## INHALT

| 1. | VOR   | VORWORT2                            |     |  |
|----|-------|-------------------------------------|-----|--|
| 2. | PER   | PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS  |     |  |
| 3. | LEHRE |                                     | 8   |  |
|    | 3.1   | VORLESUNGEN                         |     |  |
|    | 3.2   | PRAKTIKA                            | 12  |  |
|    | 3.3   | EXKURSIONEN                         | 13  |  |
|    | 3.4   | STUDENTISCHE ARBEITEN               | 14  |  |
| 4. | PRO   | MOTIONEN                            | 26  |  |
| 5. | FOR   | FORSCHUNGSARBEITEN                  |     |  |
|    | 5.1   | HOCHSPANNUNGSTECHNIK                |     |  |
|    | 5.2   | SMART POWER GRIDS                   | 74  |  |
|    | 5.3   | ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT  |     |  |
| 6. | VER   | ÖFFENTLICHUNGEN                     | 112 |  |
| 7. | МІТ   | MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE |     |  |
| 8. | PRÜ   | PRÜFEINRICHTUNGEN122                |     |  |
| 9. | LAG   | LAGEPLÄNE                           |     |  |



## 1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2012 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Nachdem in 2011 unter dem Eindruck der Katastrophe von Fukushima die Energiewende in breitem Konsens beschlossen wurde, wird nun auch der Politik und der Öffentlichkeit zunehmend bewusst, dass Photovoltaik- und Windenergieanlagen nicht von selbst in unserer Landschaft entstehen, sondern dass es erheblicher technischer und vor allem finanzieller Anstrengungen bedarf, die Energiewende umzusetzen.

Wir haben mittlerweile erreicht, dass in Deutschland 20 % des elektrischen Stromes aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Vor dem Hintergrund des Fernziels von 80 % in 2050 sind dies aber sicherlich die am einfachsten zu erreichenden 20 % gewesen.

Schon nach kaum zwei Jahren als Juniorprofessor an der Universität Stuttgart hat im Sommer dieses Jahres Martin Braun einen sehr ehrenhaften Ruf an die Universität Kassel erhalten. Seit September leitet er nun dort als ordentlicher Professor das Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze. In seiner Zeit in Stuttgart hat er viele ambitionierte Forschungsvorhaben im Bereich Smart Grids auf den Weg bringen können. Auch auf diesem Wege möchte ich ihm sehr herzlich für die an unserem Institut geleistete hervorragende Arbeit danken und wünsche ihm für seine weitere akademische Laufbahn alles Gute.

Um die Lücke nachhaltig zu schließen, die durch seinen Weggang entstanden ist, planen wir, im nächsten Jahre eine unbefristete W3-Professur zum Thema "Netzintegration erneuerbarer Energien" auszuschreiben. Die Professur soll am IEH das Gebiet der Smart Grids in Forschung und Lehre vertreten und dabei die Auswirkungen auf die Struktur und den Betrieb des elektrischen Netzes untersuchen, die sich durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien ergeben.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben der Dissertation von Dr.-Ing. Sebastian Coenen (*Measurement of Partial Discharges in Power Transformers using Electromagnetic Signals*) dokumentieren über 60 Veröffentlichungen eindrucksvoll unsere Aktivitäten. Einen Großteil dieser Veröffentlichungen können Sie auch auf unserer Homepage (www.unistuttgart.de/ieh) 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. Dabei steht der Leistungstransformator im Mittelpunkt zweier Arbeiten. M. Sc. Farzaneh Vahidi wird Fragestellungen zur Leitfähigkeitsbestimmung von Isolierölen und Dipl.-Ing. Milos Andel-



kovic wird die dielektrische Festigkeit von Isolationssystemen auf Basis von Mineralöl und natürlichem Ester untersuchen. Dipl.-Ing. Philipp Arnold und Dipl.-Ing. Manuel Wild werden die Isolationsfestigkeit von SF<sub>6</sub> bei DC-Beanspruchung bzw. Prüf- und Diagnosetechniken für Hochspannungskabelstrecken untersuchen. Dipl.-Ing. Christoph Kattman wird auf dem Gebieten der Modellierung und Simulation von Smart Grids forschen. Die derzeit 23 wissenschaftlichen Mitarbeiter sind in drei Forschungsgruppen mit den Schwerpunkten Hochspannungstechnik, Energieübertragung und Elektromagnetische Verträglichkeit organisiert.

Durch das mediale Interesse, das dem Thema Energiewende entgegengebracht wird, ist auch dieses Jahr die Anzahl der Studierenden in den Bachelorstudiengängen Elektrotechnik und Erneuerbare Energien erfreulicherweise weiter stark angestiegen.

Auch haben sich die ersten Absolventen des Bachelorstudiengangs Erneuerbare Energien in unseren neuen Masterstudiengang Nachhaltige Elektrische Energieversorgung eingeschrieben. Zentrale Themen sind hier die Nutzung der Windenergie, Photovoltaik und die Netzintegration. Durch die große Strahlkraft dieses Konzeptes können wir für diesen Masterstudiengang neben unseren eigenen Studenten aus einer Vielzahl von Bachelorabsolventen aus dem gesamten Bundesgebiet die Besten auswählen. Dies freut uns insbesondere, weil gerade die Masterstudenten für die vielfältigen Forschungsaufgaben am Institut prädestiniert sind.

Im Frühjahr haben wir zusammen mit verschiedenen Herstellern wieder das Stuttgarter Hochspannungssymposium zum Thema *"Komponenten und Betriebsführung der Netze von morgen"* in der Filderhalle in Leinfelden durchgeführt. Namhafte Referenten und der traditionell gute Ruf dieser im zweijährigen Turnus stattfindenden Veranstaltung führten 230 Teilnehmer nach Stuttgart. An zwei Tagen wurden die neuesten Entwicklungen vorgestellt und lebhaft diskutiert. Auf Grund der zahlreichen Nachfragen werden wir das Stuttgarter Hochspannungssymposium am 11. und 12. März 2014 wieder im gleichen Rahmen durchführen.

Allen unseren Freunden möchte ich an dieser Stelle recht herzlich für Ihre Anregun¬gen und Ihre Hilfe danken. Mein besonderer Dank gilt unseren Förderern und Partnern und 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 Diplom- und Masterarbeiten anführen.

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

Stuttgart, im Dezember 2012 Prof. Stefan Tenbohlen



### PREFACE

Dear friends!

As usual, we would like to inform you about our activities with our annual report 2012.

As a result of the Fukushima nuclear disaster the German government decided in 2011 to stop the usage of nuclear energy and to strengthen the transition to renewable energies for more sustainability. The politicians and the general public realize now that this includes a lot of consequences for all of us, for example large and expensive building projects of photovoltaic and wind energy plants. We will have to make a lot of technical and above all financial efforts to realize the energy transition successfully.

In 2012 20 % of German electricity has been produced by renewable energies. This seems to be a success but considering the aim to achieve 80 % in 2050 we still have lots of work to do.

After working as a junior professor at the University of Stuttgart for only two years, Prof. Braun became a full professor at the University of Kassel. Since September he is a director of the department "Energy Management and Operation of Electric Power Grids". During his time in Stuttgart he organised many ambitious research projects in the field of smart grids.

I would like to thank him for his excellent scientific work at our institute and wish him all the best for his academic career.

To close the gap he left, in 2013 a full professorship "Integration of Renewable Energies into the Power Grid" will be advertised. The new professor should research and teach on the field of smart grids. He will investigate the effects on operation and structure of electric power grids, resulting from the transition to renewable energies.

Concerning our scientific work we look back on a very successful year. The PhDthesis of Sebastian Coenen (Measurement of Partial Discharges in Power Transformers using Electromagnetic Signals) and more than 60 publications show the large variety of our research activities. You can download most of our publications from our homepage www.uni-stuttgart.de/ieh.

In 2012 a large number of qualified IEH-graduates and a lot of industrial encouragements enabled us to employ five new researchers. Two of them will focus on power transformers: M. Sc. Farzaneh Vahidi will investigate the conductivity of insulating oil regarding to HVDC applications and Dipl.-Ing. Milos Andelkovic will determine the dielectric strength of insulation systems with mineral oil and natural ester.

Dipl.-Ing. Philipp Arnold and Dipl.-Ing. Manuel Wild investigate the insulation strength of  $SF_6$  for HVDC applications and the measurement techniques of partial discharges for cables, respectively. Dipl.-Ing. Christoph Kattmann will conduct research in the area of modelling and simulation of smart grids.



The actual 23 members of our scientific staff are organised in following research groups:

high voltage technology, power transmission and electromagnetic compatibility

This year the media focused on the energy transition. As a result we are glad to see an increasing number of students in Electrical Engineering and Renewable Energies.

The first Bachelor graduates of Renewable Energies applied successfully for our new Masters' degree program Sustainable Electric Power Supply. The main topics of this master program are the usage as well as the integration of wind and photovoltaic energy into the power grid. Besides our own students, we received further applications from all over Germany and we could select the best. We are glad to find excellent master students for the institute's various research projects.

On March 6 and 7, 2012, the traditional Stuttgart High Voltage Symposium took place in the Filderhalle in Leinfelden. This year's title was "Components and Operation of Future Power Networks". Our conference (including an exhibition) was supported by several industrial partners. Outstanding speakers and the excellent reputation of this event, taking place every two years, lead 230 participants to Stuttgart. The latest developments were presented and discussed. Due to numerous demands I will organise the next Stuttgart High Voltage Symposium on March 11 and 12, 2014.

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 our sponsors and all 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 can find abstracts of our graduate's work.

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

Our best wishes accompany you into the next year.

Stuttgart, December 2012 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        |                  |
| Institutsleiter /   |   |                  |
| Head of Instute:    | Prof. DrIng. Stefan TENBOHLEN                 | -685-67871       |
|                     | 5   |                  |
| Juniorprofessur     |   |                  |
| Smart Power Grids:  | Prof. DrIng. Martin BRAUN (bis 15.9.2012)     |                  |
| Prof. im Ruhestand: | Prof. DrIng. Dr. h. c. Kurt FESER             | -685-67870       |
|                     |   |                  |
| Lehrbeauftragte:    | DiplIng. Ulrich SCHERER                       | -128-2437        |
|                     | EnBW Transportnetze AG                        |                  |
|                     | DiplIng. Thomas RUDOLPH                       |                  |
|                     | Schneider Electric Energy GmbH                |                  |
|                     | DrIng. Markus PÖLLER                          |                  |
|                     |   |                  |
|                     |   |                  |
| Oberingenieure:     | DrIng. Wolfgang KÖHLER                        | -341 2075        |
|                     | (Leiter des Hochspannungslabors Nellingen-Zir | nsholz)          |
|                     | DrIng. Ulrich SCHÄRLI                         | -685-67878       |
|                     | 5   |                  |
| Akademische Mitarbe | iter /  |                  |
| Scientific Staff:   | M. Sc. Ahmad ABDEL-MAJEED                     | 685-69193        |
|                     | DiplIng. Milos ANDELKOVIC (ab 1.11.2012)      | 685-67838        |
|                     | DiplIng. Philipp ARNOLD (ab 23.1.2012)        | 341 2075         |
|                     | DiplIng. Michael BELTLE                       | 685-68061        |
|                     | DiplWiIng. Marc BRUNNER                       | 685-69197        |
|                     | DiplIng. Dennis BURGER                        | -341 2075        |
|                     | DiplIng. Simon BUROW                          | -341 2075        |
|                     | DiplIng. Simon EILENBERGER                    | 685-69194        |
|                     | DiplIng. Maximilian HEINDL                    | -685-67857       |
|                     | DiplIng. Jens HOHLOCH                         | -341 2075        |
|                     | DiplIng. Mark JOVALEKIC                       | -685-67858       |



|                       | DiplIng. Christoph KATTMANN (ab 19.3.2012)    | -685-67874 |
|-----------------------|---|------------|
|                       | DiplIng. Andreas MÜLLER                       | -685-67868 |
|                       | M. Sc. Mohsen NEMATI                          | -685-67869 |
|                       | DiplIng. Alexander PROBST                     | -685-69196 |
|                       | DiplIng. Martin REUTER                        | -685-67817 |
|                       | DiplIng. Nicolas SCHMIDT                      | -685-67809 |
|                       | DiplIng. Daniel SCHNEIDER                     | -685-67889 |
|                       | DiplIng. Martin SIEGEL                        | -685-67867 |
|                       | DiplIng. Anne STROTMANN                       | -341 2075  |
|                       | M. Sc. Farzaneh VAHIDI (ab 1.7.2012)          | -685-69195 |
|                       | DiplIng. Dejan VUKOVIC (bis 30.4.2012)        |            |
|                       | DiplIng. Andreas WEINLÄDER (bis 31.3.2012)    |            |
|                       | DiplIng. Manuel WILD (ab 1.3.2012)            | -341 2075  |
| Sekretariat /         |   |            |
| Secretary:            | Nicole SCHÄRLI                                | -685-67870 |
|                       | (Institutsteil Stuttgart-Vaihingen)           |            |
|                       | Renate KINSKI                                 | -341 2075  |
|                       | (Hochspannungslabor Nellingen-Zinsholz)       |            |
|                       | Hermine LWOWSKI                               | -685-67876 |
| Technische Angestellt | e /   |            |
| Technical Staff:      | Erwin BECK, Zentralwerkstattleiter            | -685-67847 |
|                       | Metin DEMIRHAN, Mechaniker                    | -685-67847 |
|                       | Robert HÄBICH, Mechaniker (bis 31.10.2012)    | -685-67847 |
|                       | Patrick HACKBARTH, Elektrotechniker (bis 31.3 | .2012)     |
|                       | Michael HERDTLE, Mechaniker                   | -341 2075  |
|                       | Herbert KAUSSEN, Elektrotechniker             | -341 2075  |
|                       | Dieter MAJEWSKI, Mechaniker                   | -685-67847 |
|                       | Hartmut RÖNISCH, Elektrotechniker             | -685-67856 |
|                       | Rudolf van de WEYER, <i>Elektromeister</i>    | -341 2075  |
|                       | Christian WÖLZLEIN, IT-Systemkaufmann (ab 1   | .9.2012)   |
|                       |   | -685-67863 |
| Gastwissenschaftler / |   |            |
| Visiting scientists:  |   |            |

M. Tech. Peyman MAZIDI (1.4.-31.12.2012) M. Sc. Alexandra CIURIUC, Bukarest (ab 30.10.2012)

# **IEH**

## 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. M. BRAUN 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 4 und 6

#### 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.

#### PROF. DR.-ING. M. BRAUN

#### 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 Wirkund Blindleistung verdeutlicht werden.



### 3.3 EXKURSIONEN

- 29. Mai 01. Juni 2012: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei
- ABB Micafil, Zürich
- BRUGG Kabel, Brugg Fertigung von Hochspannungskabeln

Durchführungen

- ABB Schweiz, Zürich
- Omicron electronics, Klaus - BAUR Messtechnik, Sulz
- Gasisolierte Schaltanlagen Prüf- und Messtechnik
- Prüf- und Messtechnik für Kabel/Isolierstoffe
- Vorarlberger Illwerke
- Besichtigung des Kopswerks I/II und des Rifawerks



Die Exkursionsteilnehmer vor einer Gasisolierten Schaltanlage

#### 05. Juni 2012, 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 Pulverdingen

# I IEH.

### 3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

#### Abgeschlossene Diplom- /Masterarbeiten vom 1.11.2011 bis 31.10.2012:

#### Arnold, Philipp

#### Unkonventionelle Strommessung mittels Rogowskispulen in Mittelspannungsschaltanlagen

Die Arbeit befasst sich mit der Strommessung mittels Rogowskispulen. Die Wechselstrommessung in Mittelspannungsschaltanlagen bei 50 Hz Netzfrequenz steht dabei im Mittelpunkt. Traditionell werden in Schaltanlagen Strommesswandler eingesetzt, die auf dem Transformatorprinzip beruhen. Im Gegensatz dazu stellen Rogowskisensoren eine unkonventionelle Alternative dar, die sowohl wirtschaftliche als auch messtechnische Vorteile aufweist. Bei der Einbindung in Schaltanlagen unterscheiden sich Rogowskispulen von konventionellen Stromwandlern erheblich. Folglich gestaltet sich eine Umstellung auf Rogowskisensoren schwierig. Die durchgeführten Untersuchungen stützen sich auf den Prototypen eines kommerziellen Spulenmodells, welches bereits in Serie hergestellt wird. Anhand dessen wurde in Simulation und Messung das Übertragungsverhalten bestimmt. Passend zur vorliegenden Rogowskispule wurde eine Integriererschaltung aufgebaut, die die erforderliche Signalkonditionierung ermöglicht. Die gesamte Kette des Messsystems wurde unter realen Bedingungen auf Tauglichkeit untersucht und mit einer bereits existierenden softwarebasierten Integriererlösung verglichen.

# Unconventional Current Measurement Using Rogowski Coils in Medium Voltage Switchgear

This diploma thesis deals with current measurement using Rogowski coils. Main topic is utilisation for 50Hz AC current measurement in medium voltage switchgear. Traditionally induction-based current transformers (CTs) are used for current measurement. Rogowski coils represent an unconventional alternative featuring both economical and technical advantages. Switchgear integration of Rogowski coils differs decisively compared to conventional CTs. This fact leads to high complexity of sensor upgrades aiming Rogowski-based current measurement. The research activities in the course of this thesis were performed using a former prototype of a recent commercial production model. Considering the properties of the model provided, an individual designed hardware-based integrator has been developed. This integrator implements the signal conditioning needed. The performance of the entire measuring system has been analysed in field conditions. A comparison with an existing software-based integrator solution was made.

#### Asl, Pooya Ardebili

# Modellierung einer bikonischen Antenne und Felduntersuchung mit CST Studio

Das Hauptthema der Arbeit ist die Untersuchung der Einflüsse der Empfangsantenne auf die elektrischen Felder beim Aufbau nach CISPR 25. In der Arbeit wird ein



Simulationsmodell der bikonischen Antenne BAL9136 und des Symmetrierübertragers (Balun) mit Hilfe von CST Microwave Studio aufgebaut und analysiert. Das Modell wird durch die gemessenen S-Parameter der Antenne verifiziert. Für die Untersuchung des E-Feldes in dieser Anordnung mit und ohne Antenne wird der Antennenfaktor nach verschiedenen Verfahren und Normen bestimmt.

#### Modelling of a Biconical Antenna and Field Examination with CST

The present study endeavors to investigate the influence of the receiving antenna on the electric fields according to CISPR 25. To this end, in the first step CST Microwave Studio is employed in order to build up and analyze a simulation model for the biconical antenna BAL9136 and the corresponding balun. The accuracy of the model is then verified by comparing the results to the ones obtained via measuring the S-parameters of the antenna. Having this model in hand, various methods and norms are utilized to determine the antenna factor, which reveals the influence of the presence of the antenna on the electric fields.

#### El Kabbani, Haled

#### Entwicklung eines netzwerkfähigen Datenloggers

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines netzwerkfähigen Datenloggers zur Erfassung, Verwaltung und Bereitstellung von Messdaten im Bereich des Monitorings von Leistungstransformatoren. Als Basis dienen ein handelsüblicher Router und eine Open Source Linux Distribution. Das System lässt sich fernadministrieren und ist über Skripte flexibel an unterschiedliche Messsysteme anpassbar. Es speichert die erfassten Daten lokal und stellt sie zusätzlich via Internet zur Verfügung. Eine kostengünstige Schnittstelle ermöglicht darüber hinaus die Erfassung digitaler Signale sowie elektrischer Einheitssignale.

#### **Development of a Network Compatible Data Logger**

Topic of the thesis is the development of a network-compatible data logger for recording, managing and delivering data for power transformer monitoring. It is based on a commercial router and an open-source Linux distribution. The system can be administered remotely and is adaptable to different measurement systems via scripts. It stores data locally and make them available via internet. In addition a designed low cost interface allows the recording of digital signals and electrical standard signals.

#### Haas, Philipp

#### Teilentladungsuntersuchungen mit konventionellen und alternativen Isolierflüssigkeiten

Diese Arbeit behandelt das Gasungsverhalten von Isolierflüssigkeiten bei Beanspruchung mit Teilentladungen und Diagnoseverfahren zur Fehlererkennung. Dazu wird im theoretischen Teil insbesondere auf die TE-Messung gemäß IEC 60270 sowie auf Grundlagen der Feldberechnung eingegangen. Anschließend werden die FEM-Simulationen der elektrischen Feldstärke im Prüfling und die durchgeführten Experimente vorgestellt. Die wichtigsten gewonnenen Erkenntnisse lauten:



- Wasserstoff ist bei allen untersuchten Isolierflüssigkeiten Schlüsselgas für Teilentladungen.
- Beanspruchungsdauer und Maximalwerte der scheinbaren Ladung eignen sich nicht als Bezugsgröße für entstehende Fehlergase, dafür aber die umgesetzte Energie.
- Für die Ester wurden mit den Interpretationsschemata nicht weniger Treffer erzielt als für Mineralöl.

# Investigation of partial discharges in conventional and alternative insulating liquids

This thesis covers the gas generation caused by partial discharges in insulating liquids and diagnostic procedures for fault detection. The theoretical part addresses especially PD measurements according to IEC 60270 and also basics of computational electromagnetics. Subsequently, FEM simulations of the electric field in the test object as well as conducted experiments are presented. The most important conclusions are:

- Hydrogen is the key gas for PD for all tested insulating liquids.
- Neither test duration nor peak values of the apparent charge are suited as base for generated fault gases, but dissipated energy is.
- Regarding PD, DGA interpretation methods delivered the same performance for ester fluids as for mineral oil.

#### Heckel, Marcel

#### Untersuchung der Leitfähigkeit von Elektroisolierölen im Hinblick auf HVDC-Anwendungen

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Hochspannungsgleichstromübertragungssystemen im elektrischen Energieversorgungsnetz und der daraus resultierenden Gleichspannungsbeanspruchung von Öl-Papier-Isolationen, ist ein fundiertes Verständnis der Ölleitfähigkeit  $\kappa$  unabdingbar. Messtechnische Untersuchungen von  $\kappa$ , die in dieser Arbeit durchgeführt werden, bilden dafür die Grundlage. Das hier verwendete Messsystem, eine Stromantwortmessung auf einen Gleichspannungssprung, wird auf seine Eigenschaften, wie Genauigkeit und Reproduzierbarkeit getestet und um eine neue Messzelle erweitert. Anhand des Mineralöls Lyra X werden durch verschiedene Variationen der Messparameter Zeit, Feldstärke, Spaltabstand und Temperatur die grundsätzlichen Eigenschaften der Ölleitfähigkeit aufgezeigt. Eine erste Überprüfung der Erkenntnisse findet mit weiteren Mineralölen statt. Basierend auf den beobachteten Abhängigkeiten wird des Weiteren der Ansatz einer empirischen Modellierung der Ölleitfähigkeit vorgestellt.

#### Investigation of oil conductivity in respect to HVDC applications

Due to the increasing amount of high-voltage direct current applications in electrical power grids and the resulting dc-voltage stress of oil-paper-isolation systems, a fundamental knowledge of the oil conductivity  $\kappa$  is imperative. Therefore investigations of  $\kappa$  by measurements, which are done in this work, are necessary. The used measuring system, a current-response measurement after a direct-voltage step, is tested for its accuracy and repeatability. Using a variation of measuring



parameters like duration, field strength, oil gap and temperature, basic characteristics of the oil conductivity are presented for the mineral oil Lyra X. A first verification of the results is obtained through the investigation of other mineral oils. Furthermore, a modeling approach of  $\kappa$  based on the observed dependencies is demonstrated.

#### Horn, Jochen

# Verbesserung des Lastmanagements im geplanten Inselnetzbetrieb durch Anfangslastabwurf

Ein wesentliches Ziel aller Bemühungen beim Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze ist, die Frequenz des Netzes auf dem Nennwert zu halten. Da die Frequenz direkt mit dem Gleichgewicht von mechanisch zur Verfügung gestellter und elektrisch absorbierter Leistung zusammenhängt, ist eine stabile Frequenz beim Leistungsgleichgewicht gewährleistet. Im Fall von extremen Frequenzstörungen ist es üblich, einen Teil der Last abzuwerfen, um dieses Leistungsgleichgewicht wiederherzustellen. Diese Arbeit nimmt die Idee auf, einen Teil der Last schon abzuwerfen, bevor die Frequenz stark vom Nennwert abweicht. Diese Idee kann zum Beispiel im Fall von kontrollierten Netztrennungen angewandt werden, wo der starke zukünftige Frequenzfall vorhersagbar ist. Eine systematische Vorgehensweise, den Ort und die Menge des besten möglichen anfänglichen Lastabwurfs zu bestimmen, ist in dieser Arbeit erörtert. Die Vorgehensweise wird anhand zweier Szenarien, die das IEEE-118-Netz verwenden, verifiziert.

# Improvement of the overall performance of load shedding schemes for controlled islanding cases using initial load shedding

One major goal of all efforts in power engineering is to maintain the system frequency at its nominal value. As the grid frequency is directly related to the balance of the power provided by the prime movers and absorbed by all loads, a stable frequency means a zero power mismatch. For extreme frequency disruptions load shedding is applied to restore the power balance. This work follows the idea of shedding a certain amount of load before the frequency has deviated significantly from its nominal value, under the assumption that the knowledge of a future necessity of load shedding is given. This assumption is given, for example, in controlled islanding scenarios. A systematic procedure to find the amount and location of initial load sheddings that approach the best possible improvement of the overall load shedding performance is introduced. The procedure is verified on two scenarios employing the IEEE 118-bus system.

