

## **INHALTSÜBERSICHT**

|            |                                                  |            |
|------------|--------------------------------------------------|------------|
| <b>1.</b>  | <b>VORWORT .....</b>                             | <b>2</b>   |
| <b>2.</b>  | <b>PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS .....</b>  | <b>6</b>   |
| <b>3.</b>  | <b>LEHRE .....</b>                               | <b>8</b>   |
|            | 3.1. VORLESUNGEN .....                           | 8          |
|            | 3.2. PRAKTIKA.....                               | 11         |
|            | 3.3. EXKURSIONEN .....                           | 12         |
|            | 3.4. STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN .....           | 12         |
| <b>4.</b>  | <b>PROMOTIONEN.....</b>                          | <b>16</b>  |
| <b>5.</b>  | <b>FORSCHUNGSARBEITEN.....</b>                   | <b>32</b>  |
| <b>6.</b>  | <b>VERÖFFENTLICHUNGEN.....</b>                   | <b>88</b>  |
| <b>7.</b>  | <b>MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE .....</b> | <b>91</b>  |
| <b>8.</b>  | <b>EREIGNISSE UND KONTAKTE .....</b>             | <b>93</b>  |
| <b>9.</b>  | <b>PRÜF- UND MESSEINRICHTUNGEN.....</b>          | <b>97</b>  |
| <b>10.</b> | <b>LAGEPLAN.....</b>                             | <b>98</b>  |
| <b>11.</b> | <b>NOTIZEN .....</b>                             | <b>100</b> |

# 1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

auch in diesem Jahr möchten wir Ihnen mit diesem Bericht Einblicke in unsere Arbeit geben und auf einige Entwicklungen und Ergebnisse hinweisen.

Trotz des steigenden Bedarfs an Elektroingenieuren ist die Zahl der Studienanfänger auf diesem Gebiet an der Universität Stuttgart in 2006 zurückgegangen. Sicherlich ist dies auch durch die Einführung der Studiengebühren in Baden-Württemberg ab 2007 begründet. Hier setzt die Politik wohl ein falsches Signal. Studierende der besonders auf dem Arbeitsmarkt gefragten Fächer sollten doch eher verstärkt gefördert als durch zusätzliche Gebühren belastet werden. Erfreulicherweise haben dies auch einige Industrieunternehmen erkannt und Stipendienprogramme aufgelegt, um so frühzeitig Kontakt zu hervorragenden Absolventen zu bekommen.

Der weltweite Wandel der Energietechnik schafft neue interessante Fragestellungen und bietet international attraktive Märkte. Absolventen der elektrischen Energietechnik haben exzellente Berufschancen. Weitreichende Stromausfälle, wie z. B. am 4.11.2006, rücken die elektrische Energieversorgung weiter in das öffentliche Interesse und zeigen deren außerordentliche Bedeutung. So hat auch die Nachfrage von Studierenden nach unserem Lehr- und Forschungsgebiet weiter zugenommen. Wir freuen uns, mit 36 abgeschlossenen Studien- und Diplomarbeiten die letztjährige Zahl deutlich gesteigert zu haben. So wird im nächsten Jahr sicherlich eine noch größere Anzahl von Absolventen des Institutes zur Deckung des wachsenden Ingenieurbedarfs beitragen.

In wissenschaftlicher Hinsicht können wir auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Zwei abgeschlossene Dissertationen (Dr.-Ing. S. Markalous, Dr.-Ing. T. Hayder) sowie 27 Veröffentlichungen dokumentieren eindrucksvoll unsere vielfältigen Forschungsaktivitäten. In diesem Jahr waren wir unter anderem mit drei Berichten zur CIGRE-Konferenz in Paris beteiligt. Das Thema „Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren“ auf Basis der UHF-Technik wird am Institut zukünftig Herr Dipl.-Ing. Sebastian Coenen weiter bearbeiten. Eine Übersicht über die neuesten Forschungsergebnisse des Institutes können Sie diesem Jahresbericht entnehmen. Die Veröffentlichungen liegen auch auf unserer Homepage [www.ieh.uni-stuttgart.de](http://www.ieh.uni-stuttgart.de) zum Download bereit.

Unsere diesjährige „Pfingstexkursion“ mit den Studierenden der Vertiefungslinie „Elektrische Energiesysteme“ führte uns nach dem Besuch des Kavernenkraftwerkes Wehr der Schluchseewerk AG nach Zürich zu den Firmen ABB Schweiz AG und Brugg Kabel AG. Den Abschluss bildete ein Besuch der Entwicklung bei der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen. Durch solch eine Exkursion können die Studie-

renden nicht nur die in der Vorlesung theoretisch vorgestellten Dinge in der Praxis ausgeführt sehen, sondern auch die Unternehmen dieser Branche besser kennenlernen. Ich möchte mich daher an dieser Stelle bei den Firmen und Partnern bedanken, die Exkursionen durch ihre Spenden und ihr großes Engagement ermöglicht haben.

Im Frühjahr haben wir zusammen mit verschiedenen Herstellern ein internationales Hochspannungssymposium zum Thema „Zustandserfassung und -beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“ in der Filderhalle in Leinfelden organisiert. Hervorragende Referenten und der traditionell gute Ruf dieser im zweijährigen Turnus stattfindenden Veranstaltung führte 250 Teilnehmer hauptsächlich aus den Bereichen Energieversorger und Hersteller nach Stuttgart. An zwei Tagen wurden die neuesten Entwicklungen in der Diagnose von elektrischen Betriebsmitteln vorgestellt und lebhaft diskutiert. Auf Grund der zahlreichen Nachfragen werden wir das Stuttgarter Hochspannungssymposium am 5. und 6. März 2008 wieder im gleichen Rahmen durchführen.

Am 20./21.3.2007 wird in Zusammenarbeit mit dem VDE erneut ein Seminar zum Thema „Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren“ stattfinden. Nach einer theoretischen Einführung in die Diagnose von Leistungstransformatoren erlernen die Teilnehmer in diesem Seminar anhand von praktischen Versuchen in unseren Labors die Handhabung und Interpretation von Teilentladungsmessung, Übertragungsfunktionsbestimmung und dielektrischer Diagnostik.

Weitere Informationen zu dieser Veranstaltung können Sie auf unserer Homepage oder auch unter [www.vde.com/seminare](http://www.vde.com/seminare) finden.

Allen unseren Freunden möchte ich an dieser Stelle recht herzlich für Ihre Anregungen und Ihre Hilfe danken. Mein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft 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.

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 2006

Prof. Stefan Tenbohlen

## PREFACE

Dear Friends!

With our annual report 2006 we would like to give you some impressions of our work and point out new developments and results.

In spite of the increasing demand of electrical engineers less students started their studies in electrical engineering in Stuttgart this year. Of course this is also a result of the implementation of study fees, which have to be paid in Baden-Württemberg next year. In my opinion the policy places a wrong signal. Students in technical and scientific courses should be supported and not be burdened with additional fees. Fortunately, several industrial enterprises have realized the problem and therefore have granted scholarship programmes in order to get in contact with excellent students.

The global change of power engineering creates new interesting questions and markets. Students of this field have excellent career prospects. Extensive blackouts, i.e. in November 2006 in large parts of Europe, bring the electrical energy supply back into public focus. Therefore, the interest of students in power engineering has increased continuously. With 36 successfully finished study and diploma thesis projects we clearly raised last year's number. We expect an even growing number of students at our institute next year and also a growing number of graduates who will satisfy the increasing demand of engineers.

Concerning our scientific work, we look back on a very successful year. Two doctoral theses (Dr.-Ing. S. Markalous, Dr.-Ing. T. Hayder) as well as 27 publications show impressively our various research activities. Among others, we gave three presentations at the CIGRE-conference in Paris this year. In future Sebastian Coenen will work on PD-measurement of power transformers using UHF-technique. Please find a summary of our latest research results in this annual report. You can also download the publications from our homepage [www.ieh.uni-stuttgart.de](http://www.ieh.uni-stuttgart.de).

During this year's "summer excursion" with students of electrical engineering we visited the pumped storage power plant Wehr of Schluchseewerk, ABB Switzerland and Brugg Cables. We finished in Schwieberdingen at the research department of Bosch. Such excursions show the industrial world to our students. I would like to thank the enterprises and partners contributing to our excursion with financial and personal efforts.

In cooperation with different manufacturers and sponsors we organized an international conference on "Condition Monitoring and Diagnosis of HV Electric Power Apparatus" in March 2006.

250 participants, mainly coming from power utilities and manufacturers, visited the conference and listened to the latest developments in diagnostics of electrical equipment and to interesting discussions. Due to the great success we are going to organize this conference again on March 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup>, 2008.

Next spring, on March 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup>, 2007, the seminar “Modern Diagnostics of Power-Transformers” in collaboration with VDE is taking place again. After a theoretical introduction in diagnostics of power transformers the participants will learn the handling and interpretation of PD, transfer function and dielectric diagnostic by means of practical exercises in our laboratories. You will find further information on our homepage or on [www.vde.com/seminare](http://www.vde.com/seminare) .

We would like to send our sincere thanks to all our friends and partners who have contributed in many ways to our success. Especially we would like to thank the Deutsche Forschungsgemeinschaft as well as our industrial partners for their support. One aim of this annual report is to even improve our good relationships with our friends and also to contact new partners.

With all the best for a peaceful, healthy and successful year 2007!

Stuttgart, December 2006

Prof. Stefan Tenbohlen

## 2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

|                                                     |                  |
|-----------------------------------------------------|------------------|
| e-mail:                                             | Telefon / phone: |
| <code>vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de</code>  | +49 (0)711-      |
| <code>firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de</code> |                  |

|                                         |                                     |            |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| Institutsleiter /<br>Head of Institute: | Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN     | -685-67871 |
| Prof. im Ruhestand:                     | Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER | -685-67875 |

|                                            |                                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Honorarprofessoren<br>und Lehrbeauftragte: | Prof. Dr.-Ing. Heinz BRÜDERLIN (entpflichtet)<br><i>Ehemaliger Vorsitzender des Vorstandes der<br/>Technischen Werke Stuttgart AG</i>    |           |
|                                            | Prof. Dr.-Ing. Peter F. HEIDINGER (entpflichtet)<br><i>Ehemaliger Vorsitzender des Vorstandes der<br/>Energie-Versorgung Schwaben AG</i> |           |
|                                            | Prof. Dr.-Ing. Ernst HAGENMEYER (entpflichtet)<br><i>Ehemaliges Mitglied des Vorstandes der<br/>Energie-Versorgung Schwaben AG</i>       |           |
|                                            | Dipl.-Ing. Ulrich SCHERER<br><i>EnBW Transportnetze AG</i>                                                                               | -128-2437 |
|                                            | Dipl.-Ing. Thomas Rudolph<br><i>AREVA Energietechnik GmbH</i>                                                                            |           |

|                 |                                                                                        |            |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Oberingenieure: | Dr.-Ing. Wolfgang KÖHLER<br><i>(Leiter des Hochspannungslabors Nellingen-Zinsholz)</i> | -341 2075  |
|                 | Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI                                                                | -685-67878 |

## Wissenschaftliche Mitarbeiter /

|                   |                                               |            |
|-------------------|-----------------------------------------------|------------|
| Scientific Staff: | M. Sc. Jaquelyn ARAGÓN PATIL                  | -685-69196 |
|                   | Dipl.-Ing. Enzo CARDILLO (bis 31.1.2006)      |            |
|                   | Dipl.-Ing. Sebastian COENEN (ab 3.2006)       | -685-67869 |
|                   | M. Sc. Denis DENISOV                          | -341 2075  |
|                   | Dipl.-Ing. Markus FISCHER                     | -685-69197 |
|                   | M. Sc. Tammam HAYDER                          |            |
|                   | Dipl.-Ing. Stefan HOEK                        | -685-67858 |
|                   | Dipl.-Ing. Maik KOCH                          | -685-67857 |
|                   | Dipl.-Ing. Sacha MARKALOUS (bis 28.2.2006)    |            |
|                   | Dipl.-Ing. Jozsef OSZTERMAYER (bis 30.6.2006) |            |
|                   | Dipl.-Ing. Heinz REBHOLZ                      | -685-69194 |
|                   | Dipl.-Ing. Franz STREIBL                      | -685-67889 |
|                   | M. Sc. Rummiya VILAITHONG                     | -685-69193 |
|                   | Dipl.-Ing. Andreas WEINLÄDER                  | -685-67838 |
|                   | Dipl.-Ing. René WIMMER                        | -685-67867 |
|                   | Dipl.-Ing. Michael ZERRER                     | -341 2075  |

## Sekretariat /

|            |                                         |            |
|------------|-----------------------------------------|------------|
| Secretary: | Nicole SCHÄRLI                          | -685-67870 |
|            | (Institutsteil Stuttgart-Vaihingen)     |            |
|            | Renate KINSKI                           | -341 2075  |
|            | (Hochspannungslabor Nellingen-Zinsholz) |            |
|            | Hermine LWOWSKI                         | -685-67876 |

## Technische Angestellte /

|                  |                                                                   |            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| Technical Staff: | Erwin BECK, <i>Mechanikermeister</i>                              | -685-67836 |
|                  | Marija BERGLEZ, <i>Raumpflegerin</i>                              | -341 2075  |
|                  | Lucian GLASS, <i>Elektrotechnischer Assistent</i> (bis 31.3.2006) |            |
|                  | Michael HERDTLE, <i>Mechaniker</i>                                | -341 2075  |
|                  | Herbert KAUSSEN, <i>Elektrotechniker</i>                          | -341 2075  |
|                  | Dieter MAJEWSKI, <i>Mechaniker</i>                                | -685-67847 |
|                  | Hartmut RÖNISCH, <i>Elektrotechniker</i>                          | -685-67856 |
|                  | Joachim SCHAAF, <i>Elektrotechniker</i> (ab 1.4.2006)             | -685-67863 |
|                  | Kurt SCHILL, <i>Meister und Zentralwerkstattleiter</i>            | -685-67847 |
|                  | Karl SOBING, <i>Elektromeister</i>                                | -341 2075  |

## **3. LEHRE**

### **3.1. VORLESUNGEN**

**Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN**

#### ***Einführung in die Energietechnik II***

Sommersemester, 2 V, 1 S, für 4. Semester

- *Aufgabe und Bedeutung der elektrischen Energieversorgung*
- *Energieumwandlung 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

- *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 6. Semester

- *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

- *Aufgaben des elektrischen Energienetzes*
- *Einpolige Ersatzschaltungen der Betriebselemente für symmetrische Betriebsweise*
- *Berechnung von Energieübertragungsanlagen und -netzen*
- *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***

Sommersemester, 2 V, 2 S, für 6. Semester

- *Kennwerte von Drehstrom-Freileitungen und Kabeln; Erwärmung*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*
- *Lastflussberechnung*
- *Zustandserkennung - State Estimation*
- *Netzurückwirkungen*
- *Kippschwingungen im Netz*

**Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN**

**Dr.-Ing. W. KÖHLER**

***Hochspannungsprüf- und -messtechnik***

Wintersemester, 2 V, für 7. Semester

- *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 8. Semester

- *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 8. Semester

- *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**

***Schutz- und Leittechnik für Hochspannungsnetze***

Wintersemester, 2 V, für 7. Semester

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

## 3.2. PRAKTIKA

Dr.-Ing. U. SCHÄRLI

### ***Elektrotechnisches Grundlagenpraktikum***

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik im 1., 2. und 4. Semester. Auch Studierende der Informatik mit Nebenfach Elektrotechnik nehmen teil. Die insgesamt 57 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*
- *Schutzmaßnahmen I (Personen- und Sachschutz) nach DIN VDE 0100*
- *Schutzmaßnahmen II*
- *Entladungen bei hohen Spannungen*
- *Erzeugung und Messung von Stoßspannungen*

Dr.-Ing. W. KÖHLER

### ***Fachpraktikum Hochspannungstechnik***

Das Fachpraktikum Hochspannungstechnik wird vom IEH für Studierende im Hauptdiplom in der Regel nur im Sommersemester angeboten. Jeder Versuch wird von einer Gruppe von i.d.R. drei Studierenden an einem Nachmittag bearbeitet.

Zur Zeit werden 8 Versuche angeboten, aus denen 7 ausgewählt werden können:

- Versuch 1: Erzeugung und Messung hoher Wechselspannungen
- Versuch 2: Erzeugung und Anwendung hoher Stoßspannungen
- Versuch 3: Netzschutz in Hochspannungsnetzen: Digitaler Schutz
- Versuch 4: Elektrisches Feld: Messmethoden, Berechnungsmöglichkeiten (am PC)
- Versuch 5: Wanderwellenvorgänge: Experiment und Simulation
- Versuch 6: Stoßvorgänge an Transformatoren
- Versuch 7: Gasentladungen und Isolierstoffe
- Versuch 8: Elektromagnetische Verträglichkeit: Grundlagen der EMV-Messtechnik

### 3.3. EXKURSIONEN

18. Mai 2006, ganztägig

Besuch des Heizkraftwerks 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

6. – 9. Juni 2006: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei

- Schluchseewerke AG:

Pumpspeicherkraftwerk Wehr, Hauptschaltleitung

- ABB Schaltanlagen AG, Zürich-Oerlikon:

Fertigung von GIS

- ABB Forschungszentrum, Baden-Dättwil

- ABB Micafil AG, Zürich:

Fertigung von Hochspannungsdurchführungen

- BRUGG Kabel AG, Brugg:

Fertigung von Energiekabeln bis 400 kV

23. Juni 2006, halbtags (im Rahmen des Mentorenprogramms)

Besichtigung der modernen Netzleitstelle Esslingen (Führung des 110-kV-Netzes und der regionalen Mittelspannungsnetze) der EnBW Regional AG und des Heizkraftwerks Altbach mit Rundgang

18. Juli 2006, ganztägig

Besichtigung der beiden Blöcke des Kernkraftwerks Philippsburg der „EnBW Kraftwerke AG“ mit ausführlicher Diskussion aktueller Fragen zur Energiepolitik und -versorgung (30 Teilnehmer)

### 3.4. STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

Abgeschlossene Diplomarbeiten vom 1.11.2005 bis 31.10.2006:

| Name                | Thema                                                                                                                                                           |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ahmetagic, Ibro     | Messung und Simulation der Funkstörspannung unterschiedlicher Kabelarten.<br>Measurement and simulation of the conducted emission of different cable harnesses. |
| Bayer, Thomas       | EMV-Modellierung und Simulation komplexer Kabelbaumsysteme mit CableMod.<br>EMC simulation for different cable harnesses in CableMod.                           |
| Elpasidis, Georgios | Aufbau eines Messsystems zur Messung hochfrequenter Störströme auf Kabelbäumen.<br>Measurement of high frequency currents on cable harnesses.                   |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Heise, Tobias         | Fuzzy-logische Zustandsbeurteilung von Leistungsschaltern für das Asset Management.<br>Condition-assessment of circuit breakers by fuzzy-logic for asset-management.                                                                                             |
| Krämer, Jens          | Zusammenhang zwischen Störspannung und Störstrom nach CISPR25.<br>Interrelationship of conducted voltage emission and current measurements according to CISPR25.                                                                                                 |
| Kubach, Michael       | Entwicklung und Aufbau einer dreidimensionalen Magnetfeldsonde mit optischer Signalübertragung.<br>Three-dimensional magnetic field probe with fiber optic signal transmission.                                                                                  |
| Kuhnle, Daniel        | Optimierung der UHF-Sensoren mit Entwicklung eines Performance Check.<br>Optimisation of UHF sensors with development of a performance check.                                                                                                                    |
| Margaritis, Georgios  | Optimierung des Betriebs- und Ruhestromverhaltens eines KFZ-Bordnetzes.<br>Optimization of the operation and stand-by current performance of an automotive power network.                                                                                        |
| Merella, Demistoklis  | Entwicklung und Inbetriebnahme eines potentialfrei fernsteuerbaren Verstärkers und Hochspannungsteilers mit Pegelanpassung.<br>Development and initial operation of a potential-free remote controlled amplifier and high voltage divider with level adjustment. |
| Narenda, Uppaluri     | Optimierte ESD-Strategien in der Automobilelektronik.<br>Optimized ESD strategies in automotive electronics.                                                                                                                                                     |
| Petnga Ngankou, Nelly | Instandhaltungs- und Wartungsstrategien für die Betriebsmittel des elektrischen Energieversorgungsnetzes von Kamerun.<br>Maintenance strategies of Cameroon's electric power network.                                                                            |
| Schultz, Steven       | Portierung von Software-Paketen von NT auf XP - Fixing von Bugs und Verbesserung kleinerer Programm-Routinen<br>Transfer of software-packages from NT to XP - fixing of bugs and upgrades of little program routines.                                            |
| Shao, Qiuhua          | Der Bubble-Effekt in Öl-Papier-Isolierungen.<br>The bubble-effect in oil-paper insulations.                                                                                                                                                                      |
| Tu, Hongwu            | Modellierung von Dielektrika im Frequenzbereich.<br>Modelling of dielectrics in frequency domain.                                                                                                                                                                |
| Zorn, Tobias          | Korrelation und Simulation von Emissionsmessungen mit Antenne und Stromzange.<br>Correlation and simulation of radiated and conducted emission measurements.                                                                                                     |

**Abgeschlossene Studienarbeiten vom 1.11.2005 bis 31.10.2006:**

| Name               | Thema                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Burow, Simon       | Entwicklung und Aufbau eines Empfängers für eine 3D-Magnetfeldsonde mit optischer Signalübertragung.<br>Development of a receiver for a 3D magnetic field probe with fiber optic signal transmission.                 |
| Cui, Xuelel        | Dielektrische Eigenschaften von Öl-Papier-isolierten Modellen.<br>Dielectric properties of oil-paper-insulated models.                                                                                                |
| Dais, Ansgar       | Einfluss der Ölalterung auf die Durchschlagspannung.<br>Influence of oil ageing on the breakdown voltage.                                                                                                             |
| El Kabbani, Haled  | Entwicklung eines Testsystems zur Auswertung von Transformator-Schutzalgorithmen.<br>Development of a test system for evaluation of transformer protection algorithms.                                                |
| Heger, Patrick     | Erstellung eines Fachpraktikumversuches: Simulationsmethoden in der EMV.<br>Documentation of a new laboratory course: Methods for EMC-Simulation.                                                                     |
| Heindl, Maximilian | Entwicklung eines Algorithmus zur Bewertung der FRA.<br>Development of an algorithm to evaluate the FRA.                                                                                                              |
| Hoffmann, Erik     | Simulation nichtlinearer Bauelemente im Zeit- und Frequenzbereich.<br>Simulation of non linear elements in time and frequency domain.                                                                                 |
| Hu, Bin            | Versuchsaufbau eines elektrischen Steuersystems für „Gas-in-Öl“-Untersuchungen und deren Schutzeinrichtungen.<br>Construction of an electrical switchboard to control gas-in-oil experiments and its security system. |
| Kuhn, Hannes       | Druckabhängigkeit der Durchschlagspannung von Isolieröl.<br>Pressure dependence of breakdown voltage in oil.                                                                                                          |
| Kurz, Christian    | Messung von Transferfunktionen an einem Automobil.<br>Transfer function measurements of a vehicle.                                                                                                                    |
| Ma, Jie            | Einfluss von Feuchte und Temperatur auf die Ölleitfähigkeit<br>Influence of moisture and temperature on oil conductivity.                                                                                             |
| Neumüller, Marco   | Modellierung der Deckelöltemperatur von Transformatoren mit numerischer Optimierungstechnik.<br>Parameter estimation for transformer top-oil temperature models.                                                      |
| Pfeffer, Anne      | Neue Konzeption des Versuchs „Stossspannung“ mit zeitgemäßer Messtechnik.<br>New concept for the high-voltage-laboratory course „Surge Voltages“.                                                                     |
| Pfeffer, Anne      | Signalanalyse von Spectren mittels Wavelet-Transformation.<br>Signal analysis of spectra (interferences) using the wavelet transformation.                                                                            |

|                 |                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schmid, Thomas  | Erstellung einer Software für ein Online Monitoring System zur Datenerfassung, Datenverarbeitung und Visualisierung.<br>Programming of an online monitoring system software for data acquisition, data processing and data visualization. |
| Seibold, Robert | Feuchtebestimmung mit der Karl-Fischer-Titration.<br>Moisture determination using Karl-Fischer-Titration.                                                                                                                                 |
| Stahl, Marcus   | Normgerechte Prüfungen zur CE-Kennzeichnung.<br>Standard compliance test for CE-labelling                                                                                                                                                 |
| Vural, Ayhan    | Aufbau eines Systems zur Lokalisierung von TE durch Laufzeiten in GIS.<br>Setup of a system for the localization of PD by time delay in GIS.                                                                                              |
| Wang, Yun       | Nachbildung und Simulation von EMV-Komponenten mit FEKO.<br>Simulation of EMC-components with FEKO.                                                                                                                                       |
| Wegst, Wolfgang | Simulation und Messung des Übertragungsverhaltens von Mehradernkabelbäumen.<br>Simulation and measurement of the transfer function of multiconductor transmission lines.                                                                  |
| Zhang, Yelu     | Digitaler Transformatordifferentialschutz. Modellierung und Simulation mit MATLAB.<br>Digital differential protection of transformers. Modelling and simulation with MATLAB.                                                              |

## 4. PROMOTIONEN

- **Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals**

**Dipl.-Ing. Sacha M. Markalous**

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser

1. Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. F. Landstorfer

2. Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:

22.11.2006

Transformers, as an essential technical part of the electric network ensuring e.g. the energy exchange over wide areas between consumers and suppliers, represent at the same time a large capital value. A general growing focus on cost-effective condition-based maintenance (CBM) strategies, instead of time-based approaches, can be seen. CBM tactics may require a whole set of monitoring and diagnostic techniques. Beside several established methods to gather information about the current condition of a transformer used on a temporal basis, an increased need for possibilities of conducting the diagnostics in an online manner is arising. In view of the general advantages of online measurements, as there are (a) realistic stresses for the measurements and (b) permanent monitoring and inspection capabilities, this is quite comprehensible.

