der Bordnetznachbildungen (BNN) die Abschlussimpedanz des HV-BN dar. Im Fahrzeug wird der elektrische Antriebsstrang allerdings von einer HV-Batterie versorgt, die eine von der BNN signifikant verschiedene Eingangsimpedanz aufweist. Die in den HV-Systemen verwendeten geschirmten Koaxialkabel erlauben die Anwendung der Leitungstheorie zur theoretischen Beschreibung fehlangepasster Wellenleiter. Eine Reduktion des Systems auf seine Gleichtaktgrößen ergibt ein elektrisches Ersatzschaltbild, wie es in Fig. 1 dargestellt ist. Dabei beschreibt das Gleichtakt-Störverhalten des Prüflings eine Thévenin-Quelle, deren Quellspannung U<sub>0</sub> als konstant betrachtet werden kann, solange der Betriebspunkt des PWR unverändert bleibt. An den Klemmen des PWR stellt sich in Abhängigkeit der Eingangsimpedanz Z<sub>1</sub> des HV-Kabelbaums eine Störspannung U<sub>1</sub> sowie ein Störstrom I<sub>1</sub> ein. Die Kabelbaum-Eingangsimpedanz Z<sub>1</sub> lässt sich aus der Abschlussimpedanz Z<sub>2</sub>, dem Wellenwiderstand Z<sub>L</sub> und den Kabelparametern  $\gamma$  und  $\ell$  des HV-Bordnetzes berechnen.



# Influence of Termination Impedance on Conducted Emissions in Automotive High Voltage Cables

## Dipl.-Ing. Martin Reuter

The electrification of the automotive power train requires a novel electrical power bus system. Recent automotive low voltage (LV) networks are not able to meet power demands of electric driving engines because of high currents required for power transmission. Automotive high voltage (HV) power networks reduce needed currents to values, which can be handled more efficiently. One major task in developing electric cars is to control their electromagnetic interferences (EMI). Maximum efficiency of power electronics requires fast slew rates of switching semiconductor devices. But fast slew rates result in bus disturbances consisting of radio frequency (RF) spectral components with high amplitudes. These RF disturbances may propagate along HV power lines and are able to interfere with other electronic systems.

A complete shielding of the HV traction network is intended to reduce the RF interference potential of the electric traction system. Thus the network configuration is changed from unshielded single core multi wire harnesses into coaxial conductor layouts, and therefore the impedance characteristic of the entire network is changed. As the conducted emissions of the interference sources within the power electronics are dependent of their load impedance, the investigated component should be tested in an environment as similar as possible to vehicle situation. Therefore the device under test (DUT) should be connected to an impedance situation, which emulates an automotive HV network during the EMC test. If the load impedances within component and vehicle level tests match, then the investigated component will also behave in a similar manner.

Recently the EMC on component level is evaluated using a test setup according to CISPR 25, where line impedance stabilization networks (LISN) form the termination impedance of the HV harness. In the vehicle the traction system is supplied by a HV battery, leading to significantly changed termination impedances. As the used HV cables are coaxially shielded, the transmission line theory is applicable to the common mode equivalent circuit of the system, shown in Fig. 1. The disturbance sources inside the power inverter (PWR) are modeled as Thévenin equivalent. It consists of an ideal voltage source with the source voltage  $U_0$  and a series source impedance  $Z_Q$ . This inverter couples a clamp voltage  $U_1$  and a disturbance current  $I_1$  into the HV harness, which depends solely on the harnesses' input impedance  $Z_1$  for a given disturbance source. The input impedance  $Z_1$  of the cable is dependent of the termination impedance  $Z_2$ , the cable's wave impedance  $Z_L$  and the electric properties  $\gamma$  and  $\ell$  of the HV harness attached.



BNN / HV-Bati





Fig. 1: Elektrisches Ersatzschaltbild für Gleichtaktstörgrößen des Messaufbaus nach CISPR 25 für HV-Komponenten. Electric equivalent circuit for common mode disturbances within the test setun

Electric equivalent circuit for common mode disturbances within the test setup according to CISPR 25 for HV components.