#### Hurtig, Tobias

#### Dämpfung von Frequenzpendelungen mit Elektroautos

Das heute existierende Verbundnetz in Europa bringt außer den Vorteilen der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit auch Nachteile, wie die der Frequenzpendelung, mit sich. Elektrisch miteinander verbundene, weit auseinanderliegende Regionen können gegeneinander pendelnde Frequenzen aufweisen. Insbesondere bei plötzlich auftretenden Kraftwerksausfällen oder Lastzuschaltung sind die



Frequenzunterschiede in den Regionen deutlich messbar. In dieser Arbeit werden modellbasierte Regelverfahren (LQR und MPC) zur Dämpfung von Pendelungen in MATLAB entwickelt. Mithilfe möglicher regelbarer Lasten, wie Elektrofahrzeugen, und des voranschreitenden Ausbaus der datentechnischen Vernetzung der Teilnehmer, wird eine Lastregulierung simuliert und deren Auswirkung auf das Pendelverhalten eines an das UCTE-Netz angelehnten Modellnetzes simuliert und bewertet.

#### Attenuation of frequency oscillations with electric vehicles

The existing power grid in Europe with its advantages of energy supply and economy has also disadvantages, like inter area oscillations. Interconnected wide areas can show frequencies, which oscillate against each other. In case of sudden power plant outages or activation of loads, the differences in frequencies are quite measurable. In this thesis, model-based control methods (LQR and MPC) are used to attenuate inter area oscillations with MATLAB. An increasing number of electrical vehicles, variable loads and an improving communication infrastructure will enable load control mechanisms to dampen frequency oscillations, which are simulated and analyzed using a simplified model of the UCTE grid.

#### Li, Yi

#### Entwicklung eines Algorithmus zur Bewertung von Transferfunktionsmessungen bei Leistungstransformatoren

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Algorithmus zur Bewertung von Transferfunktionsmessungen mittels FRA (Frequency Response Analysis) bei Leistungstransformatoren. Teil der Arbeit sind Untersuchungen zu Klassifikationsmethoden mittels Entscheidungsbäumen unter Verwendung der in China verbreiteten Industrienorm DL/T 911-2004 zur Interpretation von Übertragungsfunktionsmessungen an Großtransformatoren.

#### **Development of Algorithms for Transfer Function Assessment**

This work deals with the development of an algorithm for assessment of transfer function measurements by means of FRA with focus on large power transformers. Part of the work are investigations about classification methods using decision trees, including the Chinese industry standard DL/T 911-2004 for interpretation of frequency response measurements.

#### Mardaneh, Shahrouz

# Machbarkeitsstudie zur Spannungsmessung in Schaltanlagen auf Basis von kapazitiven Koppelelektroden

Die Arbeit befasst sich mit der Spannungsmessung an MS-Schaltanlagen mittels unkonventionellen Spannungsteilern auf Basis von kapazitiven Koppelelektroden. Diese kapazitiven Koppelelektroden werden entweder in GIS als kapazitive Beläge bevorzugt in Durchführungen oder im Falle luftisolierter Schaltanlagen in Teilerstützern ausgeführt. Folglich wäre zur Spannungsmessung keine weitere Änderung in den Schaltanlagen nötig. Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Erfassung



des Einflusses von Streukapazität bei höheren Genauigkeitsanforderungen der Spannungsmessung und die Messung der Ströme, die über kapazitiven Steuerbelag zur Erde fließen; einmal als Kurzschlussstrom und weiterhin über einen Kondensator als Messkapazität. Mit Hilfe der Strommessung kann theoretisch jede angelegte Spannung an der Schaltanlage durch eine hergeleitete Formel berechnet werden.

# Feasibility Study on Voltage Measurement in Switchgear Using Capacitive Coupling Electrodes

Focus of this diploma thesis is on measuring the voltage by means of unconventional voltage divider based on capacitive coupling plate. These plates are either installed in GIS (gas insolated switchgear) such as capacitive plates in bushings or in air isolated switchgear in the voltage divider supporters, this means that no changes in the switchgears topology is required. The main focus is measuring the stray capacitance with high accuracy, also measuring the electric current flowing through the capacitive plate to the ground; first as short circuit current, then through a condenser as measurement capacitor. With the help of current measurements it is theoretically possible to calculate any voltage in switchgear using a derived formula.

#### Pham, Thanh-Huy

# Untersuchung von Gassensoren für ein Gas-in-Öl Monitoringsystem für Leistungstransformatoren

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von Gassensoren für ein DGA-Monitoringsystem für Leistungstransformatoren. Es wird untersucht, welche Art der Sensoren zur Messung der Gaskonzentration im Transformator am besten geeignet ist. Ein Versuchsstand wurde aufgebaut, um die Eigenschaften der Gassensoren zu untersuchen. Treibermodule für die Sensoren und eine Hauptplatine wurden als Testumgebung entwickelt. In den Versuchen wurden die Sensoren verschiedenen Prüfgasen wie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan in unterschiedlichen Konzentrationen ausgesetzt. Die Ausgangspannung der Gassensoren wurde ausgelesen und mit einem Matlab-Skript ausgewertet. Mithilfe der Messergebnisse können die Sensoren für das DGA-Monitoringsystem ausgewählt werden.

# Investigation of gas sensors for a DGA monitoring system for power transformers

This thesis presents an investigation of gas sensors for Dissolved Gas Analysis (DGA) of power transformers. Scope of this contribution is to find sensors suited to monitor concentrations of different gases in a transformer. An experimental setup was developed and assembled to determine the gas sensors concerning their properties like sensitivity and selectivity. Therefore, driver modules and a main board were developed as test environment. The sensors were exposed to different gases such as hydrogen, carbon monoxide and methane at different concentrations. The sensors' outputs were collected and interpreted using Matlab. The results were used to select the most applicable gas sensors for a DGA monitoring system.



#### Schmid, Steffen

#### Entwicklung einer webbasierten Transformatordiagnose für das Assetmanagement

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer webbasierten Diagnoseplattform für Transformatoren. Realisiert wurde dies mit Hilfe des Webframeworks Django, das die Programmiersprache Python zur Entwicklung verwendet. Benutzer können Gaskonzentrationen und Ölkennzahlen über ein Formular eingeben und damit unter Anderem Gas-in-Öl Analysen durchführen. Die Ergebnisse dieser Analysen können in einer Datenbank gespeichert werden. Es werden verschiedene DGA Interpretationsverfahren gleichzeitig angewendet und Trendverläufe dargestellt. Für die Administratoren stehen zusätzlich eine Verwaltungsoberfläche und eine Nutzerstatistikseite zur Verfügung.

#### Development of a diagnostic website for transformer asset management

The aim of this thesis was to develop a web-based diagnostic platform for transformers. This was made using the web framework Django, which uses the Python programming language for development. Users can enter gas concentrations and oil indicators into a form and perform gas-in-oil analyses. The results of these analyses can be stored in a database. Several DGA interpretation methods are applied simultaneously and a trend information can be drawn. For administrators, there is an admin interface and a user statistic available.

#### Vahidi, Farzaneh

## Sensitivitätsanalyse an verteilten Simulationsmodellen zur Nachbildung mechanischer Deformationen an Transformatorwicklungen

Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung mechanischer Deformationen an Transformatorwicklungen, welche zu Veränderungen der parasitären Kapazitäten zwischen Wicklungen einerseits und zwischen Wicklungen und Kessel andererseits führen. Dieser Beitrag versucht, unter Verwendung der Softwarepakete CST Studio und MATLAB, das elektrische Frequenzverhalten von Wicklungsstrukturen auf der Basis von Designdaten vorauszusagen. Dabei werden Empfindlichkeitsuntersuchungen bezüglich Veränderungen der messbaren Transferfunktion im Zusammenhang mit unterschiedlichen Deformationsarten durchgeführt.

# Sensitivity Analysis of Transformer Windings Mechanical Deformation Using Distributed Simulation Models

The aim of this investigation is to aid in the modeling of mechanical deformation possibilities of transformers windings which lead to variation of winding to winding and winding to ground capacitances and inductances in transformer windings. The focus of this study is on disc shaped windings and layer windings in three phase and single phase transformers. The contribution seeks to determine whether the frequency response analysis can be performed from design data by means of simulation methods using CST Studio and MATLAB. Sensitivity analysis with respect to transfer function changes for various simulated deformation types is carried out.

# ÎEH.

#### Wang, Haonan

Entwicklung der Zustandsschätzungs-Algorithmen für Niederspannungsnetze Genaue und zuverlässige Zustandsschätzungen sind der Grundstein für den flexiblen Betrieb eines Netzes, wenn man das passive herkömmliche Netz in ein aktives und intelligentes Netz transformiert. Durch die Integration von Photovoltaik-Anlagen in das Niederspannungsnetz ist der Netzbetrieb heute viel komplexer geworden. Die Anforderungen, die nach Norm AR4105 "Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz" an die Netzstabilität und die Spannungsqualität gestellt werden, sind der Grund für ein Online-Monitoring der Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen. Eine direkte Übertragung der traditionellen Zustandsschätzung auf das Niederspannungsnetz ist durch die fehlenden Messungen sowie die Besonderheit im Verteilnetz nicht möglich. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Zustandsschätzung, die für Niederspannungsnetze geeignet ist. Weiter wird die Durchführbarkeit der entwickelten Zustandsschätzung unter Verwendung der Messdaten von Smart Metern für ein reales Netz untersucht.

#### Development of state estimation algorithm for low voltage networks

Accurate and reliable state estimation is the basis for a flexible operation and control in the current transformation from passive networks to active smart grids. Through the growing numbers of PV-units in the low voltage networks the network operation is becoming much more complex. Therefore, Online-Monitoring for the low voltage network through state estimation is necessary to retain the required power quality specifications as given in Standards AR4105 "Generators connected to the lowvoltage distribution network" for voltage and frequency stability conditions. A direct transfer of the traditional state estimation methodology to the low voltage network is impossible due to the different network characteristics and due to the lack of measurements in the low voltage networks. The main target of this master thesis is to develop a state estimator for the low voltage networks and to obtain the feasibility of using Smart meters' measurement data for state estimation purposes.

#### Wild, Manuel

#### Untersuchung des Kopplungswiderstands im Frequenz- und Zeitbereich

Der aktuelle Trend der Automobilindustrie zeigt eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Kraftfahrzeugen. Aufgrund der dort umgesetzten elektrischen Energie sind die Störemissionen um ein Vielfaches größer als beim bisherigen Bordnetz. Um die von den Leitungen ausgehenden Störungen auf ein Minimum zu reduzieren, werden dort geschirmte Leitungen eingesetzt. In dieser Arbeit wird eine Möglichkeit zur Beurteilung der Schirmqualität mithilfe des Kopplungswiderstands untersucht. Dabei wird der Messaufbau verschiedener Verfahren betrachtet und auf das Verhalten im Messergebnis hin analysiert. Des Weiteren wird eine Berechnungsmethode vorgestellt, mit der es möglich ist, die Schirmqualität ohne eine Messung zu bestimmen. Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden exemplarisch einige Messungen im Frequenz- und Zeitbereich durchgeführt.



#### Investigation of the Transfer Impedance in frequency and time domain

The present trend in the automotive industry shows an increasing electrification of the drive train in motor vehicles. Because of the electrical energy conversion in this part, the disturbance emissions are much higher than in present vehicle wiring systems. In order to reduce the emissions by the cables to a minimum it is necessary to use shielded lines. In this thesis a possible procedure to estimate the screen efficiency based on several measuring methods is analyzed. Further a calculation method for determining the screen efficiency will be presented. Exemplary measurements in the frequency and time domain were performed to allow verification of results.

#### Zhong, Shuang

#### Untersuchung der Löslichkeit von Gasmischungen

Ziel der Arbeit ist es, die maximalen Gaslöslichkeiten von verschiedenen Transformatorölen durch Versuche zu bestimmen. Es wurden die maximalen Löslichkeiten einzelner Gase (Wasserstoff, Acetylen und Stickstoff) und der Luft von fünf verschiedenen Transformatorölen (FR3, Lyra X, Diala Dx, Midel 7131 und 10GBN) mit der Headspace-Gaschromatographie-Technik untersucht. Außerdem wurde die Gaslöslichkeit von Luft für drei künstlich gealterte Öle und zwei betriebsgealterte Öle untersucht. Dazu wurden die jeweiligen K-Faktoren bestimmt, da sie benötigt werden, um die ursprüngliche Konzentration gelöster Gase im Öl zu berechnen. Des Weiteren wurden Rechenverfahren überprüft, um die Gaslöslichkeit in Transformatorölen berechnen zu können.

#### Solubility study of gas mixtures in transformer oils

The aim of this work is to determine the maximum gas solubilities of various transformer oils. The maximum solubility of individual gases (hydrogen, acetylene and nitrogen) and ambient air of five different transformer oils (FR3, Lyra X, Diala Dx, Midel 7131 and 10GBN) were tested with the headspace gas chromatography technique. In addition, the gas solubility of ambient air for three artificially aged oils and two operational aged oils was tested. The corresponding K-factors were determined as they are required to calculate the initial concentration of dissolved gases in oil. Furthermore, calculation methods have been reviewed in order to calculate the gas solubility of transformer oils.

#### Zhou, Ji

#### Untersuchung des Alterungsverhaltens biologischer Transformatoröle

In der Arbeit werden das Alterungsverhalten von FR3 und die Ölkennzahlendiagnostik beschrieben. Ein hoher Flammpunkt, sowie die gute Umweltverträglichkeit sind zwei wichtige Vorteile gegenüber konventionellem Mineralöl. Mit dem durchgeführten Versuch bei 130°C wird gezeigt, dass der Katalysator (Cu) selbst bei langen Alterungsdauern keine wichtige Rolle spielt, da es hier keinen Luftkontakt gibt. Mit den Versuchen bei 150°C und 170°C wird dargestellt, dass FR3 und Mineralöl wie erwartet schneller altern als bei 130°C. Dies kann bezogen auf die Säurezahl mathe-



matisch beschrieben werden. Der Wassergehalt hat einen großen Einfluss auf die Alterungsgeschwindigkeit. Es ist möglich ebenfalls auf der Neutralisationszahl basierend Lebensdauerkurven von reinem FR3 zu konstruieren.

#### Study of the ageing behaviour of biological transformer oils

In the present study the aging behaviour of FR3 and its oil diagnosis is described. A high flash point and good environmental compatibility are two important advantages over conventional mineral oil as insulating material. From the experiment conducted at 130 ° C is shown that the catalyst (Cu) plays no significant role, since there is no air contact. From the tests at 150 °C and 170 °C it is shown that mineral oil and FR3 are aged faster than 130 °C. The initial water content of the oil has great influence on the aging process. It is possible to estimate service life of FR3 on the basis of neutralisation number.

| NAME                  | ТНЕМА   |
|-----------------------|---|
| Beck, Felix           | Impulsgenerator zur Nachbildung von Transienten im Kfz-         |
|                       | Transient Impulse Consister for Automative HV Networks          |
| Deale King            | Fatuial dura una Circulation con anorica una Otacta cian aus    |
| Beck, Kira            | Vermeidung von Lastspitzen.                                     |
|                       | Development of simulation scenarios and strategies to avoid     |
| Pooklar Simon         | Medellentwicklung und Simulation eines regelberen               |
| Beckler, Simon        | Ortenetztreneformetere in einem reelen                          |
|                       |   |
|                       | Nedel developement and simulation of a controllable             |
|                       | Nodel development and simulation of a controllable              |
|                       | distribution transformer in a real low voltage grid.            |
| Bergmiller, Christian | Entwicklung eines digitalen Steuerungssystems für einen         |
|                       | mobilen Stoßgenerator.  |
|                       | Development of a digital control for a mobile surge generator.  |
| Böttcher, Martin      | Entwicklung einer Pre-Compliance-Prüfmethode zur                |
|                       | Abschätzung der Störemissionen von KFZ-Komponenten auf          |
|                       | Grundlage von Multi-Segment-Transferfunktionen.                 |
|                       | Development of a Pre-Compliance test method for estimation      |
|                       | of radiated emissions by automotive components based on         |
|                       | multi-segment transfer functions                                |
| Cassinikos, Philipp   | Untersuchung der Gaslöslichkeit und Lösungsprozesse in          |
|                       | Transformatorisolierölen.                                       |
|                       | Investigation of gas solubility and solution processes in       |
|                       | transformer oils.   |
| Eipperle, Tobias      | Implementierung digitaler Filter für die akustische TE-Ortung.  |
|                       | Implementation of Digital Filters for Acoustic PD-Localization. |

# Abgeschlossene Studien-/Bachelorarbeiten sowie Forschungsarbeiten (\*) vom 1.11.2011 bis 31.10.2012:



| NAME              | ТНЕМА   |
|-------------------|---|
| Eisenmann, Lukas  | Untersuchung von Transferfunktionen in Abhängigkeit von       |
|                   | Impedanzen des Prüfaufbaus zur Vorhersage der                 |
|                   | Abstrahlung von Kabelbäumen.                                  |
|                   | Analysis of transfer functions for the prediction of cable    |
|                   | harness radiation according to impedances of the test set up. |
| Fischer, Patrick  | Digitale Signalverarbeitung zur Teilentladungsortung durch    |
|                   | ein akustisches Sensorarray.                                  |
|                   | Digital Signal Processing for Partial Discharge Localization  |
|                   | by an Acoustic Sensor Array.                                  |
| Groß, Daniel      | Platzierung von Messstationen im Verteilnetz.                 |
|                   | Measurement placement in distribution networks.               |
| Han, Shan         | Gas-in-Ol-Analyse von Messwandlern.                           |
| II. d. Tables     | Dissolved gas analysis of instrument transformers.            |
| Hurtig, Toblas    | Tellentladungsvernalten über Zeit- und Spannungsverlauf.      |
|                   | Long-term measurement of partial discharges.                  |
| Jing, vvei        | Auswertung von UHF-Tellentladungsmessungen.                   |
| Kähler Mertie     | Analysis of UHF partial discharge measurements.               |
| Konier, Martin    | PRPD-Pattern Analyse mittels normienter Kreuzkorrelation.     |
| Krämer Nielee     | PRPD analysis using normalized cross-correlation.             |
| Kramer, Nicias    | Netzregelung und probabilistische Netzsimulation mit          |
|                   | Grid control and probabilistic load flow calculation with     |
|                   | Matnower  |
| Krein Gabriel     | Frkennung von Messfehlern für die Zustandsschätzung von       |
|                   | Niedersnannungsnetzen   |
|                   | Rad data detection for state estimation in low voltage        |
|                   | networks  |
| Kurka. Christiane | Historische Netzentwicklung einer Modellregion.               |
| ,                 | Historical development of a case study grid.                  |
| Liu, Jie          | Physikalische Modellierung einer Kfz-Hochvoltbatterie.        |
|                   | Physical Modeling of an Automotive High Voltage Battery.      |
| Ma, Jun           | Realisierung eines Messdatenservers mit anschließender        |
|                   | Softwareentwicklung zur Darstellung und Analyse von           |
|                   | Messdaten.  |
|                   | Realization of a measurement server with following            |
|                   | softwaredevelopement for measurement analyzes.                |
| Müller, Steffen   | Untersuchungen zum Einsatz eines Batteriespei-                |
|                   | chersystems in einem realen Niederspannungsnetz.              |
|                   | Investigations on the application of a battery energy storage |
|                   | system in a real low voltage grid.                            |
| Petrusch, Anja    | Dynamische Modelle einer PV-Anlage und eines Batterie-        |
|                   | speichers für Mikronetze.                                     |
|                   | Dynamic models of a PV plant and a battery storage for        |
|                   | microgrias.   |

| NAME                   | ТНЕМА   |
|------------------------|---|
| Rodriguez Osuna,       | Untersuchung einer induktiven Anordnung mit                   |
| Juan Jose              | Spannungsableitern in gasisolierten Schaltanlagen zur         |
|                        | Dämpfung schneller transienter Überspannungen.                |
|                        | Investigation of a an inductive setup with surge arrestor in  |
|                        | GIS to damp VFTO.   |
| Schühle, Michael       | Entwicklung eines Vibrationsmesssystems mittels Beschleu-     |
|                        | nigungssensoren.  |
|                        | Development of a Vibration Measurement System using           |
|                        | Accelerometers.   |
| Seregely, Alexandra    | Berücksichtigung neuer Technologien in der Netzplanung.       |
|                        | Consideration of new technologies for grid planning.          |
| Stamenkovic, Vladimir  | Dielektrische Antwortmessung alternativer Isolierstoffe.      |
|                        | Dielectric response measurements of alternative insulating    |
|                        | materials.  |
| Suttner, Christian (*) | Untersuchung von Vor- und Rückzündungsphänomenen an           |
|                        | vakuumisolierten Leistungsschaltern.                          |
|                        | Investigation of Pre- and Restrike Phenomena at Vacuum        |
|                        | Insulated Circuit Breakers.                                   |
| Tanase, Vasile Eduard  | Charakterisierung und Simulation von                          |
|                        | Niederspannungsnetzen.  |
|                        | Characterisation and simulation of low voltage grids.         |
| Vilaltella, Robert     | Einfluss d es Schirmübergangswiderstandes in Kfz              |
|                        | Hochvoltsystemen auf EMV-Störgrößen.                          |
|                        | Influence of Shielding Resistance on RF Interferences in      |
|                        | Automotive High Voltage Networks.                             |
| Wang, Haonan (*)       | Teilentladungsuntersuchungen mit Transformatoröl.             |
|                        | Partial discharge investigations with transformer oil.        |
| Wang, Wei              | Untersuchung von Konzepten für hochgenaue Kapazitäts-         |
|                        | messungen.  |
|                        | Concepts for measuring very small capacitances.               |
| Wiltschko, Martin      | Entwicklung eines Automatisierungstools zur Optimierung       |
|                        | der Speicherleistung in Mikronetzen.                          |
|                        | Development of an automation tool for optimization of battery |
|                        | dimension in microgrids.                                      |
| Yang, Qiuju            | Untersuchung zur UHF-Teilentladungsmessung in                 |
|                        | gasisolierten Mittelspannungsschaltanlagen.                   |
|                        | Investigation of UHF partial discharge measurement in gas-    |
|                        | insulated medium voltage switchgear.                          |



### 4. **PROMOTIONEN**

### Measurement of Partial Discharges in Power Transformers using Electromagnetic Signals

#### Dipl.-Ing. Sebastian Coenen

| Prof. DrIng. S. Tenbohlen |
|---------------------------|
| Prof. DrIng. J. Smit      |
| TU Delft                  |
| 24.04.2012                |
|                           |

The most important task for isolation systems used in high voltage technology is the control of high electrical field strengths. For the examination and diagnosis of the isolation quality within power transformers the measurement of partial discharges (PD) is utilized. PD result from localised excessive electrical field strengths or from local reduction of the electrical strength of an isolation system. The occurrence of PD during acceptance tests refers to design or constructional faults. PD occurrence during diagnostic measurements indicates weakening by age or damage due to overstresses of the isolation system whilst power transformers are in service.

With the application of conventional PD measurement according to IEC60270, the information gained from the measurements can be very limited or even useless because of possible high interference levels on-site. Hence there is a need to investigate and develop new measurement techniques. The current thesis deals with the fundamentals of the unconventional "UHF method", measuring electromagnetic (EM) signals emitted by PD in the ultrahigh frequency range (UHF: 300 - 3000 MHz).

Suitable UHF probes are necessary for any UHF PD measurements on transformers, but up to now there is no standard available for the probes or the UHF method. The current thesis describes in detail the electrical and mechanical characteristics of the UHF probe developed, and thereby improves the comparability with measurement results of other probes. The presented methods for the characterisation of the probes, by the determination of the antenna factor for measurement conditions under oil, can be transferred to arbitrary UHF probes.

This work reviews fundamental knowledge of the EM waves arising inside power transformers to determine the achievable results from UHF PD measurements. The EM waves result from fast current flow through structures in the direct environment of PD sources. On their way to the UHF probes, waves have to pass a set of obstacles in the form of active parts of a transformer. These influences, and the rather small signal attenuation, are presented on the basis of exemplary measurements on transformers and experimental setups in HV laboratory.



The Performance Check developed allows verification of the functionality of the UHF PD measurement system. Such functional inspection is required, since calibration of that method is not possible.

Results from laboratory and on-site measurements show that a general ratio cannot be determined between the measured UHF quantities and the measured quantities of conventional measurements according to IEC60270. Thus the development of a method to confirm the achievable UHF sensitivity, a so-called Sensitivity Check, is not possible. However during several on-site measurements, UHF measurements proved to be generally responsive and could be used as stand-alone measurements or to support the IEC60270 measurement method by the so-called Gating procedure. The analysis and evaluation of UHF PD measurements take place in the same way as the conventional method, e.g. by phase resolved measurements of the occurring signals. However an experimental setup shows that not all PD sources emit corresponding UHF signals to all occurring signals that are measurable by the conventional means. Hence such analyses of the PD source might be hindered by exclusive UHF measurement.

The most important criterion for the evaluation of a new measurement method is their applicability under real test conditions for transformer measurements in the field. Several case studies document and confirm the characteristics of the UHF measurement method. It is possible to identify disturbances such as strong UHF transmitters, e.g. walkie-talkies, and to eliminate the disturbances by adequate signal filtering. A crucial advantage of UHF measurement is their resilience against external corona discharge signals, which usually represent the largest disturbance potential for conventional measurements. A further case study shows the possibility of trend analyses by monitoring UHF signals.