The diagnostic examination of partial discharges (PD) is regarded a powerful, non-destructive and sensitive diagnostic tool for the condition assessment of insulating systems. Electric PD measurements, conducted according to the IEC 60270 standard, are often referred to as 'conventional method'. Performed onsite/online on transformers these measurements show certain drawbacks and limitations, e.g. regarding the applicability of sensors and the receptivity for several disturbances. In contrast, the 'unconventional' electromagnetic (UHF) and acoustic PD measuring methods have advantages for onsite/online applications. For instance, their sensors do not need an electric connection to the high voltage circuit (hence the transformer might stay in full service for the sensor mounting) and the measurements show a certain independency of some relevant outer disturbing signals onsite (as e.g. corona). An additional benefit is the inherent possibility of a three dimensional determination of the failure location using arrival times of these PD signals. This is important, as general complete information about a PD activity comprise its level, its type and location.

Comparative sensitivity investigations of acoustic and electromagnetic PD signals revealed a very moderate damping of the UHF signals in oil and in the solid insulations, compared to the resulting attenuation of the acoustic signals. Especially for hidden PD defects a significantly higher sensitivity may be reached with the UHF method as a consequence. Results of experiments with UHF PD signals, concerning the damping characteristics of different materials and structures commonly used in transformer manufacturing, lead to the assumption that UHF PD signals can propagate within the whole transformer with comparatively low attenuation factors. Two different UHF propagation paths for PD occurring within windings might be possible. On one hand an electromagnetic detection might be feasible for signals propagating in the gap of e.g. high and low voltage winding (via different reflections). On the other hand the measurement even through a disc-winding should be possible. Additionally cavity resonances, which possibly make up the basis for advantageous narrow-band measurements, were revealed in analysis of the UHF spectra of PD in metallic tanks.

Due to the sensitivity differences between the UHF and the acoustic signals an advantageous combination of the two methods is reasonable. Two aspects of the combination can be pointed out: (a) the acoustic detection sensitivity is enhanced, caused by a denoising on the basis of an UHF-triggered averaging of the acoustic signals and (b) the plausibility and credibility of a finding regarding a potential PD activity is increased. In online UHF measurements it was demonstrated that a sensitive UHF trigger is available. The previously resulting acoustic online sensitivity is thus overcome through UHF-triggered averaging and acoustic PD signals, with a stable phase relation to the UHF trigger, can be verified with high sensitivity.

The determination of the failure location (geometric location of the PD) is managed using acoustic signal arrival times in a mixed-acoustic (i.e. electromagnetic triggering) or all-acoustic (acoustic triggering) manner. Three different alternatives of the appropriate system of non-linear observation equations can be distinguished. In the simplest case these equations characterize sphere functions around the acoustic sensors, which intersect at the PD origin. The solution of the equations systems can either be computed iteratively or in a novel non-iterative and direct way. This is possible in case of using the new introduced pseudo-time notation (related to the observation equations used in the Global Positioning System (GPS)). For acoustic source location the pseudo-time notation turned out to be very universal, since it even allows to localize defects with absolute time information from mixed-acoustic measurements.

A further important part of the location process, based on arrival times, is the correct arrival time determination, which is synonymous with determining the true beginning of the transient signal. Manual time determination (performed by an experienced

analyst) or automatic time picking (as it is frequently referred to) may be distinguished, while the latter has an objective character. Two different criteria, detecting either a change in the energy content of the signal or the auto-regressive (AR) processes modelling the signal, yielded satisfactory results. This is particularly important in the presence of the so-called structure-borne path problem, where structure-borne acoustic interferences disguise the onset of the acoustic PD signal travelled on the direct (oil) path from its source to a sensor. A further step, in improving the overall arising time determination accuracy, might be the additional application of a wavelet-based de-noising in a standard or excessive form. Both types of measurements can be addressed – single, as well as averaged acoustic signals.

- **Detektion und Lokalisierung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren mit akustischen und elektromagnetischen Signalen**

**Dipl.-Ing. Sacha M. Markalous**

Transformatoren gewährleisten als wichtiger technischer Teil des elektrischen Versorgungsnetzes den Leistungsaustausch zwischen den Konsumenten und den Anbietern elektrischer Energie. Zugleich repräsentieren sie auch einen großen Kapitalwert für die Netz- und Kraftwerksbetreiber. Bei den Instandhaltungsstrategien kann man die Tendenz weg von den zeit-basierten und hin zu den kosteneffektiveren, zustands-basierten Methoden beobachten. Zustands-basierte Ansätze erfordern eine Reihe von Überwachungs- und Diagnosetechniken. Neben verschiedenen etablierten Methoden, die Informationen über den aktuellen Zustand eines Transformators liefern und in definierten Zeitabständen verwendet werden können, ist ein gesteigerter Bedarf für Diagnosemöglichkeiten im Betrieb erkennbar. Angesichts der Vorteile von in-Betrieb Messungen (einerseits die realistischen Beanspruchungen während der Messung und andererseits die Möglichkeit der permanenten Überwachung und Inspektion) erscheint dies vernünftig. So werden eine zustandsabhängige Wartung und die Risikobewertung des Betriebs ermöglicht.

Die diagnostische Betrachtung von Teilentladungen (TE) ist als leistungsstarkes, nicht-zerstörendes und empfindliches Diagnosewerkzeug für die Bewertung des Zustandes von Isolationssystemen anerkannt. Elektrische TE-Messungen, die gemäß IEC 60270 durchgeführt werden, gelten als 'konventionelle Methode'. Zur Überprüfung der Transformatorisolation wird in den Prüflabors der Hersteller klassischerweise diese elektrische Messung von (TE) durchgeführt. Bei Messungen an öl/papierisolierten (evt. auch gealterten) Transformatoren vor-Ort in den Anlagen

oder im Betrieb können sich bestimmte Nachteile und Einschränkungen ergeben, z. B. durch die Montage der Sensoren oder wegen der Empfindlichkeit gegenüber gewissen Störungen. Die sogenannten 'unkonventionellen Methoden' der elektromagnetischen (ultrahoher Frequenzbereich - UHF) und akustischen TE-Messung haben hier Vorteile. So benötigen die hierbei verwendeten Sensoren keine elektrische Verbindung zum Hochspannungskreis (daher kann der Transformator während des Betriebs mit Sensoren ausgestattet werden), und die Messungen zeigen eine gewisse Unabhängigkeit von einigen relevanten äußeren Störungen vor-Ort (z. B. Koronaentladungen). Ein zusätzlicher Vorteil ist die inherent vorhandene Möglichkeit der drei-dimensionalen, geometrischen Fehlerortung bei Verwendung der Laufzeitinformationen der akustischen und elektromagnetischen TE-Signale. Da eine umfassende TE-Diagnose Informationen bezüglich der Stärke, des Typs und auch des Entstehungsortes benötigt, ist dies ein sehr wichtiger Aspekt.

Gegenüberstellende Experimente und Empfindlichkeitsuntersuchungen von UHF und akustischen TE-Signalen zeigten nur sehr moderate Dämpfungen für die UHF-Signale in Öl und in der Feststoffisolation. Die elektromagnetische UHF-Methode hat somit Empfindlichkeitsvorteile besonders bei durch Feststoffisolation verdeckter TE. Unklar waren allerdings konkrete Dämpfungswerte und die Wirkung kombinierter Strukturen, beispielsweise von Spulen, auf die UHF-Signale. Empfindlichkeitsuntersuchungen der elektromagnetischen UHF-TE-Messung mit häufig im Transformator vorkommenden Isolationsmaterialien und Strukturen (z. B. eine ganze Wicklung) führen zur Annahme, dass sich elektromagnetische UHF-TE-Signale innerhalb des gesamten Transformators mit vergleichsweise kleinen Dämpfungsfaktoren ausbreiten können. Für TE, die zwischen den Wicklungen entstehen, sind zwei Ausbreitungswege denkbar. Zum einen ist die Ausbreitung im Streuspalt (zwischen Unter- und Oberspannungswicklung), zum anderen sogar durch eine Scheibenwicklung möglich.

Bei den Untersuchungen stand weniger die komplette frequenzabhängige Dämpfung, sondern mehr eine integrale Aussage über die Art und Weise im Mittelpunkt, wie stark diese Materialien und Strukturen die detektierbaren UHF-Impulse beeinflussen. Mit den Experimenten wurden die Materialien und Strukturen, die einen Großteil von öl/papierisolierten Transformatoren ausmachen, modelliert. Im Einzelnen waren dies 8.4 cm dickes Pressboard, ein 0.5 cm breiter Spalt in einer Metallplatte und ein Teil einer Scheibenwicklung. Zusammen mit Öl stellen diese drei Materialien die wesentlichen Komponenten in einem Transformator dar, die für die Ausbreitung der UHF-TE-Pulse relevant sind. Alle Messungen wurden so durchgeführt, dass ein auftreten des UHF-TE-Signal eine simultan laufende elektrische TE-Messung nach IEC 60270 triggerte. Die Beziehung zur standardisierten elektrischen Messung und damit zur scheinbaren Ladung der jeweiligen UHF-Pulse war zu jedem Zeitpunkt gegeben. Zur Messung der unverstärkten UHF-Pulse wurde ein Transientenrekorder mit einer analogen Bandbreite von 3 GHz verwendet. Dass die Ausbreitung der UHF-TE-

Signale innerhalb des Transformatorkessels darüber hinaus stark von Reflektionen an den metallenen Wänden geprägt ist, zeigten Laborversuche, bei denen in den UHF-Signalen analytisch berechenbare Hohlraumresonanzen nachgewiesen wurden. Diese Hohlraumresonanzen können die Basis für vorteilhafte schmalbandige Messungen sein und ein ökonomisches Design von Überwachungs- oder Messgeräten ermöglichen.

Aufgrund der erheblich höheren Empfindlichkeit der UHF-Methode im Transformator, verglichen mit der akustischen TE-Messung, ist eine vorteilhafte Kombination der beiden Methoden sinnvoll. Dadurch kann mit Hilfe von 'Averaging (dt. Mittelwertbildung oder Überlagerung)' und dem damit verbundenen Entrauschen eine erhebliche Verbesserung der akustischen Signale erreicht werden. Die Anhebung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durch Entfernung von im Signal enthaltenem Rauschen mittels Mittelwertbildung ist sehr effektiv, wenn die folgenden Randbedingungen erfüllt sind: 1) das zu entauschende Signal ist repetitiv, 2) Signal und Rauschen sind unkorreliert und 3) es handelt sich um sogenanntes „weißes Rauschen“ (das Rauschen sollte im betrachteten Frequenzbereich eine konstante spektrale Dichte aufweisen). Während des Averaging-Prozesses wird mit sehr vielen akustischen Messungen kontinuierlich der Mittelwert gebildet. Das im Signal enthaltene Rauschen läuft gegen seinen statistischen Mittelwert Null (weißes Rauschen vorausgesetzt). Das Signal selbst (oder sein sich wiederholender Anteil) wird konstruktiv überlagert und bleibt unberührt.

Die höhere akustische Empfindlichkeit ist nur ein Aspekt der kombinierten UHF-Akustik TE-Messung. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die gesteigerte Ausagensicherheit. Mechanische Störquellen erzeugen normalerweise keine elektromagnetischen Signale im Innern des Transformators. Umgekehrt verursachen elektromagnetische Störungen keine mechanischen Signale mit stabiler Phasenlage, die nach dem Überlagerungsprozess für ein relevantes Signal sorgen könnten. Dies bedeutet, dass sichtbare, klare akustische Signale nach einem UHF-getriggerten Überlagerungsprozess sehr wahrscheinlich authentische TE-Signale sind, da eine innere TE das einzige Phänomen ist, das beide Signale zum gleichen Zeitpunkt hervorruft. Elektromagnetische in-Betrieb TE-Messungen zeigten, dass UHF-TE-Pulse als empfindliche Triggersignale für die akustische Mittelwertbildung zur Verfügung stehen. Zur Auskopplung der UHF-TE-Signale aus dem Transformatorinneren wurden scheibenförmige Sensoren entwickelt und verwendet, die über einen normalerweise zur Ölbefüllung benutzten Flachkeilschieber bei laufendem Betrieb in den Transformator eingeführt werden können.

Für die drei-dimensionale geometrische Bestimmung der TE-Fehlerstelle werden akustische Signallaufzeiten in gemischt-akustischen (d.h. elektromagnetisch oder elektrisch getriggert) oder rein-akustischen (akustisch getriggert) Messungen be-

nutzt. Eine TE wird dafür als punktförmige Quelle, die akustische und elektromagnetische Wellen in ein „homogenes“ Medium abstrahlt, modelliert. Abhängig vom gewählten Vorgehen (gemischt-akustisch oder rein-akustisch) liegt die Anzahl der Unbekannten in den nichtlinearen Gleichungssystemen bei drei - Raumkoordinaten ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) der TE - oder vier. Dadurch benötigt man für eine räumliche Ortung der TE mindestens drei oder vier akustische Sensorsignale mit nutzbarer Laufzeitinformation. Drei verschiedene Alternativen passender Systeme nichtlinearer Gleichungen können unterschieden werden. Im einfachsten Fall (mit vorhandenem elektrischem oder elektromagnetischem TE-Triggersignal) wird das Gleichungssystem über Kugelfunktionen charakterisiert, die sich im TE-Ort schneiden.

Die Lösungsalgorithmen nichtlinearer Gleichungssysteme sind häufig iterativer Natur. Ein neuer Ansatz innerhalb der akustischen Signalverarbeitung verwendet Pseudozeiten für die Aufstellung des Gleichungssystems in einer Form, wie sie im GPS (Global Positioning System) benutzt wird, und ermöglicht die Anwendung direkter, nicht-iterativer Lösungsalgorithmen, die für den Bereich der Geodäsie entwickelt worden sind. Die Lösbarkeit des Gleichungssystems, die Genauigkeit und die Fehlerfreiheit der Ortungsergebnisse hängen dabei nicht mehr von einem gewählten Startwert ab. Für die akustische Quellenlokalisierung stellte sich der Pseudozeiten-Ansatz als universell heraus, da er selbst die Lokalisierung von Quellen mit absoluter Zeitmessung erlaubt.

Ein weiterer wichtiger Teil des Lokalisierungsprozesses, der auf Laufzeiten basiert, ist eine hinlänglich korrekte Laufzeitbestimmung. Manuelle Laufzeitbestimmung (durch einen erfahrenen Benutzer) und automatische Laufzeitbestimmung können unterschieden werden. Zwei Kriterien, die entweder eine Änderung im Energieinhalt des Signales oder im auto-regressiven Prozess, der das Signal modelliert, detektieren, erzielten befriedigende Ergebnisse (normalerweise unter 5 % relativer Fehler in der ermittelten Laufzeit). Speziell im Hinblick auf die sogenannte Stahllaufweg-Problematik, bei der akustische Körperschall-Störungen den Beginn, der auf dem direkten (Öl-) Laufweg kommenden, akustischen TE-Signale verschleiern, ist dies ein gutes Ergebnis.

Ein weiterer Schritt, der die letztendlich entstehende Genauigkeit der Laufzeitbestimmung verbessert, kann die zusätzliche Anwendung von Wavelet-basiertem Entrauschen sein. Da TE beispielsweise in ihrer Intensität fluktuieren können, wird u. U. nicht immer die theoretisch erwartete Verbesserung beim Averaging erreicht. Zeitweise mögen TE auch komplett verstummen, bevor die Mittelwertbildung ein befriedigendes Niveau erlangt hat. Solche Aspekte können mit Wavelet-basiertem Entrauschen behandelt werden, wie auch rein-akustisch ermittelte Einzelimpulse. Bei Versuchen mit bereits durch Mittelwertbildung entrauschte Signale ergaben sich, speziell

bei niedrigen Überlagerungsanzahlen, große Vorteile durch ein zusätzliches Wavelet-basiertes Entrauschen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass bei einer TE-Messung (im Prüffeld, vor-Ort oder auch im Betrieb) eine klare Entscheidung über eine TE-Aktivität des Prüflings zu treffen ist. Eine Information über den TE-Ort liefert zusätzlich entscheidende diagnostische Hinweise für die Ursachenforschung und Risikoabschätzung. Für eine drei-dimensionale geometrisch exakte Ortung der TE-Fehlerstelle sind das empfindliche Ermitteln der akustischen Laufzeiten und verlässliche, robuste Ortungsalgorithmen erforderlich. Bei sehr kleinen TE-Pegeln helfen empfindliche UHF-TE-Messungen unter Öl, bis dato akustisch nicht erfassbare Fehler durch Mittelwertbildung (Averaging) sicher zu erkennen. Eine gesteigerte oder empfindlichere akustische Detektion führt dann auf eine neuartige, gesichertere Ortung der Fehlstelle.

Basierend auf eigenen Erfahrungen bei Messungen (vor-Ort/im Betrieb als auch in Prüffeldern) werden einige wichtige Schritte bei der akustischen TE-Ortung mit Hilfe von Signallaufzeiten und den dazugehörigen Beobachtungsgleichungen in öl/papier-isolierten Transformatoren empfohlen. Ein 'modus operandi' umfasst dabei Angaben zur:

- Sensorik (akustisch),
- Kombination der akustischen TE-Methode mit der elektromagnetischen UHF-TE-Messung (mögliche Mittelwertbildung akustischer Signale),
- Abfolge entscheidender Schritte der Nachbearbeitung der gemessenen Signale (zusätzliches Wavelet-basiertes Entrauschen und automatische, objektive Laufzeitbestimmung),
- Lösung des Lokalisierungsproblem (rechnerisch mit Hilfe eines iterativen Lösungsalgorithmus oder unter Verwendung direkter, sogenannter Ein-Schritt-Löser).

## ■ **Schutz von Regeltransformatoren**

**Dipl.-Ing. Tammam Hayder**

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser

1. Mitberichter:

Prof. Dr. techn. W. M. Rucker

2. Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:

08.12.2006

Transformatoren müssen wegen ihrer hohen Anschaffungs- und Ausfallkosten gegen interne Fehler geschützt werden. Als schneller selektiver Schutz wird der Differentialschutz mit Stromstabilisierung verwendet. Er hat die Aufgabe, beim Auftreten von internen Fehlern den Transformator schnell und selektiv abzuschalten und dadurch

eine Ausweitung des Schadens zu verhindern. Dazu ist es nötig, dass der Schutz in der Lage ist, auch solche Fehler festzustellen, die aus den Klemmengrößen nur schwer erkennbar sind. Ein solcher Fehler ist z. B. ein Windungsschluss ohne Erdberührung. Obwohl in der kurzgeschlossenen Windung ein immens hoher Strom fließt, verursacht dieser Fehler in den Leiterströmen des Transformators nur geringfügige Veränderungen. Liegt die aus diesen Veränderungen in den Leiterströmen resultierende Stromdifferenz unterhalb der Selektivitätsgrenze im Auslöse- und Differentialschutzdiagramm des Differentialschutzes, so bleibt ein Auslösesignal des Schutzes aus. Eine der Fehlertoleranzzonen im Auslöse- und Differentialschutzdiagramm des Transformator-Differentialschutzes ist bei Regeltransformatoren die Zone, welche die Stromdifferenzen berücksichtigt, die sich aufgrund des Regelprozesses mit einem Stufenschalter bilden. Dadurch ergibt sich ein Bereich, in dem der heutige Schutz nicht anspricht.

Ein weiterer Punkt ist die Vorgehensweise beim Schutz von Regelbänken (zwei miteinander verbundene Transformatoren). Es wird zurzeit jede Beschaltungsart untersucht und ein jeweils eigenes („typbezogenes“) Schutzkonzept entwickelt, was jedoch wegen der Anzahl der benötigten Schutzgeräte und Stromwandlergruppen nicht unbedingt kostengünstig ist. Regeltransformatoren bzw. Regelbänke kommen in letzter Zeit angesichts des steigenden Bedarfs an Leistungsflussmanagement zunehmend in unterschiedlichen Bauformen zum Einsatz.

Um diese Nachteile zu überwinden, wird in der vorliegenden Arbeit ein adaptives Verfahren für den Differentialschutz von Regeltransformatoren bzw. Regelbänken vorgestellt. Dieses Verfahren soll zu einer erheblichen Verbesserung der Empfindlichkeit des Schutzes gegenüber den bisher verwendeten Verfahren und zur Vereinfachung der Schutzkonzeption führen. Durch typbezogene komplexe analytische Funktionen, bestehend aus der Windungsanzahl der Wicklungen (einschließlich der Regelwicklungen als Variable) und weiteren Regelgrößen (z. B. Winkel), können Regelbänke und -transformatoren beschrieben werden. Diese Regelgrößen werden in Anlehnung an die Stellung des Stufenschalters bestimmt und online korrigiert. Insofern ist die Fähigkeit des Schutzes zur Erfassung der Stufenschalterstellung und zu einer adaptiven Anpassung der Primär- und Sekundärströme als Funktion dieser Stellung eine Voraussetzung für die Implementierung des Konzepts.

Nach einer Einführung in die Problematik wird eine Reihe von Regeltransformatoren unterschiedlicher Art betrachtet, deren analytische Adaptionfunktionen hergeleitet und präsentiert werden.

Um diese Adaptionfunktionen zu überprüfen sowie das gesamte Konzept zu testen, wurde ein einfaches Modell für Regeltransformatoren entwickelt. Die Elemente der

aus den Transformatorenenddaten errechneten Matrizen werden nach einem mathematischen Verfahren in Relation zur Stufenschalterstellung modifiziert.

Die vorgestellte theoretische Betrachtung wird mit einem Überblick über praktische Realisierungsaspekte abgerundet, die Erfassungsmöglichkeiten der Stufenschalterstellung werden auch angesprochen. Des Weiteren wird ein Realisierungsvorschlag gemacht und die Machbarkeit anhand einer Implementierung auf einem digitalen Signalprozessor überprüft.

Am Schluss werden Simulationsergebnisse präsentiert, dadurch wird Folgendes nachgewiesen: Erstens die Fähigkeit der typbezogenen Adaptionfunktionen, die Regeltransformatoren zu beschreiben, und zweitens die Fähigkeit des Konzepts, einen empfindlichen selektiven Schutz für den Regeltransformator zu gewährleisten.