Auf Systemebene koppelt der PWR ein sich um bis zu 33 dB vom Komponententest unterscheidendes Störspektrum U<sub>2</sub><sup>+</sup> auf den Kabelbaum ein, wie Fig. 2a zeigt. Die Störquellen im PWR werden mit einer geänderten Impedanz belastet, da der PWR anstatt mit BNN von einer HV-Batterie versorgt wird. Da das Thévenin-Äquivalent der Gleichtaktstörquellen bei einem gleichbleibenden Betriebspunkt des PWR konstant ist, lässt sich damit die Amplitude der Störspannung U<sub>2</sub><sup>+</sup> für eine beliebige Eingangsimpedanz Z<sub>1</sub><sup>+</sup> des HV-BN berechnen:

$$U_2^* = \frac{Z_1 + Z_Q}{Z_1^* + Z_0} \cdot \frac{Z_2^*}{Z_2} \cdot \frac{Z_L \cosh(\gamma \ell) + Z_2 \sinh(\gamma \ell)}{Z_L \cosh(\gamma \ell) + Z_2^* \sinh(\gamma \ell)} U_2$$

Die Berechnung der Störspannung  $U_2^*$  auf System-Ebene aus der Messung von  $U_2$  im Komponententest zeigt bis 6 MHz eine gute Vorhersage des gemessenen Störspektrums  $U_2^*$  des HV-Systems (siehe Fig. 2a). Durch ein analoges Vorgehen lässt sich der Störstrom  $I_2^*$  im HV-System berechnen:

$$I_{2}^{*} = \frac{Z_{1} + Z_{Q}}{Z_{1}^{*} + Z_{Q}} \cdot \frac{Z_{L} cosh(\gamma \ell) + Z_{2} sinh(\gamma \ell)}{Z_{L} cosh(\gamma \ell) + Z_{2}^{*} sinh(\gamma \ell)} I_{2}$$

Fig. 2b zeigt dabei den Störstrom  $I_2$  auf Komponentenebene und die daraus berechnete Vorhersage des Systemverhaltens  $I_2^*$ . Dabei weist die Vorhersage des Störstromes  $I_2^*$  ab einer Frequenz von ca. 1 MHz eine sehr gute Übereinstimmung mit dem auf Systemebene gemessenen Strom  $I_2^*$  auf.

Die Anwendung der Leitungstheorie auf HV-Systeme ermöglicht mit einer Komponentenmessung, der Kenntnis der Abschlussimpedanz des HV-Systems sowie den Kabelparametern eine Abschätzung der tatsächlich auftretenden leitungsgebundenen Störgrößen zu treffen. Somit kann aus der genormten Messung auf Komponentenebene auf das Verhalten des Prüflings in verschiedensten Fahrzeugbaureihen geschlossen werden, sodass eine Optimierung des EMV-Verhaltens schon vor Zusammenfügen der Einzel-Komponenten möglich ist.





Fig. 2: Funkstörspannung an BNN (a) und Funkstörstrom auf Hochvoltkabel (b) des Pulswechselrichters im Komponententest (U<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>), berechnete Abschätzung des Systemverhalten (U<sub>2</sub><sup>\*</sup>, I<sub>2</sub><sup>\*</sup>) und gemessen auf Systemebene (U<sub>2</sub><sup>\*</sup>, I<sub>2</sub><sup>\*</sup>). Interference voltage at LISN (a) and disturbance current on HV cable (b) of the power inverter within the component level test setup (U<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>), estimation of system behavior (U<sub>2</sub><sup>\*</sup>, I<sub>2</sub><sup>\*</sup>), and measured on system level (U<sub>2</sub><sup>\*</sup>, I<sub>2</sub><sup>\*</sup>).