Finally the thesis identifies future applications and combinations of options for the UHF measurement method at on-site measurements. It is a suitable, fast and economic application to support acoustic measurement methods locating PD sources. Furthermore, run time differences measured with UHF signals can be used to approximately locate PD defects. A method is presented by only using two UHF probes. In addition, a new acoustic localisation approach using a unified linear sensor array is illustrated. The potential and limits of PD measurement techniques used during this work leads to the conclusion, that a combination of all procedures promises best chance for successful PD measurements.



### Elektromagnetische Teilentladungsmessung in Leistungstransformatoren

#### Dipl.-Ing. Sebastian Coenen

Die wichtigste Aufgabe der in der Hochspannungstechnik eingesetzten Isolationssysteme ist die Beherrschung hoher elektrischer Feldstärken. Zur Überprüfung und Diagnose der Isolationsqualität bei Transformatoren wird die Messung von Teilentladungen (TE) durchgeführt. TE entstehen durch Feldstärkeüberhöhungen oder durch lokale Minderung der elektrischen Festigkeit eines Isolationssystems. Das Auftreten von TE bei Abnahmeprüfungen weist auf Design- oder Fertigungsfehler hin und zeigt bei Messungen im Betrieb altersbedingte Schwächung oder Schädigung des Isolationssystems an.

Bei Anwendung der konventionellen Teilentladungsmessung nach IEC60270 kann das Messergebnis durch den hohen Störpegel vor Ort nur beschränkt aussagekräftig oder unter Umständen unbrauchbar sein. Dadurch ergibt sich der Bedarf, neue Messmethoden zu erforschen und zu entwickeln. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich grundlegend mit der unkonventionellen "UHF-Methode", die von Teilentladungen ausgesendete elektromagnetische Signale im ultrahohen Frequenzbereich (UHF: 300 - 3000 MHz) erfasst.

Geeignete UHF-Sensoren stellen die Voraussetzung für TE-Messungen an Transformatoren dar, entziehen sich bisher aber jeglichen Normen und Standards. Die vorliegende Arbeit beschreibt detailliert die elektrischen und mechanischen Eigenschaften eines entwickelten UHF-Sensors und ermöglicht dadurch die Vergleichbarkeit mit anderen Sensoren. Die vorgestellten Methoden zur Charakterisierung der Sensoren, durch die Bestimmung des Antennenfaktors für Messbedingungen unter Öl, lassen sich auf beliebige UHF-Sensoren übertragen.

Um die erzielbaren Messergebnisse bewerten zu können, vermittelt diese Arbeit grundlegende Kenntnisse über die auftretenden elektromagnetischen Wellen im Transformator. Sie entstehen durch schnellen Ladungsdurchfluss von Strukturen in direkter Umgebung von Teilentladungsquellen. Auf ihrem Weg zu den UHF-Sensoren passieren die Wellen eine Reihe von Hindernissen in Form der aktiven Teile eines Transformators. Die zu erwartenden Beeinflussungen und geringen Signaldämpfungen werden anhand von Beispielmessungen an Transformatoren und Versuchsaufbauten im Hochspannungslabor dargestellt.

Der Performance Check als entwickelte Methode zur Funktionsüberprüfung erlaubt Rückschlüsse auf die Aussagekraft der nachfolgenden Messungen. Die UHF-Messmethode erfordert eine Möglichkeit der Funktionsüberprüfung, da eine Kalibrierung nicht möglich ist. Messergebnisse im Labor und vor Ort zeigen, dass keine allgemeingültige Beziehung zwischen den Messgrößen der UHF-Messung und den



Messgrößen der konventionellen Messung nach IEC60270 herstellbar ist. Somit ist die Entwicklung einer belastbaren Methode zum Empfindlichkeitsnachweis der UHF-Methode, eines sogenannten Sensitivity Checks, nicht möglich. Vor-Ort-Messungen zeigen allerdings die generelle Empfindlichkeit der UHF-Methode, die als eigenständige Messung verwendbar ist oder beim sogenannten Gating auch zur Unterstützung der IEC60270-Messmethode verwendbar ist. Die Bewertung einer UHF-TE-Messung erfolgt z.B. durch phasenaufgelöste Messungen der auftretenden Signale. Allerdings zeigt ein Versuchsaufbau, dass nicht alle TE-Quellen zu allen konventionell messbaren Signalen entsprechende UHF-Signale aussenden und die Analyse solcher TE-Quellen durch alleinige UHF-Messungen beeinträchtigt sein kann.

Wichtigstes Kriterium für die Bewertung einer neuen Messmethode ist ihre Anwendbarkeit unter realen Prüfbedingungen bei Vor-Ort-Messungen. Mehrere Fallbeispiele dokumentieren und bestätigen die zuvor analysierten Eigenschaften der UHF-Messmethode. Es ist möglich, Störungen dieser Methode durch starke UHF-Sender wie z.B. Sprechfunkgeräte zu identifizieren und Störfolgen zu eliminieren. Ein entscheidender Vorteil der UHF-Messmethode ist ihre Störfestigkeit gegen Signale externer Korona Entladungen, die in der Regel das größte Störpotential für konventionelle Messungen darstellt. Ein weiteres Fallbeispiel zeigt die Möglichkeit des Monitorings und einer Trenderfassung mit Hilfe von UHF-Signalen.

Zum Schluss der Arbeit werden weiterführende Anwendungs- und Kombinationsmöglichkeiten der UHF-Messmethode vorgestellt. Sie ist durch schnelle und kostengünstige Anwendung geeignet, um akustische Messverfahren zur Lokalisierung von Teilentladungsquellen zu unterstützen. Weiterhin können gemessene Laufzeitunterschiede bei UHF-Signalen zur örtlichen Eingrenzung von Fehlstellen verwendet werden. Vorgestellt wird eine Methode zur Ortung von Teilentladungen mit lediglich zwei UHF-Sensoren. Weiterhin wird eine neue akustische Ortungsmethode mit Hilfe eines Sensorarrays präsentiert. Eine Aufstellung während dieser Arbeit gesammelten Vor- und Nachteile aller verwendeten TE-Messprinzipien schließt mit dem Fazit, dass eine Kombination aller Verfahren die größte Aussicht auf eine erfolgreiche TE-Messung verspricht.

# Verfahren zur automatisierten Teilentladungsdiagnostik von Energiekabeln

**Dipl.-Ing. Christoph Herold** 

Hauptberichter:Prof. Dr.-Ing. T. LeibfriedMitberichter:Prof. Dr.-Ing. S. TenbohlenTag der mündlichen Prüfung:08.05.2012am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



### 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 SF6-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

### Isolationsverhalten von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bei Gleichspannung

#### Dipl.-Ing. Philipp Arnold

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) haben sich bei der Energieübertragung mit hohen Wechselspannungen in den letzten Jahrzehnten vielfach bewährt. Insbesondere führten der zuverlässige Betrieb und die erprobten Diagnoseverfahren zu einer hohen Akzeptanz bei den Anlagenbetreibern.

Jüngste Veränderungen in den Übertragungsnetzen (Übertragungen über größere Strecken, entfernte erneuerbare Einspeiser hoher Leistung) stellen neue Anforderungen an die Übertragungstechnik. Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) kann gegenüber der konventionellen Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ) wirtschaftlich günstiger sein. Ausgehend von den bestehenden GIS für Wechselspannung müssen für den Betrieb mit Gleichspannung sowohl Dimensionierung als auch Diagnoseverfahren angepasst werden.

Lokale Störstellen können Durchschläge im Inneren einer GIS verursachen. Zu diesen Störstellen zählen: Spitzen auf Kapselung und Innenleiter (feste Partikel), freibewegliche Partikel im Gasraum, Elektroden auf undefiniertem elektrischem Potential, Partikel auf Isolatoroberflächen, Sprünge und Einschlüsse in Isolierteilen.

Das Gefahrenpotential von Störstellen kann stark variieren. Freibeweglichen, leitfähigen Partikeln wird unter Gleichspannungsbeanspruchung die größte Gefahr zugeschrieben. Für die Risikobewertung ist eine sichere Störstellenidentifikation wichtig.

Die Messung von Teilentladungen (TE) stellt für die Entwicklung und den Betrieb von GIS ein zerstörungsfreies Verfahren zur Bestimmung des Isolationszustands dar. Bei Wechselspannung werden Störstellen typischerweise mittels phasenaufgelöster Teilentladungsmuster (PRPD) unterschieden. Mangels Phaseninformation müssen TE-Muster unter Gleichspannung auf anderem Wege erzeugt werden. Es gibt verschiedene Ansätze, TE-Muster durch statistische Verfahren zu gewinnen.

Die experimentellen Untersuchungen werden an einer kommerziellen, einpoligen GIS durchgeführt. Anhand der dabei gewonnenen Erkenntnisse und abgeleiteter konstruktiver Veränderungen sollen die Isolationseigenschaften von GIS mit Blick auf Gleichspannung verbessert werden. Weiter wird für den späteren Dauerbetrieb eine zuverlässige Störstellenidentifikation für das TE-Monitoring angestrebt.



### Insulation properties of Gas Insulated Switchgear (GIS) at DC voltage stress

#### Dipl.-Ing. Philipp Arnold

Gas Insulated Switchgear (GIS) are in service since several decades, showing reliable operation in power transmission at high AC voltages. In particular, high uptimes, little fault incidents and meaningful insulation diagnosis methods lead to a high acceptance of the technology.

Recent changes in the structure of transmission grids (long distance transmissions, remote high-power renewable feeders) define new requirements concerning power transmission. HVDC transmission may provide economic benefits towards traditional HVAC transmission under certain circumstances. Regarding GIS, both design and diagnostic methods have to be adopted for HVDC transmission.

Local defects inside a GIS can lead to an electrical breakdown. These defects could be as follows: Spikes on conductors (fixed particles), loose moving particles, electrodes of undefined electrical potential, particles attached to solid insulators, loosen electrodes of solid insulators, cracks and voids within solid insulating parts.

The risk of each kind of defect might vary on a wide scale from tolerable to intolerable. Generally speaking, loose moving conductive particles are considered to pose the highest risk compared to the other defects in HVDC case. For risk analysis, the identification of the shape of defect plays therefore an important role.

Partial discharge (PD) measurements represent a non-destructive way to examine the condition of a gaseous insulation system, both in development and in field operation. In AC case, defects are typically distinguished by a characteristic phaseresolved partial discharge (PRPD) pattern. In DC case, lacking of phase information, patterns must be generated differently. There are various approaches to generate patterns using statistical analysis.

The experimental investigations are performed on a commercial single pole AC GIS duct. The technical expertise from the investigations has two aspects: Gaining detailed information in the laboratory to improve HVDC GIS insulation properties and to ensure that PD monitoring results can be used for meaningful description of condition in field installations under continuous operation.



### Patternerkennung mittels Kreuzkorrelation

#### Dipl.-Ing. Michael Beltle

In der elektrischen Energietechnik ist die Versorgungssicherheit von zentraler Bedeutung. Der sich anbahnende Paradigmenwechsel, weg von einer zentralen Versorgung durch große Kraftwerke hin zur vermehrten dezentralen und fluktuierenden Einspeisung durch regenerative Energien, führt zu steigenden Belastungen der Betriebsmittel. Leistungstransformatoren stehen im Fokus dieser Betrachtung, da sie die Schnittpunkte der Netze darstellen.

Um lokale Schäden in Leistungstransformatoren frühzeitig erkennen zu können und somit die Gefahr eines Ausfalls zu minimieren, kann das Monitoring konventionelle Diagnosemethoden unterstützen. Für das Monitoring von Teilentladungen (TE) eignet sich die Ultra High Frequency (UHF) Messung, da sie gegenüber der konventionellen elektrischen Messung auch während des regulären Betriebs ohne besonderen Mehraufwand eingesetzt werden kann. Bei diesem Verfahren werden die elektromagnetischen Emissionen der TE durch eine Antenne im Kesselinneren gemessen. Wie bei der elektrischen Messung ist eine Korrelation mit der Phasenlage möglich. Beispiele der resultierenden so genannten Phased Resolved Partial Discharge Patterns (PRPD-Pattern) sind in Fig. 1 dargestellt. Hierbei können typische Muster charakteristischen Fehlertypen und -quellen zugeordnet werden. Durch kontinuierliches Monitoring lassen sich sowohl die gesamte TE-Aktivität und deren Abhängigkeit von der Zeit sowie die Entwicklung einzelner Fehlerquellen, also ein Trend, nachvollziehen.



Fig. 1: Drei Beispiele häufig auftretender Teilentladungsmuster (PRPDs), Daten eines UHF Monitoring Systems an einem Maschinentransformator. Three typical PRPD Patterns measured at a step-up transformer using a UHF-PD Monitoring System.


# Cross-correlation based pattern recognition

#### Dipl.-Ing. Michael Beltle

Service reliability in electrical power networks is of crucial importance. Failures can cause considerable damage to the economy. Considering the upcoming changes e.g. in the German power grid with increasing renewable energy sources demands on grid resources, especially power transformers change. Distributed generation combined with power fluctuations of renewable sources cause higher stress levels for power transformers.

To prevent destroying events, power transformers are tested, e.g. partial discharge (PD) measurements are performed during routine tests of new transformers. Today, also PD measurements during service are an often used diagnostic method for particular transformers. Because testing only provides snapshot information about transformer's condition, permanent online monitoring is more frequently used to gain operational experiences. Therefore, the so called "UHF PD measuring method" (UHF: Ultra High Frequency) is used. It is based on the fact that PD are fast electrical processes radiating electromagnetic waves with frequencies up to the ultrahigh range (300 – 3000 MHz) in the surrounding oil. Due to the moderately attenuated propagation of UHF waves inside the transformer tank, the electromagnetic wave detection is very sensitive. Like at the electrical measurement, phase correlation is possible. Fig. 1 shows 3 examples of different patterns recorded at one generator step-up unit during service. Patterns can be assigned to typical PD sources.



Fig. 2: Linke Achse, grauer Plot: Korrelationsgrad minutenweise. Rechte Achse, gepunkteter Plot: gesamte Teilentladungen minutenweise. Left axis, grey plot: correlation coefficients per minute. Right axis, black dotted plot: number of PD per minute, both over time.



Da während des Monitorings große Mengen an Messdaten anfallen, entsteht der dringliche Bedarf einer (teil-) automatischen Auswertung. Bei dem hier vorgestellten Ansatz sollen typische Muster aus dem Datensatz des Aufzeichnungszeitraumes erkannt werden.

Über die zeitliche Korrelation wird erkennbar, wann welche Quellen aktiv waren und gleichzeitig, ob sich Quellen in ihrem Zeitverhalten ändern. Verwendet wird ein Ansatz aus der Bilderkennung, die 2-dimensionale Kreuzkorrelation. Dabei wird eine Vorlage (engl. Template), welche das gesuchte Pattern möglichst genau charakterisiert, mit dem PRPD-Pattern verglichen. Mathematisch wird dabei für jede mögliche Überdeckung der Vorlagenmatrix mit der PRPD-Matrix das Skalar Produkt errechnet und in diesem Fall zusätzlich normiert. Die Ergebnismatrix enthält für jede Überdeckung den Korrelationsgrad, der ein Maß für die Ähnlichkeit beider Matrizen ist. Der höchste Korrelationsgrad der Ergebnismatrix wird als Triggersignal verwendet. Übersteigt er einen Schwellwert, so gilt die Quelle als erkannt.

Fig. 2 zeigt einen Zeitraum von 6,5 h, in dem für jede Minute ein PRPD erstellt und mit einem Template, das Pattern 1 aus Fig. 1 charakterisiert, verglichen wurde. Dazu ist die Anzahl der Teilentladungen pro Minute dargestellt (gepunktete Linie). Es ist erkennbar, dass ab 2:00 h die untersuchte Quelle direkt mit der TE-Anzahl zusammenhängt. Der normierte Korrelationsgrad in dieser Zeit liegt bei über 70%, im Vergleich zu ca. 30%, wenn die Quelle nicht auftritt. Das gute Verhältnis lässt eine sichere Erkennung zu, wenn der Schwellwert auf 60% gesetzt wird.

Für die Pattern 2 und 3 aus Fig. 1 werden nun ebenfalls Templates erstellt, Korrelationsversuche durchgeführt und ein passender Schwellwert definiert. Für alle drei Pattern wird dann der gesamte verfügbare Datensatz an UHF-TE-Daten mittels Kreuzkorrelation untersucht. Das Ergebnis ist in Fig. 3 darstellt. Im oberen Teil ist die Anzahl der TE minutenweise in grau zu sehen. Zur besseren Übersichtlichkeit wird aus den hoch volatilen Messungen ein gleitender Durchschnitt errechnet, siehe schwarzer Plot. Darunter ist mittels Zeitbalken erkennbar, wann welche Pattern, respektive Quellen, aktiv waren. Erkennbar ist, dass Pattern 1 sporadisch auftritt, wohingegen Pattern 2 und vor allem 3 fast permanent aktiv sind. Pattern 2 ist 44% der gesamten Aufzeichnungszeit aktiv, Pattern 3 sogar über 50%. Der Vergleich mit der TE-Aktivität zeigt bei Tag 10 eine überdurchschnittlich hohe Aktivität, die auf Pattern (Quelle) 2 zurückgeführt werden kann.

Die Patternerkennung mittels Kreuzkorrelation ermöglicht die detaillierte Untersuchung von PRPD-Pattern unabhängig davon, ob diese von elektrischen oder UHF-Messungen herrühren. Sowohl Kurzzeitmessungen (vgl. Fig. 2), wie sie zu diagnostischen Zwecken verwendet werden, als auch Langzeitanalysen von Daten über Jahre sind möglich. Einzelne Quellen können damit erkannt und ihre Entwicklung weiter verfolgt werden. Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn ist durch Verknüpfung dieser Information mit beispielsweise der gesamten TE-Aktivität, aber auch dem zeitabhängigen Lastzustand sowie der Öltemperatur des Transformators, etc. möglich.



Continuous monitoring is used determine sources over time and recognize trends. For (semi-) automated detection of certain patterns in large data, 2-dimensional cross-correlation is used. It compares a template, which characterizes a pattern in terms of shape, and a PRPD pattern. For every possible coverage of template and PRPD matrix a scalar is calculated. The resulting matrix contains the correlation factors for all coverage combinations. The maximum value represents the measure for the similarity and can be used for triggering of patterns. Fig. 2 shows the number of PD per minute for 6.5 h (dotted black line) and the correlation factor of a template characterizing pattern 1 and PRPD generated for each minute (grey line). A dependency between source and PD activity can be seen starting at 2.00h. Correlation factor is about 70% compared to 30% at times of inactive source. This ratio allows reliable detection by setting threshold to 60%. For patterns 2 and 3 also templates are generated including tests and threshold definition. All patterns are correlated with the entire PD data set. Results are shown in Fig. 3. The upper plot shows PD per minute in gray and in black a moving average. The lower plot shows the occurrence of patterns 1 to 3 over time. Pattern 1 is not regularly active, whereas patterns 2 and 3 show frequent activity. Pattern 1 occurs about 44% of the recorded time and pattern 3 for more than 50%. Comparison with PD activity shows a high activity at day 10 which can be traced to pattern 2.

Pattern recognition using cross-correlation allows detailed determination of PRPD patterns form electric or UHF measurements. Short time evaluation (see Fig. 2) for diagnostic purposes as well as long term analysis for monitoring is possible. Single sources can be identified and traced. Consideration of additional data like load, oil temperature etc. promises further technical expertise.



Fig. 3: Oben: TE minutenweise in grau, gleitender Durchschnitt in schwarz. Unten: Auftreten der Muster 1-3 im gesamten Monitoringzeitraum (~80 Tage). Upper plot: overall PD per minute in gray, black is moving average. Lower plot: occurrence of Patterns 1 to 3 in the entire dataset (~80 days).



# 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. 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 the 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 Widerstands durchgeführt. Bei optimaler Auslegung des Resonators und der Widerstände konnte eine leichte Dämpfung erzielt werden (Fig. 3).



Fig. 3: Dämpfung durch Hohlraumresonatoren: optimale Dämpfung (durchgezogene Linie) und Referenzmessung (gepunktete Linie). Damping by means of resonators: ideal damping (continuous line) and reverence measurement (dashed line).

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 (Fig. 3).



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).



## Erkennung von Aktivteilbeschädigungen bei Leistungstransformatoren mit Hilfe von Transferfunktionsmessungen (FRA)

#### Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

Gegenstand dieser Forschungstätigkeit sind Untersuchungen über die Detektierbarkeit mechanischer Beschädigungen und elektrischer Veränderungen am Aktivteil von Leistungstransformatoren mit Hilfe von Übertragungsfunktionsmessungen.

Das elektrische Übertragungsverhalten von Leistungstransformatoren im Frequenzbereich bis 2 MHz wird durch die kapazitiven und induktiven Kopplungen zwischen Wicklungen, Kern und Kessel bestimmt. Die Übertragungsfunktion <u>TF</u>(f) ist eine gemessene Zustandsgröße und beschreibt das elektrische Übertragungsverhalten eines Transformators an seinen Anschlussklemmen nach Betrag und Phase in Abhängigkeit von der Frequenz. Das Übertragungsverhalten ist durch eine Vielzahl charakteristischer Resonanzen gekennzeichnet, die unmittelbar durch die Streukapazitäten und -induktivitäten, welche sich aus der Geometrie und Anordnung von Aktivteil und Kessel ergeben, bestimmt sind. Die Übertragungsfunktion <u>TF</u>(f) als Zustandsgröße bildet diese geometrischen Gegebenheiten gleich einem Fingerabdruck ab. Fig. 1 zeigt den typischen Verlauf des Betrags einer solchen Übertragungsfunktion eines Transformators über der Frequenz.



#### Fig. 1: Gemessene Transferfunktion eines 200 MVA 110 kV/65 kV-Leistungstransformators. Measured end-to-end transfer function of 200 MVA 110 kV/65 kV transformer.



# Recognition of power transformer active part failures by means of Frequency Response Analysis (FRA)

#### Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

Purposes of this research are investigations about the detectability of mechanical defects and electrical changes of power transformer active parts by means of transfer function measurements and FRA.

The electrical transfer behaviour of power transformers in the frequency range up to 2 MHz is mainly determined by the capacitive and inductive coupling amongst windings, core and transformer tank. The complex transfer function  $\underline{TF}(f)$  is a measured state variable and represents the frequency dependent electrical transmission behaviour between connection terminals (magnitude and phase). The electrical transmission is identified by numerous characteristic resonances, which depend on the stray capacitances and inductances that are determined by the geometry and arrangement of active part and transformer tank. The transfer function  $\underline{TF}(f)$  as a state variable displays the geometric structural condition like a finger print. Fig. 1 shows a typical transformer frequency response (magnitude vs. frequency).



Fig. 2: Kurzschlussschaden (radiale Deformation) an 220 kV/110 kV-Wicklungen. Short circuit damage (radial deformation) at 220 kV/110 kV windings.

If the geometric clearances inside the transformer change, stray capacitances and inductances are affected inherently and therewith the transfer function changes, too. This results in a change of the winding impedance(s) which influences the transfer functions of the transformer.



Verändern sich Abstände in der Geometrie des Aktivteils im Innern des Transformators und damit die Streukapazitäten und -induktivitäten, so hat dies unmittelbaren Einfluss auf das Resonanzverhalten. Die Folge sind Veränderungen der frequenzabhängigen Wicklungsimpedanz und damit der Übertragungsfunktionen des Transformators. Beispielhaft für einen Wicklungsschaden zeigt Fig. 2 den durch einen Kurzschluss in einem 110kV-Netz verursachten Schaden an Phase U eines 220kV/110kV-Transformators.

Untersuchungen in der Vergangenheit weisen der FRA als Diagnosemethode ein hohes Maß an Sensitivität aus, um geometrische und elektrische Veränderungen am Aktivteil eines Leistungstransformators zu detektieren. Beschädigungen sind oftmals Folge elektrischer Fehler wie Kurzschlüsse und können je nach Schwere den weiteren Betrieb des Trafos verbieten, sie erhöhen mindestens jedoch das Ausfallrisiko im weiteren Betrieb. Bisher fehlen jedoch allgemeingültige Richtlinien bei der Detail-Interpretation von Transferfunktionsmessungen. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Interpretation von Veränderungen bei Übertragungsfunktionen in Verbindung mit verschiedenen Fehlerarten. Bekannte Fehlerarten wie Deformationen wirken sich in Form von Verschiebung, Erzeugung oder Verschwinden von Resonanzstellen in einer Übertragungsfunktion aus. Um derartige Zusammenhänge aufzuklären, können bestimmte mechanische Fehler simuliert und die Veränderungen in der Übertragungsfunktion analysiert werden. Daraus können Regeln abgeleitet werden, die dabei helfen, zwischen unzulässigen und zulässigen Veränderungen der Übertragungsfunktion zu unterscheiden. Fig. 3 zeigt Simulationen gängiger Übertragungsfunktionen anhand eines stark vereinfachten einphasigen Transformatormodells, Fig. 4 zeigt das detaillierte 3D-Modell einer Transformatorwicklung mit nachgebildeter radialer Deformation.



Fig. 3: Simulation des Frequenzverhaltens eines vereinfachten Transformatormodells anhand verschiedener Transferfunktionstypen. Simulation of frequency behaviour of a simplified transformer model in terms of different frequency response types.