In der Arbeit wird auch auf das Thema "Signalaufbereitung im Differentialschutz von Transformatoren" eingegangen, es werden Filteralgorithmen analysiert und miteinander verglichen und Verbesserungsmöglichkeiten vorgeschlagen.

## ■ **Protection of Regulating Transformers**

**Dipl.-Ing. Tammam Hayder**

Increased energy demand, deregulation, privatization of the power supply industry and cross-border energy transport often cause utilities to operate and stress transmission systems to, and occasionally beyond, the capabilities they were originally designed for. Maintaining reliable, secure and economical operation of interconnected networks under these conditions requires that transmission operators improve their control and management of network power flows and provide voltage stability. Today, new power electronics applications such as unified power flow controllers (UPFC) are available to control network power flows. Since regulating transformers have proved efficient in controlling the power flows and regulating the voltage, they are more and more widely used.

In this changing environment of energy production, transmission and distribution high demands on the protection equipment are required, concerning sensitivity, security and reliability. Especially the policy of integrating protection functions into the control and monitoring systems challenges protection engineers to improve the sensitivity of protection, so that low-current faults could be detected (like turn-to-turn short circuits in transformer windings) and a warning message given. Moreover, the idea of an adaptive protection that adjusts the operating characteristics of the relay system in response to changing system conditions has become much more promising. It

improves the protection sensitivity and simplifies its conception. This thesis presents an adaptive adjustment concept for differential protection of regulating transformers.

### **Protection of regulating transformers - state of the art**

Regulating transformers may be of the “in-phase” type or the “phase-shifting” type. The in-phase type provides means for increasing or decreasing the circuit voltage at its location under load without changing the phase angle. The phase-shifting type changes the phase angle and usually also the voltage magnitude under load. A regulating transformer may be used alone in a circuit or in conjunction with a power transformer. Or the regulating-transformer function may be built into a power transformer.

The current approach to the conception of differential protection for regulating transformers is as follows: For power transformers with regulating winding (mostly in-phase type), the percentage slope of the differential relay should be high enough to accommodate the full range of voltage change, as already mentioned for tap-changing power transformers. A general set to operate for a current imbalance of 15 % greater than the imbalance due to maximum regulation is recommended [IEEE C37.91, 2000]. Thereby the protection sensibility is significantly impaired.

In the case of a regulating transformer in conjunction with a power transformer, a concept of protection for every arrangement should be developed. The most commonly used circuit for a two-core design, “phase-shifting” type is the symmetrical phase shifting transformer (PST). This configuration consists of an auxiliary unit, whose secondary winding is connected serially into the transmission path and a main unit which is equipped with a fully tapped low-voltage winding. This PST is protected by dual, redundant protection systems including a percentage-differential relay with harmonic restraint and an individual current transformer for each system. So far, several tests had to be carried out to determine the current transformer connection and ratio requirements and to adjust the relays [IEEE C57.135, 2001].

### **Adaptive differential protection for regulating transformers**

A protection concept on the basis of an adaptive current balance of primary and secondary currents (source and load by a design consisting of two transformers) on the regulating transformer in relation to the tap changer position enables the attainment of two goals: the improvement of the protection sensitivity and the simplification of the protection conception. For an implementation of the concept the protection must be able to detect the tap changer position and to adapt the adjustment of the secondary currents as a function of the tap changer position.

The main idea of the concept is the description of transformers by an analytical complex function consisting of the number of turns of the windings and including the regulating winding(s) as variables, which are determined and adjusted online depending on the tap changer position as well as other controlled variables in the function (e.g. angle).

### **Derivation of analytical adaptive functions**

The well-known equivalent circuit (positive-sequence) of transformer is used. The circuit consists of a serial impedance and a complex ratio of turns. Only the ratio of turns is relevant for the concept.

The way of the derivation of the function depends on the design type of the regulating transformer. In the case of a single-core regulating transformer, the internal connection of windings should be analysed. In the case of a double-core regulating arrangement, one has to distinguish between two types according to the connection of the auxiliary unit: If the winding on the load side of the auxiliary unit is galvanically separated from the main unit, the complex ratio of turns can be calculated by multiplying the ratio of turns of both units with each other. In the other type, a winding of the auxiliary unit is connected into the transmission path and to the main unit. In this case, the auxiliary unit can be replaced by a controlled voltage source with an impedance. The further mathematical handling of the equivalent circuit diagram leads to a simple three-phase two-winding transformer. In this thesis, a catalogue containing adjustment functions for several common designs of regulating transformers has been compiled.

### **Modelling of regulating transformers**

Two models have been used in this thesis:

- a) A geometrical model whose elements are derived from the geometrical arrangement of the transformer. Different fault conditions can be simulated by changing the appropriate impedances. A change of the tap changer position can be accounted for by changing the turns ratio of the ideal transformer on the regulating winding.
- b) A matrices model: It is based on the physical concept of representing windings as coupled coils, so a system can be described in the time domain using two matrices  $[R]$  and  $[L]$  and the Laplace operator  $p$ :

$$[u] = [R][i] + [L][pi]$$

This model is successfully implemented in the simulation program EMTP-ATP as a routine named BCTRAN. In order to model internal faults, new elements can be

added which are computed using mathematical equations modelling the faulted transformer. A model for a regulating transformer can be created in the following two steps:

1. The matrices  $[R]$  and  $[L]$  modelling a regulating transformer with nominal position of the tap changer (position 0) are calculated using the BCTRAN routine of ATP.
2. In this step the ratios between the elements of two successive positions  $i$  and  $i \pm 1$  of the tap changer are derived.

The period of changing between the two positions can be modelled by means of the switching sequence of the tap changer.

### **Conception of adaptive differential protection for regulating transformers**

The concept uses the well-known two protection methods: restricted earth fault protection and biased differential protection. In applying the differential protection a variety of considerations must be taken into account. After the elimination of zero sequence currents the ratio and the phase of signals on either side of the windings must be corrected. In place of constant correction factors the concept arranges software blocks for correction (ratio and phase) with an open input interface for adjustment functions depending on the type of the regulating transformers. Such an open platform allows an easy implementation of new functions. Prerequisite for the adaptive system is the recording of the position indicating signal. There are several possibilities for receiving the tap position. One possible way is via a direct connection with the tap changer. In this case the protection unit must be equipped with a processing unit for the conversion and transmission of the signal into an adequate code (like the BCD code). Another possibility for recording the position is via the communication system in the substation. The IEC 61850 is the international standard for substation automation systems. It defines the communication between devices in the substation and the related system requirements. It supports all substation automation functions and their engineering. For the tap changer position a “logical node” of the type ATCC, i.e. an Automatic Tap Change Controller, is defined.

### **Simulation results**

A lot of simulations have been carried out with the models presented above. Five different types of transformers have been simulated. Their rated data are provided by the transformer manufacturers. First, the accuracy of the derived adjustment functions have been checked. In a further step the stability of the restricted earth fault protection and the biased differential protection in case of external faults has been investigated. Furthermore, different short circuits in windings with the earth and turn-

to-turn short circuits in windings have been simulated. The following conclusions can be drawn:

- When checking out the adjustment functions, there remained a small difference current. Its amount depends on the fact on which side of the transformer the tap changer is installed. If the tap changer is installed on the primary winding then the residual difference current is bigger (about 0.06 p.u. of the rated current) because of a magnetising current; otherwise the residual current is less than 0.005 p.u. of the rated current.
- Both protection functions are stable in case of external faults. The position of the tap changer does not have a significant impact.
- Both the restricted earth fault protection and the biased differential protection have responded to different short circuits with earth and turn-to-turn short circuits in windings of the five simulated types. The increase of the earth fault protection indicators and of the fault characteristics in the relay diagram depends on several parameters: winding, place of fault, position of tap changer and fault resistance.

Simulations of turn-turn short circuits have shown that with an adaptive adjustment of the amplitude and the phase of the currents the protection is able to detect low-current turn-turn short circuits.

### **Investigation of technical feasibility**

In this investigation a Texas Instruments DSP 225 MHz has been used on the evaluation board. The algorithm of the differential protection of the transformer has been implemented on the DSP with the C-code. Simulated current signals have been sampled with a Matlab routine and transported to the evaluation board through an USB interface. The implementation of adaption functions as components which can be downloaded after the main program was successful. The execution time of currents adjustment by changing the changer position amounted to less than 0.1 ms.

### **Signal processing in digital protection relays for transformers**

Input signals to differential protective relays on transformers are not pure sinusoidal signals; they are contaminated with noise which must be eliminated in order to obtain signal quantities of interest. A filter must save the fundamental frequency components and up to the fifth harmonic components. There are two types of digital filtering algorithms for protective relays: a) algorithms with a data window and b) algorithms based on estimation of the signal parameters. The algorithms of the first type are mostly finite impulse response filters (FIR) whose output signal is related to the input signal by a convolution sum. The most common FIR filters in digital protective relays for transformers are one-cycle Fourier-filters and one-cycle Walsh- filters. The benefit

of the Walsh filter lies in the simplicity of the calculating, but in terms of accuracy and speed the one-cycle Fourier filter was found to be a good compromise for a digital implementation of the differential relay for power transformers. Algorithms of type b) are more complex than those of type a). Two filters of this latter family have been found suitable for the digital protection of transformers, the recursive least square filter (RLS) and the Kalman filter. In this thesis the Kalman filter has been used as a test case for recursive estimator filters.

The current attitude towards the use of Kalman filters in comparison to Fourier filters is that an application of the filter is justified only when the covariance of white noise cannot be assumed constant. Tests have shown the behaviour of an eleven-state Kalman filter and a one-cycle Fourier filter in the presence of new types of noise which could appear in a modern power system. In this thesis a test signal comprising several sinusoidal components and faults in a transformer simulated with EMTP-ATP have been considered.

- In case of a signal affected by white noise (constant covariance): Both filters appear to be capable of eliminating the noise, but a little improvement is obtained when the Kalman filter is used. Above all, the estimated fundamental frequency component has less standard deviation.
- Signal affected by decayed DC-component: In contrast to the Fourier filter, the Kalman filter is capable of rejecting the DC component.
- Signal affected by nonharmonic sinusoids: A quality improvement is clearly obtained by employing the Kalman filter.

In two cases the necessity for an improvement of the Kalman filter has been identified and solutions have been developed:

- In case of variations in the system frequency of more than  $\pm 50$  mHz from its normal value, the Kalman filter becomes unstable: One possibility is the use of an extended Kalman filter, which is simply an extension of the linear Kalman-filter theory to non-linear systems. The eleven-state filter must be extended to a twelve-state system in which the system frequency is considered as a system variable [Kim, 2005] and the relationships of the observed current signals become non-linear. The quality of the output signals obtained by using the recommended adopted Kalman filter is clearly an improvement, not only in comparison to the linear Kalman filter, but also in comparison to the Fourier filter.
- A significant problem in using the Kalman Filter is the long rise time after the occurrence of a fault in the transformer. The reason is the covariance matrix  $P$  which becomes smaller after a few iterations. To avoid this, the matrix  $P$  must be

reset to a high value when a fault occurs. A fault indicator is a jump in the difference current. This jump can be detected with a Hinkley detector [P-Mathonna, 1984].

In view of additional quality in power systems, a Kalman filter with the improvements recommended above could be a better alternative to a Fourier filter in differential protection relays for transformers.

## Conclusions

A significant improvement of protection sensitivity can be achieved with an adaptive current balance of primary and secondary currents on the regulating transformer in relation to the tap changer position. Furthermore, such an adaptive adjustment concept turns the differential protection relay into an universal relay for transformers. The development of an individual protection concept for every type of regulating arrangement and the use of several differential relays with current transformer groups for every relay is no longer necessary. The adaptive functions can be verified by means of the developed models.

In this thesis, the Kalman filter has been extended by using non-linear system relationships, in order to improve the filter stability in case of frequency variations. A Hinkley detector has been integrated which detects the jump of the difference current, so that the covariance matrix  $P$  can be reset to a high value when a fault occurs. Thereby the rise time of the filter upon the occurrence of a fault in the transformer is significantly reduced.

## ■ Diagnosis of Moisture in Transformer Insulation

**M.Sc. Chandima Ekanayake**

PhD-Thesis at Chalmers University, Göteborg,

18.01.2006

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

This thesis presents application of dielectric response measurements for identifying condition of high voltage insulation in power transformers. Results of such measurements, incorporated with different modelling techniques, allow to estimate moisture content in solid part of transformer insulation. For this to be accurate, a good understanding of the electrical behaviour of oil-impregnated pressboard/paper insulation is necessary. Calibrating measurements for correlating the dielectric response data and the moisture content in insulation were carried out. Furthermore, numerous field investigations were also performed for studying the feasibility on application of response measurements under different field conditions. The work presented in this thesis was mainly focused on frequency domain spectroscopy (FDS). FDS measurements (1E-4 Hz – 1E6 Hz) were performed on well-controlled

oil-impregnated pressboard/paper samples. Results of these were used to form master curves of the dielectric responses in a broad frequency range (e.g. 1E-7 Hz – 1E6 Hz). It had been observed that the presence of moisture influenced the permittivity of impregnated pressboard and paper at very low frequencies ( $< 0,1$  Hz), whereas its influence on the loss was more pronounced and visible in the whole frequency range below 1kHz. The FDS responses formed a database, which later was used to develop a computer program for interpreting the results of diagnostic measurements in terms of moisture content in the solid part of power transformer insulation. During the field experiments the influences of different conditions that could disturb the measurement were carefully studied and it was shown that guarded measurements between low voltage and high voltage windings (CHL) provide the most reliable data for further analyses. The estimated moisture content and the calculated oil conductivities from the results of FDS measurements were compared with the results obtained from Karl Fischer titration (KFT) and by direct measurements of conductivity of oils sampled from the investigated units. It had been shown that similar values could be attained by both methods when correct temperature values were used i.e. for analyses of FDS data the temperature value during the measurements was applied, whereas for KFT analyses the temperature of the unit during its normal service had to be considered.

- **Improved Signal Analysis Techniques for Short Circuit Tests in Transformers**

**M.Sc. S. Santhi**

PhD-Thesis at the Indian Institute of Technology, Madras,      September 2006  
Gutachter:      Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser

## 5. FORSCHUNGSARBEITEN

Das Institut befasst sich in seinen Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig mit Themen, die zur Sicherstellung einer zuverlässigen Energieversorgung beitragen. Dabei werden hochspannungstechnische Aufgaben auf dem Gebiet der Isolationsfestigkeit genauso bearbeitet wie Themen, die den Einsatz der Informationstechnik in der Energieversorgung und in der Hochspannungstechnik betreffen. Ein besonderer Schwerpunkt der Forschungstätigkeit ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei energietechnischen und elektronischen Systemen.

### **Arbeitsgebiet: Schutz und Überwachung von Betriebsmitteln**

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 entwickelt und verbessert, um z. B. die Restnutzungsdauer vorhersagen zu können. Zum anderen werden anlagenübergreifende Instandhaltungsstrategien entwickelt (Asset Management).

Weiterhin erfordert der vermehrte Einsatz von Mikrorechnern für den Schutz und die Überwachung von Betriebsmitteln die Entwicklung und Analyse von Algorithmen, die speziell auf die Digitaltechnik zugeschnitten sind. Am Institut wurden in den letzten Jahren adaptive Verfahren für den Schutz von Freileitungen, Kabeln und Transformatoren entwickelt. Momentan werden neuartige Methoden zur Überwachung von Transformatoren und SF<sub>6</sub>-Anlagen entwickelt.

### **Arbeitsgebiet: Hochspannungsprüf- und -messmethoden**

Am Institut werden moderne Messmethoden zur Erfassung hoher Stossspannungen und schnellveränderlicher elektromagnetischer Felder untersucht und weiterentwickelt. Besondere Schwerpunkte sind Untersuchungen zur Genauigkeit von Hochspannungsmessungen und die Erfassung der Messgrößen mittels digitaler Messgeräte mit eingebauter Intelligenz. 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, mit der akustischen TE-Messtechnik und mit der UHF-Methode zur Erfassung und Ortung von TE.

### **Arbeitsgebiet: Gasförmige Isolierstoffe**

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird seit längerem versucht, das reine SF<sub>6</sub> als Isoliermedium in metallgekapselten gasisolierten Schaltanlagen (GIS) durch SF<sub>6</sub>-Mischungen und alternative Isoliergase zu ersetzen. Für die Auswahl eines umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Gases sowie für die dielektrische Auslegung der GIS sind Schott- bzw. Stützisolatoren von großer Bedeutung. So wird an Modellanordnungen mit typischen Fehlstellen die elektrische Festigkeit von verschiedenen Gasgemischen untersucht. Weiterhin ist für technische Isolieranordnungen die Kenntnis des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Span-

nungsfestigkeit von großer Bedeutung. An Modellanordnungen wird deshalb der Einfluss der Feuchtigkeit und der Temperatur auf die Durchschlagfestigkeit bei verschiedenen Spannungsbeanspruchungen untersucht.

### **Arbeitsgebiet: Elektromagnetische Verträglichkeit**

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren einer der wesentlichen Schwerpunkte. Begonnen haben diese Aktivitäten mit der Erzeugung und Messung elektromagnetischer Feldimpulse mit extrem hohen Amplituden und sehr kurzen Anstiegszeiten. Dabei stand die Nachbildung von NEMP, LEMP und die Simulation von Trennerschaltungen in SF<sub>6</sub>-Anlagen im Vordergrund. Neuere EMV-Forschungsarbeiten befassten sich mit schnellen Emissionsmessverfahren im Zeitbereich (FEMIT: **F**ast **E**mission **M**easurement in **T**ime **D**omain) und mit der Modellierung und messtechnischen Untersuchung von elektrostatischen Entladungen von Kunststoffoberflächen.

Die momentan laufenden Forschungsarbeiten sind im Bereich der Automobil-EMV angesiedelt. Eine Arbeit befasst sich mit Korrelationsbetrachtungen zwischen im Automobilbereich üblichen Komponentenmessverfahren und den EMV-Messungen an Gesamtfahrzeugen. Dabei ist eines der Ziele, durch Messungen an einzelnen Fahrzeugkomponenten (z. B. Steuergeräten) auf das spätere Verhalten dieser Komponenten im Fahrzeug zu schließen. Eine weitere Arbeit befasst sich mit der EMV von Fahrzeugbordnetzen. Durch neue elektrische Aggregate in modernen Fahrzeugen können neuartige impulsförmige Störgrößen verursacht werden, welche für alle an diesem Bordnetz betriebenen Baugruppen u. U. Störgrößen darstellen, die durch die bisherigen EMV-Prüfverfahren nicht abgedeckt sind. Ziel dieser Arbeit ist es, die Störgrößen zu erfassen und zu klassifizieren und auch neue Messtechnik zu entwickeln, mit deren Hilfe diese sporadisch auftretenden Störgrößen im Fahrzeug sicher und ohne wesentliche Störbeeinflussung aufgezeichnet werden können.

Nicht unerwähnt bleiben sollen die Aktivitäten auf dem Gebiet der potentialfreien Messung elektrischer und magnetischer Felder. Seit mehreren Jahrzehnten waren Mitarbeiter unseres Instituts auf diesem Gebiet erfolgreich tätig. In jüngster Zeit wurden auch hier weitere Neuentwicklungen gemacht, wobei der Einsatz neuartiger VCSEL-Laserdioden mit sehr geringem Stromverbrauch im Vordergrund stand.

## ■ **Untersuchung der Fehlergasentstehung in Leistungstransformatoren**

**M.Sc. Jackelyn Aragón Patil**

Leistungstransformatoren sind teure und zugleich äußerst wichtige Komponenten des elektrischen Energieübertragungsnetzes. Die Deregulierung des Energiemarktes und die damit verbundene längere Betriebsdauer bestehender Anlagen führt zu einem erhöhten Ausfallrisiko. Aus diesem Grund besteht eine wachsende Nachfrage nach geeigneten Diagnoseverfahren, die gesicherte Zustandsprognosen erlauben und somit helfen, dieses Risiko besser einzuschätzen. Um den Zustand von Leistungstransformatoren beurteilen zu können, werden unterschiedliche Methoden der Diagnostik eingesetzt. Dabei ist die Analyse der gelösten Gase im Transformatoröl (DGA - Dissolved Gas Analysis) eine anerkannte Methode, die es ermöglicht, sich anbahnende Defekte rechtzeitig zu erkennen. Mit der DGA kann sowohl eine quantitative als auch eine qualitative Bewertung der im Öl gelösten Gase vorgenommen und damit eine Fehlerprognose aufgestellt werden.

Die Alterung der Öl-Papier-Isolierung ist mit dem Alter eines Transformators eng verbunden. Ein für die Lebensdauer kritischer Zustand kann anhand einer chemischen Auswertung des Isolationsmediums bestimmt werden. Entsprechend dem Befund ist der Betreiber dann imstande, Maßnahmen zu treffen, die zu einer Zustandsverbesserung führen.

Das Transformatormineralöl besteht aus Kohlenwasserstoffen, die, begünstigt durch Katalysatoren wie Hitze und metallische Bestandteile, mit dem Sauerstoff aus der Atmosphäre, Feuchtigkeit und Partikel reagieren. Durch den ständigen Luftaustausch zwischen Ölausgleichsgefäß und der Umgebungsluft eines frei atmenden Transformators (in Europa bevorzugt eingesetzt) unterliegt das Transformatoröl hauptsächlich einem Oxidationsprozess. Der Oxidationsprozess wird durch starke Spannungs- und thermische Beanspruchung, deren Begleiterscheinung ein erheblicher Anstieg der Öltemperatur ist, beschleunigt.

Der Oxidationsprozess wird durch äußerst reaktionsfreudige Radikale verursacht, die durch die Aufspaltung der Kohlenwasserstoffketten entstehen. Die Hauptprodukte dieser Zersetzung gehören zu den Stoffgruppen der Fettsäuren, Aldehyde, Ketone und Ester. Neben dem eben beschriebenen Oxidationsprozess zerfallen aufgrund der Energie einer Fehlerquelle die langen Kohlenwasserstoffketten in gasförmige Produkte wie  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $CO$  und  $CO_2$ . Diese gasförmigen Verbindungen sind im Öl lösbar und können bei bestimmter Konzentration, abhängig von Art und Intensität des auftretenden Fehlers, in Leistungstransformatoren gefunden werden.

Dieses Projekt befasst sich mit der Untersuchung der im Transformatorenöl gelösten Gase, indem Fehlerarten wie Teilentladungen oder Heißpunkte simuliert werden.

## ■ Investigation of Fault Gases Generation in Power Transformers

**M.Sc. Jackelyn Aragón Patil**

Power transformers are very expensive and vital components of the electrical power transmission network. Due to deregulation and continuous increasing age, there is a growing concern about the condition of such expensive power transformers. Consequently, diagnostic methods proved to be of great importance in order to gain insight into the condition of a power transformer. The Dissolved Gas Analysis (DGA) is known as one of the most acknowledged fault diagnostic method that allows detection of incipient faults developing in power transformers. Through application of DGA it is possible to make quantitative and qualitative estimation of gases dissolved in transformer oil and to derive a diagnostic of the fault. Furthermore, it allows implementation of maintenance plans for a reliable operation and extended life span of power transformers.

The life of a paper-oil insulating system is associated with life of the power transformer. For that reason, chemical evaluation of the insulating system allows to estimate the ageing condition of transformer oil and paper and, therefore, to infer any malfunctioning occurring in a power transformers. During the functioning of power transformers certain electrical and thermal failures may lead to deterioration of insulating system.

The mineral transformer oil consists of a mix of hydrocarbon molecules that react with oxygen from the atmosphere, moisture, particles and catalyst such as heat and metallic parts from the power transformer. The transformer oil is generally subjected to an oxidation process, due to regular air incursion into the free-breathing transformer system, which is applied mostly in Europe. Moreover, this oxidation process is significantly accelerated under severe electrical and thermal stresses, which are accompanied by a significant increase of oil temperature.

The oxidation process is induced by highly reactive radicals, which are products of hydrocarbon cracking. The main products of decomposition of transformer oil are acids, aldehydes, ketones and esters. Moreover, long chain hydrocarbon molecules are induced to breakdown by effect of fault energy, leading to formation of some gaseous products such as  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ . These gas compounds which are soluble in transformer oil can be found in certain amount depending on type and intensity of fault occurring in power transformers.