As part of an HV-System, the DUT emits an up to 33 dB different voltage spectrum  $U_2$ ' compared to the component test into the HV harness, as shown in Fig. 2a. On system level the harness is supplied with a HV battery instead of LISNs, thus the disturbance sources inside the DUT are loaded with changed impedance. As the Thévenin equivalent of the disturbance source is constant for a given operating point of the DUT, the amplitude of the disturbance voltage  $U_2^*$  can be calculated the input impedance  $Z_1^*$  of the HV harness:

$$U_2^* = \frac{Z_1 + Z_Q}{Z_1^* + Z_0} \cdot \frac{Z_2^*}{Z_2} \cdot \frac{Z_L cosh(\gamma \ell) + Z_2 sinh(\gamma \ell)}{Z_L cosh(\gamma \ell) + Z_2^* sinh(\gamma \ell)} U_2$$

The calculation of  $U_2^*$  on system level, using the component level test result  $U_2$ , shows a quite accurate estimation up to 6 MHz of the measured disturbance voltage  $U_2$ ' of the HV system (see Fig. 2a).

Analogously, the disturbance current  $I_2^*$  on system level can be calculated:

$$I_{2}^{*} = \frac{Z_{1} + Z_{Q}}{Z_{1}^{*} + Z_{Q}} \cdot \frac{Z_{L} cosh(\gamma \ell) + Z_{2} sinh(\gamma \ell)}{Z_{L} cosh(\gamma \ell) + Z_{2}^{*} sinh(\gamma \ell)} I_{2}$$

Fig. 2b shows the measured disturbance current on component level  $I_2$  and the calculation of the current on system level  $I_2^*$ . The comparison of calculation result  $I_2^*$  and the disturbance current  $I_2$ , measured on system level, indicates a high accuracy of the estimation on system level above a frequency of 1 MHz.

The presented method allows a calculation of the system's EMC behavior using the component level test results and the HV harnesses' RF characteristics. Therefore, it is possible to estimate the EMV behavior of a component applied in any car type series, enabling the optimization of the single components' EMC regarding the entire system behavior before it is assembled.



## Pre-Compliance-Prüfmethode zur Abschätzung der Störabstrahlung bei KFZ-Komponententests

## Dipl.-Ing. Daniel Schneider

Zur Reduktion der entwicklungsbegleitenden Ausgaben für EMV-Messungen im Automobilbereich sind Methoden gefragt, welche hinsichtlich benötigter Messgeräte und Einrichtungen kostengünstiger als normgerechte Lösungen sind. Für eine Abschätzung der zu erwartenden gestrahlten Störemission bei einer Komponentenprüfung nach CISPR 25 in einer Absorberhalle können Transferfunktionen herangezogen werden. Dies erfolgt auf Grundlage von Störstrommessungen am Kabelbaum einer Komponente in einem Laboraufbau. Hierzu werden messtechnisch erzeugte Transferfunktionen (TF) verwendet. Die TF stellen den Zusammenhang zwischen Störstrom und elektrischem Feld her. Benötigte TF können von vorherigen, ähnlichen Projekten stammen oder müssen beim ersten Messdurchgang in einer Absorberhalle ermittelt werden. Durch Kombination von Störstrom und TF lässt sich das zu erwartende elektrische Feld berechnen. Die Methode führt zu einer Minimierung der benötigten Messzeit und der damit Bisherige Untersuchungen gehen von unverzweigten verbundenen Kosten. Systemen aus, welche lediglich einen Kabelbaum zwischen Komponente und Bordnetznachbildung (BNN) besitzen. Untersuchungen zeigen, dass auch verzweigte Hochvolt-(HV)-Systeme abbildbar sind, die aus HV-BNN, Inverter, Niedervolt-BNN und elektrischer Maschinennachbildung (EMN) bestehen, siehe Fig. 1a) und 1b). In Fig. 2 ist das über die TF-Methode berechnete Feld E<sub>calc Inv</sub> im Vergleich zu einer Referenzmessung E<sub>meas Inv</sub> des sich im Betrieb befindlichen Inverters zu sehen. Es stellt sich von 0.15 bis 3.5 MHz eine Überbewertung von 15 dB ein. Ab 3.5 MHz werden ca. 5 dB höhere Werte berechnet. Die Berechnung gibt die Tendenz des zu erwartenden Störpotentials wieder, was eine Worst Case Analyse ermöglicht.