Fig. 2 shows a winding damage on Phase U of a 220 kV/110 kV power transformer caused by a short circuit within the 110 kV grid.

Investigations in the past revealed FRA being a highly sensitive method to diagnose electrical and mechanical failures of a power transformer's active part. Changes are often a result of electrical failures of the ambient power grid such as short circuits and may, depending on their severity, deny further operation of the transformer respectively increase its risk of outage.

Until now, objective guidelines for detailed interpretation and assessment of transfer function measurements are missing. Scope of this research work is the interpretation of transfer functions changes in relation to different failure types.

Known damage types, e.g. deformations, have an effect on the transfer functions like shifting, creating or disappearing of resonances. For further investigations on the relationship between physical (mechanical) changes of the active part and corresponding changes of the transfer function, certain damage types can be modeled into winding geometries. 3D simulations of the electro-magnetic field reveal relationships of how the transfer function is affected by such changes of the geometry. As an outcome, rules can be established which may allow to distinguish between acceptable and non-acceptable changes of the transfer function.

Fig. 3 shows simulation results of common transfer function types derived from a simplified single-phase transformer model. Fig. 4 shows a 3D model of a transformer winding with reproduced (artificial) deformation.



Fig. 4: Simulation einer radialen Wicklungsdeformation mit CST-Studio. Simulation of radial deformation (buckling) of transformer winding using CST Studio.



# Dielektrische Untersuchungen alternativer Isoliermaterialien

#### Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Die Erforschung alternativer Dielektrika, wie z.B. Pflanzenöle oder Aramidwerkstoffe hat sehr unterschiedliche Komponenten. Zum einen die fundamentalen Materialeigenschaften, die die Auslegung des Isoliersystems beeinflussen, als auch die sich verändernden Zustandsgrößen, die für diagnostische Zwecke herangezogen werden. In den letzten Jahren wurden vor allem Diagnoseverfahren aus der chemischen Laboranalytik, wie zum Beispiel die Gas-in-Öl Analyse untersucht und mit Erfolg angepasst. In diesem Beitrag werden Ölleitfähigkeitsstudien und als diagnostisches Verfahren FDS (engl. frequency domain spectroscopy) unter dem Aspekt des Einsatzes von Pflanzenölen vorgestellt.

Aktuell ist ein Trend festzustellen, der die genauere Charakterisierung der Öl/Papier Isolation verfolgt. Unter anderem wurde eine CIGRE Arbeitsgruppe A2/D1.41 gegründet (Prof. Küchler), um Ölleitfähigkeiten und deren richtige Messung zu untersuchen. In diesem Zusammenhang wurden am Institut Aktivitäten begonnen, um eine gut arbeitende Messtechnik und Ölmodelle zu entwickeln.

Die Ölleitfähigkeit ist eine Größe, die selbst bei Neuölen von sehr vielen Parametern abhängt, wie zum Beispiel Temperatur, Feldstärke und Zeit. (Fig. 1)



Fig. 1: Grundsätzliche Zeitabhängigkeit der Ölleitfähigkeit (Dissertation H. Link 1966). General time dependency of oil conductivity.

Man erkennt, dass die Leitfähigkeit durch sich bewegende lonen erst langsam dem Endwert nähert. Bei Messungen wurde deutlich, dass FR3 üblicherweise einen 10-fach höheren Wert hat als Mineralöl, wobei sich auch innerhalb der gleichen Stoffklasse die Werte um Größenordnungen unterscheiden können (Fig. 2). So sind Werte bis zu wenigen Femtosiemens pro Meter möglich. Durch Variation des Ölspalts, der Temperatur und der Feldstärke konnten die bekannten Theorien zur



# Dielectric studies of alternative insulating materials

#### Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Research concerning alternative dielectrics, for example vegetable based oils or aramid solid insulation, has very different components. On the one hand there are fundamental characteristics, which influence the dielectric design. And on the other hand there exist changing condition variables, which can be used for diagnostic purposes. During the last years especially the diagnostic methods connected to analytical chemistry, e.g. dissolved gas in oil analysis, have been investigated and successfully adjusted. In this contribution two new aspects are presented. The first is an oil conductivity study and the second is the investigation of frequency domain spectroscopy in case of Kraft paper in combination with vegetable based oils (FR3).

Recently also an increasing trend can be seen, which follows a more precise description of the oil/paper insulation system. A CIGRE Working Group A2/D1.41 (Prof. Küchler) is doing reasearch in this field, in order to investigate oil conductivity and its proper measurement as standards seem to be insufficient for high-voltage applications. In this context also works have been started at the institute to develop a proper working measurement setup and more general oil models.

Oil conductivity is a quantity, which depends even for new unused oil on many parameters like temperature, field strength and time (Fig. 1). It is apparent, that oil conductivity reaches only slowly its steady state as ions have to be accelerated through the oil volume. Measurements show that FR3 typically has a tenfold higher value than mineral oil.



Fig. 2: Leitfähigkeit verschiedener Isolieröle bei Raumtemperatur, 90°C bei 1kV/mm. Conductivity of different insulting liquids at 20°C and 90°C at 1kV/mm.



lonenleitung in Isolierölen an einem Mineralöl allesamt überprüft werden. Für ein vollständiges Ölmodell sollten weitere Öle untersucht werden. Insbesondere wird die Grenzfläche zwischen Öl und Papier einen großen Einfluss haben. Zukünftige Untersuchungen werden sich dieser Thematik widmen.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde verdeutlicht, dass die natürlichen Ester eine veränderte Leitfähigkeit, sowie Permittivität gegenüber Mineralöl besitzen. Diese Unterschiede müssten sich in den Messungen der dielektrischen Diagnostik bemerkbar machen. Dies ist Motivation esterimprägniertes Kraftpapier mittels FDS zu untersuchen - unter Variation der Papierfeuchte und Temperatur. Um eine Datenbasis zu bilden wurde die zugrundeliegende Messtechnik, in erster Linie die Feuchtigkeitsbestimmung, auf ihre Genauigkeit hin bewertet. Die Titration von FR3 ist hinsichtlich der Genauigkeit unproblematisch mit Standardabweichungen kleiner als 1%. Begrenzend wirkt die Streuung von 20% bei trockenen imprägnierten Papierproben (Fig. 4). Erste Frequenzbereichsmessungen zeigen, dass es bei der Feuchtigkeitsbewertung Unterschiede zur herkömmlichen Isolation gibt, die sich bei trockenem Papier eher wenig bemerkbar machen. Im diagnostisch wichtigen Bereich, wenn es um Entscheidungen für Wartungsmaßnahmen geht, wurden die Unterschiede viel größer. Dies ist Motivation weitere Messreihen im Labor aufzunehmen, um eine neue vollständige Datenbasis aufzubauen für Pflanzenöl imprägniertes Kraftpapier.



Fig. 3: Verlustfaktor im Frequenzbereich für imprägniertes sehr feuchtes Papier. Loss factor in frequency domain for very wet Kraft paper.



It should be noted, that even within a material class, values can vary by orders of magnitude. For some mineral oils the conductivity can even be in the range of only fS/m. By varying electrode distance, temperature and field strength, all known theories about ionic conduction in dielectric liquids have been verified for one mineral oil (Lyra X). For a more complete oil model, different oils should be investigated. The interface between oil and pressboard will play a crucial role. Future investigations will cover this.

In the preceding section it was shown that natural esters have a different conductivity, but also permittivity, compared to mineral oil. These differences should become visible when utilizing dielectric diagnostic techniques. This is the motivation to investigate FR3 impregnated Kraft paper under varying temperature and moisture conditions. Because it is the basis of the work, the water assessment has been investigated first. Direct titration of FR3 is no problem regarding accuracy and repeatability. Typically the relative standard deviation (RSD) is below 1%. More restricting is the water measurement of oil impregnated paper with low water content as the RSD easily reaches 20% (Fig. 4). First loss factor measurements in the frequency domain show that only small differences exist compared to a traditional mineral oil and paper systems. In the more important range of wet or moderately wet insulations, the differences get bigger. Based on these first experiences it is now necessary to develop a new accurate database for natural ester impregnated insulating systems, especially with high accuracy in the range, which is relevant for diagnostic measurements.



Fig. 4: Leistungsfähigkeit der Karl-Fischer-Titration trockener imprägnierter Papiere. Performance of the Karl-Fischer-Titration for dry, but impregnated paper.



# Overload assessment of power transformers for online monitoring

#### M. Tech. Peyman Mazidi

There are different reasons why transformers become overloaded, or why utilities may choose to overload them beyond their nameplate ratings. One reason is because the load demand has caught up or surpassed the transformer capacity and additional capacity is needed. Due to the complexity and exposure of the power system, no matter how well it is designed, failures are going to occur. It is the primary function of protective equipment to recognize such faults and isolate the faulted element from the rest of the system. This will cause the power flow to find new ways to reach the load demand. Transformers that find themselves on such paths might experience overloads beyond their normal capacity. In fact, depending on economical and reliability reasons, it may be necessary to overload transformers to use 25%, 50%, or more of their transformer life to maintain customers' loads or to give system operators time to mitigate contingency conditions and prevent a potential blackout. It is possible to intelligently overload transformers to a rating that is still safe to operate. Understanding the aging of the insulation and how to calculate the hottest-spot winding temperature are of vital importance in order to know how much a transformer can be safely overloaded.

The four general types of loading are as follows:

#### Normal life expectancy

a) Normal life expectancy loading

#### Sacrifice of life expectancy

- b) Planned loading beyond nameplate
- c) Long time emergency loading
- d) Short time emergency loading

Since the transformers are very expensive, to investigate these loading conditions in a transformer we need to use transformers models. The model should behave accurately in all these loading conditions.

Currently, there are two general models for modeling power transformers, IEEE and IEC models. Each of these two models have shown results that are acceptable, however, there comes some time that the network should causes overloads and the utilities need to know exactly how much their apparatus can take on during operation. Some experiments showed that transformers can be overloaded more than a margin given by these two models.



A new model was developed recently, One-Body model, and some experiments were performed to investigate the model. One-Body model showed reasonable results in investigations and by using less input data than two other models, its results were also along with the real overloading conditions which are higher than limitations of previous two models. We have put our effort and aim on improving this model and to prepare it for online monitoring in the power transformers.

The One-Body model works by the concept of considering the transformer as a onehomogeneous body, which the whole body has only one temperature and it's Top-Oil temperature of the transformer.

The model is presented in the following figure:



To calculate the hot-spot and top-oil temperatures which are the main parameters in limiting transformers performance, this model tries to model all of the transformers losses as "thermal resistance". It did not show good results when in investigations the thermal resistance was considered a constant. Therefore, a simplified model was also used for calculation of thermal resistance of a transformer.

Another view that should be considered in online monitoring is to use minimum set of input data, to make the calculations as simple as possible by having an acceptable range of error. For this purpose, there are researches trying to find a range of data that is used as input data and limiting them to one particular period so that by having data from that small period, we get acceptable results from our model, hence we do not need to perform experiment on all transformers at different conditions.



# Fehlergasverluste über das Ausdehnungsgefäß eines frei-atmenden 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 (engl. Dissolved Gas Analysis, DGA) kann wichtige Informationen über Fehler im Inneren eines Transformators liefern. Durch natürliche Alterung sowie thermische oder elektrische Fehler entstehen Gase, die sich im umgebenden Öl des Transformators lösen. Bei der Diagnose der Gaswerte wird vermehrt auf die Gasgenerationsraten statt auf den absoluten Wert verwiesen, um die Schwere des Fehlers besser einschätzen zu können. Diese Entwicklung liegt auch an der zunehmenden Anzahl an installierten Gas in Öl online Monitoringsystemen. Dabei spielt der Verlust an Gasen eine wichtige Rolle, da er die gemessenen Werte verfälscht. Sein Einfluss ist aber bisher nicht bekannt.

Der Verlust an Fehlergasen findet überwiegend über das Ausdehnungsgefäß statt. Die Bauform des Ausdehnungsgefäßes spielt dabei eine große Rolle. Ein effektiver Gasaustausch zwischen den gelösten Gasen im Isolieröl und der umgebenden Luft im Ausdehnungsgefäß ist nur bei der so genannten "offenen Bauart" des Ausdehnungsgefäßes möglich. Die Gasdiffusion zwischen Öl und der umgebenden Luft im Ausdehnungsgefäß soll hierfür untersucht werden. Es wird die Auswirkung von Flächenänderungen des Phasenübergangs zwischen Isolieröl und Umgebungsluft sowie die Abhängigkeit des Diffusionsvorgangs von der Temperatur im Laborexperiment ermittelt.

Um den Austausch von Fehlergasen an der Grenzfläche zwischen Öl und Umgebungsluft im Ausdehnungsgefäß nachbilden zu können, werden Ölfässer verwendet. Diese Fässer haben ein Volumen von ca. 217 I. Um die Fläche des Phasenübergangs zwischen Öl und Umgebungsluft variieren zu können, wird ein Versuch bei aufrecht stehendem Fass (Oberfläche ca. 0,26 m<sup>2</sup>) und ein Versuch bei liegendem Fass (Oberfläche ca. 0,48 m<sup>2</sup>) durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde 100 I mineralisches Transformatorenöl mit gelösten Fehlergasen verwendet. Die Fässer sind zur Umgebung hin offen. Für die Versuche mit veränderlicher Temperatur wird zum Aufheizen und zur Temperaturhaltung ein Durchlauferhitzer mit Pumpe verwendet.

In Fig. 1 sind beispielhaft die Konzentrationsverläufe von Wasserstoff bei unterschiedlichen Oberflächen abgebildet. Die Versuche fanden bei Raumtemperatur statt. Bei den Kurven handelt es sich um exponentielle Ausgleichskurven zu den entsprechenden Messwerten. Die Dauer beider Versuche ist vergleichbar (54 bzw. 40 Tage).



## Loss of fault gases through the conservator tank of free-breathing 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 is increasingly considered. This development is also enforced by more and more installed DGA online monitoring systems. However, the loss of fault gases plays a significant roll because it falsifies the measured values. But, its influence is unknown.

The loss of fault gases is predominantly caused by the conservator tank of a transformer. Therefore, the design of the conservator tank plays an important role. An effective gas exchange between gases dissolved in the insulating oil and the ambient air in a conservator tank is only possible in a so-called free-breathing conservator tank. Therefore, the gas diffusion between oil and ambient air in the conservator tank is investigated. Different effects, like the size of the boundary surface between insulating oil and ambient air as well as the temperature dependency of gas diffusion are determined in laboratory experiments.

To reproduce the exchange of fault gases at the boundary surface between oil and ambient air in a conservator tank, oil drums are used. These oil drums have a volume of about 217 I. To vary the size of the boundary surface one experiment is done with an upright standing oil drum (boundary surface approx. 0.26 m<sup>2</sup>) and one with a lying oil drum (boundary surface approx. 0.48 m<sup>2</sup>). At each experiment, 100 I of mineral transformer oil with dissolved fault gases was used. The drums are open to the ambient. For the experiments with variable temperature a continuous-flow heater and a pump is used for heating and temperature control.

Fig. 1 shows the concentration trend of dissolved hydrogen at different sizes of the boundary surface. The x-axis shows the time in hours and the y-axis the concentration of dissolved hydrogen in ppm (parts per million, volumetrically). Both experiments are performed at room temperature. The curves in the diagram are exponentially fitted curves to the corresponding measured values. The duration of both experiments is comparable (54 vs. 40 days).

The measurement with a larger boundary surface shows a faster decrease of dissolved hydrogen concentration. In comparison to other gases, hydrogen volatilizes the fastest.



Zu erkennen ist eine schnellere Abnahme der Wasserstoffkonzentration bei größerer Oberfläche. Im Vergleich zu anderen Gasen verflüchtigt sich Wasserstoff am schnellsten.



Fig. 1: Konzentrationsverlauf des gelösten Wasserstoffs bei unterschiedlichen Oberflächen.

Concentration trend of dissolved hydrogen at different boundary surfaces.

Mit zunehmender Oberfläche zwischen den beiden Phasen steigt auch der Verlustfaktor. Durch eine größere Oberfläche verflüchtigen sich mehr Gase.

In einer weiteren Untersuchung soll der Einfluss der Temperatur analysiert werden. Hierzu wurde der Versuch bei drei Temperaturen durchgeführt: Raumtemperatur (ca. 23 °C), 50 °C und 70 °C. Die Oberfläche ist bei allen Versuchen gleich (0,26 m<sup>2</sup>).

In Fig. 2 ist der normierte Konzentrationsverlauf des gelösten Wasserstoffs bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Ein Vergleich der gemessenen Kurven gestaltete sich schwierig, da die Gase verschiedene Anfangskonzentrationen haben. Zu erkennen sind ein exponentiell flacher Verlauf der Konzentration bei 23 °C und ein steiler exponentieller Abfall bei den höheren Temperaturen. Ebenfalls ist eine unterschiedliche Dauer der drei Versuche (12, 2 und 1 Tag) und im Vergleich zu den Versuchen mit unterschiedlichen Oberflächen eine deutlich kürzere Versuchsdauer zu erkennen. Bei den Verlustfaktoren (mit der Ausnahme von H<sub>2</sub>) kann von einem linearen Anstieg mit der Temperatur ausgegangen werden.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Fehlergasverluste, der hier nicht behandelt wurde, ist die Menge des Ölaustausches zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß. Dieser kann je nach Bauart und Betriebsweise des Transformators variieren.



With an increasing boundary surface between oil and ambient air also the loss of gases increases. Through a larger surface, more gases are volatilized.

Another experiment analyses the influence of temperature on the diffusion process. For this, the measurement is performed at three different temperatures: room temperature (approx. 23 °C), 50 °C and 70 °C. The boundary surface of all three measurements is the same (0.26 m<sup>2</sup>).

Fig. 2 shows the normal concentration trend of dissolved hydrogen at different temperatures. The x-axis shows the time in hours and the y-axis the normal concentration of dissolved hydrogen. A comparison of the raw curves proved to be difficult, since they have different initial concentrations.



Fig. 2: Normierter Konzentrationsverlauf des gelösten Wasserstoffs bei unterschiedlichen Temperaturen. Normal concentration trend of dissolved hydrogen at different tem

Normal concentration trend of dissolved hydrogen at different temperatures.

An exponentially flatter curve gradient of the concentration at 23 °C and a steep exponential decay at the higher temperatures can be recognized. In addition, a different duration of the three experiments (12, 2 and 1 day) can be seen, and in comparison to the experiments with different surfaces a much shorter duration of the measurements. For the loss factors (with exception of H<sub>2</sub>), a linear increase with the temperature can be assumed.

Another important factor influencing the fault gas losses, which was not discussed here, is the amount of oil exchange between the transformer main tank and the conservator tank. This may vary depending on the type and mode of operation of the transformer.



# Untersuchung der Temperaturverteilung in Ölgekühlten Leistungstransformatoren

#### Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Transformatoren stellen eine Schlüsselkomponente bei der Verteilung elektrischer Energie in Stromnetzen dar. Ihre Belastbarkeit und Lebensdauer hängen dabei 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. 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 Transformatorwicklung 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.

Ein viel versprechender Ansatz, der die detaillierte Untersuchung der Temperaturverteilung innerhalb einer Transformatorwicklung ermöglicht, ist die numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, *kurz:* CFD). 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 zweckdienliche Vereinfachungen angewandt werden, um den Rechenaufwand auf ein vertretbares Maß begrenzen zu können. Fig. 1 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.

Nach der Diskretisierung des zu untersuchenden Bereichs erfolgt die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen, welche die Bewegung des Ölstroms analytisch beschreiben. Die hieraus resultierende Geschwindigkeitsverteilung ist für einen Abschnitt einer Unterspannungswicklung beispielhaft in Fig. 2 links dargestellt.



## Investigation of the temperature distribution in oil cooled power transformers

#### Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Power transformers are key components applied for the distribution 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. 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 being difficult to be met. 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.



Fig. 1: Zweidimensionales numerisches Modell einer Unterspannungswicklung und dessen Diskretisierung.

2-dimensional numerical model of a low voltage winding and its discretization.

A promising approach to predict the detailed temperature distribution inside a winding of a transformer is the application of computational fluid dynamics (CFD).





Fig. 2: Visualisierung der Berechnungsergebnisse für die Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturverteilung in der modellierten Unterspannungswicklung. Visualization of calculation results for the oil flow velocities and temperature distribution inside the modeled low voltage winding.

Wird darüber hinaus bei der Berechnung auch der von der Ölstromverteilung abhängige Energietransport mitbetrachtet, kann damit die in Fig. 2 rechts dargestellte Temperaturverteilung bestimmt werden.

Obwohl CFD die Möglichkeit bietet, die Temperaturverteilung im Inneren einer Transformatorwicklung sehr detailliert zu untersuchen, erfordern die getroffenen Annahmen und Vereinfachungsschritte im Modellierungsprozess eine Validierung der Berechnungsergebnisse. Für diesen Zweck wurde am IEH ein experimentelles Wicklungsmodell erstellt, welches drei Passagen der Niederspannungswicklung eines großen Leistungstransformators widerspiegelt. Für die Validierung der CFD-Berechnungsergebnisse bei bestimmten Betriebsparametern wurden die Messdaten von Temperatursensoren in den Leitern der beiden oberen Passagen des experimentellen Wicklungsmodells herangezogen. Fig. 3 zeigt den Vergleich der entsprechenden Ergebnisse für die Temperaturdifferenzen zwischen den aufwärts gezählten Leitern und dem umgebenden Öl an der entsprechenden Position. Die Ölstromrate wurde dabei auf  $\dot{m}_{oil} = 3.5$  kg/s und  $\dot{m}_{oil} = 10.5$  kg/s bei einer Öltemperatur am Modelleintritt von  $\vartheta_{in} = 35$  °C festgelegt. Die gute Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Ergebnissen validiert den Modellierungsansatz bei den gegebenen Randbedingungen.



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. 1 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. 2 on the left. In addition, the transport of energy depending on the mass flow distribution can be calculated simultaneously, resulting in the temperature distribution as displayed in Fig. 2 on the right.

Although CFD offers the opportunity to investigate the temperature distribution inside transformer windings in great detail, the assumptions and taken simplification steps during the modeling process demand for a validation. For that purpose, an experimental model of a winding was created at the IEH, resembling three passes of the low voltage winding of a large power transformer. The data from temperature sensors inside the conductors of the two upper passes within the experimental model were taken to validate the CFD-calculations at corresponding setups. Fig.3 shows a comparison of the respective results concerning the temperature differences between the conductors counted upwards and the surrounding oil at corresponding position. The oil flow rate was set to  $\dot{m}_{oil} = 3.5$  kg/s and  $\dot{m}_{oil} = 10.5$  kg/s while the oil temperature at the inlet of the winding model was set to  $\vartheta_{in} = 35$  °C. The good agreement between the respective results validates the taken modeling approach at the given boundary conditions.



Fig. 3: Validierung der Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen bei einer Öltemperatur am Eintritt in das Wicklungsmodell von  $\vartheta_{in}$  = 35 °C. Validation of calculation results with data from measurements for an oil temperature at the inlet of the winding model with  $\vartheta_{in}$  = 35 °C.



# Teilentladungsortung durch ein UHF getriggertes akustisches Sensorarray

#### Dipl.-Ing. Martin Siegel

Teilentladungen (TE) in Transformatoren sind ein Indiz für eine bestehende Degradation des Isolationsmaterials. Eine mögliche Folge davon kann eine fortschreitende Schädigung des Isolationsmaterials sein, verbunden mit weitergehenden Beschädigungen bis hin zum Ausfall des Transformators. Um dies zu verhindern kann die Teilentladungsaktivität bei Leistungstransformatoren dauerhaft durch ein Monitoringsystem überwacht werden und gegebenenfalls eine Instandsetzung durchgeführt werden. Das durch Monitoring Wartung bzw. gewonnene Wissen über die Existenz von TE kann helfen, den Zustand des Transformators besser zu bestimmen. Falls auf Grund dieser Daten eine Instandsetzung veranlasst werden soll, ist es außerdem sehr hilfreich die Position der Teilentladung(en) im Transformator zu kennen, um gezielt betroffene Stellen reparieren zu können. Vor allem bei hohem Rauschpegel und mehreren TE-Quellen versagen herkömmliche Ortungsmethoden, die auf Averaging-Verfahren basieren. Deshalb werden neue Methoden zur Rauschunterdrückung und automatisierten Laufzeitbestimmung benötigt. Die hier vorgestellte Ortung basiert auf der Kombination aus einer ultra-hochfrequenten Messung der elektromagnetischen Abstrahlung von TE und der Laufzeitbestimmung der von TE erzeugten Ultraschallemission. Ein UHF Drain Valve Sensor wird dabei durch einen standardisierten Flachkeilschieber in den Ölraum des Leistungstransformators eingebracht. Die gemessenen UHF-Signale (Frequenzbereich: 300 MHz – 3 GHz) der TE breiten sich mit etwa 2/3 der Lichtgeschwindigkeit im Isolieröl aus und können als Nullzeitpunkt für die Laufzeitbestimmung der akustischen Signale verwendet werden, die nur eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von rund 1400 m/s aufweisen. Alternativ kann das elektrisch gemessene Signal der TE nach IEC 60270 als Nullzeitpunkt für die Ortung verwendet werden. Ein entscheidender Vorteil der UHF-Methode zur Nullzeitbestimmung ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber externen Korona-Entladungen, welche das größte Störpotenzial für die elektrische Messung darstellen. Der UHF-Sensor befindet sich im Innern des Trafokessels (Faraday'scher Käfig) und ist daher unempfindlich gegen externe elektromagnetische Störquellen.