This project deals with the investigation of fault gases dissolved in transformer oil by constructing an experimental setup that resembles functioning of power transformers under faulty conditions induced by application of partial discharges or hotspots. The experimental setup consists of a high voltage (HV) system, an oil-filled tank with flow system and an online monitoring system based on DGA technique (Fig. 1 and Fig 2).

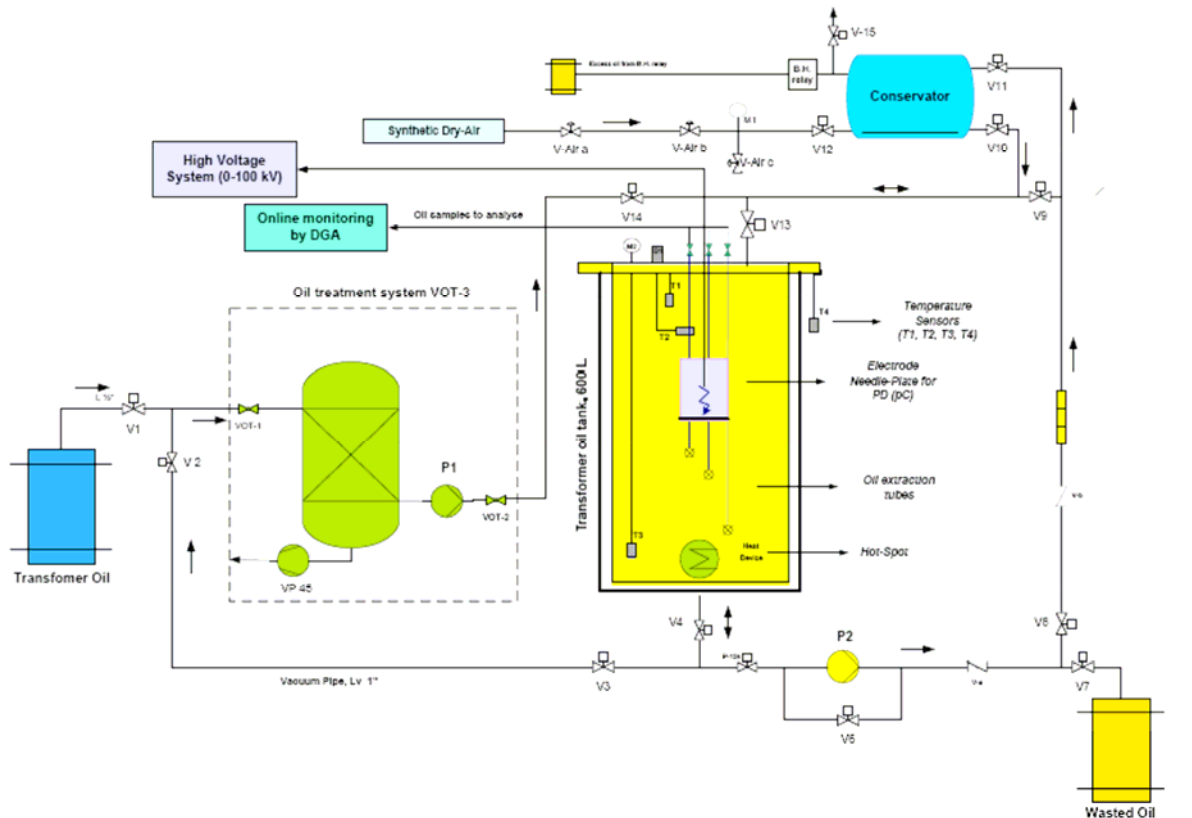


Fig. 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Fehlergasentwicklung im Trafo-Öl  
Experimental setup for investigation of fault gas formation in transformer oil

Der experimentelle Aufbau besteht dabei aus einem Öltank mit Ölumlauf-, einem Hochspannungs- und einem Online-Beobachtungssystem für DGA.

Über eine automatisierte Steuerung, die in einem Schaltschrank eingebaut ist, werden die Funktionen der Anlage ausgeführt. Die Übergabe der Parameter der elektrischen Anordnung sowie die Einstellung des Ölkreislaufes an die Anlagensteuerung erfolgt ferngesteuert am Computer mittels einer am Institut entwickelten Software.

Im Rahmen der DGA-Online-Überwachung zielt die Analyse der gelösten Gase darauf ab, den Zusammenhang zwischen einem bestimmten Defekt, seiner Intensität und dem Gasgehalt im Isolieröl zu bestimmen. Messungen in unterschiedlichen Tiefen des Öltanks ermöglichen ein besseres Verständnis der fehlerrelevanten Diffusionsvorgänge im Isolieröl.

Die Überwachung durch die DGA besteht aus der Entnahme von Ölproben, der Vakuumentgasung der Probe und der anschließenden Analyse der gewonnenen Gase. Am Ende der Analyse, nachdem mittels geeigneter Auswertekriterien die Menge und der Fehlergastyp bestimmt worden sind, erhält man eine gesicherte Fehlerdiagnose bzw. Zustandsprognose des Leistungstransformators.

Die chemische Analyse des Transformatoröls, welches ein wichtiger Informationsträger ist, spielt bei der Zustandsbewertung von Leistungstransformatoren eine wichtige Rolle. Es ist daher von großer Bedeutung, das jetzige Wissen über die Oxidationsprozesse des Transformatoröls als Folge von thermischen und elektrischen Belastungen zu erweitern.

The functioning of the experimental setup can be accomplished by means of an automated switchboard and software developed in Java for remote control by computer application. The main tasks of this software are to manage oil flow and electrical parameters.

Within the online monitoring by DGA, gas-in-oil analysis aims to explain the relation between a particular fault, its intensity and the quantity of gases. Measurements of gas-in-oil taken from different depths of the tank allow to gain understanding about the rate of diffusion of dissolved gases in transformer oil.

The monitoring by DGA consists of taking oil samples, extracting dissolved gases from oil samples by vacuum extraction and analysing gas composition. Afterwards, amount and type of fault gases are evaluated by means of interpretation criteria that bring out a quite reliable fault diagnostic and condition assessment of a power transformer.

Chemical analysis of transformer oil, which is an important information carrier, plays a decisive role in the assessment of power transformer. Furthermore, it aims at enlarging potential knowledge and understanding about the oxidation process of transformer oil under effect of thermal and electrical stresses.

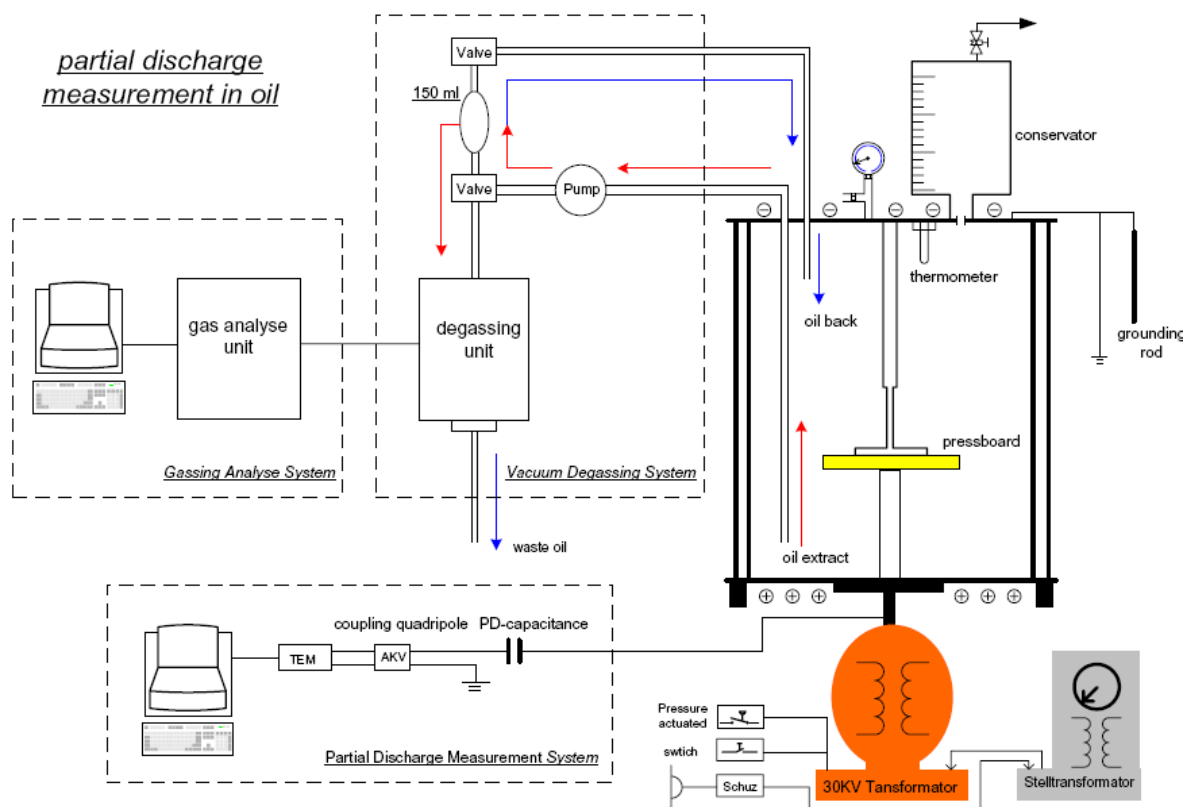


Fig. 2: Untersuchung über die Auswirkungen von Teilentladungen (TE) im Trafo-Öl  
Investigation of effects of partial discharge in transformer oil

## ■ Elektromagnetische Teilentladungsmessung im ultrahohen Frequenzbereich (UHF) an Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Sebastian Coenen

In zunehmendem Maße entsteht der Bedarf, die bestehende Isolationsqualität von Öl/Papier-isolierten Transformatoren vor Ort oder im Betrieb zu überprüfen. Eine wichtige, zerstörungsfreie und empfindliche Methode stellt dabei die Messung von Teilentladungen (TE) dar. TE unter Öl sind sehr schnelle elektrische Prozesse, die elektromagnetische Wellen mit Frequenzen bis in den ultrahohen Bereich (300 – 3000 MHz) abstrahlen. Ausgekoppelt werden diese elektromagnetischen Wellen durch UHF-Sensoren, wie beispielsweise in Fig. 1 zu sehen. Diese Sensoren können über einen zur Ölbefüllung benutzten Flachkeilschieber bei laufendem Betrieb in das Innere des Transformators eingeführt werden.

TE-Messungen an Betriebsstandorten von Transformatoren werden durch ein hohes Störniveau erschwert, verursacht durch Koronaentladungen an Freileitungen, Rundfunk- sowie Mobilfunkantennen.



Fig. 1: UHF-Kegelsensor für die Online-Messung mit Schubstange, Gehäuse und Flansch

UHF sensor for online measurement with connecting rod, housing and flange

Ein entscheidender Vorteil der UHF-Messmethode zur Detektion von TE ist die Ausnutzung des Transformatorkessels als Schirmung gegen externe elektromagnetische Wellen. Ausgekoppelte UHF-Signale aus dem Trafoinneren, wie in Fig. 2 zu sehen, ermöglichen eine klare Entscheidung über die TE-Aktivität eines Transformators.

Ein bisheriger Nachteil der UHF-Messmethode war die fehlende Möglichkeit, die applizierten Sensoren sowie das angeschlossene Messsystem auf ihre Funktionalität zu überprüfen. Ein neu am IEH entwickelter UHF-Sensor ermöglicht diesen sogenannten Performance Check.

- **Electromagnetic partial discharge measurement within the ultrahigh frequency range (UHF) in power transformers**

**Dipl.-Ing. Sebastian Coenen**

Analysing the existing insulation quality of oil/paper insulated transformers during full service or at least in field becomes more important. A powerful, nondestructive and sensitive diagnostic tool represents thereby the measurement of partial discharges (PD). PD under oil are very fast electrical processes and radiate electromagnetic waves with frequencies into the ultrahigh range (300 – 3000 MHz). These electromagnetic waves are detectable by UHF sensors, for example seen in fig. 1. These sensors can be inserted into the transformer during full service using the oil filling valve.

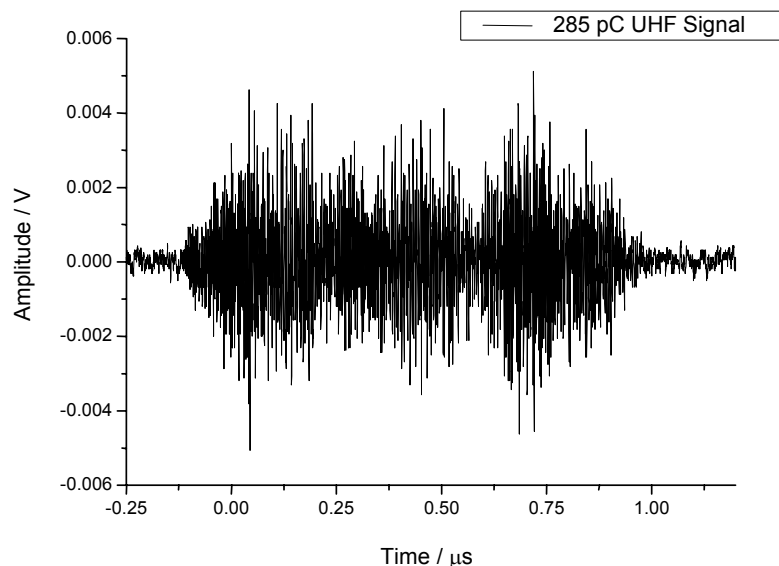


Fig. 2: UHF-Zeitsignal einer TE mit dem Ladungspegel von 285 pC  
UHF time signal of a PD with the charge level of 285 pC

Sensitive PD measurements in field at operating locations of transformers may be difficult because of a high noise level, caused by corona discharges in overhead power lines, broadcast antennas and mobile communication antennas.

An advantage of the UHF measuring method for the detection of PD is the utilization of the transformer tank as a shielding against external electromagnetic waves. Decoupled UHF PD signals from inside the transformer as shown in fig. 2, allow a clear decision about the PD activity of a transformer.

A disadvantage of the UHF measuring method up to now was the missing possibility to check the installed and inserted sensors as well as the attached measuring system for their functionality. For that so called Performance Check a new UHF sensor was developed at the IEH.

Grundlegende Idee ist, künstliche, hochfrequente elektromagnetische UHF-Signale isoliert vom Empfangspfad in den Transformator einzukoppeln und über den Empfangspfad wieder zu empfangen. Durch die Integration einer isolierten, monopolarartigen Elektrode in den kegelförmigen Sensorkopf, gemäß der schematischen Darstellung in Fig. 3, wurde eine parallele Leitungsführung in der Schubstange des Sensorgehäuses notwendig.

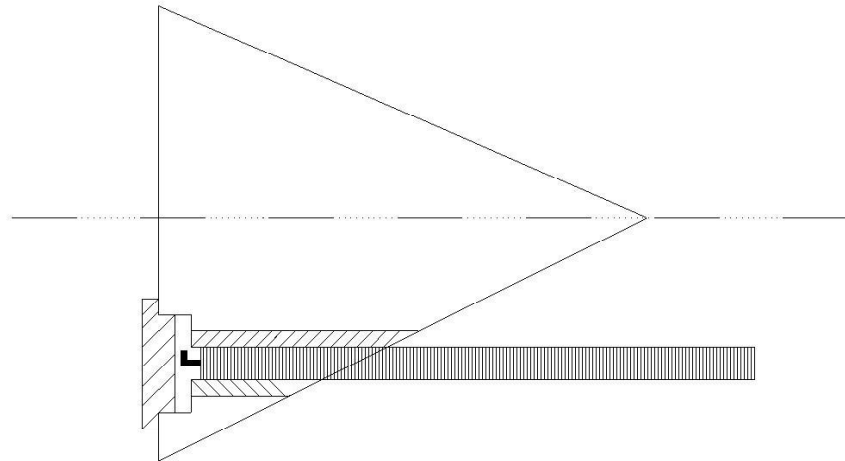


Fig. 3: Schematischer Schnitt des integrierten isolierten Monopols im Sensorkopf  
Schematic of the integrated isolated monopole inside the sensor head

Voraussetzung für den Funktionstest des Kegelsensors ist die Vermeidung der Überkopplung der elektromagnetischen Signale auf dem parallelen Leitungsstück. Die Leitungslängen ermöglichen eine Abschätzung der Signallaufzeit auf ca. 5 ns im Falle der ausschließlichen Überkopplung zwischen isolierter Elektrode und Kegelsensor. Diese theoretische Laufzeitdifferenz konnte in einem Laborversuch bestätigt werden.

Eine weitere Voraussetzung für eine aussagekräftige Funktionsüberprüfung ist die sichere Erkennung einer fehlerhaften Sensorinstallation. Denkbar ist beispielsweise, dass der Sensor durch den Kontakt zur Kesselwand geerdet wird und dadurch möglicherweise keine hochfrequenten Signale auskoppeln kann. Bei einer Referenzmessung wird der komplett montierte Sensor mit integriertem Monopol auf einem Labortisch liegend punktförmig geerdet. Das messbare Zeitsignal resultiert in einem Spektrum, das keine nennenswerten hochfrequenten Anteile aufweist (siehe Fig. 4, dicke schwarze Linie). Somit erfüllt der Funktionstest seine Aufgabe und ermöglicht den Nachweis einer fehlerhaften Sensorinstallation.

Die Funktion des Performance Checks wird in einem letzten Schritt mit dem an einen Versuchskessel angeflanschten Sensor untersucht. Nach Einspeisung eines hochfrequenten Signals konnte das Zeitsignal mit dem Frequenzspektrum in Fig. 4 empfangen werden (dünne graue Linie). Deutlich zu erkennen sind die hochfrequenten Signalanteile bis 2 GHz. Somit ist die klare Aussage möglich, dass der komplette Empfangspfad vom UHF-Sensor über die Messleitungen zum Transientenrekorder korrekt installiert ist.

The basic idea is to inject artificial UHF impulses separated from the receiving path and detect the injected impulses with the receiving path of the same sensor. By the integration of an isolated monopole electrode into the sensor head, according to the schematic in fig. 3, two parallel lines inside the sensor frame are necessary.

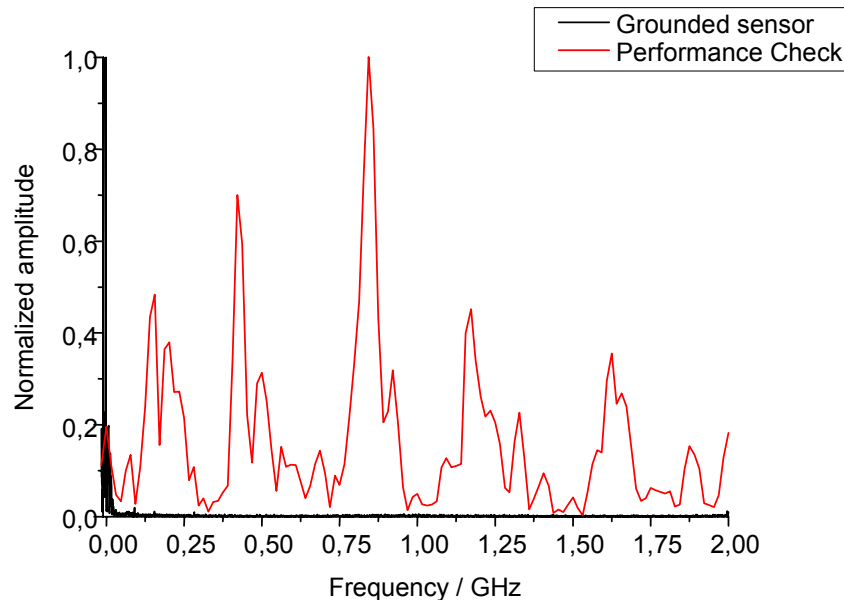


Fig. 4: Empfangenes Spektrum bei geerdetem Sensor (dicke schwarze Linie) im Vergleich zum fehlerfreien Sensor (dünne graue Linie) bei gleichem eingespeisten Signal

Received spectrum of the grounded sensor (thick black line) in comparison to the error free sensor (thin grey line) using the same injected signal

Precondition for the Performance Check of the sensor is the avoidance of coupled electromagnetic signals on the parallel receiving and transmitting line. The line lengths are used for an estimation of the signal run time for approx. 5 ns, in case of the exclusive coupling between isolated electrode and sensor head. This theoretical run time difference was confirmed in a laboratory test.

A further condition for a significant Performance Check is the recognition of an incorrect sensor application, e.g. if the sensor is grounded by contacting the tank wall and so cannot transfer high frequency signals. During a reference measurement the completely installed sensor with integrated monopole laying on a wooden table is punctually grounded. The detectable signal does not result in a spectrum with considerable high frequency fractions (see fig. 4, thick black line). So the function test fulfills its task and makes the proof of the correct sensor installation possible.

The method of the Performance Check is finally investigated using a test transformer tank in the laboratory. After injecting the artificial UHF impulses the signal with the responding frequency spectrum in fig. 4 could be received (thin grey line). Clearly recognisable are the high frequency portions up to 2 GHz. Thus the clear statement is possible, that the complete receiving path from the UHF sensor over the measuring lines to the transient recorder has been installed correctly.

## ■ UHF-TE-Diagnostik an Hochspannungskabelsteckern im Betrieb

M.Sc. Denis Denisov

Die Statistiken der Netzbetreiber zeigen, dass die Mehrzahl der Störungen in Energieversorgungssystemen in Mittelspannungskabelnetzen auftritt. Diese unterirdischen Kabelnetzwerke verteilen Energie über regionale Distanzen, hauptsächlich in dicht besiedelten und Industriegebieten. Die Gründe für die Ausfälle in den Kabelsystemen sind zu über 60% auf interne Defekte zurückzuführen, während die restliche Fehlerrate im Zusammenhang mit externen Einflüssen (z. B. Erdarbeiten) steht. Im Gegensatz zu Hochspannungskabeln sind Kabelanschlüsse und Kabelmuffen wesentlich komplexer aufgebaut. Sie bestehen in der Regel aus mehreren dielektrischen Materialien, welche höher ausgenutzt werden und reagieren daher empfindlicher auf kleine Störeinflüsse, z. B. Verunreinigungen bei der Montage vor Ort oder geringfügige mechanische Beschädigungen.

Nachgewiesene überhöhte TE-Aktivität in den Steckern ist ein klares Zeichen dafür, dass diese ausgetauscht werden müssen. Um solche TE-Aktivitäten unter Vor-Ort-Bedingungen und im Betrieb sicher zu erkennen, wird die UHF-TE-Diagnostik eingesetzt. Dieses Messverfahren basiert auf dem Empfang von elektromagnetischen Emissionen, die aus der TE-Quelle kommen. Der UHF-Sensor (Monopolantenne) soll möglichst nahe am Prüfling installiert werden und muss effektiv gegen Störungen aus der Umgebung abgeschirmt werden, wie in Fig. 1 zu sehen ist.

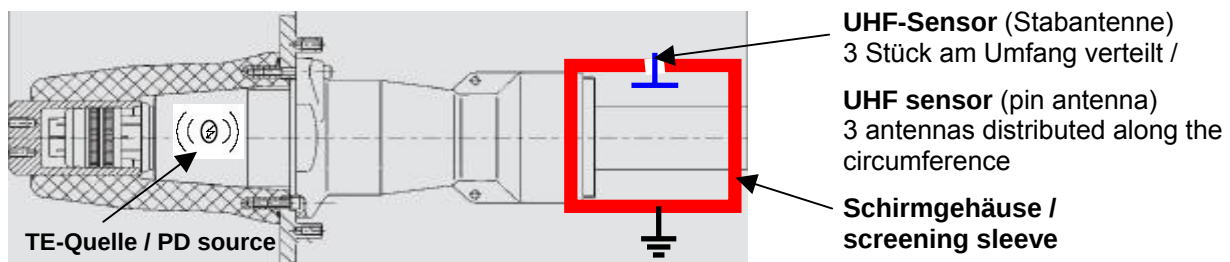


Fig. 1: Prinzipielle Anordnung zur UHF-TE-Diagnostik an Kabelsteckern  
Principal arrangement for UHF PD diagnostics on cable connectors

Die Kalibrierung der UHF-Methode bezüglich scheinbarer Ladung ist nicht direkt möglich, sondern nur indirekt durch eine Vergleichsmessung mit dem IEC 60270-Messverfahren, wie in Fig. 2 zu sehen ist. Durch diesen Vergleich wird auch die Empfindlichkeit der UHF-Methode nachgewiesen. Die TE-Intensität wurde durch die Änderung der angelegten Spannung variiert. Es stellte sich heraus, dass mit dem UHF-TE-Messverfahren in der vorliegenden Anordnung noch TE-Pegel unter 5 pC erfasst werden können.