Fig. 1: a) Blockschaltbild des verzweigten HV-Systems, b) Realisierung in einer Halle a) Block diagram of a distributed system, b) Realization in a chamber


# Pre-Compliance Test Method for Radiated Emissions of Automotive Components

#### Dipl.-Ing. Daniel Schneider

For the cost reduction of EMC measurements during the automotive component development, methods have to be found which are low-cost compared to solutions according to the standard CISPR 25. The estimation of the expected radiated emissions during a component test in a semi anechoic chamber can be obtained over transfer functions (TF) in combination with disturbance current measurements. Those TF can be obtained by measurement. TF use the correlation between disturbance currents and the according electric field strength. Needed TF come from previous similar projects or have to be generated during the first measurement round in an anechoic chamber. By the use of disturbance currents of a component in a laboratory setup and the according TF the expected radiated field can be calculated. This method leads to minimized measurement time and costs. Previous analyses are using simple non-distributed systems with a cable harness between the line impedance stabilization network (LISN) and the device under test. Further analysis show the usability of the TF method for distributed high voltage (HV) systems. Those distributed systems comprise HV-LISN, inverter, low voltage LISN and electric drive machine emulation, see Fig. 1a) und 1b). Fig. 2 shows the calculated field strength E<sub>calc Inv</sub> compared to a reference measurement E<sub>meas Inv</sub> of an inverter being in state of operation. An overestimation between 0.15 to 3.5 MHz of up to 15 dB can be observed. Beginning from 3.5 MHz an offset of 5 dB is calculated. The calculation gives the trend of the reference measurement. A good overall impression of the expectable worst case can be obtained.



Fig. 2: Vergleich der Referenzmessung  $E_{meas \ Inv}$  mit der Berechnung  $E_{calc \ Inv}$ Comparison of the reference measurement  $E_{meas \ Inv}$  and calculation  $E_{calc \ Inv}$ 



#### Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen

#### M. Sc. Christian SUTTNER

Mittelspannungsschaltanlagen werden in elektrischen Verteilnetzen eingesetzt, um auf der Mittelspannungsebene Energieverbraucher und -erzeuger zu- und abzuschalten. Der Bereich der Mittelspannung umfasst in der elektrischen Energietechnik Spannungen von 1 kV bis 40 kV. Durch den Einsatz von Vakuumschalttechnik und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) 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 leichter 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 zusammengerückt, was die Störgrößenbeaufschlagung auf die Sekundärtechnik erhöht.



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.

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

Ziel der Forschungsarbeit ist es, umfassende Klarheit über die elektromagnetischen Vorgänge bei 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 auf die neue Sensorgeneration hin 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 (SF<sub>6</sub>) 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. 2: Konventioneller Stromwandler (links) und kernloser Stromsensor (rechts). Conventional current transformer versus rogowski sensor.

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 sensors.



### 6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

A. Ellerbrock, A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen *Design and Building of a Cheap Smart Meter.*IEEE Power and Energy Student Summit, Bielefeld, January 24-25, 2013

H. Moranda, J. Gielniak, A. Graczkowski, P. Przybylek, K. Walczak, Z. Nadolny, H. Moscicka-Grzesiak, K. Feser, S. Gubanski *Moisture in Cellulose Insulation of Power Transformers – Statistics.*IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, June 2013, Vol. 20, Issue 3, pp. 982-987

S. Burow, U. Straumann, W. Köhler, S. Tenbohlen Damping of VFTO by RF Resonator and Nanocrystalline Materials. Electrical Insulation Conference 2013, Ottawa, Canada, June 2-5, 2013, Conference Proceedings, Paper No. 097