Zur eigentlichen Ortung wird ein akustisches Sensorarray, bestehend aus Köperschallsensoren mit einer Resonanzfrequenz von  $f_R = 150$  kHz, verwendet. Dieses Uniform Linear Sensorarray (ULA) besteht dabei aus zwei akustischen Sensorpaaren, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind. In diesem Beitrag wird das Ortungsprinzip mit vier Sensoren gezeigt, die in einer Kreuzanordnung am Transformator angebracht sind.



# Partial discharge localization by a UHF triggered acoustic sensor array

## Dipl.-Ing. Martin Siegel

Examining the insulation quality of oil/paper-insulated transformers gets more and more important because of the increasing number of transformers reaching their technical life expectancy. Partial Discharge (PD) in transformers can be an indication of an existing degradation of the insulation material. A possible consequence can be further damage or even failure of the transformer. To prevent this, the PD activity of power transformers can be monitored permanently by a monitoring system. If on the basis of these monitoring data a repair is to be initiated, it is helpful to know the position of the PD(s) in the transformer in order to repair only the affected area. Conventional detection methods based on averaging processes fail if there are several PD sources inside the transformer. Also high noise levels make localization difficult. Therefore, new methods for noise reduction and automatic run-time determination are required.

The presented localization method is based on the combination of an ultra-highfrequency measurement of the electromagnetic radiation of PD and the runtime determination of PD generated ultrasonic emission. PD under oil are fast electrical processes and radiate electromagnetic waves with frequencies up to the ultra-high frequency range (UHF: 300 MHz– 3 GHz). UHF probes can be inserted into transformers during operation using oil filling valves. As a result of the shielding characteristics of the transformer tank against external electromagnetic waves, usually a clear decision can be made concerning the PD activity of the test object. A key advantage of UHF method is its insensitivity to external corona discharges, which represent the highest potential for interference for conventional electrical measurement according to IEC 60270.

Electromagnetic waves propagate in oil with about 2/3 light speed whereas acoustic signals only have a propagation velocity of about 1400 m/s. Thus, the UHF signal can be used as zero-time for runtime determination in combination with acoustic sensors.

For the acoustical localization a sensor array consisting of acoustic sensors with a resonant frequency  $f_R = 150$  kHz is used. This uniform linear array (ULA) consists of two pairs of acoustic sensors, which are arranged perpendicularly to each other. In this article, the localization principle is shown with four sensors, which are mounted in a cross arrangement at the transformer tank wall. Alternatively, only three sensors can be used in an L-configuration. Fig. 1 shows the sensor arrangement, consisting of a UHF sensor and a uniform linear acoustic sensor array.



Die Sensoren eines Sensorpaares liegen dabei d = 11 cm auseinander. Alternativ können auch nur drei Sensoren in einer L-Anordnung verwendet werden, dabei wird ein Sensor doppelt verwendet. Fig. 1 zeigt die Sensoranordnung, bestehend aus einem UHF Sensor und dem akustischen Sensorarray.

Der Abstand der TE zum Sensorarray kann durch die Zeit  $\Delta t$  zwischen UHF-Signal (oder IEC-Signal) und den akustischen Signalen bestimmt werden. Aus den vier Zeiten der einzelnen akustischen Sensoren wird der Mittelwert gebildet, um die Laufzeit zum Arraymittelpunkt zu erhalten. Diese Laufzeit wird mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit v<sub>öl</sub> von Ultraschall in Öl multipliziert, um den Abstand von Sensorarray zur TE zu erhalten.

Die genaue Startzeit der akustischen Signale wird entweder durch das sogenannte Hinkley Kriterium, durch eine Spektroskopie oder durch einen Matched Filter bzw. eine Matched Filter Bank ermittelt.

Um den exakten Einfallswinkel  $\Phi_{ULA}$  zu bestimmen werden die genauen Laufzeitdifferenzen t<sub>delay</sub> zwischen den Sensoren, die sich im Array gegenüberliegen, benötigt. Hierfür können, falls genau genug, die einzeln berechneten Startzeiten der Sensoren herangezogen werden. Außerdem kann die Laufzeitdifferenz über eine Kreuzkorrelation der Sensorsignale erfolgen. In Fig. 2 ist die Einfallswinkelbestimmung aus der Laufzeitdifferenz von zwei Sensoren zu sehen. Dieser Winkel führt zu einem mehrdeutigen Kegelmantel (Fig. 3) um die Sensorachse. Eine akustische Welle einer TE hat demnach ihren Ursprung auf einem beliebigen Punkt auf diesem Kegel. Es wird für jedes Sensorpaar ein Einfallswinkel berechnet, somit erhält man für jede Sensorachse einen Mehrdeutigkeitskegelmantel. Diese schneiden sich in exakt einer Projektionsgeraden, auf welcher sich die TE-Quelle befindet. Man erhält somit die Richtung des Vektors von Sensorarray zur TE, siehe Fig. 1.



Fig. 1: Sensoranordnung zur Teilentladungs-Ortung mit UHF getriggertem akustischen Sensorarray. Sensor arrangement for partial discharge detection with a UHF triggered acoustic sensor array.



The distance between PD and sensor array can be determined by the time  $\Delta t$  between UHF signal (or IEC signal) and the acoustic signals. The mean value of the four run times of the individual acoustic sensors is used in order to obtain the run time to the center of the array.

The start time of the acoustic signals is determined either by the Hinkley criterion, by spectroscopy, or by a matched filter or a matched filter bank.

To determine the angle of incidence  $\Phi_{ULA}$  the exact delay differences  $t_{delay}$  between the sensors are required. For this purpose the individually calculated starting times of the sensors can be used if they are accurate enough. In addition, the delay difference can be determined via cross-correlation of the sensor signals. Fig. 2 shows the determination of the angle of incidence by the delay difference of two sensors. This angle results in an ambiguity cone-shaped shell (Fig. 3) around the sensor axis. An acoustic wave of PD has therefore its origin on any point on this shell. For each sensor pair an incident angle is calculated. This leads to two cone-shaped shells intersecting in exactly one projection line, which is located on the PD source.



Fig. 2: Einfallswinkelbestimmung aus Laufzeitdifferenz eines Sensorpaares. Angle determination by time delay difference of a sensor pair.



Fig. 3: Mehrdeutigkeitskegelmantel bei der Einfallswinkelbestimmung. Ambiguity cone-shaped shell of the angle of incidence.



# Untersuchung der Leitfähigkeit von Elektroisolierölen im Hinblick auf HVDC-Anwendungen

## M. Sc. Farzaneh VAHIDI

Traditionell findet die Übertragung und Verteilung von Energie im elektrischen Energieversorgungsnetz hauptsächlich mit Hilfe der Drehstromtechnik statt. Neue Anforderungen führen aber zu einem vermehrten Einsatz von Hochspannungsgleichstromübertragungssystemen (HGÜ). Der Grund liegt hier vor allem am steigenden Anteil der erneuerbaren Energien, die möglichst effizient genutzt werden sollen. Meist muss dabei geografisch bedingt die Energie über sehr weite Strecken oder mit Hilfe von Erd- bzw. Seekabeln von der Quelle zum Verbraucher übertragen werden. In beiden Fällen ist dies häufig aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nur mit dem Einsatz von HGÜ realisierbar.

Die Beanspruchungen der Isoliersysteme von dafür verwendeten Betriebsmitteln, wie z.B. HGÜ-Transformatoren, können sich grundsätzlich von den Beanspruchungen bei Wechselspannung (AC) unterscheiden. Die theoretische Grundlage, die diesen Sachverhalt verdeutlicht, ist die Analogie der Permittivität  $\epsilon$  im AC-Fall und der elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa$  im Gleichspannungs(DC)-Fall. Für letzeren ist  $\kappa$  die feldbestimmende Größe. Neben einer reinen DC-Belastung können HVDC-Isoliersysteme aber auch mit Mischfeldbeanspruchungen belastet werden.

Solche entstehen z.B. beim Zu- oder Umschalten der Gleichspannung oder durch eine Überlagerung mit zusätzlichen, zeitveränderlichen Spannungsformen. Bei solchen Mischfeldbeanspruchungen können sehr komplexe Feldverteilungen auftreten, wie dies im Folgenden an einem Einschaltvorgang erklärt wird. Nach dem Zuschalten der Spannung stellt sich im Isoliersystem zunächst ein Verschiebungsfeld, geprägt durch die Kapazitäten, ein. Dann beginnt eine länger andauernde Übergangsphase, die durch Umladevorgänge der Kapazitäten über die Widerstände der Isolationskomponenten zustande kommt. Im stationären Endzustand, dem oben angesprochenen reinen DC-Fall, herrscht schließlich das Strömungsfeld entsprechend der Leitfähigkeit.

Egal, ob nun eine reine DC-Beanspruchung oder eine Mischfeldbeanspruchung vorliegt, muss für das vollständige Verständnis der Vorgänge in einem HVDC-Isoliersystem nicht nur die Permittivität  $\varepsilon$ , sondern vor allem auch die Leifähigkeit  $\kappa$  aller Komponenten in ihrem Wert und Verhalten bekannt sein.

Meist ist das aber nur unzureichend der Fall, weil die Leitfähigkeit im Vergleich zur Permittivität häufig von vielen Parametern, wie z.B. der Feldstärke, der Zeit und der Temperatur, abhängt. Sie kann somit nur schwer allumfassend bestimmt werden.



# Conductivity measurement of insulating oil targeting HVDC applications

## M. Sc. Farzaneh VAHIDI

The industrial growth of nations leads to a worldwide sustainable development of power grids worldwide. The demand for new facilities to transmit the electrical power is increasing. The transmission of energy between power plants and substations is carried out using two techniques: AC technique, which offers a transmission with high efficiency and low power losses because it can simply be transformed to higher voltage levels, and DC transmission, which uses direct current for the bulk transmission of electrical power and it is normally used for transmission of energy along long distances.

The technology of HVDC transformers has taken a big step forward in recent years. Hence, the introduction of new concepts for design optimization and improving the reliability of HVDC transformers has become important. During the transformers operation time, there is a degradation of insulation material because of aging. The operation condition of these transformers can be determined from the field distribution. Therefore, the oil-paper insulation system for HVDC application should be considered regarding to the behavior of field distribution against operation time. Furthermore, the analysis of oil conductivity is a dominant strategy which yields more information about insulation condition of transformers.

The AC field distributions in transformers depend on the permittivity. Contrary to AC field distribution, DC field stresses are determined by the conductivity of the insulating materials. Therefore knowledge about the conductivity of the oil for design and safe operation in DC case is of significant importance. The conductivity of insulating material depends on several parameters, e.g. humidity, temperature, time and electrical field strength. In this contribution, a measuring cell with plate-type electrodes is presented for the analysis of oil conductivity dependent on different parameters. There are some standards for measuring the conductivity, but the different periods of electrification and various values for applying field strength show that a direct comparison of the measured conductivity values of an oil sample, which was determined by different standards, is not always possible.

For the investigation of conductivity properties a constant voltage method is selected and the test is conducted with the setup according Fig. 1.



Dies trifft auch für die Leitfähigkeit von Elektroisolierölen zu, die in den meisten HVDC-Isolationen in Verbindung mit Papier eingesetzt werden. Messtechnische Untersuchungen solcher Öle sind somit zwingend nötig. Das Forschungsvorhaben zielt auf eine Erweiterung und Verbesserung der Ölleitfähigkeitsmessung unter Gleich- sowie Wechselspannungsbeanspruchungen. Das Vorhaben wurde für Gleichspannungsmessung teilweise in die Tat umgesetzt. Basierend auf den beobachteten Abhängigkeiten wird des Weiteren der Ansatz einer empirischen Modellierung der Ölleitfähigkeit angestrebt.

Fig. 1 zeigt die Komponenten des Messaufbaus.

Die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit dieses Aufbaus wurde eingehend untersucht und als ausreichend genau eingestuft. Die Messgenauigkeit des vollständigen Systems zur Leitfähigkeitsmessung setzt sich aus der Toleranz der Spannungsquelle, der Genauigkeit der Strommessung mit dem Elektrometer, den Eigenschaften der Messzelle und dem Ölhandling zusammen. In einer analytischen Betrachtung können die letzten zwei Punkte nicht ohne Weiteres quantifiziert werden, weshalb nur die Fehler durch die Spannungsquelle und die Strommessung Berücksichtigung finden.

Mit Hilfe der Erkenntnisse und Erfahrungen bei zahlreichen Messungen konnte ein Prozess definiert werden, der eine korrekte, reproduzierbare Durchführung von Leitfähigkeitsmessungen ermöglicht.







Fig. 1: Aufbau zur Ölleitfähigkeitsmessung nach der Konstanten-Spannungs-Methode (① DC-Spannungsquelle, ② Messzelle, ③ Elektrometer, ④ Datenerfassung).

Setup for oil conductivity determination with a constant voltage source (① DC source, ② measuring cell, ③ electrometer, ④ data acquisition).

The measurement accuracy of this set-up is investigated analytically and experimentally for different mineral oils. The reproducibility of the test results is also determined. Consequently, this measuring process could be developed for various electrical field strengths and temperatures which allow the determination of insulating materials' conductivity regarding to HVDC applications.



# 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, die den spannungsführenden Leiter zu seiner Umgebung hin umschließen. Im Fall von Mittel- und Hochspannungskabel ist die unmittelbare Umgebung ein elektrisch leitender Schirm mit Erdpotential. Dabei herrschen im Isolationsmedium sehr hohe Feldstärken von mehr als 10 kV/mm. Selbst kleinste Unregelmäßigkeiten (Verschmutzungen, Lufteinschlüsse, Deformierungen), sogenannte Fehlstellen, führen im Bereich der Isolation zu einer lokalen Erhöhung des elektrischen Feldes und zu einer stärkeren Beanspruchung des Isolationsmediums. Übersteigt der Wert der Feldstärke die Durchschlagsfestigkeit des Mediums in 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 eine dauerhafte Schädigung der Isolationstrecke im Bereich dieser Entladung.



Fig. 1: Einseitige Teilentladungsmessung an einem Kabel mit Fehlstellenortung durch Laufzeitbestimmung.

Single sided partial discharge measurement of a cable with fault location detection by time domain reflectometry (TDR).

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



# New methods for partial discharge measurements for on-site tests on cable systems with long lengths

## Dipl.-Ing. Manuel Wild

The electrical power transmission in the medium and high voltage level often relies to use insulated cable systems instead of overhead lines. The isolation 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 isolating medium. Smallest imperfection (moisture, air enclosures and deformations) cause local increasing of the electrical field and thus more stress for the isolation 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 isolation 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 die gemessenen Pulse im Abstand 2550 m, 5100 m und 7150 m. Calibration pulse of 10 nC and the measured pulses at the distances 2550 m, 5100 m and 7150 m.

The condition of the isolation 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 isolation 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.



gewisse Menge an Ladungsträger. Diese Ladungsverschiebung regt einen Impuls an, welcher sich längs des Kabels in beide Richtungen von der Fehlstelle weg ausbreitet. 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 Zeit, 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 nicht angeschlossen, der dort eintreffende Puls erfährt eine Reflexion und wird sich zurück in Richtung Messgerät ausbreiten (Fig. 4). Nun kann die Differenz zwischen direktem und reflektiertem Puls (t<sub>A</sub>-t<sub>B</sub>) ermittelt werden und damit der Ort der Fehlerstelle (Abstand X<sub>PD</sub> vom Messgerät).



Fig. 3: Kalibrierimpuls und zugehörige Reflexion vom fernen Kabelende. Calibration pulse and corresponding far end reflection.

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. Kann sich der direkt ausgebreitete Impuls noch aus dem Rauschpegel abheben, so kann der reflektierte Impuls, welcher mindestens die einfache Kabellänge zu durchlaufen hat, oft nicht mehr detektiert werden. Abhilfe schafft hier eine zusätzliche Messstelle, die zum Beispiel am zweiten Ende des Kabels angeschlossen werden kann. Durch Synchronisierung können die beiden Messstellen kombiniert und dieselbe Berechnungsmethode wie oben beschrieben angewendet werden. Dies 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 the most cases of on-site measurements, the far end of the cable is disconnected from the grid and has 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 by measurement at long cables is not always possible, because of attenuation and dispersion for the travelling pulse through the cable. Even when the directly propagated pulse is well detectable, the reflection from 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 can be used. This improves the sensitivity of onsite measurements and affords more precise PD measurements on long lengths cables and thereby a better condition.



## 5.2 SMART POWER GRIDS

## Zustandsschätzung für Niederspannungsnetze

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

Der elektrische Verteilnetzbetrieb auf Nieder- und Mittelspannungsebene erfolgt derzeit "blind". Es gibt in der Regel keine Messdaten, auf deren Basis der Verteilnetzbetreiber den Netzbetrieb optimieren kann. Der starke Ausbau von Photovoltaikanlagen im Niederspannungsnetz, der kommende Einsatz von intelligenten Messsystemen (Smart Meter) mit variablen Stromtarifen als Anreiz für ein Lastmanagement und zukünftig auch die Elektrofahrzeuge bringen eine große Dynamik mit sich und damit eine Herausforderung für einen sicheren und wirtschaftlich optimierten Netzbetrieb. Die Grundlage dafür ist jedoch die Kenntnis des Zustandes des Niederspannungsnetzes.

Die Zustandsschätzung erlaubt die Bestimmung aller Zustandsgrößen in einem elektrischen Energieversorgungsnetz. Zustandsgrößen sind die Spannungen an den Netzknoten. Nur wenn man alle diese Spannungen kennt, kann man beurteilen, ob sie im gewünschten Bereich liegen. Außerdem kann man erst mit ihrer Kenntnis die Belastung (evtl. Überlastung) der Freileitungen, Kabel und Transformatoren berechnen.

Die Integration einer Vielzahl dezentraler Erzeuger in das Mittel- und Niederspannungsnetz (hier vor allem PV-Anlagen) erfordert nun auch in diesen Netzen die Kenntnis des wahren Netzzustands, d.h. eine Zustandsschätzung wird nötig. Der Austausch auf nationalen und internationalen Tagungen zeigte, dass z.B. in nordeuropäischen Ländern das Thema Netzzustand im Niederspannungsnetz kaum eine Rolle spielt, weil dort viel weniger PV-Anlagen installiert sind. Aber in Mittel- und Südeuropa und anderen sonnenreichen Gegenden der Erde wird die Kenntnis des Netzzustands mit zunehmender Durchdringung sehr wichtig werden.

Wegen der sehr hohen Knotenanzahl muss man sich gut überlegen, welche und wie viele Messwerte für ein gutes, d.h. ausreichend genaues Ergebnis der Zustandsschätzung erforderlich sind. Hier gilt: So viel wie nötig, aber so wenig wie möglich.

Der zukünftig geplante Einsatz von Smart Metern bietet ganz neue Möglichkeiten, da prinzipiell Messdaten, wie bspw. Leistung, Spannung und Strom, von jedem Kundenanschluss nahezu in Echtzeit zur Verfügung stehen können. Die Verfügbarkeit dieser Informationen ist eine wesentliche Grundlage für eine Zustandsschätzung. Mit einem genaueren Echtzeitmodell des Netzes durch die Zustandsschätzung können auch andere Verteilnetzmanagement-Funktionalitäten wie Spannungs- und Blindleistungsoptimierung, Netzwiederaufbau, Lastausgleich und eine optimale Netzkonfiguration zuverlässiger ausgeführt werden.



## State estimation for low voltage networks

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

Accurate and reliable state estimation for low voltage networks is the basis for a flexible operation and control in the current transformation from passive conventional grids to active smart grids. The development in the energy supply has revealed a rapid increase of controllable distributed generators, stationary storage systems and electric vehicles. This development leads to a significantly different kind of system behaviour which must be understood first. With this insight, it is possible to make suggestions for operational network improvements in order to increase the security and efficiency of the distribution system operation. For this, a high chronological and topological resolution of information for the system state estimation in the low voltage level is necessary. The measurement data necessary for state estimation can be obtained either from the distribution system measurement infrastructure or from the installed smart meters at the connection points of the customer.

For the distribution network (medium and low voltage) there are (up to date) several studies such as cost effective network expansion and operation taking into consideration the future integration of more distributed generation (DG) units in Germany. To optimise the integration of renewable energies in distribution networks, not only pure active power feeding but also reactive power control may be used for better operation.

The focus of this project is to develop a state estimator for low voltage networks and obtain the technical feasibility of using smart meters and their measurements for low voltage network observability and controllability.

However, the future use of smart meters is offering new types of measurements in the low voltage level, such as active power, reactive power, voltage and current measurements at each customer connection almost in real time. The availability of this information is an essential basis for state estimation in low voltage networks. With a more accurate real-time model of the network through the distribution state estimation, other operational functions such as active and reactive power optimisation, network restoration, load balancing and optimal network configuration can be more reliably performed and controlled.



#### Algorithmus und Konzept der Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen

Da die Messdaten in Niederspannungsnetzen zu einem bestimmten Zeitpunkt für eine Zustandsschätzung selten ausreichen, müssen virtuelle Messdaten erzeugt werden. Verfügbare Messdaten eines Smart Meters sind  $P_{PV}$ ,  $P_{Last}$ ,  $Q_{Last}$  und U, welche die Anforderung zur Redundanz der Messdaten nicht erfüllen können. Als zusätzliche Pseudo-Messungen werden die Leistungen zwischen zwei Knoten  $P_{ij}$  und  $Q_{ij}$  durch Lastflussberechnung ermittelt und zusammen mit den von Smart Metern gelieferten Echtzeit-Messungen an den Zustandsschätzer übergeben. Um die Pseudo-Messungen möglichst genau zu schätzen, wird hier das Standardlastprofil H<sub>0</sub> und ein PV-Leistungs-Skalierungsfaktor verwendet. Die Pseudo-Messungen haben eine höhere Ungenauigkeit als Echtzeit-Messungen. Für ein Konfidenzintervall von 95,45% wird bei den Pseudo-Messungen eine Genauigkeit von 50% angenommen. Bei den Echtzeit-Messungen für U wird eine Genauigkeit von 1% und bei den Echtzeit-Messungen von P und Q eine Genauigkeit von 3% sowie dasselbe Konfidenzintervall angenommen. Bild 1 zeigt den Ablauf des Algorithmus.



Fig. 1: Flussdiagramm der Zustandsschätzung für Niederspannungsnetze. Flow diagram for State Estimation in the low voltage networks.

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



#### Algorithm and concept for low voltage state estimation

The available measurement data from smart meters  $P_{PV}$ ,  $P_{Load}$ ,  $Q_{Load}$  and U in low voltage networks at a point of time are insufficient for state estimation due to the high number of state variables compared to the available measurements. A new method is introduced in order to increase the number of available measurement data to fulfill the state estimation observability requirements. As shown in the figure 1, additional power flow  $P_{ij}$  and  $Q_{ij}$  measurement data were generated through a load flow calculation based on the standard load profile  $H_0$  and the PV generation profiles together with the available load power measurements  $P_{Load}$ ,  $Q_{Load}$  from the installed smart meters. These generated measurement data will be modeled as pseudo measurement with 50% accuracy and 95.45% confidence level. The smart meters voltage measurements U from the households and the generated active power  $P_{PV}$  will have 1%, 3% respectively for the same confidence level. All these measurements (pseudo and real time) together with the network topology will be the input for the state estimator, which is developed and programmed based on the weigthed least squares (WLS) method.



## Chancen und Auswirkungen einer elektrischen Wärmebereitstellung auf intelligente 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 und Öl gedeckt. Einer der wesentlichen Vorteile von Wärmeenergie gegenüber elektrischer Energie ist dessen einfachere Speicherbarkeit, z.B. in Warmwasserspeichern zur Warmwasserversorgung von privaten Haushalten. Eine Möglichkeit den Wärmebedarf zu decken stellen sogenannte Wärmepumpen dar. Diese transportieren unter Aufnahme von elektrischer Energie Wärme aus der Luft oder dem Boden in die Heizungsanlage. Der Reiz einer solchen Wärmebereitstellung liegt darin, dass unter guten Bedingungen das mehr als Vierfache an elektrischer Energie in Form von thermischer Energie "gewonnen" wird. In Kombination mit einem häuslichen Wärmespeicher können daher Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe und Wärmeverbrauch des Haushalts zeitlich entkoppelt voneinander erfolgen. Diese zeitliche Verschiebbarkeit und der oben genannte Faktor zwischen verrichteter elektrischer Arbeit und gewonnener thermischer Energie macht die Wärmepumpe als elektrische Form der Wärmebedarfsdeckung und potenziell auch zur Erbringung von Netzdienstleistungen besonders interessant.

Die bisherige Arbeit konzentrierte sich auf die parallele Modellierung zweier "Submodelle": ein Submodell, das ein elektrisches Niederspannungsnetz mit allen relevanten Verbrauchern und Betriebsmitteln berücksichtigt, und ein zweites Submodell zur Nachbildung des thermischen Verhaltens von dezentralen Heizungssystemen (bisher Wärmepumpen und -speicher). Der wesentliche Vorteil dieser Herangehensweise ist die gleichzeitige Simulation des thermischen und elektrischen Bedarfs von beispielsweise privaten Haushalten und eine Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten. Insbesondere können so die Auswirkungen einer dezentralen elektrischen Wärmebereitstellung auf elektrische Verteilnetze unter Berücksichtigung von Wärmebedarf und –verlusten auf Haushaltsseite untersucht werden.