## ■ **Online electromagnetic (UHF) partial discharge diagnostics of HV cable terminations**

**M.Sc. Denis Denisov**

Utility's statistics show that the majority of outages in power systems occur in distribution cable network. They are partly caused by external impacts, for instance by digging activities, but the major issue is still insulation degradation. Some failures caused by internal fault in the insulation of cable systems occur in accessories, such as joints and terminations. This is due to the fact that, in contrast to the cable itself, these components have a more complex structure, sometimes even with several dielectrics, and increased field gradients, and in addition they are assembled and installed under on-site conditions and thus exposed to the higher risk of defects and contaminations. Several IEC standards, e.g. IEC 60840, prescribe routine tests on the prefabricated components of HV cable accessories to be carried out by manufacturers. But an assembly done under on-site conditions can strongly affect the long-term performance of the completed accessory.

Modern plug-in cable connectors (terminations) for GIS and transformers are made of silicone rubber. The electrical life span of this high polymeric material exceeds 40 years, but only in absence of PD activity that inevitably causes material's degradation. To detect such a harmful activity under conditions of on-site on-line testing, UHF PD diagnosis principle can be deployed. This method is based on sensing the electromagnetic emissions from discharge sites in the insulation. The coupling sensors should be placed possibly close to the test object and effectively screened against outside interferences as shown in Fig. 1.

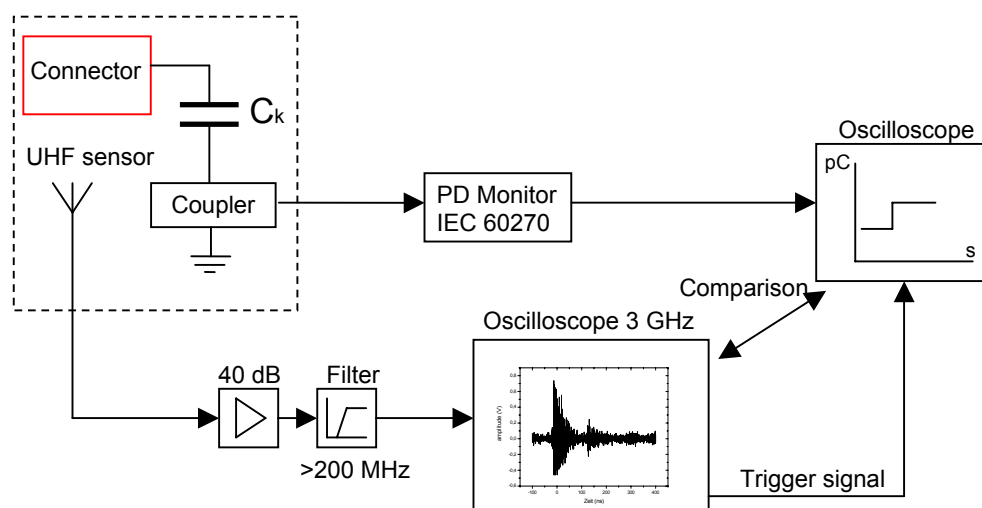


Fig. 2: Principal diagram for the sensitivity check  
Prinzipschaltbild zur Empfindlichkeitsprüfung

Vor-Ort-TE-Messungen wurden an Kabelsteckern im Bereich eines Kabelabganges an einer GIS durchgeführt, während die Anlage in Betrieb war, wie es in Fig. 3 zu sehen ist. An einem Stecker wird ein Schirmgehäuse (2) mit Sensoren angebracht. Im Innenraum des Schirmgehäuses sind drei 5 cm lange Monopolantennen so angeordnet, dass sich jede 1-2 cm über der Kabeloberfläche befindet und tangential zum Kabelquerschnitt orientiert ist. Die Antennen sind jeweils um 120° gegeneinander angeordnet, um den kompletten Umfang des Prüflings (1) abzudecken. Das von einer Antenne gemessene Signal wird durch einen 40 dB-Vorverstärker mit einer Bandbreite von 1 – 1000 MHz verstärkt und über ein Koaxialkabel zu einem schnellen Digitalspeicheroszilloskop geführt.

Fig. 4 zeigt einen typischen schnellen Impuls, der vor Ort an einem TE-behafteten Stecker aufgezeichnet wurde (Messbandbreite 3 GHz). Das Frequenz-Spektrum dieses Impulses (hell) und das Spektrum des Grundrauschens (dunkel) sind in Fig. 5 dargestellt. Abgesehen von Rundfunk- und Handysignalanteilen gibt es mehrere signifikante Spektralbereiche, die in diesem Fall auf interne Teilentladungen schließen lassen.

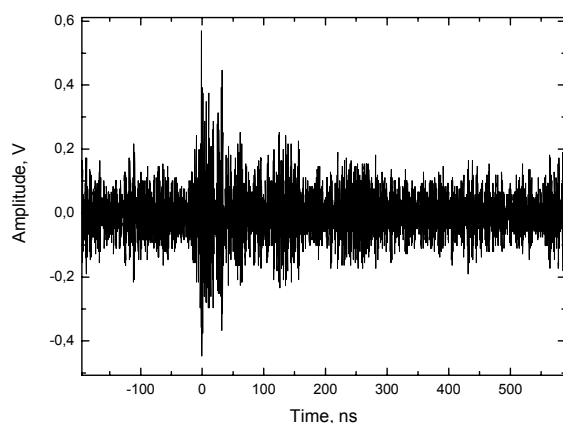


Fig. 4: Ein typischer schneller UHF-Impuls

Typical fast pulse emitted by  
some connectors

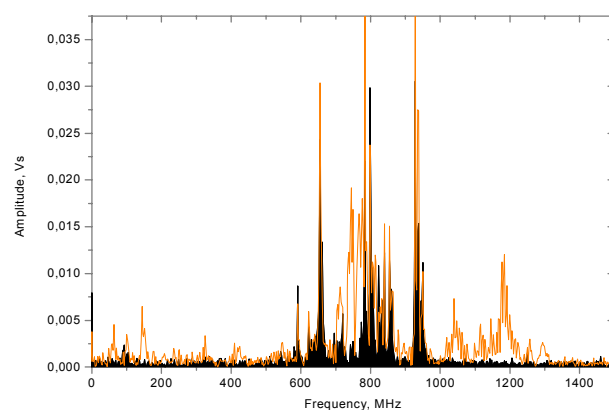


Fig. 5: Frequenz-Spektrum vom  
Impuls (hell) und Rauschen (dunkel)  
Frequency spectra of the pulse (light)  
vs. background noise (black filled)

Die UHF-Methode hat sich für die Zustandsbewertung von Kabelstecksystemen vor Ort prinzipiell als gut geeignet erwiesen.

Die Lokalisierung von TE behafteten Kabelgarnituren ist eine wesentliche Voraussetzung, um gefährdete Komponenten in Kabelnetzen zu beurteilen. Dadurch wird eine zerstörungsfreie Diagnose ermöglicht, und die Unterbrechung der Versorgung wird vermieden. Auf Basis der Messwerte vor Ort können rechtzeitig geeignete Wartungsarbeiten der schadhaften Komponenten geplant werden, ohne größere Folgeschäden, wie evtl. bei Netzausfällen, zu riskieren. Diese Vorgehensweise der zustandsbasierten Wartung ist weniger aufwändig und kostengünstiger als die Reparatur nach Schadensereignissen.

The calibration of the UHF method in terms of amount of apparent charge is impossible, but comparative PD measurements can be performed on the test set-up in the laboratory, using both the UHF method and the conventional method according to IEC60270, as shown in Fig. 2. This is done to estimate the maximum sensitivity of the UHF method. A sensitivity below 5 pC turned out to be detectable.

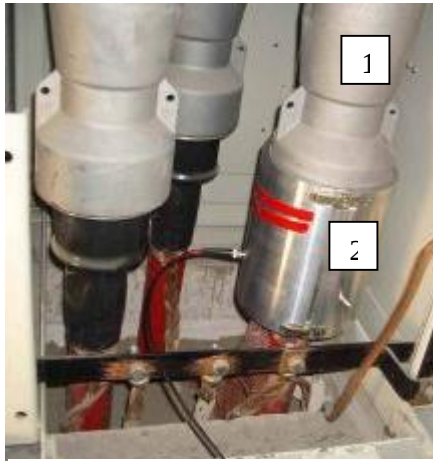


Fig. 3: On-site test set-up:

Vor-Ort-Aufbau:

1. Connector / Stecker
2. Sleeve/Schirm with antennas

To enable an on-site/on-line diagnostics a metallic sleeve (2) equipped with monopole antennas is clamped around the plug-in cable termination (1) while cable system is in service, as shown in Fig. 3. Inside of the screening sleeve there are three 5 cm long monopole antennas, each placed 1-2 cm above the cable surface and oriented tangentially to the cable cross-section. Antennas are shifted by 120° from each other to embrace the whole circumference of the test object. The signal from the antenna is fed to the digital oscilloscope by coaxial cables via a 40 dB pre-amplifier (in a frequency range from 1 to 1000 MHz).

Fig. 4 shows a typical fast pulse signal picked up on a faulty termination with a full oscilloscope's bandwidth of 3 GHz. The frequency spectrum of this pulse (light curve) and the spectrum of the background noise (black filled) are plotted in Fig. 5. Besides some broadcast and GSM frequency spikes there are several other high frequency components that indicate the presence of PD activity.

Several on-site/on-line measurements as well as laboratory experiments conducted in terms of this project demonstrate the effectiveness of the ultrawide band PD detection. The method can be applied to proof the quality of assembly work at commissioning as well as on a regular basis after many years in service to detect aged, risky terminations as a part of the condition-based maintenance.

Detection and recognition of the PD affected cable accessories is a predictive method to qualify high-risk components in the cable network. On-line on-site PD diagnostics is a valuable tool for non-destructive and non-supply-interruptive condition monitoring of cable systems. Based on the results of such on-site measurements some preventive maintenance actions on the defective cable components can be scheduled, without waiting for outage to the energy supply. This is the principle of condition based maintenance (CBM) that is less time consuming and more cost effective, than the corrective maintenance, i.e. fixing what has broken. The latter is in most cases associates with substantial damages and high repair costs.

## ■ Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Zustandsüberwachung von Leistungstransformatoren unter Anwendung der DGA

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Elektroenergieversorgungsunternehmen (EVU) sehen sich als Folge des liberalisierten Marktes mit einem verschärften Wettbewerb konfrontiert. Kostendruck einerseits und zu garantierende Versorgungsqualität andererseits zwingen EVU in Anbetracht ihres umfangreichen Betriebsmittelparks zur Anwendung intelligenter Instandhaltungsstrategien.

In diesem Kontext rechtfertigen teure und versorgungskritische Betriebsmittel, insbesondere Leistungstransformatoren, eine zustandsbasierte Instandhaltung mit Hilfe IT-gestützter online-Monitoringsysteme (ITOMS). Diese ITOMS dienen gegenwärtig mehrheitlich der Protokollierung zustandsrelevanter Messdaten der überwachten Betriebsmittel. Die Interpretation dieser Messdaten geschieht immer noch manuell.

Wünschenswert ist eine Ergänzung der ITOMS durch ein Interpretationssystem, das die verfügbaren zustandsrelevanten Messdaten automatisch zu entscheidungsrelevanten Zustandsdaten verdichtet. Entscheidungsträgern im Bereich der Instandhaltung wäre damit ein Werkzeug an die Hand gegeben, das diese befähigt, rechtzeitig zustandsabhängige Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten und damit andernfalls drohende Kosten durch Instandsetzung und Versorgungsausfall abzuwenden.

Für die Zustandsüberwachung von Leistungstransformatoren ist die DGA ein anerkanntes Hilfsmittel. Im Rahmen der DGA werden zunächst messtechnisch gelöste Gase im Isolieröl in qualitativer wie quantitativer Hinsicht erfasst. Schließlich werden die Messergebnisse im Hinblick auf mögliche Transformatorfehler interpretiert. Hierfür stehen verschiedene konventionelle Interpretationsmethoden zur Verfügung. Allen Methoden gemeinsam ist, dass sie Messgrößen  $\vec{m}$  auf Zustandsgrößen  $\vec{z}$  abbilden, d.h. zwischen  $\vec{m}$  und  $\vec{z}$  besteht ein funktioneller Zusammenhang  $\vec{z} = \vec{f}(\vec{m}) \in \vec{Z}$ , wobei  $\vec{Z} \in \{(z_1, \dots, z_n) \mid z_1, \dots, z_n \in \{0, 1\}\}$  den Bildraum definiert.

Es wurde bereits ein computerbasiertes Interpretationssystem entworfen, das ein differenzierteres Zustandsbild des Leistungstransformators zeichnet. Grundlage ist ein regelbasiertes Fuzzy-Inferenz-System (FIS), das mit dem erweiterten Bildraum  $\vec{Z}_e \in \{(z_1, \dots, z_n) \mid z_1, \dots, z_n \in [0, 1]\}$  arbeitet. Das FIS wird zunächst mit  $\vec{z} = \vec{f}_e(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  initialisiert, wobei  $\vec{z} = \vec{f}_e(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  aus  $\vec{z} = \vec{f}(\vec{m}) \in \vec{Z}$  durch Glättung hervorgeht.

Die Funktion  $\vec{z} = \vec{f}(\vec{m}) \in \vec{Z}$  ist als unvollkommen anzusehen, ebenso die durchgeführte Glättung, die nur auf Annahmen beruht. Daher ist nicht zu erwarten, dass die Funktion  $\vec{z} = \vec{f}_e(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  den Zusammenhang zwischen  $\vec{m}$  und  $\vec{z}$  optimal beschreibt.

## ■ **Methods of Artificial Intelligence for condition monitoring of power transformers applying DGA**

**Dipl.-Ing. Markus Fischer**

Due to the fact that the market is deregulated, electrical power companies (EPCs) are confronted with an increased competition. Cost pressure on one hand and reliability of power supply on the other hand force EPCs to apply clever maintenance strategies to their extensive equipment park.

In the context mentioned above, it is adequate to apply a condition based maintenance strategy to equipments that are expensive or important like power transformers. A first step is done by using IT-based online-monitoring systems (ITOMS). Up to now, ITOMS are predominantly only used to record condition relevant measurements of the observed equipment. The interpretation of these measurements is still done manually.

Therefore, it is desirable to complete these ITOMS with an interpretation system that automatically maps condition relevant measurements to decision relevant conditions. Thus, decision-makers in the range of maintenance are able to trigger - in time - maintenance tasks on equipment conditions so that they can avoid corrective maintenance costs as well as costs of outages.

Dissolved Gas Analysis (DGA) is an accepted way to supervise the condition of power transformers. At first, DGA is used to identify and to quantify gases that are dissolved in transformer oils. Finally, these measurement results undergo an interpretation procedure in terms of detecting possible transformer faults. Therefore, different interpretation methods are available. All of these methods are mapping measurements  $\vec{m}$  to conditions  $\vec{z}$  according to a function  $\vec{z} = \vec{f}(\vec{m}) \in \vec{Z}$ , in which  $\vec{Z} \in \{(z_1, \dots, z_n) \mid z_1, \dots, z_n \in \{0,1\}\}$ .

A computer based interpretation system was already designed to be able to draw a more sophisticated picture of the transformer condition. This type of interpretation system is based on a fuzzy-reasoning-system (FRS) that works with an extended range  $\vec{Z}_e \in \{(z_1, \dots, z_n) \mid z_1, \dots, z_n \in [0,1]\}$ . In the first instance the FRS will be initialized with a function  $\vec{z} = \vec{f}_e(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  that is emerging from  $\vec{z} = \vec{f}(\vec{m}) \in \vec{Z}$  through smoothing.

The function  $\vec{z} = \vec{f}(\vec{m}) \in \vec{Z}$  has to be assumed as imperfect as well as the smoothing which is done based on estimates. Hence, the function  $\vec{z} = \vec{f}_e(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  doesn't describe the interrelation of  $\vec{m}$  and  $\vec{z}$  perfectly.

However, we can optimize that function, if we take additional empirical knowledge about the interrelation of  $\vec{m}$  and  $\vec{z}$  into consideration.

Eine Optimierung kann jedoch erzielt werden, indem zusätzlich empirisches Wissen über den Zusammenhang zwischen  $\vec{m}$  und  $\vec{z}$  berücksichtigt wird. Empirisches Wissen wird entsprechend Fig. 1 schrittweise in das FIS eingepflegt, so dass das FIS mit der Zeit die optimale Funktion  $\vec{z} = \vec{f}_o(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  beschreibt. Der Experte gewinnt das empirische Wissen durch Abstraktion über die Datenpaare, die im Vorfeld bereits durch Beobachtung oder Messung ermittelt wurden (1). Dieses empirische Wissen wird mit dem Wissen verglichen, das bereits in das FIS eingepflegt wurde (2). Gegebenenfalls werden abschließend die Produktionsregeln (3) oder die Zugehörigkeitsfunktionen (4) angepasst bzw. ersetzt.

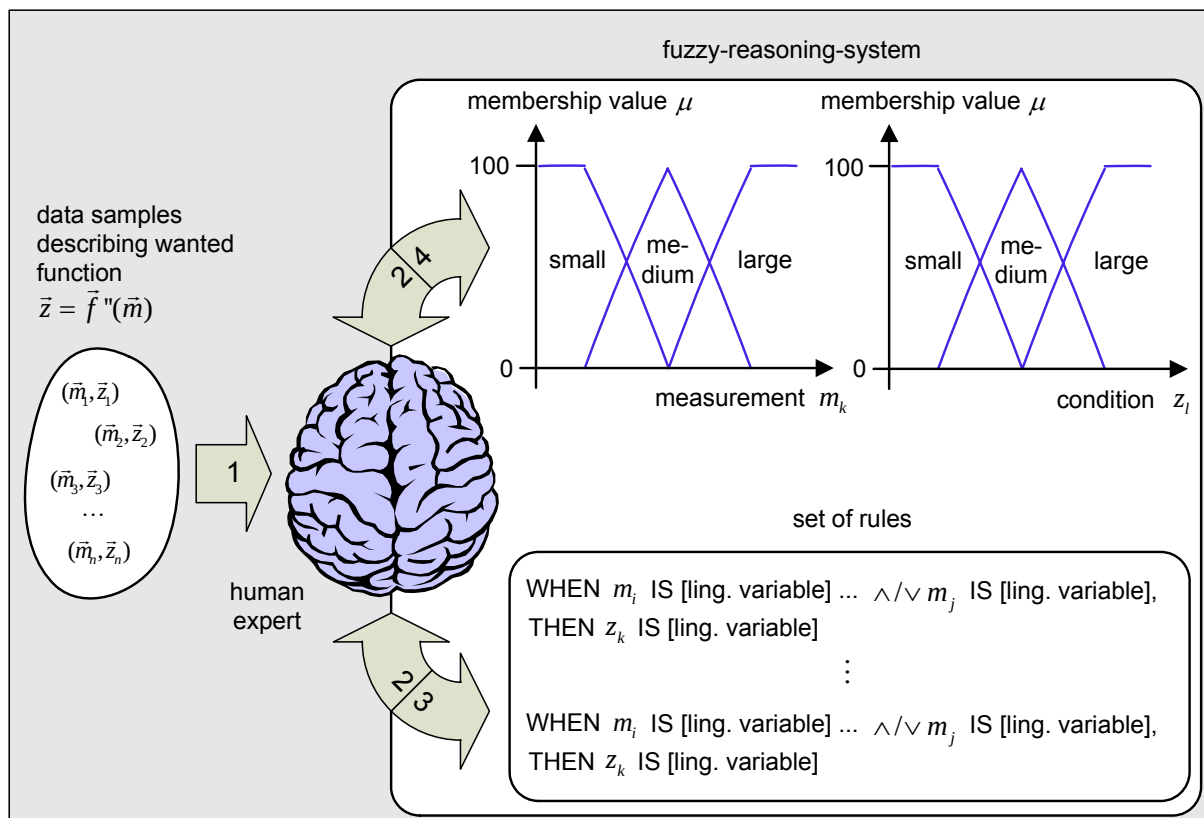


Fig. 1: Funktionsmodellierung mit Hilfe des empirischen Wissens eines Experten  
Modelling of a function by means of empirical knowledge of an human expert

Eine anderer Weg der datengetriebenen Modellierung von  $\vec{z} = \vec{f}_o(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  führt über ein künstliches neuronales Netz (KNN). Das KNN arbeitet parallel zum Experten, entsprechend Fig. 2. Zunächst wird dem KNN über das FIS die Funktion  $\vec{z} = \vec{f}_e(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  aufgeprägt (1). Infolgedessen beschreiben FIS und KNN beiderseits diese Funktion. Im nächsten Schritt wird das KNN einem Training unterzogen (2). Mit fortschreitendem Training baut sich das KNN derart um, dass es zunehmend  $\vec{z} = \vec{f}_o(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  beschreibt. Ein Clusterverfahren gewinnt aus dieser Repräsentationsstruktur wieder Produktionsregeln (3) und Zugehörigkeitsfunktionen (4) zurück, die dann bestehende Produktionsregeln und Zugehörigkeitsfunktionen im FIS ersetzen.

Experte und KNN sind also über das FIS gekoppelt und können ihren jeweiligen Kenntnisstand austauschen, um so gemeinsam  $\vec{z} = \vec{f}_o(\vec{m}) \in \vec{Z}_e$  zu modellieren.

According to Fig. 1 empirical knowledge is step by step introduced into the FRS, so that the FRS tends to describe the optimal function  $\bar{z} = \bar{f}_o(\bar{m}) \in \bar{Z}_e$ .

In order to get empirical knowledge, an expert has to abstract data samples that are sampled by means of observation or measurement (1). This empirical knowledge will be compared with the knowledge already maintained into the FIS (2). Finally, rules (3) or membership functions (4) will be adjusted or replaced if necessary.