F. Vahidi, M. Jovalekic, S. Tenbohlen, M. Rösner, C. Perrier, H. Fink *Electrical conductivity measurement and determination of ion mobility in insulating oil.* Electrical Insulation Conference (EIC), Ottawa, Canada, June 2-5, 2013, Paper No. 068, pp. 313-317

S. Burow, U. Straumann, W. Köhler, S. Tenbohlen *Measurement System for Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Switchgear.* Electrical Insulation Conference 2013, Ottawa, Canada, June 2-5, 2013, Conference Proceedings, Paper No. 105

M. Wild, S. Tenbohlen, E. Gulski, R. Jongen *Power Cable Modeling for PD Pulse Propagation and Sensitivity.* EIC 2013, Electrical Insulation Conference, June 2-5, 2013, Ottawa, Canada, Paper No. 087



M. Wild, S. Tenbohlen, E. Gulski, R. Jongen, F. de Vries *Practical aspects of PD localization for long length Power Cables.* EIC 2013, Electrical Insulation Conference, June 2-5, 2013, Ottawa, Canada, Paper No. 088

S. Eilenberger, D. Schöllhorn, G. Walker, S. Tenbohlen, M. Braun *Probabilistic Simulation for LF-Grid Optimization with new Network Components.* CIRED, 22nd International Conference on Electricity Distribution, June 10-13, 2013, Stockholm, Schweden, June 10-13, 2013, Paper 0575

A. Probst, S. Tenbohlen, M. Seel, M. Braun

Probabilistic grid planning with consideration of dispersed generation and electric vehicles.

CIRED, 22nd International Conference on Electricity Distribution, June 10-13, 2013, Stockholm, Schweden, Paper 1361

A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen, D. Schöllhorn, M. Braun Meter Placement for Low Voltage System State estimation with Distributed Generation.

CIRED, 22nd International Conference on Electricity Distribution, June 10-13, 2013, Stockholm, Schweden, June 10-13, 2013, Paper 0640

A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen, D. Schöllhorn, M. Braun Development of State Estimator for Low Voltage Networks Using Smart Meters Measurement Data.

POWERTECH 2013, Grenoble, Frankreich, June 16-20, 2013, Paper A5562AA

M. Nemati, M. Imran, B. Meyer, M. Braun, H. Mueller, S. Tenbohlen Development of Generic Dynamic Models for Distributed Generators in Microgrids. POWERTECH 2013, Grenoble, Frankreich, June 16-20, 2013, Paper A5725MN

M. Brunner, M. Braun, S. Tenbohlen Heat pumps as important contributors to local demand-side management. POWERTECH 2013, Grenoble, Frankreich, June 16-20, 2013, Paper A5721MB

J. Smajic, A. Shoory, S. Burow, W. Holaus, U. Riechert, S. Tenbohlen Simulation Based Design of HF-Resonators for Damping of Very Fast Transients in GIS.

COMPUMAG 2013, Budapest, Ungarn, June 30 – July 4, 2013, Paper No. PB6-2



M. Reuter, T. Friedl, S. Tenbohlen, W. Köhler Emulation of Conducted Emissions of an Automotive Inverter for Filter Development in HV Networks.

IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, USA, August 5-9, 2013, Conference Proceedings pp. 236-241

D. Schneider, M. Böttcher, S. Tenbohlen, W. Köhler

*Pre-Compliance Test Method for Radiated Emissions with Multiple Segment Transfer Functions.* 

IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, USA, August 5-9, 2013, Conference Proceedings pp. 605-610

M. Siegel, S. Tenbohlen, H.O. Kristiansen

New Methods for Multisource PD Localization On Power Transfomers by an Acoustic Sensor Array.