Weiterführende Arbeiten werden das thermische Modell um zusätzliche Formen der Wärmebereitstellung, wie beispielsweise Kraft-Wärme-Kopplung für dezentrale Anwendungen ("Mini-Blockheizkraftwerke"), erweitern. Da der Projektfokus nicht ausschließlich auf Wärme- und Kälteanwendungen, sondern allgemein auf der Berücksichtigung verschiedener Energieträger liegt, sollen weitere Smart Grid relevante Technologien bzw. Anwendungsfälle, wie zum Beispiel Power-to-Gas Anlagen, berücksichtigt werden.



## Chances and impacts for smart distribution grids by an electrical provision of heat

## 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). Compared to electrical energy, the easier storability of thermal energy, such as in warm water storages for hot water supply, is one of the major advantages of thermal energy. Amongst others, heat pumps offer a possibility to provide thermal energy electrically. This system transports thermal energy coming from the ground or air into the heating system. The attractiveness of such heating systems is explained by the fact that thermal energy "harvested" by the heat pump exceeds the electrical energy used for this by a factor of approximately 4. When combined with heat storages, thermal energy demand can be deferred from the actual thermal energy provision. Given this deferability and the factor between thermal energy provided by the heat pump and electrical energy used, heat pumps constitute a very interesting option to cover thermal energy demand electrically and to potentially provide ancillary services for the grid.

Previous work focused predominantly on the parallel development of two "submodels": a sub-model, considering the electrical grid with all the relevant loads and electrical equipment, and a thermal sub-model representing the thermal behavior of the dispersed heating systems (up to now: heat pumps and storages). The essential advantage of such an approach is the simultaneous simulation of the electrical and thermal energy demand e.g. of private households and their interdependencies. Especially the impacts of a dispersed heat provision under consideration of the household's thermal energy needs and losses can be investigated with such a model.

Further work will extend the thermal sub-model by additional possibilities of heat provision such as "micro combined heat and power units" for an alternative decentralized generation of heat energy. As the focus of the project does not solely concentrate on thermal energy but moreover incorporates various energy carriers (e.g. gas), additional relevant smart grid use cases such as power-to-gas systems are being considered subsequently.

From the perspective of the project "Dynamic simulation and optimization of decentralized energy concepts", to which the above mentioned work is assigned to, the so-far developed "regional model" will be connected to a "supraregional" model developed by the Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER).



Aus Sicht des Projektes "Dynamische Simulation und Optimierung dezentraler Energiekonzepte", in welches die oben genannte Arbeit eingebettet ist, soll das sich in der Entwicklung befindliche und hier beschriebene Modell mit einem überregionalen Modell seitens des Instituts für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER) gekoppelt werden. Fokus des überregionalen Modells ist die volkswirtschaftlich optimale Ausgestaltung einer künftigen regenerativen Energieversorgung unter Berücksichtigung mehrerer Energieformen wie Strom, Wärme und Gas innerhalb Baden-Württembergs.

Da, bedingt durch die geplante künftige sehr hohe und volatile Einspeisung durch erneuerbare Energien, die Versorgungssituation auf Verteilnetzebene nicht mehr durch eine einfache Aggregation der Größen beschrieben werden kann, birgt die Kopplung der beiden Modelle den wesentlichen Vorteil, dass Aussagen hinsichtlich der volkswirtschaftlichen Optimierung insbesondere unter Berücksichtigung der Situation auf den unteren Spannungsebenen erfolgen. Hierdurch können abschließend Empfehlungen für künftige Investitionen im Sinne einer optimalen und energiespartenübergreifenden Energieversorgung Baden-Württembergs ausgesprochen werden.

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 assoziiertes Projekt. Die Förderung des Vorhabens erfolgt durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.



The focus of this supraregional model is 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 from an economical point of view.

Due to the planned, very high and volatile regenerative power supply, the situation on distribution grid level can no more be described in an aggregated way. Therefore, the coupling of these two models has the major advantage of being able to investigate the economic optimality under special consideration of the individual situations on the lower voltage levels. By doing so, it will be finally possible to derive recommendations for future investments in terms of an optimal energy supply in Baden-Wurttemberg considering various energy carriers.



Fig. 1: Zusammenfassung des methodischen Vorgehens (Quelle: eigene Darstellung). Summary of methodology (source: own illustration).

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 vermieden werden. Gegenstand dieser Arbeit ist unter anderem die Untersuchung der genannten Netzkomponenten, die ein Verzögern und Vermeiden von klassischen, kostenintensiven Netzausbauten ermöglichen können.

Potenzielle Technologien, die hier in Frage kommen, sind Batteriespeichersysteme (BSS) und regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT). Während das Speichersystem u.a. Energiemengen aus der Mittagsspitze der Photovoltaikeinspeisung verlagern kann, hat der Transformator die Möglichkeit, im Erzeugerfall die Spannung an der Ortsnetzstation durch Variation des Übersetzungsverhältnisses im laufenden Betrieb unter den eigentlichen Spannungszielwert im Lastfall zu setzen. Dadurch kann, abhängig von der Netztopologie, eine bessere Ausnutzung der Spannungsbänder erreicht werden, was faktisch zur verbesserten Integration erneuerbarer Energien speziell im Niederspannungsnetz beiträgt.



## 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 loadflow in the low voltage grid changing the behaviour from a consumer to a power supplier. Because of the reversed load flow the voltage situations changes mainly at the outer nodes to levels which would have never been reached without them. 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 changing loadflows and voltage conditions are potential violations of voltage band limitations during peak generation phases. Over and above changing requirements for an optimized distribution network operation have to be faced by the network operator because of fundamental changes to the classical top-down supply principle. The resulting load flow fluctuations induced in the grid are driving the distribution network more often into 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 to the distribution grid scenery? Subject of this work is amongst other things the analysis of these grid components, which are possibly able to delay or even avoid classical, cost intensive grid reinforcements.

Potential technologies to be concidered are battery energy storage systems (BSS) and controllable distribution transformers (rONT). Whereas battery energy storage systems are able to e.g. shift amounts of energy away from photovoltaic peak times at noon, the controllable distribution transformers enable the possibility to change the transformation ratio in active operation. By doing this the transformer switches the voltage target value below the target value in a normal load case at the substation to reduce the spread of the voltage band caused by photovoltaic generation peaks. With this operation mode a better use of the voltage bands can be achieved resulting in a better integration of renewable energy sources in distribution grids. Both components (Fig. 1) can participate in reducing or shifting the needed voltage bands in their own specific way that physical limitations to a distribution grid operation are not exceeded. Therefore digging tons of copper wire in streets can be dispensable.



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.

Beide Komponenten (Fig. 1) können durch ihre Wirkungsweise an einer Reduktion oder Verlagerung der Spannungspegel so teilhaben, dass die physikalischen Grenzen des Verteilnetzbetriebs weiterhin eingehalten werden, ohne dass Kupfer im Boden vergraben werden muss. Fig. 2 zeigt den Spannungsverlauf an einer Ortsnetzstation (ONS) über drei Tage hinweg. Die dünne Kurve zeigt die Spannung im unbeeinflussten Fall, welche an der ONS anliegt. Die dicke Kurve zeigt einen möglichen Spannungsverlauf nach einer Beeinflussung durch einen regelbaren Ortsnetztransformator, welche beispielhaft zeigt, dass die Spreizung und Höhe des benötigten Spannungsbandes deutlich reduziert werden kann.

Eine weitere Möglichkeit äußere Netzknoten oder speziell jene, welche eine große Erzeugeranlage anbinden, zu beeinflussen sind Batteriespeichersysteme (BSS). Diese können Einspeisemengen z.B. in die Abendstunden verlagern, wenn die Netze die Energie weiterleiten können, ohne an ihre Spannungsgrenzen zu kommen, siehe Fig. 3. Die dünne Kurve zeigt die Leistungskurve an der PV-Anlage mit inaktivem Batteriespeichersystem. Die dicke Kurve zeigt dieselbe PV-Anlage, deren Einspeiseleistung durch das Batteriespeichersystem beeinflusst wird, indem das BSS Energie absorbiert, verlagert und wieder einspeist.

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 herauskristallisiert 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, da notwendige Zwischenschritte auf dem Weg zu einem Smart Grid dann bereits bekannt sind.



Fig. 5 shows an overview of the voltage curve at a substation (ONS) over three days. The thin curve shows the voltage at the ONS not influenced by the transformer. The thick curve represents the voltage at the ONS influenced by the controllable distribution transformer. It can be seen that a significant reduction of the voltage spread and maximum values can be achieved by influencing the voltage with a controllable distribution transformer.



Fig. 2: Spannungsverlauf an ONS, beeinflusst und unbeeinflusst durch rONT. Voltage curve at substation, not influenced and influenced by rONT.

Another option to influence the voltage at the outer nodes or especially at nodes with big generation units are battery energy storage systems (BSS). These systems can be used to shift generated power to times, e.g. evening hours, when the grid is able to transmit the energy without reaching voltage limitations, see Fig. 6. The thin curve shows the power curve at a PV device without a BSS. The thick curve shows the same PV device with an active BSS absorbing power (1) and feeding it in again (3). In state (2) the BSS is idle cause of reached capacity limitations.





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 simulation programs it is possible to analyze and crystallize further requirements of the future intelligent or "smart" grids. After identifying comonalities it is possible to retain cuttingedge 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.



## Simulation und Modellreduktion elektrischer Netze mit intelligenten Elementen

### Dipl.-Ing. Christoph Kattmann

Durch die zunehmende Verbreitung von Photovoltaikanlagen, elektrischen Fahrzeugen mit intelligenten Ladestrategien und anderen Technologien wie Demand-Side-Management wandelt sich die Rolle der Niederspannungsnetze bei der Energieversorgung. Bisher waren in den Netzen der untersten Spannungsebene fast ausschließlich passive, ungeregelte Verbraucher zu finden. In der Zukunft sind 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 dafür eine Felderprobung nur eingeschränkt in Frage kommt, gewinnt eine umfassende Simulation der Netzelemente und ihrer Auswirkungen auf den Netzzustand an Bedeutung.

Die Netzsimulation wird seit Jahrzehnten für Berechnungen in höheren Spannungsebenen eingesetzt, dabei werden die Niederspannungsnetze oft als einzelne Netzknoten mit aggregierter Last betrachtet. Dies ist mit der Verbreitung der erwähnten aktiven Elemente nicht mehr möglich. Der Zustand in den Ortsnetzen muss ebenfalls durch Simulation ermittelt werden, was durch den schieren Umfang der Netze und die komplexen Steuer- und Regelalgorithmen sehr rechenaufwändig ist. Durch Einflüsse wie den Einstrahlungsverlauf auf PV-Anlagen und die Kommunikation zwischen Netzelementen ist der Lastverlauf einzelner Niederspannungsnetze auch nicht mehr unabhängig voneinander.

Um eine Simulation mit angemessenem Zeitaufwand durchführen zu können, ist daher eine Vereinfachung des Netzmodells unumgänglich. Die Entwicklung von Techniken zur Modellreduktion und effektiven Simulation von Niederspannungsnetzen mit intelligenten Elementen ist deshalb ein Thema des Forschungsprojekts "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.

Neben der Optimierung herkömmlicher Simulationsmethoden stehen dabei Techniken zur Bildung von Netzäquivalenten im Fokus, die das komplexe und dynamische Verhalten der Niederspannungsnetze der Zukunft nachbilden, sich aber in vertretbarer Zeit berechnen lassen.



## 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, noncontrolled consumers. 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 these 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.

Power system simulation has been used for decades, but mainly in higher voltage grids. Low-voltage grids were mostly represented as grid nodes with an aggregated load. With the increasing integration of the mentioned elements, this approach is no longer valid. The state of low-voltage distribution grids has to be evaluated using simulation, but the extent and number of those grids render the simulation extremely computationally expensive. In addition, because of global influences like irradiation on PV plants and communication between grid elements the states of different grids are no longer independent.

In order to conduct simulations in a reasonable timeframe, a simplification of the grid model is hence indispensable. The development of techniques for model reduction and effective simulation of low-voltage grids is therefore one subject of 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. The project is funded by the Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden Württemberg.

Apart from the optimization of traditional simulation methods, the focus concentrates on the design of grid equivalents that mimic the complex and dynamical behavior of the low-voltage grids of the future, while being computable with feasible time and effort.



## Mikronetze, der Weg zu flexiblen Stromnetzen

#### M.Sc. Mohsen Nemati

Auf der Niederspannungsebene können vernetzte Generatoren eine neue Klasse von Versorgungssystemen bilden: das Mikronetz. Ein Mikronetz besteht aus mindestens einem Erzeuger und einer Last. Zum Ausgleich von Abnahme- bzw. Einspeisespitzen ist der Einsatz eines zusätzlichen Energiespeichers denkbar. Ein privater Haushalt mit eigener Photovoltaikanlage kann ein Mikronetz darstellen, ebenso wie beispielweise ein Krankenhausnetz oder sogar ein ganzes Niederspannungsnetz.

Durch die Anbindung an das übergeordnete Versorgungsnetz werden zwei Betriebsarten möglich. Zum einen kann das Mikronetz im Netzparallelbetrieb laufen, wobei eine Verbindung zum Versorgungsnetz besteht. Am zentralen Verknüpfungspunkt, dem sogenannten Point of Common Coupling (PCC), ist das Mikronetz über einen automatischen Transferschalter (Static Transfer Switch) mit dem Verbundnetz gekoppelt.

Zum anderen ist der Betrieb als eigenständige Insel möglich: im Fall einer Störung im übergeordneten Netz erlaubt das Mikronetz-Konzept das Öffnen des Verbindungsschalters am Verknüpfungspunkt, sodass das Mikronetz während der Störung als Inselnetz stabil weiterbetrieben werden kann und somit die Versorgungssicherheit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Netzes erhöhen kann. Die Wahrscheinlichkeit einer Versorgungsunterbrechung oder gar eines Blackouts reduzieren sich durch Inselnetzbildung und verschiedene Lastmanagementverfahren deutlich. Auch durch verteilte Energieerzeugung und Energiespeicher wird die Versorgung weiter sichergestellt.

Fig.1 zeigt die allgemeine Struktur eines Mikronetzes.



Fig. 1: Allgemeines Konzept eines Mikronetzes mit verschiedenen Bestandteilen. General Concept of Microgrids with Different Components. (Source: www.osii.com)



## Microgrids, the way to more flexible power grids

#### M.Sc. Mohsen Nemati

Microgrids are generally defined as low voltage networks with distributed generators, together with controllable loads and local storage devices for balancing the consumption and generation. For example a private household with its own photovoltaic modules, electrical grid of a hospital or also entire low voltage grid can build different microgrids.

The main feature of microgrids is - although they operate mostly connected to the distribution network – that they can be automatically transferred to an islanded mode in case of faults in the upstream network and can be resynchronized after restoration of the upstream network voltage. Fig. 1 shows the general concept of microgrids with different components.

The operation of microgrids offers distinct benefits to customers and utilities, i.e. increasing security of supply, reduction of overall energy consumption, improved energy efficiency, losses reduction and improvement of supply reliability. Local power generation and storage, islanding capability and load management allow portions of the grid and critical facilities to operate independently of the larger grid when necessary and thus reduce blackouts. Furthermore microgrids allow consumers to acquire power in real-time at lower costs, while using local generation to limit peak power costs. Because of these benefits microgrids have been proposed as novel distribution network architecture within the smart grids concept, providing higher flexibility and security of supply.

Most of the distributed energy generators in microgrids are DC-sources. The important DC components in microgrids can be photovoltaic modules, fuel cells and batteries as storage devices. For further research in the field of dynamics of microgrids, genetic dynamic models of these components have been developed. First these parts have been modeled in Matlab-Simulink and then in the network simulation programs PSS®Netomac and PSS®SINCAL. The major challenge in the operation of microgrids is the transition between two main modes, from islanded mode to connected mode and vice versa. The stability of microgrids as well as frequency and voltage quality are the most important points in microgrids investigations. In order to fully exploit the possible advantages of inverter-based islanded microgrids, adequate control strategies that are specifically designed for the inverters in the islanded microgrid need to be developed. Therefore the controlling concepts, methods and strategies, which play a significant role in operation quality of these grids have been investigated. Single-phase and three-phases inverter models were developed for dynamic AC components. Additionally, various methods and possibilities to control the active and reactive power in microgrids have been developed.



Zahlreiche der in Mikronetzen vorkommenden Einspeiseeinheiten liefern Gleichstrom. Hierzu gehören unter anderem Photovoltaikmodule und Brennstoffzellen sowie die Batterie als Speichereinheit.

Zu weiteren Untersuchungen der Mikronetze wurden am IEH genetische dynamische Modelle für diese Komponenten entwickelt. Die Modelle wurden zunächst in Matlab-Simulink und dann in PSS®Netomac und PSS®SINCAL untersucht und getestet.

Herausforderungen beim Betrieb von Mikronetzen bestehen beim Wechsel zwischen Insel- und Verbundbetrieb sowie in der Stabilisierung von Spannung und Frequenz im Inselnetzbetrieb. Das Konzept der Mikronetze stellt hohe Anforderungen an die Regelstrategie, damit Frequenz- bzw. Spannungstoleranzbänder nicht verletzt werden. Hierzu wurden dynamische Modelle für ein- und dreiphasige Wechselrichter entwickelt. Zusätzlich haben wir verschiedene Methoden und Möglichkeiten zur Regelung der Wirk- bzw. Blindleistung in Mikronetzen weiter entwickelt. Die Reglermodelle der unterschiedlichen Erzeuger können die Frequenz- und Spannungshaltung im Inselnetzbetrieb und im Verbundnetzbetrieb bei symmetrischen oder auch unsymmetrischen Mikronetzen sicherstellen.

Weiterhin soll die Integration der Speichertechnologie in Mikronetzen untersucht werden. Eine Auslegung von Batteriespeichern ist dabei immer abhängig vom gewählten Anwendungsfall. Bei der Nutzung von Batteriespeichern in einem Mikronetz spielen Dimension und Ort des Speichers eine bedeutende Rolle. Aus diesem Grund wurde ein Automatisierungstool in VBA zur Dimensionierung und Platzierung der Batterie in typischen Mikronetzen entwickelt. Damit werden die notwendige Speicherdimension und der geeignete Ort festgestellt, die aus der Sicht von Verteilungs- und Mikronetzen zur Einbindung dezentraler Einspeisungen notwendig sind. Dies geschieht, um Vorteile der Batteriespeicheranlagen vollständig widerspiegeln zu können und verschiedene Probleme im Netz, wie z. B. Spannungsschwankungen und Betriebsmittelüberlastungen, zu vermeiden. Der Algorithmus kann die verschiedenen Lösungen bewerten und stellt ein einfach zu bedienendes Optimierungstool dar. Fig. 2 zeigt den Batteriespeichereinsatz in einem Beispiel-Mikronetz.

Die zukünftigen Arbeiten in diesem Bereich konzentrieren sich auf folgende Themen:

- Kombination und Simulation der entwickelten Komponentenmodelle im Rahmen eines Mikronetzes mit verschiedenen Strukturen
- Weiterentwicklung eines intelligenten Energiemanagementsystems
- Optimierung des Betriebs von Mikronetzen vor, während und nach dem Übergangsmodus
- Komponentenmodell eines Endkunden (Smart Home) mit regelbaren, lokalen Anlagen
- Entwicklung geeigneter Auswerteverfahren zur Analyse der Kosten- und Nutzeneffekte



The controller models of the different distributed generators can help to stabilize frequency and voltage in the islanded mode as well as in connected mode for balanced and unbalanced microgrids.

Furthermore the integration of storage devices in microgrids has been investigated. The use cases of battery storages define how they should be designed and installed in the network. The most important aspects of battery storage dimensioning and placement from the perspective of distribution networks and microgrids with decentralized supply to avoid voltage deviations and equipments overload have been considered. A tool for the optimization of battery integration in microgrids has been developed. Using this tool together with PSS®SINCAL enables the user to analyze different application areas of battery storage systems in microgrids for different purposes such as minimization of equipment loading, voltage deviation and electrical losses. The introduced program is capable of evaluating and integrating different existing solutions, so that they could be extended to an easy-to-use optimization tool. Fig. 2 shows the integration of battery storage system in a sample microgrid.



Fig. 2: Speichereinsatz im Mikronetz. Storage system integration in microgrid (Source: Fraunhofer).

The future work at IEH will focus on following topics:

- Combination of the developed models and simulation critical case studies
- Further development of smart energy management systems
- Optimization of microgrids operation before/in/after transition modes
- Development of smart home models with controllable local devices
- Development of an evaluation method to analyze the cost-benefits



## Einfluss von E-Mobility auf zukünftige Netztopologien

### Dipl.-Ing. Alexander Probst

Elektromobilität hat das Potential, in den nächsten Jahren zum Massenmarkt zu werden. Dies hat verschiedene Gründe, wie die Umweltfreundlichkeit und der verringerte CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Elektroautos. Bereits bei dem derzeitigen deutschen Strommix können Elektroautos mit den sparsamsten Dieselmodellen bei den Emissionen konkurrieren. Darüber hinaus wird sich bei einer zunehmenden Verbreitung von erneuerbaren Energien ein noch günstigeres Bild für die Elektroautos ergeben. Abgesehen davon sind Elektroautos lokal emissionsfrei und auch deutlich leiser als konventionelle Fahrzeuge. Dies wird insbesondere in Metropolen die Lebensqualität erhöhen.

Die Frage, die sich daraus ergibt, ist, ob das heutige Stromnetz in der Lage dazu ist, künftigen Elektroautos ausreichend Ladeleistung bereitzustellen. Wie viele Elektroautos verkraftet das Netz? Und gibt es eventuell sogar Möglichkeiten für die Elektroautos sich an Netzdienstleistungen zu beteiligen und so das Netz zu entlasten? 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.



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

Da in Zukunft einige Haushalte ein Elektroauto laden werden und bereits heute viele Haushalte eine Photovoltaikanlage besitzen, müssen die heutigen Netzplanungsgrundsätze zur Kabeldimensionierung überdacht und angepasst werden. Zu diesem Zweck müssen zukünftige Lastprofile von Elektroautos abgeschätzt werden, was in Fig. 1 skizziert ist. Hierzu ist es notwendig, Annahmen über zukünftige Ladeleistungen und Durchdringungsgrade von Elektroautos zu treffen.



## Effects of electric mobility on future grid topologies

#### **Dipl.-Ing. Alexander Probst**

Electric Mobility has the potential to become a mass market. There are several reasons to sustain this assumtion, such as the environmental friendliness of electric cars and the associated reduction of  $CO_2$  emissions. Even with the current German electricity mix, electric cars can already compete with the most fuel-efficient diesel models in emissions. In addition, an increasing share of renewable energies would even amplify these advantages. Beside this, electric vehicles are locally emission-free and quieter than conventional vehicles. This would improve the quality of life especially in metropolitan areas.

This raises questions, whether the current power grid is able to provide sufficient charging power for the future electric vehicles? How many cars can it handle? And there might even be opportunities for electric cars to participate in grid services. The aim of my work at the 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.



Fig. 2: Spitzenlast pro Haushalt aus Messdaten mit und ohne Elektromobilität. Peak load per household out of measurement data with and without E-Mobility.

Today, households are already having photovoltaic systems and some of them will have an electric vehicle in the near future. This causes the need for an adaption of today's network planning principles for cable diameter sizing accounting for these new technologies. Future load profiles of electric vehicles can 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, welches beispielsweise versucht, das Fahrzeug preisoptimal zu laden, ein solches Profil beeinflussen. In Kombination mit realen Messdaten von Haushaltslasten lässt sich nun abschätzen, welche Leistung bei einer bestimmten Anzahl an Haushalten in einem Niederspannungsabgang auftreten kann (siehe Fig. 2).

Es ist deutlich zu sehen, dass Elektromobilität, insbesondere bei kleinen Anzahlen an Haushalten, zu einer signifikanten Erhöhung der auftretenden Spitzenlast führt, was darin begründet liegt, dass diese vornehmlich nach der Arbeit in den Abendstunden geladen werden würden, zu denen ohnehin schon die Last sehr hoch ist. Allerdings kann das preisoptimierende Lademanagement zu einer klaren Entlastung führen, da die Preise in der Nacht deutlich günstiger werden, wenn das Netz ohnehin Kapazitäten frei hat.

Dennoch kann es vorkommen, dass manchmal der Preis aufgrund der Einspeisung Erneuerbarer dann günstig ist, wenn das Netz bereits an seinen Kapazitätsgrenzen betrieben wird. Dies kann teilweise sogar zu einer Verschärfung der Problematik führen. Tabelle 1 zeigt von 10.000 Simulationen, wie häufig das Spannungsband verletzt wird. Dabei wird zwischen dem dynamischen Tarif, der sich an den täglich wechselnden Strombörsenpreisen orientiert, und dem statischen Tarif, der dem durchschnittlichen Börsenpreis entspricht, unterschieden. Außerdem werden die drei Fälle "Sofortiges Laden", "Preisoptimierung" und "Optimierung und Regelung" zur Einhaltung der Restriktionen differenziert.

Dabei wird deutlich, dass sowohl im Sommer als auch Winter häufig das Spannungsband verletzt wird. Allein durch die preisliche Optimierung des Ladevorgangs von Elektroautos kann die Häufigkeit von Unterspannungen reduziert werden. Bemüht man zusätzlich eine Regelung, die die Ladeleistung bei Unterspannung reduziert, kann die Häufigkeit von Unterspannung weiter reduziert werden. Ganz vermieden werden kann sie jedoch nicht, da manchmal das Netz auch ohne Elektromobilität bereits zu stark belastet wird.