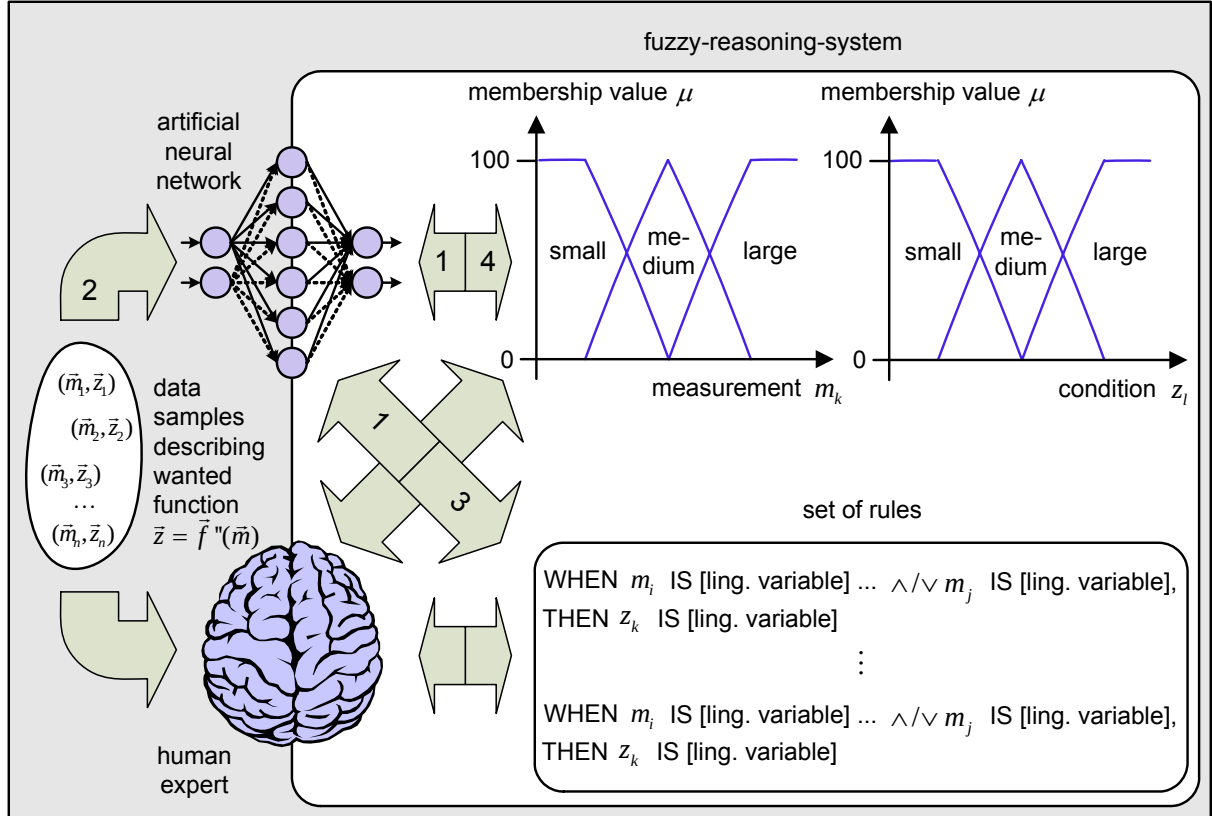


Fig. 2: Joint modelling of a function by means of a neural network and an expert  
Gemeinsame Funktionsmodellierung durch neuronales Netz und Experten

Another method to develop  $\bar{z} = \bar{f}_o(\bar{m}) \in \bar{Z}_e$  data-driven is based on an artificial neural network (ANN). The ANN is working in parallel to a human expert as depicted in Fig. 2. First of all, the ANN will be initialized with  $\bar{z} = \bar{f}_e(\bar{m}) \in \bar{Z}_e$  by FRS (1). Now, FRS and ANN are describing the same function. Next, ANN will be trained by data samples (2). During training the ANN will rearrange its structure such that the ANN will be more and more describing the function  $\bar{z} = \bar{f}_o(\bar{m}) \in \bar{Z}_e$ . A clustering procedure will then rebuild rules (3) and membership functions (4) based on the ANN-structure of  $\bar{z} = \bar{f}_o(\bar{m}) \in \bar{Z}_e$ . Finally, the resulting membership functions and rules will be maintained into the FRS instead of all existing rules and membership functions.

Thus, human expert and ANN are coupled via FRS and can mutually exchange their particular state of knowledge in order to model the function  $\bar{z} = \bar{f}_o(\bar{m}) \in \bar{Z}_e$  together.

## ■ **Wavelet-basiertes Verfahren zur Ortung von Teilentladungen in gasisolierten Schaltanlagen bei Messungen im Frequenzbereich**

**Dipl.-Ing. Stefan Hoek**

Durch die Liberalisierung des Energiemarktes ist es für die Verbundunternehmen sehr wichtig, die Kosten in allen Bereichen zu optimieren. Eine zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie stellt eine Möglichkeit dar, die Betriebskosten zu reduzieren. Durch eine empfindliche Messung von Teilentladungen (TE) können potentielle Fehlstellen in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) frühzeitig erkannt werden. Für die Bewertung des Risikos einer Betriebseinschränkung oder eines Ausfalles ist zum einen die Erkennung des Fehlertypus wichtig. Die Art der Fehlstelle lässt sich anhand verschiedener bekannter Methoden aus phasenaufgelösten TE-Mustern ermitteln. Eine weitere wichtige Information zur Risikoabschätzung ist eine schnelle und exakte Ortung der TE-Quellen. Bei der Ortung von TE in GIS können verschiedene Methoden, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen, verwendet werden. In der Praxis angewendete Methoden zur Ortung von TE sind das Zu- und Abschalten verschiedener Schaltanlagenteile (Sectionizing), die Laufzeitmessung elektromagnetischer Wellen, die akustische Messung (Laufzeit bzw. Amplitude) oder eine Kombination der genannten Verfahren. Eine neue Methode beruht auf der Messung von Interferenzen im Frequenzbereich. Die Messungen im Frequenzbereich haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu Messungen im Zeitbereich mit deutlich geringeren Hardwarekosten realisierbar sind und dass diese Hardware in vielen Messlabors schon vorhanden ist.

### **TE-Ortung mittels Interferenz in GIS**

Die Position der TE-Quelle in der GIS ist mit Hilfe der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen zwei Sensorsignalen, dem Abstand  $X$  der Sensoren und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  möglich (Fig. 1). Das Ortungsverfahren im Frequenzbereich nutzt die Interferenz zweier überlagerter Signale und bestimmt daraus die Laufzeitdifferenz  $\Delta t$ . Die Grundlage dafür ist der Verschiebungssatz der Fourier-Transformation.

#### Messverfahren

Um das Interferenzphänomen sichtbar zu machen, werden drei Energiespektren ausgewertet, die in folgender Weise (2) zu  $K(\omega)$  kombiniert werden. Wegen der Dispersionseffekte der höheren Moden in den GIS ist nur ein bestimmter Frequenzbereich (nur TEM-Ausbreitungsmodus) nutzbar, da für  $K(\omega) = K_t(\omega)$  in Gleichung (2) zwei ähnliche Sensorsignale benötigt werden. Die Energiespektren (Betragsfunktion) von Sensor 1  $F(\omega)$ , von Sensor 2  $G(\omega)$  und dem addierten Signal von Sensor 1 und 2  $H(\omega)$  werden mit einem herkömmlichen Spektrumanalysator gemessen. Der Laufzeitunterschied  $\Delta t$  ist aus der resultierenden Kosinusfunktion bestimmbar.

## ■ **Wavelet-based procedure for partial discharge localization in Gas-Insulated Switchgear in frequency domain**

**Dipl.-Ing. Stefan Hoek**

The liberalisation of the energy market forces utilities to optimize their costs. A condition-dependent maintenance strategy represents a possibility to reduce operating costs. A sensitive measurement of partial discharges (PD) allows the recognition of defects in gas-isolated switchgears (GIS). To assess the defect's risk in GIS the recognition of the defect type is important. It may be determined using different well-known methods like the phase resolved partial discharge pattern. A further important information to estimate the risk is a fast and accurate localization of the PD sources. For the localization of PD in GIS different methods are used, which are based on different physical principles. In practice the applied methods for localization are switching of different switchgear parts (sectionizing), the time-of-flight measurement of electromagnetic waves, the acoustic measurement (time-of-flight and/or amplitude) or a combination of these procedures. A new method is based on the measurement of interferences in the frequency range. Using a spectrum analyser (often available in laboratories) instead of an expensive fast digital oscilloscope (in time domain) could be an interesting and economic alternative.

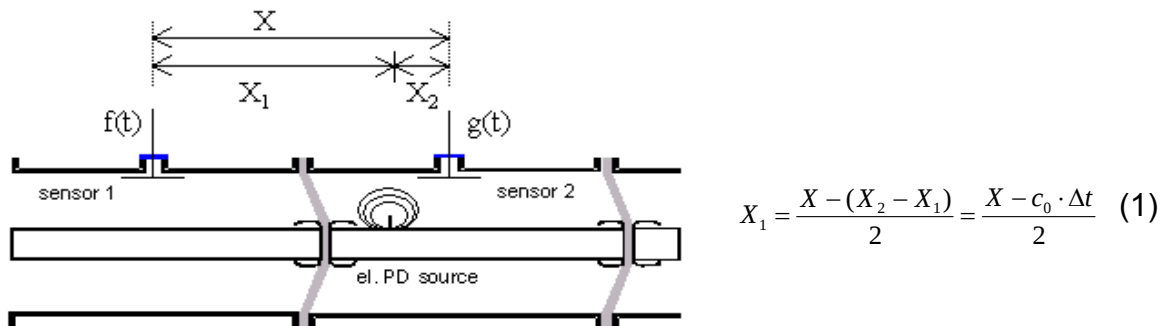


Fig.1: TE-Ortung mit der Laufzeitdifferenzenmethode und die Berechnung von  $X_1$   
PD location by time-of-flight measurement and calculation of  $X_1$

### **PD locating in GIS with interference**

The location of the defects may be estimated with the help of the time delay  $\Delta t$ , the distance  $X$  between the sensors and the propagation speed  $c_0$  (Fig. 1). The interference phenomena of two sensor signals, which are added, should give information about the time delay  $\Delta t$  between the sensor signals. The idea is based on the displacement law of the Fourier-transformation (1) of the received signals.

$$\frac{H(\omega)}{F(\omega) + G(\omega)} = K(\omega) \approx K_t(\omega) = \left| \cos\left(\frac{\omega}{2 \cdot \Delta f}\right) \right| = \left| \cos\left(\frac{\omega \cdot \Delta t}{2}\right) \right| \quad (1)$$

Diese theoretische Kosinusfunktion  $K_t(\omega)$  hat äquidistante Minima, die als Interferenz gedeutet werden können. Der Abstand  $\Delta f$  (Interferenzfrequenz) zwischen den Minima gibt Aufschluss über die Laufzeitdifferenz  $\Delta t$ .

### Analyse der Messung mittels Waveletanalyse

Um den Abstand  $\Delta f$  der Minima objektiv auch bei komplexeren Messaufbauten bestimmen zu können, bietet sich eine Analyse unter Verwendung von Wavelettransformationen an. Dabei wird die theoretische Kosinusfunktion  $K_t(\omega)$  als Vorbild für das zu wählende Mutterwavelet genommen. Dadurch erreicht man eine große Selektivität der gesuchten Interferenz gegenüber Resonanzen und Störungen, die in komplexen Anlagen auftreten und die sich auch durch Minima im Spektrum äußern können. Das Ergebnis zeigt die Übereinstimmung des gemessenen Spektrums  $K(\omega)$  über dem kompletten Frequenzband  $\omega$  und dem theoretischen Kosinus  $K_t(\omega)$  mit einer bestimmten Interferenzfrequenz  $\Delta f$ . Die Unterscheidung zwischen Interferenz, die zu einer entsprechenden Laufzeit gehört, und Störungen bzw. Reflexionen findet über Maximalwerte und Plausibilität statt (Fig 3). Ein gutes Resultat zeichnet sich durch eine erhöhte Signalenergie bei einer konkreten Interferenzfrequenz  $\Delta f$  und über einen breiten Frequenzbereich  $\omega$  aus (Fig. 2 mit Interferenzfrequenz  $\Delta f=10.8 \text{ MHz}$ ). Für die ausgemachte Interferenzfrequenz kann auf den Betrag der Laufzeitdifferenz  $|\Delta t|$  geschlossen werden. Um eindeutig auf den Ort der TE-Quelle schliessen zu können, ist eine zweite Messung mit verändertem Messaufbau (Messkabeln) nötig.

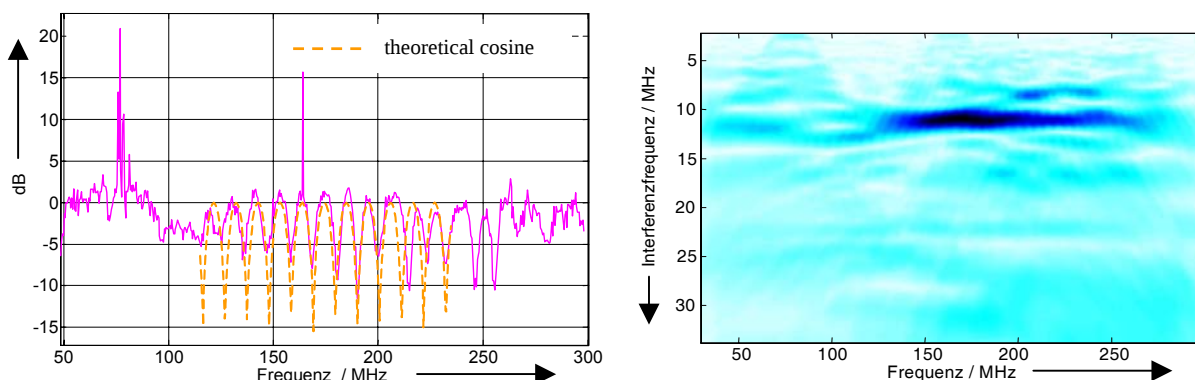


Fig.2: Gemessene Funktion  $K(\omega)$  mit passender Kosinusfunktion  $K_t(\omega)$  (links) und zugehörige Auswertung mit Hilfe der Wavelettransformation (rechts) an einer 550-kV-GIS im Labor mit wenigen Reflexionsstellen  
Measurements and wavelet-evaluation for a 550-kV-GIS in the laboratory

Diese neue Methode erlaubt für einfache Konstruktionen eine kosteneffektive Ortung von Fehlstellen in GIS oder in Gas-Insulated Lines (GIL). Genaue Kenntnis des inneren Aufbaus der GIS oder GIL ist notwendig, um die Ergebnisse (mehrere Interferenzfrequenzen) richtig interpretieren zu können.

### Measurement procedure

To visualise the interference phenomena three power spectrums are evaluated, which are compared in a characteristic way  $K(\omega)$  (1). Because of the dispersion effects of higher modes in GIS only a certain frequency range (only TEM-mode) is useful for the measurement, as both sensor signals should be as similar as possible for  $K(\omega) = K_t(\omega)$ . The three power spectrums are obtained from sensor 1  $F(\omega)$ , sensor 2  $G(\omega)$  and the superimposed signal of sensor 1 and 2  $H(\omega)$  with a conventional spectrum analyser. So the time difference  $\Delta t$  will be estimable with the resulting cosine function. This theoretical cosine function  $K_t(\omega)$  has equidistant minima, which can be interpreted as interference phenomena. The distances  $\Delta f$  (interference frequency) of the minima give information about the time difference  $\Delta t$ .

### Analysis of the measurement

To determine the distance  $\Delta f$  of the minima in more complex geometric setups, an analysis with the wavelet transformation is useful. The mother wavelet is chosen very similar to the theoretical cosine function  $K_t(\omega)$ . Thus a large selectivity of the searched interference in relation to resonance and disturbances, which may occur in complex test setups, becomes possible. The result shows the similarity of measured spectrum  $K(\omega)$  over the complete frequency range  $\omega$  and theoretical cosine  $K_t(\omega)$  with a certain interference frequency  $\Delta f$  (Fig. 2). With the help of the maximum values and plausibility it is possible to distinguish between interferences, which belong to the searched delay time and which belong to reflections (Fig. 3). A good result is visible by an increased signal energy at a certain interference frequency  $\Delta f$  and over a wide frequency range  $\omega$  (Fig 2 with interference frequency  $\Delta f=10.8$  MHz). The absolute value of the time delay  $|\Delta t|$  can be estimated by the interference frequency  $\Delta f$ . Because of the unsigned value of the time delay, at least two measurements with different cable lengths are necessary for a localization.

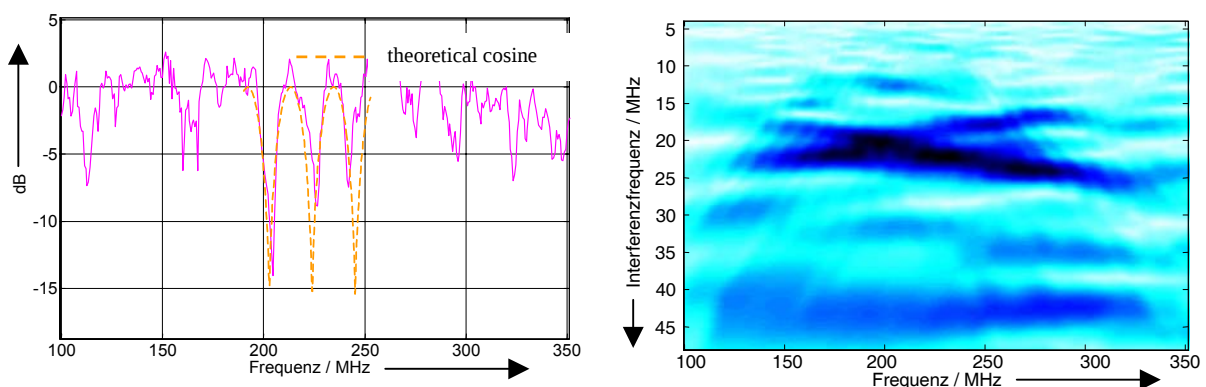


Fig.3: Messung und Wavelettransformation an einer 300-kV-GIS im Feld  
Measurement and wavelet transformation at a real GIS bay for 300 kV

This new method allows a cost-effective localization of PD in GIS in at least basic configurations or in gas-insulated lines (GIL). However, the correct interpretation of these signals is in some cases a complex procedure and requires sophisticated knowledge about the geometry of the GIS.

## ■ **Feuchtigkeit in Öl-Papier-isolierten Leistungs- transformatoren**

**Dipl.-Ing. Maik Koch**

Das Thema „Alterung“ betrifft heute jede Konferenz oder wissenschaftliche Tagung über Hochspannungsgeräte. In Leistungstransformatoren ist Feuchtigkeit ein Alterungsprodukt und -indikator. Wasser spaltet die Zelluloseketten der Feststoffisolierung hydrolytisch auf, begünstigt Teilentladungen, verursacht Bläschenbildung (Bubbling) und verringert die Durchschlagsspannung des Isolieröls. Um Transformatoren zu trocknen, muss zunächst deren tatsächliche Feuchtigkeit bestimmt werden. Da der Stand der Technik hier leider nur unbefriedigende Genauigkeit bietet, bildet die Messung der Feuchtigkeit in Transformatoren und die Erforschung ihrer schädigenden Wirkungen einen Schwerpunkt der Forschung am IEH.

### **Relative Feuchtigkeit in Leistungstransformatoren**

Basierend auf mehreren Untersuchungen wurde das Konzept der relativen Feuchtigkeit auf Transformatoren angewendet. Beschreibt die relative Feuchte den Zustand von Öl-Papier-Isolierungen, so ergeben sich folgende Vorteile:

1. Diffusionsvorgänge und das Feuchtegleichgewicht lassen sich einfacher beschreiben, da sie auf Differenzen in der Wasseraktivität bzw. relativen Feuchtigkeit beruhen.
2. Die Feuchtemessung bleibt unbeeinflusst von Öl- und Papialterung.
3. Eine Umrechnung über Gleichgewichtsdiagramme ist nicht mehr nötig.
4. Kapazitive Sensoren messen kontinuierlich und genau.
5. Zum zerstörerischen Potenzial von Wasser besteht ein direkter Zusammenhang.

Wasser äußert sich in verschiedenen Schädigungen, für die jene Wassermoleküle verantwortlich sind, welche für Wechselwirkungen zur Verfügung stehen. Genau dieses Wasser wird durch die relative Feuchte beschrieben, nicht durch die Gewichtsfeuchte, z. B. mit der Karl Fischer Titration gemessen. Die Wassermasse bezogen auf die Zellulose- oder Ölmasse (Gewichtsfeuchte in ppm oder %) beinhaltet auch die Wassermoleküle, die stark gebunden sind, also nicht für Wechselwirkungen zur Verfügung stehen. Den direkten Bezug zum Schädigungspotenzial stellt das aktive Wasser her, beschrieben durch die relative Feuchte.

## ■ **Moisture in Oil-Paper-Insulated Power Transformers**

**Dipl.-Ing. Maik Koch**

The subject „ageing“ nowadays plays an important role at every conference or scientific meeting about HV-devices. In power transformers moisture is an ageing product and indicator. Water causes depolymerisation of cellulose chains through hydrolysis, causes bubble evolution and decreases the PD inception voltage and the breakdown voltage. Before drying a transformer a reliable evaluation of its water content is necessary. Unfortunately the accuracy of commercially available measurement methods and procedures does not satisfy. Therefore the measurement of moisture and investigation of its deteriorating impacts is one of the major research topics at the IEH.

### **Moisture Relative to Saturation in Power Transformers**

The concept of relative moisture or water activity was applied on power transformers based on several investigations. The following advantages arise, if moisture relative to saturation is used instead of moisture relative to weight:

1. Moisture diffusion and equilibrium directly depend on differences in relative humidity and are therefore easier to explain.
2. Moisture measurements remain independent from oil and paper ageing.
3. A calculation of moisture in paper by equilibrium curves is not necessary.
4. Capacitive sensors measure continuously and accurately.
5. Relative moisture is directly related to the deteriorating potential of water.

The different risks in a wet insulation are caused by water molecules available for interactions. These water molecules are expressed by the moisture content relative to saturation and not by the moisture relative to weight as measured e.g. by Karl Fischer titration. Moisture relative to weight also includes the water molecules that are bound relatively strong and therefore are not active. Contrary to this the moisture relative to saturation is directly related to the detrimental impacts of water.

Fig. 1 illustrates the measurement of water activity in a power transformer using an online monitoring system. The relative moisture in oil varies with the top oil temperature respectively the load factor. Using a long time average of the relative moisture in oil a “mathematical equilibrium” is established leading to the relative moisture in paper and cellulose, here 2,6 %. This better characterizes the detrimental potential of water than the conventionally used “water related to weight”.

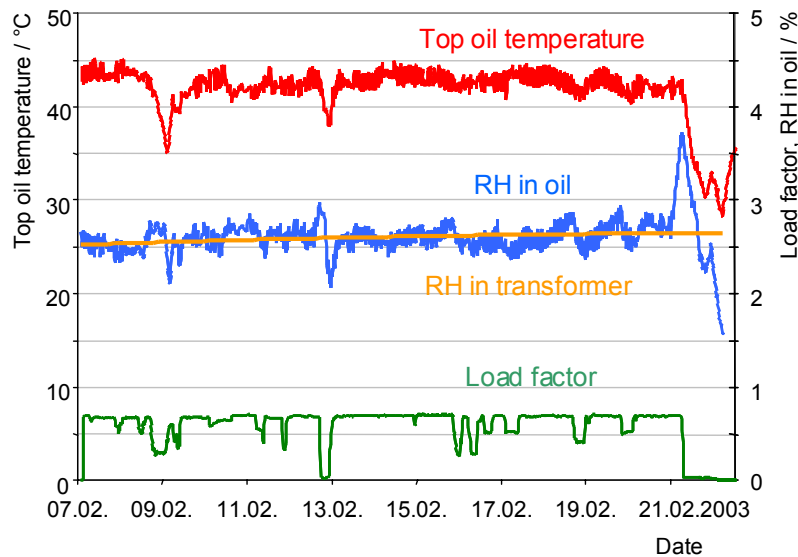


Fig. 1: Gemessener Lastfaktor, obere Öltemperatur, relative Feuchtigkeit im Öl und berechnete relative Feuchtigkeit in der Zellulose  
Measured load factor, top oil temperature, relative moisture in oil and calculated relative moisture in cellulose

Fig. 1 verdeutlicht die Messung der Wasseraktivität in einem Leistungstransformator durch ein Online-Monitoring-System. Die relative Feuchtigkeit im Öl (und damit die Wasseraktivität) ändert sich mit der oberen Öltemperatur bzw. dem Lastfaktor. Mit einem Langzeitmittelwert der Ölfeuchte wird ein „mathematisches Gleichgewicht“ hergestellt und die relative Feuchte in der Zellulose berechnet, hier beträgt diese 2,6 %. Damit ist das Schädigungspotential von Wasser besser charakterisiert als durch die bisher übliche Gewichtsfeuchte.