18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Paper OF4-02

M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen

Investigations of in-oil Methods for PD Detection and Vibration Measurement. 18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Paper OD5-04

A. Müller, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen
Assessment of UHF PD Monitoring Data by Means of Pattern Recognition.
18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Paper OF4-05

A. Müller, S. Tenbohlen

Analysis of Fault Gas Losses through the Conservator Tank of free-breathing Power Transformers.

18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Paper OF3-02

M. Beltle, S. Tenbohlen
Vibration Analysis of Power Transformers.
18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Paper OF3-05



N. Schmidt, S. Tenbohlen, S. Chen, C. Breuer Numerical and Experimental Investigation of the Temperature Distribution inside Oil-Cooled Transformer Windings. 18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013, Seoul, Süd-

korea, August 25-30, 2013, Paper OG1-03

A. Müller, S. Tenbohlen

Analysis of Fault Gas Losses through the Conservator Tank of Free - Breathing Power Transformers.

18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Proceedings of the ISH, Paper No. OF3-02

S. Su Win, S. Tenbohlen

Partial Discharge Localization in Power Transformers.

18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Proceedings of the ISH, Paper No. OD5-01

A. Müller, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen

Assessment of UHF PD Monitoring Data by Means of Pattern Recognition. 18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH2013, Seoul, Südkorea, August 25-30, 2013, Proceedings of the ISH, Paper No. OF4-05

J. Hohloch, S. Tenbohlen, W. Köhler, M. Aidam, A. Ludwig, X. Pan

*RF* coupling behaviour between the high and low voltage levels in automotive power networks.

12th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, Brügge, Belgien, September 2-6, 2013, Conference Proceedings, Paper No. 302

M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler

Influence of a Traction Battery's Input Impedance on Conducted Emissions of an Automotive HV Inverter.

12th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, Brügge, Belgien, September 2-6, 2013, Conference Proceedings, pp. 229 - 234

D. Schneider, M. Böttcher, B. Schoch, S. Hurst, S. Tenbohlen, W. Köhler *Transfer Functions and Current Distribution Algorithm for the Calculation of Radiated Emissions of Automotive Components.* 

12th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, Brügge, Belgien, September 2-6, 2013, pp. 443-448



S. Coenen, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen Investigations of in-oil Methods for PD Detection and Vibration Measurement. CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM 2013, Zürich, Schweiz, 8.-14. September 2013, Paper PS3 id093

S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle, M. Reuter Suitability of Ultra High Frequency Partial Discharge Measurement for Quality Assurance and Testing of Power Transformers. CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM 2013, Zürich, Schweiz, 8.-14. September 2013, Paper PS3 id118

M. Reuter, R. Eidher, W. Pfaff EMV-Bewertung von Hochvolt-Topologien auf Komponenten- und Systemebene. 6. GMM-Fachtagung, Elektromagnetische Verträglichkeit in der Kfz-Technik, 26.-27. September 2013, Stuttgart, S. 23 - 28

M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler

Einfluss der Batterieimpedanz auf EMV-Störgrößen im Hochvoltbordnetz elektrisch angetriebener Kraftfahrzeuge.

Internationaler ETG-Kongress, 5.-6. November 2013, Berlin, Beitrag EM 02.01

S. Eilenberger, G. Kayser, S. Tenbohlen, D. Schöllhorn, M. Braun, M. Sojer, T. Smolka

Probabilistische Netzsimulation zur Bewertung von regelbaren Transformatoren. Internationaler ETG-Kongress, 5.-6. November 2013, Berlin, Beitrag 02.09.03

A. Abdel-Majeed, S. Tenbohlen, D. Schöllhorn, M. Braun Platzierung von Messstationen zur Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen. Internationaler ETG-Kongress, 5.-6. November 2013, Berlin, Beitrag 02.10.02

M. Brunner, M. Braun, S. Tenbohlen

Wärmepumpen als Möglichkeit zur Spannungsregelung in Niederspannungsnetzen. Internationaler ETG-Kongress, 5.-6. November 2013, Berlin, Beitrag 02.12.04

J. Hohloch, S. Tenbohlen, W. Köhler, A. Ludwig, X. Pan Untersuchung der elektromagnetischen Kopplung zwischen KFZ-Bordnetzen mit verschiedenen Spannungsebenen.