Zukünftige Untersuchungen werden sich darauf konzentrieren, die Methodik zur Analyse von Netzen auf ihre Tauglichkeit hin zu verfeinern. Darüber hinaus sollen nachhaltige Konzepte für ein Lastmanagementsystem entworfen und verglichen werden.



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 could affect the profiles in a way such that the vehicles are charged price optimally. In combination with real measured data, it can now be estimated which peak load is to be expected by considering a certain number of households (see Fig. 2).

It is clear to see that electric mobility leads to a significant increase in the occurring peak load, especially for small numbers of households. This arises from the fact that they would be charged mainly after work in evening hours when there is already a high demand for electricity. However, the use of a price optimizing load management system results in a considerable reduction of peaks, because electricity is cheaper at night when the load is low.

Nevertheless, it is possible that sometimes the price is favorable due to the supply of renewable when the network is already operating at its capacity limits. This can sometimes even lead to a worsening of the problem. Table 1 shows the incidences of under voltage out of 10,000 simulations. A distinction is made between the dynamic tariff, which is based on the daily changing energy exchange rates, and the static tariff that is equal to the average market price. In addition, the three cases "Immediate Charge", "Price Optimization" and "Optimization and Control" to comply with the restrictions are distinguished.

|                    | Immediate<br>Charge | Price<br>Optimization | Optim. with<br>Control |
|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Winter, stat. rate | 1067                | 42                    | 6                      |
| Winter, dyn. rate  | 1067                | 180                   | 9                      |
| Summer, stat. rate | 252                 | 4                     | 0                      |
| Summer, dyn. rate  | 252                 | 47                    | 1                      |

Tab. 1: Häufigkeit von Unterspannungen bei 10.000 Simulationen. Incidences of under voltage during 10.000 simulations.

It becomes clear that both in summer and winter the voltage band is frequently violated. By only charging vehicles price optimally, the number of incidences can be reduced. Additionally, if a control is utilized, which reduces the charging power when measuring under voltage, the number of incidences can be further reduced. However, it cannot be reduced to zero in every case, because sometimes the grid is overloaded even without electric vehicles.

Future work focuses on the methodology for the analysis of low voltage grids regarding their stability to a large number of electric vehicles. In addition, sustainable concepts for load management systems are developed and compared.



## 5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

## Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen

#### Dipl.-Ing. Dennis Burger

Mittelspannungsschaltanlagen dienen dem kontrollierten Zu- und Abschalten von elektrischen Energieverbrauchern und -erzeugern zur Mittelspannungsebene eines Energieverteilnetzes. Als Mittelspannung werden in der elektrischen Energietechnik Spannungen von 1 kV bis 40 kV bezeichnet. Der Einsatz von Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) als Isolationsmedium für Mittelspannungsschaltanlagen bringt eine deutliche Verringerung des Platzbedarfs und des Wartungsaufwandes gegenüber luftisolierten Anlagen (AIS) mit sich.

Aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit hat der Einzug von SF<sub>6</sub> als Isolationsmedium für neue Herausforderungen in der Schaltanlagentechnik gesorgt:

Zum einen haben deutlich verringerte Isolationsabstände für ein nahes Zusammenrücken von Primär- und Sekundärelementen und damit für stärker ausgeprägte Beeinflussungsmechanismen gesorgt. Andererseits generieren Trennschalter unter SF<sub>6</sub> aufgrund der höheren Durchschlagfeldstärke breitbandigere transiente Störgrößen. Höhere Amplituden sowie höhere Frequenzinhalte der sekundärseitigen Störgrößenbeaufschlagung folgen der frequenzbedingt stärkeren Kopplung von der Primär- auf die Sekundärseite (z.B. auf Stromwandlerleitungen).



Zur Untersuchung des EMV-Verhaltens wurde eine dreipolig gekapselte,  $SF_6$ isolierte Testschaltanlage konfiguriert. Sie besteht aus drei Schaltfeldern, wobei jeweils eines für die Einspeisung bzw. den Anschluss einer Last vorgesehen ist. Das dritte Schaltfeld dient der Installation von Sekundärtechnik und zur Messung der Störgrößen.



## Electromagnetic compatibility of medium voltage switchgear

## Dipl.-Ing. Dennis Burger

Medium voltage switchgears are built for the controlled connection and disconnection of electric energy consumers and producers to the medium voltage level of power distribution grids. The medium voltage level of power grids ranges from 1 kV up to 40 kV. Using sulfur-hexafluoride (SF<sub>6</sub>) as the insulating medium in switchgear results in a significant reduction in space requirements and in maintenance expenses compared to air-insulated switchgear (AIS).

In respect of electromagnetic compatibility, the use of  $SF_6$  in switchgear technology has lead to some new challenges:

On the one hand, the significantly reduced insulation distances moved primary and secondary equipment closer together. Thus, the interference mechanisms get more severe. On the other hand,  $SF_6$  insulated disconnectors generate more broadband transients due to the higher breakdown field strength of  $SF_6$ . Disturbances with higher amplitudes and larger frequency spectrum will reach secondary equipment due to the frequency dependent stronger coupling from the primary to the secondary side (e.g. to current transformer wires).



Fig. 2:

Zündung zwischen den Schaltkontakten beim Öffnen des Trenners. Ignition between the disconnector contacts during an opening operation.



### Fig. 3:

Spannungsmessung (der Einspeiseund der Sammelschienenseite) während der Zündvorgänge. Voltage measurement (of the feeding side and busbar side) during the disconnector arcing process.



#### Entstehung transienter Störgrößen durch Trennschalterbetätigung

Betrachtet wird die spannungsmäßige Trennung eines leerlaufenden Sammelschienenabschnitts durch einen Trennschalter. Unmittelbar nach der galvanischen Trennung der Schalterkontakte befindet sich das abgetrennte Sammelschienenstück aufgrund der verbleibenden Ladungsträger auf einem konstanten Potential (trapped charge). Das Potential des Gegenkontakts verändert sich jedoch mit der Frequenz des speisenden Netzes. Die zunehmende Potentialdifferenz führt zu einem proportional dazu ansteigenden elektrischen Feld zwischen den Trennerkontakten. Schließlich wird die Durchschlagfeldstärke des Isolationsmediums (Luft oder SF<sub>6</sub>) überschritten und eine Durchzündung führt zur schlagartigen Umladung des leerlaufenden Sammelschienenstücks. Sobald die Umladung vollzogen ist, erlischt der Lichtbogen und der Prozess startet von Neuem.



Fig. 4:

Gleichtakt Störstrom auf der Stromwandlerleitung (sekundärseitig) während der Trennung eines leerlaufenden Sammelschienenabschnitts. Common mode disturbance current through the secondary wiring of the current transformer during a disconnector's breaking operation.

Die Zündungen erfolgen so lange, bis die Trennerkontakte einen hinreichend großen Abstand erreicht haben, um die Durchschlagfeldstärke des Isolationsmediums nicht mehr zu überschreiten. Mit dem Abstand der Trennerkontakte steigt die Amplitude der durch die Umladung ausgelösten transienten Wanderwellen (siehe Fig. 3).

Die auftretenden Störgrößen werden mit Hilfe eines Hochspannungstastkopfes (bis 20 kV), diversen Stromzangen und einer E-Feldsonde gemessen. Anschließend werden die Messdaten mit verschiedenen Softwaretools weiterverarbeitet, um eine detaillierte Analyse im Frequenz- und Zeitbereich zu ermöglichen.

Ziel der Forschungsarbeit ist, umfassende Klarheit über die elektromagnetischen Vorgänge während Schalthandlungen in Mittelspannungsschaltanlagen zu schaffen. Es sollen Konzepte zur Überprüfung und Sicherstellung der EMV abgeleitet werden und auf bestehende Schwachstellen in den normativen EMV - Anforderungen an Mittelspannungsschaltanlagen aufmerksam gemacht werden.



A commercial  $SF_6$ -insulated, three phase metal enclosed switchgear was installed to investigate its EMC behavior. It consists of three switchgear panels, respectively one for feeding and one for the connection of a load. The third switchgear panel is used for the installation of secondary equipment as well as for the measurement of electromagnetic noise.

#### Generation of transient disturbances by disconnector operations

Let's consider the galvanic disconnection of an unloaded part of busbar by a disconnector switch.

Immediately after the electrically disconnection of the switch contacts, the disconnected part of busbar stores the actually present charge and remains at a constant voltage (trapped charge effect). However, the potential of the opposite contact changes due to the sinusoidal AC voltage of the feeding side. The increasing potential difference enforces a proportionally rising electric field between the disconnector contacts. Finally, the breakdown field strength of the insulating medium (air or  $SF_6$ ) is reached and a reignition leads to the sudden reloading of the disconnected part of busbar. Once the charge transfer is completed, the arc extinguishes. This process repeats several times per half cycle. The ignitions occur until the disconnector contacts have reached a sufficient distance not to exceed the breakdown field strength of the insulation medium any more. Enlarging the distance of the disconnector contacts increases the amplitude of the transient travelling waves caused by the charge transfer (see Fig. 3).

The occurring disturbances are measured with the use of a high voltage probe (up to 20 kV), various current clamps and an E-field probe. Afterwards, the measurement data gets processed by different software tools to allow a detailed analysis in both frequency and time domain.

The aim of the research project is to ascertain a clear view to the electromagnetic processes in medium voltage switchgear. Concepts for the verification and maintenance of EMC shall be derived. Furthermore, existing weak points in normative EMC requirements of medium voltage switchgear shall be pointed out.



## 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 Vergleich zu herkömmlichen Kraftfahrzeugen wird deshalb 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 Strom- und Spannungsänderungen dar, die durch Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter verursacht werden. Der Spannungsverlauf eines solchen Schaltvorgangs ist beispielhaft in Fig. 1 dargestellt.



Fig. 1: Beispiel eines gemessenen Impulses auf dem Hochvolt-Bordnetz eines Fahrzeuggesamtsystems.

Example of an impulse measured on the high-voltage power train of an overall vehicle system.

Um eine Beeinflussung verschiedener Fahrzeugkomponenten zu verhindern, müssen 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, die sich aus den Innenleitern, einem äußeren Leiter der Messvorrichtung und dem Kabelschirm als gemeinsame Impedanz zusammen setzen.



## 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. 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, existieren im Fahrzeug verschiedene Kopplungspfade auch innerhalb von Komponenten, die zur Ausbreitung von elektromagnetischen Störungen beitragen. 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 gute Entkopplung der beiden Bordnetzebenen geachtet werden.

Daher werden Komponenten des HV-Bordnetzes hinsichtlich ihres internen Kopplungsverhaltens zwischen der HV- und der LV-Ebene näher untersucht. Von großer Bedeutung sind hier z.B. in einer HV-Batterieeinheit die Sensoren für Strom- bzw. Spannungsmessungen, die Isolationsüberwachung des HV-Bordnetzes sowie Schütze, mit denen das HV-Bordnetz von der Batterie getrennt werden kann. Die direkt an einem HV-Schütz in einer Batteriekomponente zwischen den HV- und LV-Anschlüssen gemessene Kopplung (S21-Parameter) zeigt Fig. 3. Dabei tritt zwischen der Spule im LV-Kreis und den HV-Leitern eine kapazitive Kopplung auf (Anstieg mit 20 dB pro Dekade). Bei geschlossenem Schütz liegt die gemessene Kurve um ca. 28 dB höher als bei geöffnetem Schütz. Der frequenzabhängige Verlauf der Kopplung eines an den HV-Anschlüssen differentiell eingespeisten Störsignals auf die LV-Seite der gesamten Komponente ist in Fig. 4 dargestellt. Zur Durchführung von Messungen an HV-Komponenten im Betrieb müssen Gleichspannungen durch Blockkondensatoren vom HF-Messgerät (Netzwerkanalysator) ferngehalten werden. Zur Ein- und Auskopplung der HF-Signale werden außerdem Stromzangen verwendet. Je nach verwendeter Signalein- bzw. Auskopplungsart und Kopplungsverhalten der untersuchten Komponente wird ein HF-Verstärker verwendet, um eine ausreichend große Messdynamik zu erreichen.



Fig. 3: Messung der Kopplung zwischen HV- und LV-Anschlüssen eines Schützes. Measurement of coupling between HV- and LV-pins at a contactor.



Since all HV-components (for example DC/DC-converters, HV-batteries, auxiliary heaters) include connections for control and monitoring, there exist several coupling paths in the vehicle and also within the component which contribute to the propagation of disturbances. To avoid the propagation of disturbances in the LV wiring system (12 V-level) with its 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 of HV components is examined in detail. 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. The characteristic coupling (S21 parameter) which was directly measured at the HV- and LV-pins of a contactor installed in a battery device is shown in Fig. 3. The measuring result shows a capacitive coupling between the coil of the relay and the HV-conductor (rise of 20 dB per decade). The difference of about 28 dB between the two curves results from different states of the contactor (closed or opened). For the investigation of the frequency-dependent coupling of the complete component a differential signal for example is fed into the HV port (Fig. 4) while the RF signal is measured at each line of the LV-side. In Fig. 4 the measurement is performed at a supply and communication line. When the component is in the active mode the measurements are performed by using a DC block capacitance. For the injection and the measurement of RF-power special current probes are used. Depending on the measurement setup also a RF-amplifier may be necessary in order to increase the dynamic of the measurement.



Fig. 4: Kopplung eines differentiellen Störsignals von der HV-Seite auf eine Versorgungs- und eine Kommunikationsleitung. Coupling of a differential interference signal in a supply and a communication line on the LV side.



## 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 Leistungselektronik 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 Radio- und anderen Funkdiensten reichen können. In empfindliche Elektronik, wie etwa Radiovorverstärker, können diese Störungen einkoppeln und die Funktionalität des gesamten Audiosystems 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. Die auf Leitungen befindlichen Störströme und Störspannungen einer Komponente, wie z.B. einer Motorsteuerung, hängen stark von der Impedanz ab, mit der die Störquellen 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 (DUT – Device under Test, engl. für Prüfling) mit dem in Fig. 1 gezeigten Messaufbau nach der Norm CISPR 25 gemessen. Die Eingangsimpedanz der Bordnetznachbildungen (BNN), die die Lastimpedanz des Niedervolt (NV)-Bordnetzes (12 V) in einem konventionell betriebenen Fahrzeug nachbilden sollen, ist in dieser Norm definiert, und diese werden sowohl für das HV- als auch NV-Bordnetz eingesetzt. Allerdings sind die Kabel des HV-Bordnetzes geschirmt ausgeführt und besitzen einen konstanten Wellenwiderstand, welchen es so im NV-Bordnetz nicht gibt. Deshalb unterscheiden sich auch die Eingangsimpedanzen der beiden Bordnetze deutlich: Während NV-Kabelbäume relativ "gutmütig" auf eine Stoßstelle am Leitungsende reagieren, bilden geschirmte Kabel Leitungsresonanzen aus, die einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse der leitungsgebundenen EMV-Störungen haben können.



# 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 (12 V) 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 devices.

A complete shielding of the HV traction network is intended to reduce RF interferences. Thus the network configuration is changed from unshielded single core multi wire harnesses into coaxial conductor layouts, and therefore also the impedance characteristics of the entire network are changed. As the conducted emissions of the interference sources within the power electronics are dependant of their load impedance, the investigated component should be tested in an environment closest possible to vehicle situation. Therefore the device under test (DUT) should be connected to an impedance, which emulates an automotive HV network, while EMC tests. 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, as shown in Fig. 1. The vehicle is simulated by two Line Impedance Stabilization Networks (LISN/BNN). These LISNs have been developed to emulate an unshielded automotive LV network, but they can easily be adapted for shielded cables. The shielding yields in a constant wave impedance of these HV cables, which does not exist in common LV harnesses. Thus their input impedances differ substantially. As unshielded harnesses of recent LV networks do not have a constant wave impedance termination mismatch does not result in line resonances. Termination mismatch of shielded cable networks leads to regularly occurring line resonances, which are able to falsify EMC test results.



Fig. 1: Prüfaufbau zur Messung der EMV von Hochvoltkomponenten, mit Bordnetz-Nachbildungen für HV- und LV-Kabelbaum. Das eingesetzte HV-Kabel hat einen Wellenwiderstand von  $Z_L = 11 \Omega$ . EMC Test setup for the measurement of Conducted Emissions of High Voltage Components, including LISNs for HV and LV harnesses (LV marked with NV). The implemented HV cable has a constant wave impedance of  $Z_L = 11 \Omega$ .

Fig. 1 zeigt einen Messaufbau nach CISPR 25 für die EMV-Qualifizierung eines Pulswechselrichters (PWR), der den Prüfling (DUT) darstellt. Dieser erzeugt aus einer Gleichspannung eine dreiphasige Wechselspannung, welche eine Synchron-Maschine (M) antreibt. Über ein HV-Kabel mit dem Wellenwiderstand von  $Z_L = 11 \Omega$  und zwei geschirmte HV-BNN wird der PWR mit Gleichspannung versorgt. Die HV-BNN stellen dabei den Leitungsabschluss des HV-Kabels dar, sodass eine Fehl-anpassung zwischen Wellenwiderstand von HV-Kabel und Eingangsimpedanz der HV-BNN zu den beschriebenen Leitungsresonanzen führt.

Solche Resonanzeffekte sind in Fig. 2 dargestellt. Die Kurven zeigen die Funkstörspannung (2a) und den Störstrom (2b) auf einem HV-Kabel in Abhängigkeit dreier Abschlussimpedanzen. Bei einem Abschluss mit 50  $\Omega$ , also einer BNN nach CISPR 25 treten zwar niedrigere Ströme, aber dafür überhöhte Spannungswerte auf. Hingegen bei rein kapazitivem Abschluss (niederohmig im betrachteten Frequenzbereich, gekennzeichnet mit 0  $\Omega$ ) treten erhöhte Störströme und verringerte Spannungen auf. Bei beiden Abschlüssen können jedoch deutliche Resonanzüberhöhungen (15 – 20 dB) durch die Fehlanpassung beobachtet werden, die nur beim Abschluss der Leitung mit ihrem Wellenwiderstand  $Z_L = 11 \Omega$  stark gedämpft sind. Diese Unterschiede im Messergebnis sind nicht durch ein verändertes Störspektrum des Prüflings bedingt, sondern ein Resultat der Stoßstelle im Prüfaufbau.

Resonanzüberhöhungen von leitungsgebundenen Störgrößen können demnach nur vermieden werden, indem die Eingangsimpedanz der BNN für HV-Komponenten an den Wellenwiderstand des verwendeten Kabels angepasst wird. Auch bei der Entwicklung von Funkentstörfiltern für Komponenten muss die Eingangsimpedanz des HV-Kabels berücksichtigt werden, um Reflexionen und damit Resonanzen wirkungs-voll zu unterdrücken.





Fig. 2: Funkstörspannung an BNN (a) und Funkstörstrom auf Hochvoltkabel (b) in Abhängigkeit der Eingangsimpedanz der HV-BNN. Interference voltage at LISN (a) and disturbance current on HV cable (b) in dependency of the input impedance of the HV-LISN.

Fig. 1 shows a component level EMC test setup according to CISPR 25, for the EMC qualification of an automotive power inverter (DUT). This device converts the supply's direct current into three-phase alternating current, driving a synchronous machine (M). The HV cable has a wave impedance of  $Z_L = 11 \Omega$  and is supplied via two shielded HV LISNs. The LISNs function as line termination and a termination mismatch between cable's wave impedance and LISN's input impedance results in the described line resonances.

Such resonances are shown in Fig. 2. The displayed curves highlight measured RF voltages within attached LISNs (2a) and disturbance currents on the HV cable (2b) dependant on three load impedances. Terminating the line with 50  $\Omega$  (LISNs according to CISPR 25) lower disturbance currents are measured, but resonance magnification of the interference voltage occurs. Trying to reduce the RF emissions by decoupling the line via a capacitor to ground (low impedant within investigated frequencies, marked with 0  $\Omega$ ) results in reduced voltage amplitudes, but increased disturbance currents. Both terminations show significant exaggerations of conducted emission due to line resonances, which can only be avoided by terminating the cable with its wave impedance  $Z_L = 11 \Omega$ . These differences in the test results do not occur because of changed disturbance spectra of the inverter, but are caused due to the impedance mismatch within the test setup.

Resonance magnification of conducted RF interferences can only be avoided by adapting the line termination to the wave impedance of applied HV cables. Additionally, when developing EMI filter structures the characteristic impedance of the connected HV cable must be taken into consideration to avoid reflections and line resonances effectively.



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

### Dipl.-Ing. Daniel Schneider

Für den Einsatz von elektronischen Komponenten in Kraftfahrzeugen sind Abstrahlungsprüfungen nach CISPR 25 vorgeschrieben. Durch die zunehmende Parallelisierung der einzelnen Aufgabenpakete im Entwicklungsprozess sind die Terminpläne eng bemessen. Daher kommt es vor, dass erste Muster in Fahrzeugen verbaut werden, bevor überhaupt eine Begutachtung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) erfolgte. Aus Sicht der Komponentenhersteller ist die frühzeitige Kenntnis des Störverhaltens sehr wichtig, um EMV-Maßnahmen, wie Filteranpassung, Schirmung und Layout-Änderungen vorzunehmen. Um einen Schritt früher an der EMV einer Komponente arbeiten zu können, ist eine Pre-Compliance-Messmethode nötig, die keinen Schirmkabinenmessplatz benötigt. Durch den Einsatz dieser Messmethode direkt am Laboraufbau des Entwicklers soll eine Abschätzung der auftretenden Störabstrahlung nach einer CISPR 25 konformen Messung erfolgen. Zwei Verfahren bieten die Möglichkeit, eine Vorhersage der Abstrahlung zu erhalten. Diese Vorhersagemethoden unterliegen der Annahme, dass Gleichtaktströme auf Kabelbäumen die dominierende Größe für die elektromagnetische Abstrahlung im Bereich von 0,15 bis 200 MHz darstellen. Daher genügen bei den Methoden Stromzangenmessungen als Grundlage für die Berechnung des abgestrahlten Feldes.

Die erste Methode verfolgt einen mathematischen Ansatz, welcher sich auf ein Hertz'sches Dipol-Modell stützt. Hierbei wird ein Kabelbaum als Dipol modelliert und die Geometrie des Aufbaus berücksichtigt. Die zweite Methode verwendet zur Bestimmung der Abstrahlung eine messtechnisch erstellte Transferfunktion. Die Erstellung der Transferfunktion kann durch zwei Messverfahren erfolgen: Zum einen über Streuparametermessungen mit einem Netzwerk-Analysator (NWA) und zum anderen über einen Messempfänger (ME). Die jeweiligen Transferfunktionen enthalten somit alle Eigenschaften des gesamten Aufbaus, wie zum Beispiel die Antennencharakteristik und die Nahfeldkopplung zwischen Aufbau und Messantenne. Da diese Effekte nicht ohne weiteres in einem analytischen Modell implementiert werden können, liegt der momentane Hauptfokus auf der Transferfunktionsmethode unter Verwendung eines NWA.

In der Transferfunktionsmethode wird die Korrelation zwischen Störstrom auf einem Kabelbaum und dem daraus bedingten elektrischen Feldes verwendet. Die Erstellung kann für einen ganzen Kabelbaum als auch für einen segmentierten Kabelbaum erfolgen. Nachteil für einen ganzen Kabelbaum ist, dass die enthaltene Stromverteilung in der Transferfunktion eingebettet ist. Dies kann dazu führen, dass


### 109

## Pre-compliance test method for radiated emissions of automotive components

#### Dipl.-Ing. Daniel Schneider

Radiated emission tests for automotive components according to CISPR 25 are mandatory for its use in a vehicle. Nevertheless, time schedules are rather strict during the development of an electrical component due to a parallelization of single tasks. Therefore first prototypes of components are already installed and tested in cars before measurements concerning their electromagnetic compatibility (EMC) performance have been done. From the equipment's manufacturer point of view an early knowledge of the performance is an important matter regarding remedial measures like filter adaption, shielding or PCB layout changes. Hence an on-site precompliance measurement method without the need of a semi anechoic chamber is desired. This means a measurement method which can be applied on a laboratory setup and leading to an estimation of the occurring radiated emission during a CISPR 25 test. Two methods are capable predicting a component's irradiation. Those methods rely on the assumption that common mode currents on the component's cable harness are the main cause of electromagnetic emissions in the range of 0.15 to 200 MHz. Therefore the prediction of such emissions is based on test receiver current probe measurements.

The first method pursues a mathematical approach which bases upon a Hertzian dipole model representing a cable harness and considering the geometry of the test setup. The second method employs a transfer function determined by measurements. For the creation of a transfer function there are two procedures. One is using scattering parameter measurements with a network analyser (NWA) and another is using a test receiver. Those transfer functions include all aspects of the test setup like near field coupling of the antenna with the setup as well as the geometrical conditions. Those effects are hardly to implement in an analytic approach. Hence the main focus is on the transfer function method using a NWA.