### Der Bubble-Effekt in Öl-Papier-Isolierungen

Wird eine feuchte Öl-Papier-Isolierung erwärmt, so können Gasbläschen entstehen, welche die elektrische Festigkeit entscheidend herabsetzen. Für diesen „Bubble-Effekt“ wurden der Einfluss von Papierfeuchte, Ölqualität, Papierqualität, Alterungszustand und Temperaturanstieg systematisch untersucht. Die Papieralterung erhöht die Einsetztemperatur der Bläschenbildung, während die Ölalterung die Einsetztemperatur verringert. Die Blasenbildung ist an einen steilen Temperaturanstieg gebunden ( $\Delta T > 3 \text{ K/min}$ ), bei geringerem Anstieg diffundiert die Feuchtigkeit in das Öl, ohne die gasförmige Phase zu bilden. Der Bubble-Effekt stellt für den Transformatorbetrieb dann ein Risiko dar, wenn ein steiler Temperaturgradient bei hoher Endtemperatur (100-160°C) auftritt, das Wicklungspapier feucht ist ( $CW > 1,5 \%$ ) und die Blasen in einem dielektrisch hoch beanspruchten Bereich auftreten. Fig. 2 illustriert die Gasblasenemission aus Kraft Isolierpapier mit einer Feuchte von 4 %. Fig. 3 zeigt die Einsetztemperatur für verschiedene Öle und Isolierpapiere.

## The Bubble-Effect in Oil Paper Insulations

During heating of a wet oil paper insulation gaseous bubbles may rise up which obviously decrease the dielectric withstand strength. The influence of moisture in paper, paper quality, paper ageing, oil ageing and temperature rise on the bubble inception temperature were systematically investigated. Paper ageing *increases* the bubble inception temperature whereas oil ageing *decreases* this parameter. Bubbles will only evolve at a steep temperature rise ( $\Delta T > 3 \text{ K/min}$ ), below this rate of increase the water molecules migrate into the oil without bubble formation. The bubble effect becomes hazardous at a steep temperature increase with high end temperatures (100-160°C), moisture contents above 1,5 % and if bubbles enter an area of high electric field strength. Fig. 3 illustrates the bubble evolution from wet Kraft paper. Fig. 4 shows the inception temperature for various oils and paper.

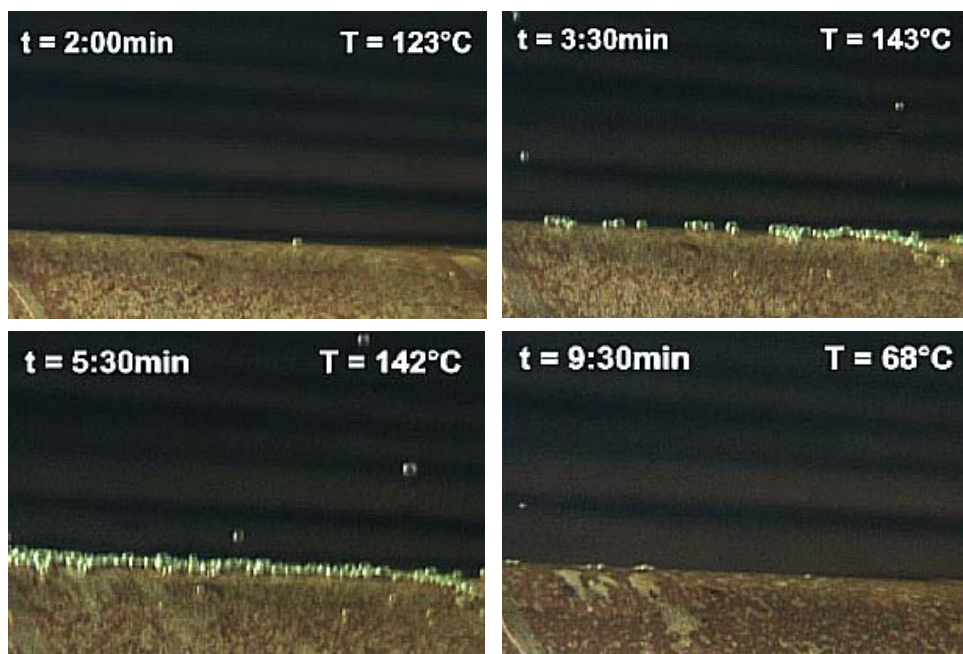


Fig. 2: Blasenentwicklung aus 10 Lagen Kraft Isolierpapier mit einer Feuchtigkeit von 4 %, gewickelt um ein innenbeheiztes Rohr  
Bubble evolution from 10 layers of Kraft insulation paper with a moisture content of 4 %, wrapped around a heated tube

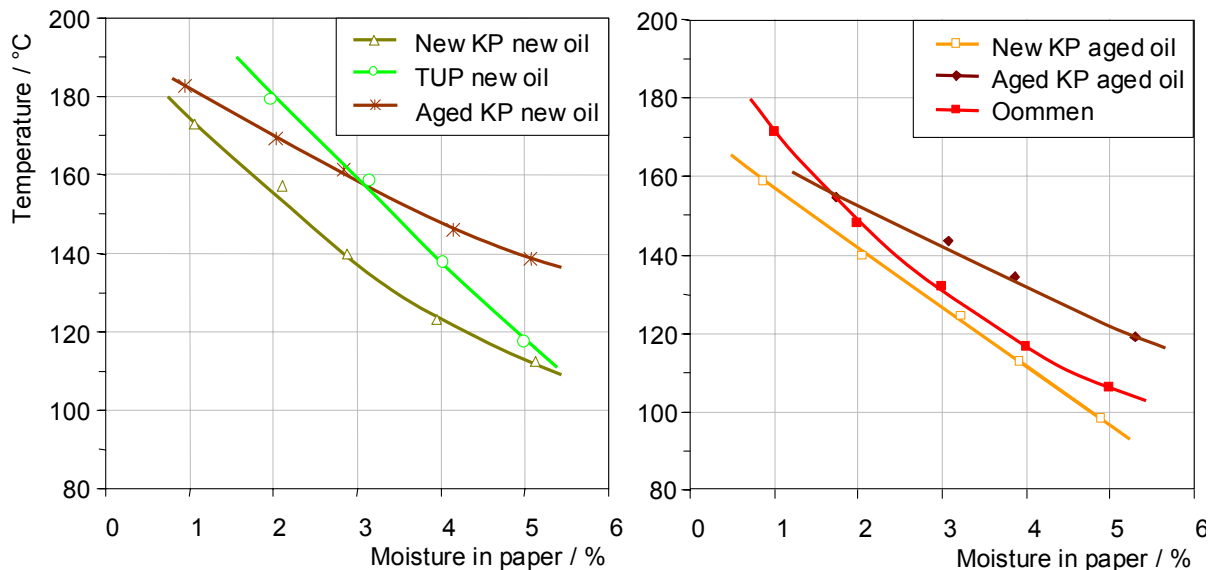


Fig. 3: Blaseneinsetztemperatur für neues Kraft Papier, thermisch stabilisiertes Papier und gealtertes Kraft Papier in neuem Öl (links)  
 und für neues Kraft Papier und gealtertes Kraft Papier in gealtertem Öl im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Literatur (rechts)  
 Bubble inception temperature for new Kraft paper, thermally upgraded paper and aged paper in new oil (left)  
 and for new Kraft paper and aged Kraft paper in aged oil compared to results from the literature (right)

### Reproduzierbarkeit der coulometrischen Titration nach Karl Fischer

Die coulometrische Titration nach Karl Fischer gilt als Maßstab für Feuchtebestimmung im Allgemeinen. Die Messzelle selbst ist sehr genau, jedoch birgt die Probenaufbereitung und das Auslösen des Wassers aus der Probe eine Reihe von Fehlerquellen. Während der Probenaufbereitung dringt immer Feuchtigkeit aus der Atmosphäre ein; alle Ergebnisse sind mit einer Abweichung zu höheren Werten behaftet. Die Ausheiztemperatur, also die zum Lösen von gebundenem Wasser eingebrachte thermische Energie, bestimmt wesentlich die freigesetzte Wassermenge. Randbedingungen, die nicht von Standards festgelegt sind, werden in Öllaboren unterschiedlich gehandhabt. Deshalb zeigten Ring- oder Blindtests immer wieder sehr große Unterschiede im gemessenen Feuchtegehalt (siehe Fig. 4).

Ausgehend vom Stand der Technik, einer verbesserungswürdigen Vergleichbarkeit unterschiedlicher Titrationsverfahren, wurden verschiedene Titratoren und Methoden zur Probenaufbereitung miteinander verglichen. Die Untersuchung mündet in eine empfohlene Verfahrensweise für die Wasserbestimmung in Ölen und zellulosehaltigen Isoliermaterialien. Die Ausheiztemperatur für Papier sollte 160°C, für Pressboard 180°C betragen. Zur Trennung von Öl und Papier wird Heptan empfohlen. Zur Titration von Öl zeigt sich die direkte coulometrische Titration am besten geeignet. Der Zustand des Reagenz muss durch Wasserstandards regelmäßig geprüft werden.

## Reproducibility of Coulometric Karl Fischer Titration

Coulometric Karl Fischer titration rates as the general standard for water measurements. The titration cell itself is very accurate, but the sample preparation and the release of water from a solid material bear several and substantial reasons for errors. During sample preparation moisture always ingresses from the atmosphere causing a deviation to higher moisture contents. For moisture measurements in solid samples the heating temperature determines the released water content. Constraints, that are not covered by standards, are handled differently by laboratories. Therefore round robin tests repeatedly showed immense differences in the measured water content, see fig. 4.

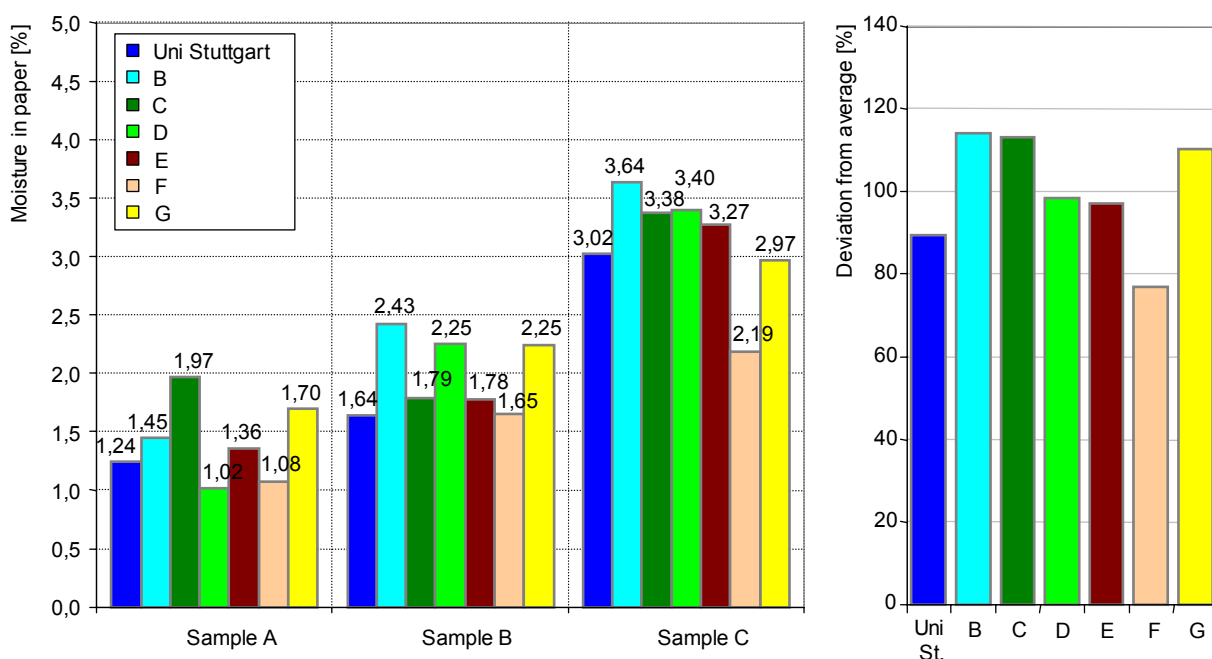


Fig. 4: Während eines Blindtests gemessene Feuchtigkeiten in drei Papierproben (links) und Abweichung der Labore vom Mittelwert aller Labore(rechts)  
Moisture in paper as measured by the laboratories (left)  
and deviation of each laboratory from the average of all laboratories (right)

Because of the poor comparability of different laboratories and titration procedures, several instruments and methodologies were compared. This investigation results in recommendations for water titration in oils and cellulosic materials. The heating temperature for paper should amount 160°C, for pressboard 180°C. Heptan should be used to release oil from paper. For titration of oils the direct injection method seems to be most suitable. The condition of the reagent should be examined periodically by water standards.

## ■ **Beschreibung von Mehrleiteranordnungen für die EMV-Simulation von Komponentenmessungen nach CISPR25**

**Dipl.-Ing. Heinz Rebholz**

Die Problemstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit gewinnt mit steigender Komplexität der Anwendungen eine immer höhere Bedeutung. Die hohe Dichte von elektronischen Komponenten im Automobil erschweren zunehmend einen störungsfreien Betrieb der einzelnen Baugruppen. Aufgrund eines steigenden Kostendrucks gegenüber Automobilzulieferern steigt auch das Verlangen nach einfachen und besonders schnellen Lösungen, um eine Komponente gemäß den Vorgaben des Automobilherstellers fertigen zu können. Als Komponente wird hier jegliche Art von Sensoren, Aktoren sowie die steuernden Einheiten im KFZ bezeichnet, z. B. Beschleunigungssensoren, geregelte Ventile oder Motorsteuergeräte.

Bevor eine neu entwickelte Komponente im Fahrzeug getestet wird, erfolgt eine Messung der Störfestigkeit (SF) und der Störaussendung (SA) als Komponentenaufbau in der Absorberkammer. Die Gesamtheit des Aufbaus zum jeweiligen Testverfahren ist in CISPR25 beschrieben, wobei die Grenzwerte vom KFZ-Hersteller für das jeweilige Produkt festgelegt werden. Ziel der EMV-Simulation wird es im ersten Schritt sein, das Verhalten einer Komponente für Komponententests vorherzusagen, bzw. die kritischen Pfade zu entlarven, bevor eine zeit- und kostenintensive Entstörung der Komponente im Labor erfolgt. Eine Gesamtsimulation des Fahrzeugs ist allerdings aus heutiger Sicht nur bedingt und in einzelnen Ausschnitten möglich, weshalb auf sie im Folgenden nicht näher eingegangen wird.

Bei der Nachbildung des Komponententests zeigt sich, dass besonders Leiterverbindungen zwischen zwei Subsystemen, z. B. die Verbindung eines Steuergeräts mit seinem Aktor, eine bedeutende Rolle sowohl für leitungsgebundene Störungen, als auch für den über das Feld abgestrahlten Anteil spielen. Aus der Leitungstheorie ist das Übertragungsverhalten von einfachen Leiteranordnungen genau beschreibbar. Um die Leitungstheorie über einen Frequenzbereich von 0,15 – 1000 MHz anwenden zu können, müssen jedoch die Randbedingungen, wie z. B. die Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Leitung sowie die geometrische Beschaffenheit des Systems bekannt sein. Obwohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit Hilfe von  $\epsilon_r$  als Funktion der Frequenz, Temperatur und Materialbeschaffenheit ebenfalls schwer zu beschreiben ist, zeigt es sich, dass die genaue geometrische Beschreibung des Systems die Leitungstheorie an ihre Grenzen geraten lässt. Bereits geringe Inhomogenitäten innerhalb des Kabelsystems zeigen enorme Abweichungen zwischen errechnetem und simuliertem Übertragungsverhalten.

## ■ **Characterisation of multiconductor wires for EMC-simulations of component tests according to CISPR25**

**Dipl.-Ing. Heinz Rebholz**

To satisfy the increasing EMC requirements for automotive parts inside a vehicle, computer simulation is employed to localise critical components and paths within a component chain. A component chain is hereby defined as a standard test setup, described in CISPR 25, with motor control unit, connected cable harness and different types of actors and sensors.

Due to the increasing level of different control units, i.e. for passenger safety and comfort, each individual component chain has to meet the OEM standards regarding to their EMC requirements. The need for faster prototyping and thereby lower development costs shows the demand for supporting simulations before a time- and cost-intensive RF suppression takes place. Up to now, only limited vehicle simulations are practicable in a reasonable limit of hardware assignment and calculation time. Therefore only subsystems for component tests, according to CISPR 25, are considered in the following sections.

Many years of experience in EMC development have shown, that mainly the interconnections between the control unit and adjacent cable harnesses dominate the behaviour of the conducted and radiated emission. Especially cable assemblies with more than three wires act rather statistically than according to the transmission line theory due to non uniform bundling and wiring within the harness. To use the transmission line equations within a frequency range from 0.15 to 1000 MHz the boundary conditions of the harness have to be known. The propagation velocity along the conductor can be described with the complex  $\underline{\epsilon}_r$ , which is changing over the frequency range, the temperature and the material configuration of the wire coating. However, the failure which arises due to the in-detail unknown  $\underline{\epsilon}_r$  is negligible compared to the unknown geometrical description of the harness. Thus, the simulation result depends on the accuracy of the geometrical model. No problems occur whilst simulating parallel placed straight and unbent wires. Included connectors and PCB lands for connection and termination purpose at the far ends of the harness gains in a huge impact to simulation accuracy. Any connection as well as any other kind of bundling results in a non uniform wiring along the conductor. Thereby the effective space between the conducting wire and the underlying grounding plane varies over the propagation direction of the conductor. So, only a statistical approach can help to characterise the cable harness for the whole frequency spectrum. With powerful 3D solvers it is possible to generate a detailed model of the device, nevertheless it is impossible to describe deviations of the feed cable to connecting units with arbitrary wiring configurations.

Um dennoch eine Vorhersage über das Übertragungsverhalten solcher Leiteranordnungen machen zu können, muss ein statistischer Ansatz herangezogen werden, der davon ausgeht, dass jede Einzelader sich in beliebiger Position innerhalb des Kabelbaums befinden kann. Die Einzeladern werden somit äquivalent zueinander innerhalb des Bündels, und man kann an einem beliebigen Querschnitt nicht mehr zwischen den einzelnen Adern unterscheiden.

Als Beispiel für Messung und Simulation wird ein Leitersystem mit zehn Adern und einer Gesamtlänge von 190 cm betrachtet. Auf beiden Seiten des Leiters befinden sich Anschlüsse, um die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten zu bestimmen. In jeweils 10 cm Abstand zu den Abschlüssen werden die Leiter gebündelt und zu einem Kabelbaum zusammengefasst. Die Simulation erfolgt innerhalb einer 3D Feldsimulation mit Hilfe des MoM (Method of Moments-)-Verfahrens.

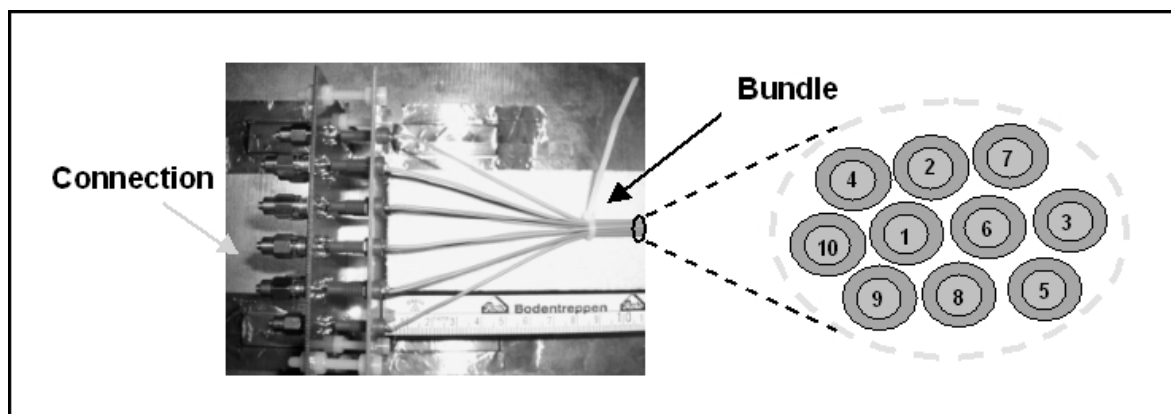


Fig. 1: Setup zur Bestimmung der Übertragungseigenschaften eines gebündelten Kabelsystems

Setup to determine the transmission line parameters of a cable harness

Ein- und ausgangsseitig sind alle Einzeladern jeweils mit 50 Ohm gegenüber der Tischmassefläche abgeschlossen. Abbildung 2a zeigt die gemittelte Eingangsreflexion  $s_{xx}$  des Bündels in einem Frequenzbereich von 0,3 – 1000 MHz. Auffällig ist, dass die bei der Eindrahtleitung bekannten Resonanzen im Bündel bereits ab 200 MHz verschwinden. Dies ist auch daran zu erkennen, dass im Bereich von 200 – 1000 MHz die Varianz bzw. die Abweichungen innerhalb der Messergebnisse abnehmen. Abbildung 2b zeigt die zum Aufbau gehörende gemittelte Simulation der Eingangsreflexion. Wie erwartet zeigen sich starke Abweichungen gegenüber der Messung an den noch ausgeprägten Resonanzstellen bis 200 MHz, die jedoch mit zunehmender Frequenz verschwinden.

Durch ein vereinfachtes Simulationsmodell ist es möglich, Kabelbündel mit einem statistischen Ansatz nachzubilden. Das Übertragungsverhalten kann somit innerhalb der Varianz aus den Messungen sehr gut nachgebildet werden. Obwohl hier nicht dargestellt, erhält man für die Transmission die gleichen Aussagen wie für die Reflexionsparameter.

The statistical approach to describe complex harness configurations assumes, that every single conductor within a bundle can be placed in an arbitrary position inside the bundle. Then the conductors can be seen equal to each conductor of the bundle. This means, that if we cut the bundle at any position along the harness, we are not able to distinguish between the individual conductors.

As an example to simulate the behaviour of a multiconductor cable harness, a ten-wire-system as described in Fig. 1 is tested. All conductors are 190 cm long and are prepared to measure the scattering parameters from both sides of the harness. Both ends of the wires are bundled in a distance of 10 cm after the connecting device. The simulations are carried out with a MoM (Method of Moments)-based 3D field solver.

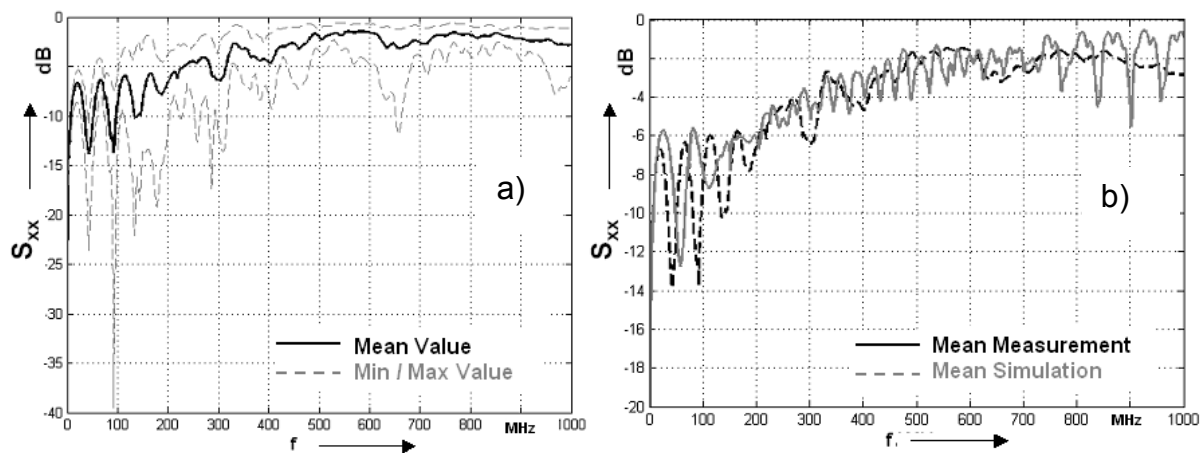


Fig. 2: a) Durchschnittlicher gemessener Eingangsreflexionsfaktor  $s_{xx}$  ( $x = 1-10$ ) der Mehrleiteranordnung mit Minimal- und Maximalwerten.  
b) Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Mittelwert von  $s_{xx}$   
a) Mean value of measured input reflection parameters  $s_{xx}$  ( $x = 1-10$ ) with min. and max. values. b) Comparison between simulation and measurement of  $s_{xx}$

All unused ports are terminated with 50 Ohm on both ends of the cable harness. Fig 2a shows the input reflection parameter of the cable system, described as the mean value over all ten input connections. The mean value of  $s_{xx}$  comes along with the determined minimum and maximum values of the input reflection coefficient. If one compares  $s_{xx}$  to the known input reflection of a single wire conductor it is noticeable, that the resonant character of the structure can not be found beyond 200 MHz anymore. Also the variance of the measurement results decreases. Fig 2b compares the mean values of measurement and simulation results. One can observe a good accordance between measurement and simulation up to 800 MHz. The same results can be gained for the transmission parameters of the system.