Internationaler ETG-Kongress, 5.-6. November 2013, Berlin, Beitrag Nr. P71



M. Wild, S. Tenbohlen, R. Jongen, B. Quak
Untersuchung von Teilentladungsverhalten mit Wechselspannung und gedämpfter
Wechselspannung.
4. ETG-Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen",

12.-13. November 2013, Dresden, Tagungsband S. 198

M. Jovalekic, S. Tenbohlen, J. Harthun, C.Perrier *Performance of alternative insulating liquids at low temperature.*4. ETG-Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen",
12.-13. November 2013, Dresden, Paper P.2, Tagungsband S. 90

F. Vahidi, S. Tenbohlen, M. Rösner, C. Perrier, H. Fink

The investigation of the temperature and electric field dependency of mineral oil electrical conductivity.

4. ETG-Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen",

12.-13. November 2013, Tagungsband S. 111

U. Schichler, W. Koltunowicz, F. Endo, K. Feser, A. Giboulet, A. Girodet, H. Hama, L. Lundgaard, S. Meijer, C. Neumann, S. Okabe, J. Pearson, R. Pietsch, U. Riechert, S. Tenbohlen, B. Hampton, J.L. Roldan, H.-G. Kranz *Risk Assessment on Defects in GIS Based on PD Diagnostics.* Cigre Brochure 525, Paris, February 2013

U. Schichler, W. Koltunowicz, F. Endo, K. Feser, A. Girodet, H. Hama, L. Lundgaard, S. Meijer, C. Neumann, S. Okabe, J. Pearson, R. Pietsch, U. Riechert, S. Tenbohlen, B. Hampton, J.L. Roldan

Risk Assessment on Defects in GIS Based on PD Diagnostics.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, December 2013, Vol. 20, Issue 6, pp. 2165-2172



## 7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

| 2427.2.13  | Treffen der CIGRE-Arbeitsgruppe WG A2.38<br>in Ljubljana, Slowenien,<br>Prof. Tenbohlen, N. Schmidt  |  |
|------------|--|--|
| 18.3.13    | Sitzung des ETG-Beirates in Frankfurt,<br>Prof. Tenbohlen  |  |
| 15.5.13    | <ol> <li>Programmausschusssitzung "Grenzflächen in elektrischen<br/>Isoliersystemen" für die Grenzflächentagung vom 1213.11.2013<br/>in Dresden,<br/>Prof. Tenbohlen</li> </ol>        |  |
| 25.6.13    | Electrical Insulation Conference, EIC 2013, Ottawa, Canada, Teilnehmer/Beiträge: M. Wild, S. Burow, F. Vahidi  |  |
| 5.6.13     | Vortrag bei Tagung Transform, Berlin, Prof. Tenbohlen  |  |
| 1013.6.13  | 22nd International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Stockholm, Schweden, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, A. Abdel-Majeed, S. Eilenberger, A. Probst  |  |
| 13.6.13    | Komiteesitzung zur EMV 2014 in Frankfurt,<br>Prof. Tenbohlen   |  |
| 14.6.13    | Sitzung der VDE-Arbeitsgruppe K124 in Mannheim,<br>Prof. Tenbohlen   |  |
| 1620.6.13  | POWERTECH 2013<br>Grenoble, Frankreich, Beiträge: A. Abdel-Majeed, M. Nemati,<br>M. Brunner  |  |
| 30.64.7.13 | 11th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2013),<br>Bologna, Italien, Beitrag von A. Ciuriuc   |  |
| 59.8.13    | IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility,<br>EMC 2013, Denver, Vorträge: M. Reuter, D. Schneider  |  |
| 2530.8.13  | 18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH<br>2013, Seoul, Südkorea, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, A.<br>Müller, M. Beltle, M. Siegel, N. Schmidt           |  |
| 26.9.13    | EMC Europe, 12th International Symposium on Electromagnetic<br>Compatibility, Brügge, Belgien, Vorträge: J. Hohloch, M. Reuter,<br>D. Schneider  |  |
| 812.9.13   | Conseil International des Grands Reseaux Électriques, Joint<br>Colloquium SC A2/C4, CIGRÉ, Zürich, Schweiz. Teilnehmer/<br>Beiträge: Prof. Tenbohlen, M. Beltle, N. Schmidt, M. Siegel |  |
|            |  |  |