The transfer function method uses the correlation between the disturbance current on a cable harness and its electric field. The generation can be made for an entire cable harness as well as for a segmented harness. Disadvantage of the entire cable harness setup is the embedded current distribution. This may lead to a false estimation of the electric field like shown in Fig. 1. Using product specific transfer functions a good estimation can be obtained. Fig. 2 shows the result for a wiper motor which leads to an estimation with a deviation mainly smaller 10 dB compared to the reference.



bei Anwendung der Methode auf einen Prüfling eine falsche Abschätzung des elektrischen Feldes erfolgt, wie Fig. 1 zeigt. Gelingt es, produktspezifische Transferfunktionen zu erstellen, kann dennoch eine gute Vorhersage getroffen werden. In Fig. 2 ist hierzu das Ergebnis für einen Scheibenwischermotor zu sehen. Eine Abweichung zur Referenzmessung von überwiegend kleiner 10 dB wird erreicht.

Um unabhängig von der Stromverteilung die Transferfunktionsmethode anwenden zu können, kann der Kabelbaum in einzelne Segmente unterteilt werden. Für jedes Segment wird eine Transferfunktion erstellt. Durch Stromzangenmessungen am Kabelbaum des Prüflings an denselben Positionen für die eine Transferfunktion ermittelt wurde und unter Hinzunahme von Phaseninformation für den Strom und das elektrische Feld kann durch Superposition das Feld berechnet werden. Fig. 3 zeigt hierzu den schematischen Aufbau für die Multi-Segment-Transferfunktion und Fig. 4 das Ergebnis der Verifizierung für eine 8-fach segmentierte Leitung. Es ist zu erkennen, dass unterhalb von 70 MHz bzw. oberhalb von 170 MHz noch erhebliche Abweichungen vorhanden sind. Diese Abweichungen entstehen durch den Einfluss des verwendeten Messaufbaus und der verwendeten Phaseninformation, welche in Zukunft minimiert werden müssen.











A current distribution independent approach is the use of a segmented harness. For this purpose one transfer function for each segment is generated. Using current probe measurements on the device under test's harness at each position a transfer function is generated for in combination with phase information of the currents and the electric fields a calculation of the field through superposition can be made. Fig. 3 shows schematically the setup for the Multi-Segment transfer function and Fig. 4 the result of the verification for an 8 times segmented wire. Below 70 MHz and above 170 MHz considerable deviations occur. Those deviations are due to the influence of the used measurement setup and phase information which have to be minimized in future work.



Fig. 3: Messaufbau für die Anwendung der Transferfunktionsmethode. Test setup for the transfer function method.



Fig. 4: Verifikationsergebnis für eine 8-fach segmentierte Leitung. Verification result for an 8 times segmented wire.



## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

A. Probst, M. Braun, S. Tenbohlen Erstellung und Simulation probabilistischer Lastmodelle von Haushalten und Elektrofahrzeugen zur Spannungsbandanalyse. VDE-Kongress, Würzburg, November 8-9, 2011, Beitrag Nr. P06

A. Probst, M. Braun, J. Backes, S. Tenbohlen *Probabilistic analysis of voltage bands stressed by electric mobility.*IEEE Power and Energy Society, Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, December 5-9, 2011, Paper ID No. 250

P. Wiest, A. Probst, M. Braun, S. Tenbohlen *Wirtschaftliche Betrachtung von Batteriespeichern zur Frequenzregelung*. IEEE Power and Energy Student Summit, Ilmenau, January 19-20, 2012

G. Kayser, A. Probst, M. Braun, S. Tenbohlen *Probabilistische Lastmodellierung von Haushaltslasten.* IEEE Power and Energy Student Summit, Ilmenau, January 19-20, 2012

J. Horn, A. Probst, M. Braun, S. Tenbohlen *A new approach using load control to dampen interarea frequency oscillations.* IEEE Power and Energy Student Summit, Ilmenau, January 19-20, 2012

S. Tenbohlen, M. Heindl, M. Jovalekic On-site PD Diagnostics, FRA and Moisture Measurement for Power Transformers. IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 132 No. 2 pp. 1-5

J. Hohloch, W. Köhler, S. Tenbohlen, M. Aidam, T. Krauß Charakterisierung und Vergleich leitungsgebundener Störungen an KFZ-Hochvoltbordnetzen.

EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 7.-9. Februar 2012, Tagungsband S. 477-484

D. Schneider, S. Tenbohlen, W. Köhler

Untersuchung von Vorhersagemethoden der Abstrahlung bei Komponententests nach CISPR 25.

EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 7.-9. Februar 2012, Tagungsband S. 263-271

M. Reuter, M. Waible, S. Tenbohlen, W. Köhler

Einfluss der Abschlussimpedanz von Hochvoltkabeln auf Funkstörgrößen in elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen.

EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 7.-9. Februar 2012, Tagungsband S. 469-476



D. Burger, S. Tenbohlen, W. Köhler, W. Ebbinghaus Auswirkungen multipler Rückzündungen in vakuumisolierten Leistungsschaltern auf die EMV von Mittelspannungsschaltanlagen.

EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 7.-9. Februar 2012, Tagungsband S. 199-206

C. Körner, F. Oechsle, M. Braun, A. Probst

*Leistungsabhängige Spannungsregelung im Mittelspannungsnetz.* 7. ETG/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2012, Mainz, 14.-15. Februar 2012

S. Köthe, M. Garhamer, M. Braun

*Beitrag der Photovoltaik zur Netzstabilisierung durch Einspeisemanagement.* 27. Symposium "Photovoltaische Solarenergie", Bad Staffelstein, 29.2.-3.3.2012

J. Binder, H.-D. Mohring, M. Landau, J. van Appen, M. Braun, A. U. Schmiegel, J.-C. Marcel, N. Martin, U. Thomas, W. Woyke, M. Garhamer, D. Magnor, D.-U. Sauer, C. Jehoulet, H. Schuh

Erfahrungen bei der Installation und beim Betrieb von PV-Speichersystemen: Feldtest des Sol-ion Systems in Süddeutschland, Guadeloupe und an Forschungsinstituten.

27. Symposium "Photovoltaische Solarenergie", Bad Staffelstein, 29.2.-3.3.2012

J. von Appen, M. Braun, B. Zinßer, D. Stellbogen

Leistungsbegrenzung bei PV-Anlagen - Anpassung der Modellierungsmethoden und Vergleich verschiedener Standorte.

27. Symposium "Photovoltaische Solarenergie", Bad Staffelstein, 29.2.-3.3.2012

S. Eilenberger, M. Braun

Herausforderungen und Lösungen für das Verteilnetz von morgen. Stuttgarter Hochspannungssymposium 2012, 6.-7. März 2012, Tagungsband (ISBN 978-3-00-037432-6), S. 43-58

M. Siegel, S. Kornhuber, M. Beltle, A. Müller, S. Tenbohlen *Monitoring von Teilentladungen in Leistungstransformatoren.* Stuttgarter Hochspannungssymposium 2012, 6.-7. März 2012, Tagungsband (ISBN 978-3-00-037432-6), S. 229-238

N. Schmidt, J. Wildenhain, R. Skrzypek Beurteilung der Überlastbarkeit von Windparktransformatoren durch Monitoring. Stuttgarter Hochspannungssymposium 2012, 6.-7. März 2012, Tagungsband (ISBN 978-3-00-037432-6), S. 93-99

S. Burow, U. Riechert, W. Köhler, S. Tenbohlen *New mitigation methods for transient overvoltages in gas insulated substations.* Stuttgarter Hochspannungssymposium 2012, 6.-7. März 2012, Tagungsband (ISBN 978-3-00-037432-6), S. 169-181



S. Tenbohlen et al. *Transformer Reliability Survey: Interim Report.* Electra No. 261, April 2012, pp. 46-49

Z. Girma, M. Braun Stand Alone Hybrid Power System Design for Rural Electrification in Ethiopia. National Conference on Science, Technology and Innovations for the prosperous Ethiopia (NCSTI), Bahir Dar University, Ethiopia, May 16-18, 2012

J. von Appen, R. Estrella, M. Braun

Technical and economical assessment of different storage use cases for distribution grid operation.

CIRED Workshop, Lissabon, 29.-30. Mai 2012

T. Stetz, M. Braun

Improved Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany - Technical and Economical Analysis of Improved Operation Methods for PV Inverters in Low Voltage Systems.

IEEE Transactions on Sustainable Energy, Issue 99, pp. 1-9, DOI: 10.1109/TSTE. 2012.2198925, 6. Juni 2012

M. Jovalekic, S. Tenbohlen

Gassing behavior of various alternative insulating liquids under thermal and electrical stress.

IEEE Conference on Electrical Insulation (ISEI), San Juan, Puerto Rico, 10.-13. Juni 2012, pp. 490-493

M. Jovalekic, D. Vukovic, S. Tenbohlen, J. Harthun, C. Perrier

Comparative Experimental Study of Dielectric Strength of Oil-cellulose Insulation for Mineral and Vegetable-based Oils.

IEEE Conference on Electrical Insulation (ISEI), San Juan, Puerto Rico, 10.-13. Juni 2012, pp. 424-428

R. Frotscher, D. Vukovic, M. Jovalekic, S. Tenbohlen, J. Harthun., C. Perrier, M. Schäfer

Behaviour of Ester Liquids under Dielectric and Thermal Stress – From Laboratory Testing to Practical Use.

CIGRE Session 2012, Paris, Frankreich, 26.-31. August 2012

S. Rätzke, M. Koch, M. Jovalekic

*Dielectric Response Measurements of Natural Esters in Comparison to Mineral Oil.* CIGRE Session 2012, Paris, Frankreich, 26.-31. August 2012



M. Braun, T. Stetz, R. Bründlinger, C. Mayr, K. Ogimoto, H. Hatta, H. Kobayashi, B. Kroposki, B. Mather, M. Coddington, K. Lynn, G. Graditi, A. Woyte, I. MacGill

*Is the Distribution Grid Ready to Accept Large Scale Photovoltaic Deployment? - State of the Art, Progress and Future Prospects.* 

Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Volume 20, Issue 6, pages 681–697, September 2012

K. Diwold, W. Yan, L. De Alvaro Garcia, L. Mocnik, M. Braun *Coordinated Voltage-Control in Distribution Systems under Uncertainty.* UPEC - 47th International Universities' Power Engineering Conference, London, UK, September 4-7, 2012

A. Abdel-Majeed, M. Braun

*Low Voltage System State Estimation Using Smart Meters.* UPEC - 47th International Universities' Power Engineering Conference, London, UK, September 4-7, 2012

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

*Measurement of Transfer Impedances of Components for Automotive High-Voltage Power Networks.* 

EMC Europe 2012, Rom, Italien, September 17-21, 2012, Paper No. B3-2

D. Schneider, S. Tenbohlen, W. Köhler

*Pre-Compliance Test Method for Radiated Emissions of Automotive Components Using Scattering Parameter Transfer Functions.* 

EMC Europe 2012, Rom, Italien, September 17-21, 2012, Paper No. A8-1

M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler

Influence of Termination Impedance on conducted Emissions in Automotive High Voltage Networks.

11th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, Rom, Italien, September 17-21, 2012, Conference Proceedings, Paper No. B3-1

D. Burger, S. Tenbohlen, W. Köhler, W. Ebbinghaus Impact of Multiple Restrikes at Vacuum Circuit Breakers on the EMC of Medium Voltage Switchgear.

EMC Europe 2012, Rom, Italien, September 17-21, 2012, Paper No. C2-1

R. Jongen, B. Quak, S. Tenbohlen, E. Gulski

New developments in on-site testing of long lengths of (E)HV power cable.

IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), September 23-27, 2012, Bali, Indonesien, Paper No. A-121, pp. 149-153

M. Beltle, S. Tenbohlen

Usability of Vibration Measurement for Power Transformer Diagnosis and Monitoring. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), September 23-27, 2012, Bali, Indonesien, Paper No. A129, pp. 281 – 284

.↓*ĩEH*.

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

Analysis of UHF PF Monitoring Data by Means of Normalized Cross-Correlation. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), September 23-27, 2012, Bali, Indonesien, Paper No. G-11, pp. 103 – 106

A. Müller, M. Jovalekic, S. Tenbohlen

Solubility Study of Different Gases in Mineral and Ester-based Transformer oils. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Bali, Indonesien, September 23-27, 2012, Paper No. A-124, pp. 937-940

A. P. Purnomoadi, M. A. G. Al-Suhaily, S. Meijer, J. J. Smit, S. Burow, S. Tenbohlen The Influence of Free Moving Particles on the Breakdown Voltage of GIS under Different Electrical Stresses.

2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Bali, Indonesien, September 23.-27, 2012, Paper No. A-164, pp. 383-386

S. M. Hoek, A. Kraetge, M. Koch, O. Kessler, M. Heindl Emission and Dissipation Mechanisms of PD Pulses for UHF and Traditional Electrical Measurements.

2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Bali, Indonesien, September 23.-27, 2012, Paper No. A-146, pp. 305-308

D. I. Hidalgo Rodriguez, L. Spitalny, J. Myrzik, M. Braun

Development of a control strategy for mini CHP plants for an active voltage management in low voltage networks.

IEEE ISGT, Berlin, 14.-17. Oktober 2012

E. Kämpf, M. Bauer, R. Schwinn, M. Braun

*ICT Infrastructure Design Considering ICT Contingencies and Reserve Requirements on Transmission Level.* 

IEEE ISGT, Berlin, 14.-17. Oktober 2012

M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler

Messung leitungsgebundener Störgrößen von Komponenten für Hochvolt-Anwendungen.

4. AutoTest, Fachkonferenz zum Thema: "Test von Hard- und Software in der Automobilentwicklung", 17.-18. Oktober 2012, Haus der Wirtschaft, Stuttgart

S. M. Hoek, M. Koch, M. Heindl

Emission and Propagation Mechanisms of PD Pulses for UHF and Traditional Electrical Measurements.

International Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEEI), Vol. 4, No. 3, October 2012, pp. 393-404



M. Nemati, M. Braun, M. Ramold, H. Müller

Entwicklung eines Optimierungstools zur Dimensionierung und Platzierung eines Batteriespeichers in Mikronetzen.

VDE-Kongress, Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, 5.-6.11.2012, Beitrag Nr. 1.3.1

T. Stetz, H. Wolf, A. Probst, S. Eilenberger, Y. Saint Drenan, E. Kämpf, M. Braun, D. Schöllhorn, S. Schmidt

Stochastische Analyse von Smart-Meter-Messdaten.

VDE-Kongress, Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, 5.-6.11.2012, Beitrag Nr. 4.2.4

S. Eilenberger, D. Schöllhorn, M. Braun Aktives, intelligentes Niederspannungsnetz Sonderbuch - Messdaten, Simulation und Optimierungsmöglichkeiten.

VDE-Kongress, Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, 5.-6.11.2012, Beitrag Nr. P3.13

A. Abdel-Majeed, H. Wang, M. Braun, D. Schöllhorn *Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit Hilfe von Smart Meter.*VDE-Kongress, Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, 5.-6.11.2012, Beitrag Nr. 4.2.3

M. Heindl, M. Beltle, S. Tenbohlen, U. Sundermann, F. Schatzl *Betriebsverhalten von Leistungstransformatoren in Hybridnetzen.* VDE-Kongress, Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, 5.-6.11.2012, Beitrag Nr. P4.7

S. Tenbohlen, M. Heindl, M. Jovalekic, A. Müller, M. Siegel *Trends in der Diagnostik von Hochspannungs-Betriebsmitteln.* VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 1

M. Beltle, A. Müller, S. Tenbohlen

Analyse von UHF-TE-Langzeitmessungen mittels bilderkennender Verfahren. VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 8

M. Siegel, S. Tenbohlen S. Kornhuber

*Neue Methoden zur Ortung mehrerer TE-Quellen mittels akustischem Sensorarray.* VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 12



M. Heindl, M. Beltle, S. Tenbohlen und S. Coenen (Siemens, Nürnberg) Untersuchung der Vergleichbarkeit von Übertragungsfunktionsmessungen (FRA) an Leistungstransformatoren.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 14

M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen und S. Coenen (Siemens, Nürnberg)

Untersuchungen verschiedener Verfahren zur TE-Detektion und zur Vibrationsmessung.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 15

S. Burow, W. Köhler, S. Tenbohlen, U. Straumann

Messung und Dämpfung von sehr schnellen Transienten (VFT) in gasisolierten Schaltanlagen.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 32

A. Müller, S. Tenbohlen

Fehlergasverluste über das Ausdehnungsgefäß eines freiatmenden Leistungstransformators.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 33

A. Müller, M. Jovalekic, S. Tenbohlen

Studie über die Löslichkeit verschiedener Gase in mineralischen und auf Estern basierenden Transformator- Ölen.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 46

M. Beltle, S. Tenbohlen

Untersuchung der Vibrationen von Leistungstransformatoren für Diagnose und Monitoring.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 47

N. Schmidt, S. Tenbohlen, P. Mazidi

The Overload Assessment of Power Transformers by Thermal Monitoring.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 48

M. Jovalekic, S. Tenbohlen

Gas in Öl Analyse verschiedener alternativer Isolieröle unter thermischen und elektrischen Belastungen.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 53



N. Schmidt, A. Weinläder, S. Tenbohlen, Universität Stuttgart; S. Chen, Alstom Grid, Massy, Frankreich

Experimental Investigation of the Temperature Distribution within the Low Voltage Winding of a Large Power Transformer.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 54

M. Wild, S. Tenbohlen, E. Gulski

Die Anwendung von gedämpften Wechselspannungen für Vor-Ort-Prüfungen und Zustandsbestimmung von Hochspannungskabeln.

VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Fulda, 14.-16.11.2012, Beitrag Nr. 74

M. Beltle, A. Müller, S. Tenbohlen

Statistical Analysis of Online Ultrahigh-Frequency Partial-Discharge Measurement of Power Transformers.

IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 28, No. 6, November/December 2012, pp. 15 – 19

M. Siegel, S. Tenbohlen, S. Kornhuber

*Teilentladungsmonitoring von Leistungstransformatoren mit der UHF-Methode.* ew – das Magazin für die Energiewirtschaft, Heft 25, 2012, S. 64-67

P. Karimifard, G.B. Gharehpetian, A.J. Ghanizadeh, S. Tenbohlen

Estimation of simulated transfer function to discriminate axial displacement and radial deformation of transformer winding.

COMPEL, The international journal for computation and mathematics in electrical and electronics engineering, Special section: selected papers from the 4<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment, UK-Bingley, 2012, S. 1277-1293

M. Siegel, S. Tenbohlen, S. Kornhuber

*Teilentladungsmonitoring von Leistungstransformatoren mit der UHF-Methode.* ew – das Magazin für die Energiewirtschaft, Nr. 25, 2012, S. 64 - 67



## 7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

| 57.12.11  | IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies<br>Europe 2011, Manchester, Vortrag von A. Probst  |
|-----------|---|
| 1.2.12    | Informationstag Verteilnetz-Automation, Kassel. Vortrag von Prof.<br>Braun "Herausforderungen und Lösungen für die zukünftige<br>elektrische Energieversorgung"   |
| 79.2.12   | EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für<br>Elektromagnetische Verträglichkeit in Düsseldorf,<br>Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen (Mitglied im<br>Programmkomitee), Dr. W. Köhler, D. Burger, J. Hohloch,<br>M. Reuter, D. Schneider |
| 67.3.12   | Stuttgarter Hochspannungssymposium 2012 "Komponenten und<br>Betriebsführung der Netze von morgen", Filderhalle,<br>Vorträge: Prof. Tenbohlen, Prof. Braun, M. Beltle, S. Burow,<br>S. Eilenberger, A. Müller, N. Schmidt, M. Siegel                 |
| 1215.3.12 | VDE-Seminare "Klassische Diagnoseverfahren" bzw. "Moderne<br>Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren" am Institut mit<br>Vorträgen und Laborübungen von Prof. Tenbohlen, M. Beltle,<br>M. Heindl, A. Müller, M. Siegel                       |
| 2627.3.12 | CIGRE JWG A2/C4.39 "Electrical Transient Interaction between<br>Transformers and the Power System", WG Meeting in Nürnberg,<br>M. Heindl  |
| 21.5.12   | Besprechung der VDE-Arbeitsgruppe FB Q2 in Frankfurt,<br>Prof. Tenbohlen  |
| 24.5.12   | Meeting der CIGRE-Arbeitsgruppe WG A2.37 in Zürich, Prof. Tenbohlen   |
| 24.5.12   | IMEC Technology Forum 2012, Brüssel. Vortrag von Prof. Braun<br>"Smart Grid Challenges and Solutions – Integration of Photovoltaic<br>and Storage Systems"  |
| 5.6.12    | Vortrag beim Bioschmierstoffkongress in Oberhausen<br>"Untersuchungen und Einsatz von biobasierten Ölen als<br>Elektroisolieröle in Transformatoren",<br>Prof. Tenbohlen  |
| 1013.6.12 | International Conference on Electrical Insulation, San Juan, Puerto Rico, Vorträge von M. Jovalekic und D. Vukovic  |
| 19.6.12   | VDI Spezialkonferenz: Netzanbindung und Netzintegration von<br>Erneuerbaren Energien, Karlsruhe. Vortrag von Prof. Braun "Techno-<br>ökonomisch optimierte dezentrale Stromversorgung"  |



| 27.6.12    | Tagung "Transform" in Berlin, Key-note von Prof. Tenbohlen:<br>"The grid, with transformers as important elements"  |  |
|------------|---|--|
| 24.7.12    | IEEE PES GM 2012, San Diego, CA, USA. Vortrag von Prof. Braun<br>"Appropriate ICT Infrastructures for Smart Grids"  |  |
| 2631.8.12  | CIGRE-Session 2012 in Paris, Prof. Tenbohlen  |  |
| 35.9.12    | CIGRE JWG A2/C4.39 "Electrical Transient Interaction between<br>Transformers and the Power System", WG Meeting in Paris,<br>M. Heindl   |  |
| 47.9.12    | UPEC 2012, 47th International Universities' Power Engineering<br>Conference, London, UK, Beitrag von A. Abdel-Majeed  |  |
| 1014.9.12  | 16th Int. Workshop on High Voltage Engineering, Wroclaw, Polen,<br>Prof. Tenbohlen, Vorträge von P. Arnold, M. Jovalekic, P. Mazidi,<br>M. Siegel, F. Vahidi, M. Wild   |  |
| 1721.9.12  | EMC Europe, 11th International Symposium on Electromagnetic<br>Compatibility, Rom, Italien, Teilnehmer/Beiträge: Dr. W. Köhler,<br>D. Burger, J. Hohloch, M. Reuter, D. Schneider   |  |
| 2327.9.12  | 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and<br>Diagnosis (CMD) in Bali, Indonesien,<br>Prof. Tenbohlen, Papers von M. Beltle und A. Müller   |  |
| 9.10.12    | Herbstveranstaltung der Gruppe Network <sup>2</sup> der EnBW, TU Darmstadt, Prof. Tenbohlen, A. Probst  |  |
| 17.10.12   | CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung in Köln<br>"Netze im Zeichen der Energiewende",<br>A. Abdel-Majeed, M. Brunner, S. Eilenberger, C. Kattmann,<br>M. Nemati, A. Probst  |  |
| 1718.10.12 | <ol> <li>AutoTest, Fachkonferenz zum Thema "Test von Hard- und<br/>Software in der Automobilentwicklung", Stuttgart, Vortrag von<br/>M. Reuter</li> </ol>   |  |
| 56.11.12   | VDE-Kongress "Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der<br>Zukunft", Stuttgart, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, A. Abdel-<br>Majeed, M. Beltle, S. Burow, S. Eilenberger, M. Heindl, A. Müller,<br>M. Nemati, A. Probst, M. Siegel  |  |
| 1516.11.12 | ETG-Fachtagung "Diagnostik elektrischer Betriebsmittel" in Fulda<br>mit CIGRE-Tutorial am 14.11.,<br>Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen (wissenschaftl. Tagungsleiter),<br>M. Beltle, S. Burow, M. Heindl, M. Jovalekic, P. Mazidi, A. Müller,<br>N. Schmidt, M. Siegel, F. Vahidi, M. Wild |  |



# 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 $5 \times 10 \times 5 \text{ m3}$ (B x L x H) mit<br>rechnergeführter Anlagensteuerung und Messwertver-<br>arbeitung |  |  |  |
| Spannungsteiler   | drei gedämpft kapazitive bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)   |  |  |  |
| E/H-Feldmeßsysteme  | mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 800 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)   |  |  |  |
| EMP/ EMV-Prüfgeräte   | diverse kleinere für die Nachbildung elektrostatischer<br>Entladungen, Einkopplung von Störspannungsimpulsen<br>ins Netz, Prüfung von Bauteilen und Geräten mit<br>Mikroelektronik-Schaltungen            |  |  |  |
| CW-EMV-Absorberräume  | mit Leistungsverstärkern, div. Antennen, Feldmess-<br>system, opto-analoge Messwertübertragungsstrecke bis<br>3 GHz, Messempfänger bis 3 GHz, TEM-Messzelle   |  |  |  |
| Klimakammer   | 3 x 3 x 3 m <sup>3</sup> , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C, rel. Luftfeuchtigkeit von 10 % bis 95 %  |  |  |  |
| Einpolige SF6-Anlage  | Un = 525 kV, Länge mit Abzweigen ca. 25 m   |  |  |  |
| Einpolige SF6-Anlage  | Un = 245 kV, Länge mit Abzweigen ca. 5 m  |  |  |  |
| Dreipolige SF6-Anlage   | Un = 110 kV, Länge ca. 3 m  |  |  |  |
| Digitale und analoge Mess   | sgeräte für periodische und einmalige Vorgänge mit<br>Abtastraten bis über 20 GHz, Netzwerkanalysatoren,<br>Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren   |  |  |  |
| Teilentladungsmessgeräte zur 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





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