| 26.9.13    | VDE ETG Taskforce "Strom im Wärmemarkt",<br>Berlin, Beitrag von M. Brunner   |  |
|------------|--|--|
| 2627.9.13  | 6. GMM Fachtagung "Elektromagnetische Verträglichkeit in der Kfz-<br>Technik", Stuttgart, Teilnehmer: Dr. W. Köhler, D. Schneider, J.<br>Hohloch, C. Suttner, Vortrag von M. Reuter  |  |
| 56.11.13   | Internationaler ETG Kongress 2013 "Energieversorgung auf dem<br>Weg nach 2050", Berlin, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen,<br>A. Abdel-Majeed, M. Belte, M. Brunner, S. Eilenberger, J. Hohloch,<br>M. Nemati, M. Reuter, M. Siegel |  |
| 7.11.13    | ETG-Beiratssitzung in Berlin, Prof. Tenbohlen  |  |
| 12.11.13   | VDE ETG Taskforce "Strom im Wärmemarkt",<br>Frankfurt, Sitzung/Arbeitstreffen, Teilnehmer: M. Brunner  |  |
| 1213.11.13 | ETG-Grenzflächentagung 2013, Dresden, Teilnehmer/Beiträge:<br>Prof. Tenbohlen, M. Jovalekic, F. Vahidi, M. Wild  |  |
| 1920.11.13 | Transformer Seminar, Stockholm, Schweden, Prof. Tenbohlen  |  |
| 3.12.13    | Treffen der CIGRE-Arbeitsgruppe WG D1.37 in Lenzburg/Schweiz, Prof. Tenbohlen  |  |



# Prüfeinri 8. PRÜFEINRICHTUNGEN

| Stoßspannungsanlagen        | bis 2000 kV, 100 kJ   |
|-----------------------------|---|
| Schwingende Blitzstoßspann  | ung bis 1200 kV<br>(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 Freiluft-<br>antenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m $^3$ (B x L x H)  |
| Spannungsteiler             | gedämpft kapazitive Spannungsteiler bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)  |
| E/H-Feldmeßsysteme          | mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 500 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)   |
| EMV-Prüfgeräte              | div. kleinere für die Nachbildung elektrostatischer Ent-<br>ladungen, Einkopplung von Störspannungsimpulsen ins<br>Netz zur Prüfung von Bauteilen und Geräten |
| EMV-Absorberräume           | 10 m und 3 m Messabstand, mit Leistungsverstärkern,<br>div. Antennen, Feldmesssystem, Videoüberwachung<br>über LWL, Messempfänger bis 3 GHz, TEM-Messzelle    |
| Klimakammer                 | $3\ x\ 3\ x\ 3\ m^3,$ 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 Messge | eräte für periodische und einmalige Vorgänge mit Abtast-<br>raten bis über 20 GHz, Netzwerkanalysatoren,<br>Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren           |
| Teilentladungsmessgeräte zu | ur phasenaufgelösten Messung und Interpretation   |
| Öllabor                     | Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlag-<br>spannungsmessgerät, Gaschromatographen   |



## 9. LAGEPLÄNE

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



Von Stuttgart Hauptbahnhof: Linien S1, S2, S3 (alle 10 Min. Fahrtdauer 10 Min.)Vom Flughafen:Linien S2, S3(alle 15 Min. Fahrtdauer 17 Min.)



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