Through a statistical treatment of simulation data it is possible to a qualify even complex cable harnesses over a frequency range up to 1 GHz. With the simplified cable model we are one step closer to simulate the complete component chain.

- **Evaluation of lightning protection zone using AutoCAD-based software tool**

**Dr.-Ing. Zlatan Stojkovic, Humboldt Research Fellow**

The use of computer simulation tools to improve design productivity has been proposed since the 1980s. As a result of recent technological trends in engineering education, the importance of applying software tools in power systems has been realised. Computer simulation tools are widely used for transient event simulations, power flow studies, stability analysis and operational planning. Many of the tasks formerly performed by engineers are being simplified, expedited or eliminated by improved computer applications, which should allow engineers to devote more time to creative professional activities.

Evaluation of the zone of protection is a very important task in the designer's practice. Since the zone of protection is the volume within which a lightning conductor gives protection against a direct lightning strike by directing the strike to itself, the problem is a three-dimensional one.

This contribution presents some AutoCAD-based software tool possibilities for estimating the lightning protection zone of substations, structures and transmission lines. Formed by the application of powerful tool AutoCAD and programming languages AutoLISP and Visual Basic the purpose of this user-oriented tool is to construct the lightning protection zone in a way suitable for the designer's practice.

The lightning protection zone evaluation is performed using two different methods. The protection angle method (PAM) denotes the first method. The magnitude of the protective angle is dependent of the form of the structure and the arrangement of the applied protective components. The rolling sphere method (RSM) denotes the second method, based on the striking distance theory.

Three types of the striking distance calculations are used. The first type is a geometric model (GM), in which the striking distance is assumed to be independent of both stroke current magnitude and the local geometry of the ground structures. Electro-geometric model (EM), where the striking distance is represented by a function only of stroke current magnitude and is supposed to be independent of the local geometry of the ground structures, represents the second type. The basic assumption of the EM refers to the correlation between the length of the last step of the downward leader and the stroke current magnitude. Finally, the GEM denotes the third type. This model, based to a large extent upon the improved knowledge of the physics of long sparks, has taken account of both prospective stroke current magnitude and the geometry of the grounded structure. Eriksson model and Petrov-Waters model are involved into the software developed.

This example illustrates the procedure of protection zone determination for structure presented in Fig.1. The system for the protection of analysed structure against lightning is made using single rod. Using developed software the zone of protection

for the accepted arrangement of Franklin rod is evaluated. Figure 2 visualises the protection zone for III protection level according to IEC. The height of the Franklin rod equals to 4 m.

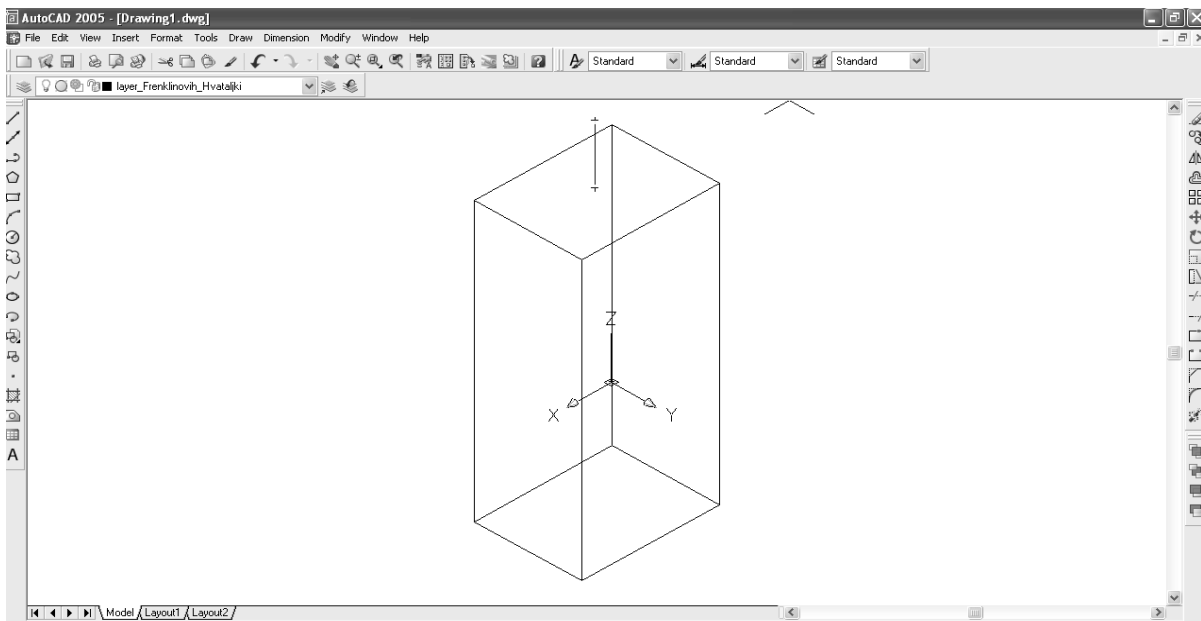


Fig. 1: Single rod used for the protection of analyzed structure against lightning

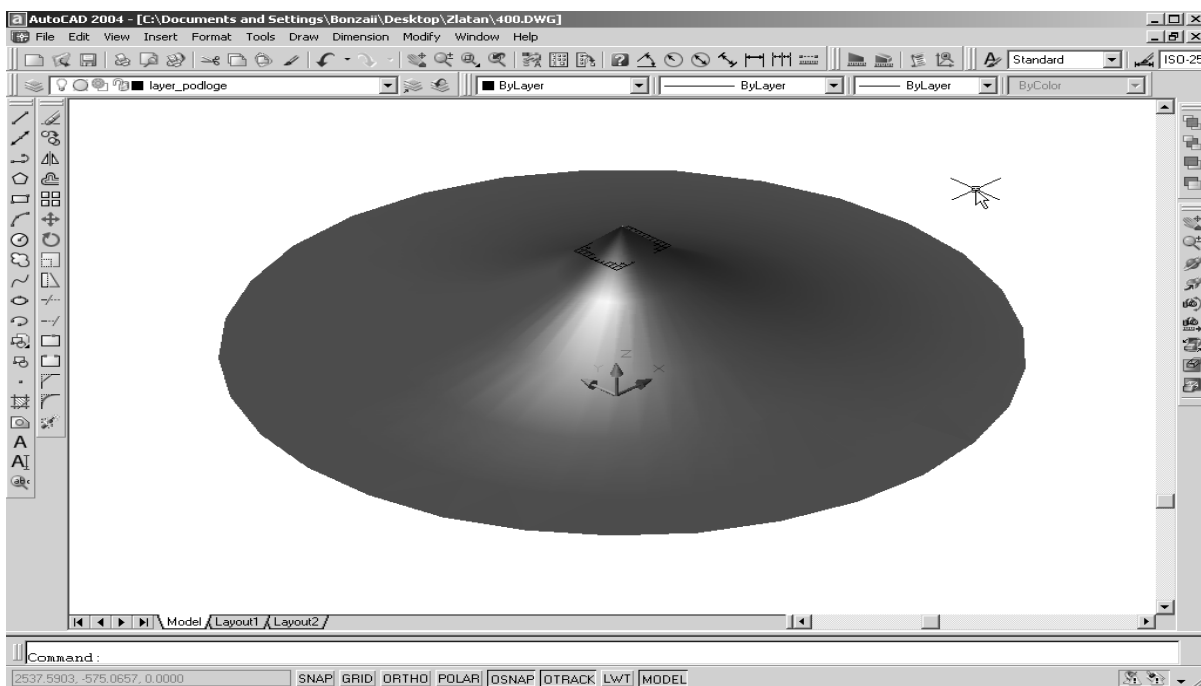


Fig. 2: Protection zone visualisation for III protection level and Franklin rod height of 4 m

The evaluation of the lightning protection zone for a substation is presented. Figure 3 represents a three-dimensional view of a high voltage substation 110/35/10 kV, respectively. The height of tower 1 is 28 m. The heights of towers 2, 3 and 4 are taken to be 15 m. The towers 1 - 4 are used for lightning protection and represent the Franklin rods, too. The substation lightning protection zone is determined by applying the RSM for the impulse current amplitude of 5 kA. A two-dimensional plan view (Front) of the whole protection zone for the applied towers is shown in Fig.4.

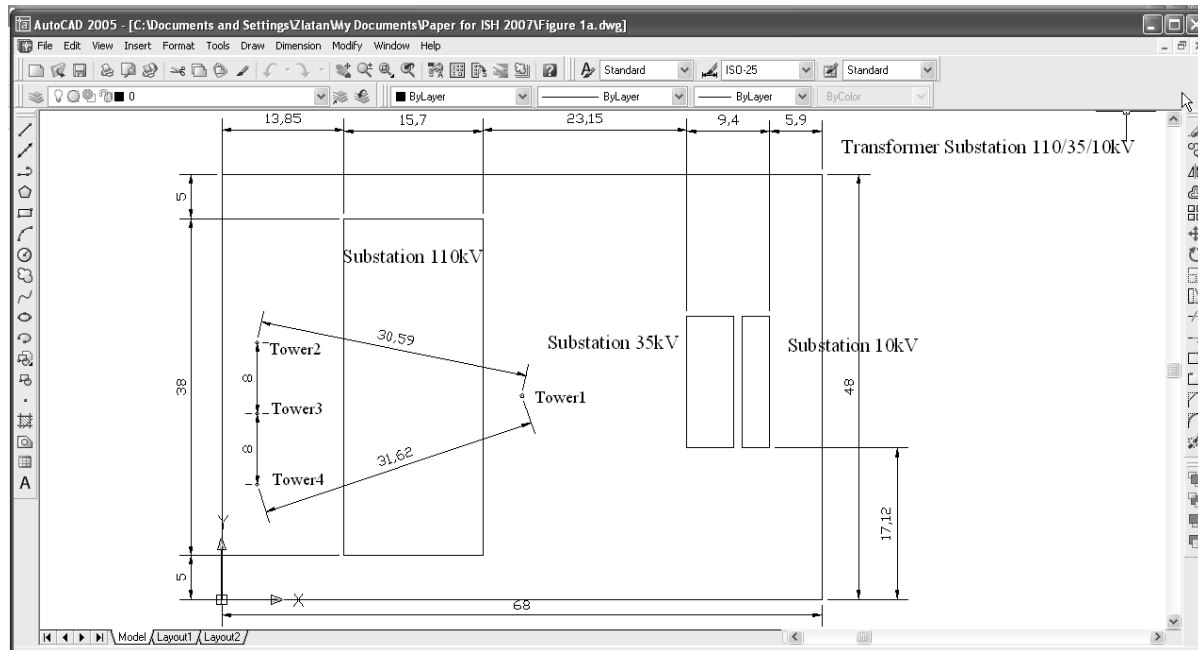


Fig. 3: Three-dimensional view of the high voltage substation 110 kV/35 kV/10kV

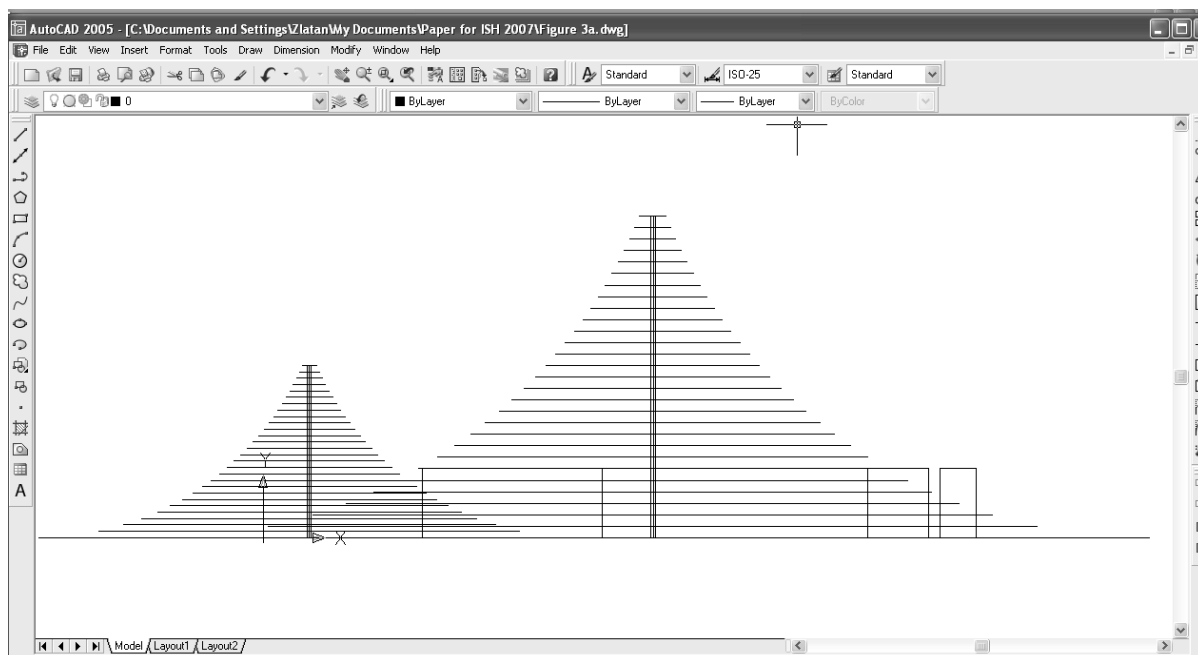


Fig. 4: Two-dimensional plan view (Front) of the whole protection zone for applied towers and the impulse current amplitude of 5 kA

The procedure of lightning protection zone visualisation based on the use of different methods for a concrete 2x400 kV transmission line tower is performed. Figure 5 represents the analyzed 2x400 kV transmission line tower.

According to the GEM application the attractive surface for terminating the phase conductor of denoted transmission line is evaluated (Fig. 5). The striking distances are calculated according to the expression given by Eriksson. The impulse current amplitudes are taken to be 10 kA and 25 kA, respectively.

Figure 6 shows the attractive surface for terminating the phase conductor of denoted transmission line based on different models. The striking distances are calculated for

the impulse current amplitude of 10 kA using Eriksson model and Petrov-Waters model, respectively.

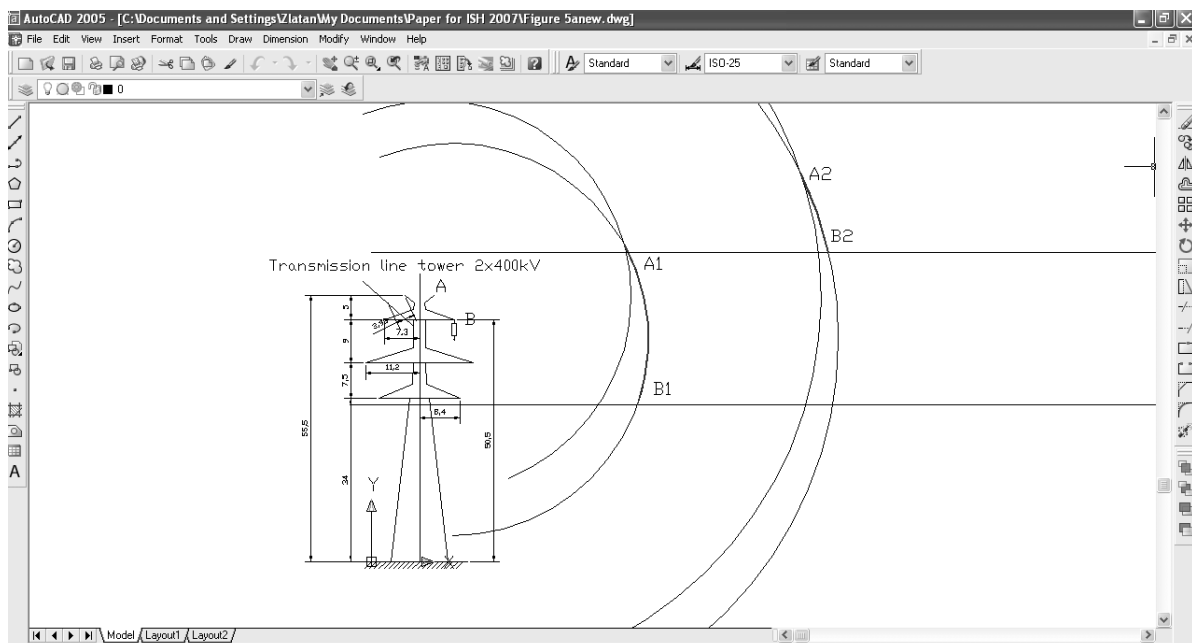


Fig. 5: Attractive surface for terminating the phase conductor of the analyzed 2x400 kV transmission line tower according to the expression given by Eriksson; impulse current amplitudes 10 kA (arc A1B1) and 25 kA (arc A2B2)

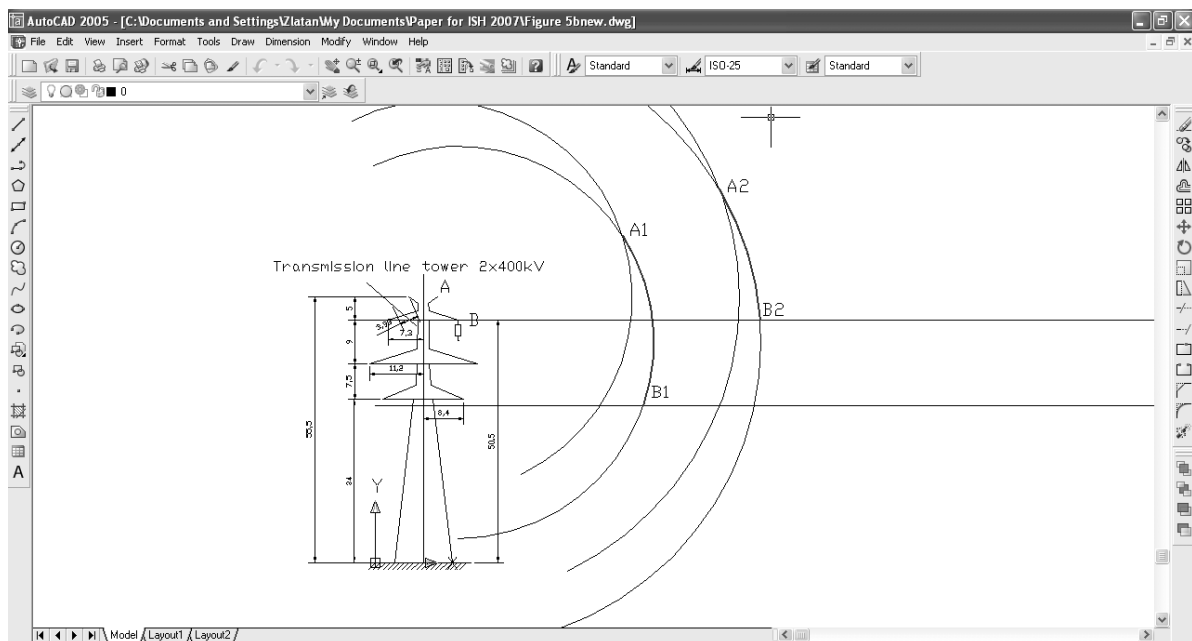


Fig. 6: Attractive surface for terminating the phase conductor of the analyzed 2x400 kV transmission line tower for the impulse current amplitude of 10 kA; Eriksson model (arc A1B1) and Petrov-Waters model (arc A2B2)

So evaluated attractive surface enables the computation of the transmission line shielding failure rate using different procedures.

## ■ **Elektrostatische Entladungen in gedruckten und integrierten Schaltungen**

**Dipl.-Ing. Franz Streibl**

An elektronische Steuermodule (Fig. 1, links) für Kraftfahrzeuge werden allgemein immer höhere Anforderungen im Bezug auf Funktionalität und Zuverlässigkeit gestellt. Diese zwei Arten der Anforderungen bedingen sich gegenseitig, insbesondere wenn darüber hinaus die Kostenminimierung bei der Herstellung der Module eine hohe Priorität besitzt.

Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Module unter Einwirkung elektromagnetischer Störungen nehmen ständig zu. Speziell werden von den Abnehmern solcher Geräte derzeit immer höhere Spannungsfestigkeiten bei den Tests mit elektrostatischen Entladungen verlangt. Inwiefern die Erhöhung dieses einen Parameters, also der Prüfspannung, tatsächlich mit den realen Störvorgängen im Feld und deshalb mit einer effektiven Störfestigkeitserhöhung zusammenhängt, ist derzeit umstritten.

Dies ist mitunter deshalb der Fall, weil beispielsweise die Fehlermechanismen in integrierten Schaltungen unter Einwirkung von kurzen Spannungsimpulsen mit grosser Amplitude und zugleich Anstiegszeiten von unter einer Nanosekunde zum Teil nur ansatzweise untersucht und verstanden sind. Messtechnische Untersuchungen (Fig. 1, rechts) sollen hier zu einem besseren Verständnis des Verhaltens und Zusammenspiels von gedruckten und integrierten Schaltungen unter Einwirkung von elektrostatischen Entladungen, kurz ESD (Electrostatic Discharge), führen.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand sind die Einflüsse auf das Prüfungsergebnis durch die in Prüfstandards implizit enthaltenen Freiheitsgrade bei elektrostatischen Prüfaufbauten wie auch relevante Charakteristika des Prüflings. Durch unterschiedliche elektrisch-mechanische Konfigurationen des Prüfaufbaus und des ESD-Simulators wird in der Praxis versucht, die Störszenarien der Realität möglichst vollständig abzubilden. Ob und wie dies zu unterschiedlichen Störmechanismen und damit Prüfschärfen führt, ist ein weiterer Aspekt der Untersuchungen.

## ■ **Electrostatic discharges in printed and integrated circuits**

**Dipl.-Ing. Franz Streibl**

The requirements concerning functionality and reliability of electronic control units (Fig. 1, left) in automobiles are generally increasing. These two kinds of requirements are mutually dependent, especially when minimal production costs of such devices have to be achieved.

Reliability requirements especially with respect to the influence of electromagnetic interference are also ever increasing. The customers for the devices require higher and higher withstand voltages for the tests with electrostatic discharges. It is under discussion whether the increase of this single parameter “withstand voltage” actually is related to real failure mechanisms in the field and whether it increases the immunity of the device.

This is due to the fact that, for example, the failure mechanisms in integrated circuits under electrostatic discharge (ESD) conditions, being high voltage amplitudes and short rise times below 1 ns at the same time, are only partly investigated and understood. Laboratory tests and analysis (Fig. 1, right) are used to gain a better understanding of the behaviour and the interaction between printed and integrated circuits under ESD.

We also investigate the influence of the degrees of freedom allowed in standard test setups with respect to the test result, as well as relevant characteristics of the equipment under test. Standards try to reproduce the real interference scenarios in the field by a set of different electrical and/or mechanical configurations of the ESD simulator and the test setup surrounding the equipment under test (EUT). If and how variations of the test setup might lead to different failure mechanisms and thereby different levels of inspection scrutiny is another aspect of the investigations.



Fig. 1: Original control unit (left) and simplified test setup (right)  
Original-Steuergerät (links) und vereinfachter Messaufbau (rechts)

Während der Vorbereitungen zu ESD-Prüfungen wird i.d.R. der Impulszeitverlauf des verwendeten ESD-Simulators überprüft. Dies geschieht mit sogenannten ESD-Targets (Fig. 2). Die Targets bestehen hauptsächlich aus einem breitbandigen und niederimpedanten Hochspannungsshunt oder einem entsprechenden Spannungsteiler. In der Vergangenheit wurden für ESD-Testabläufe Targets elektrisch und mechanisch definiert, die nur eine unzureichende Bandbreite besitzen und daher für Impulse mit kurzer Anstiegszeit (Fig. 3) nicht geeignet sind.

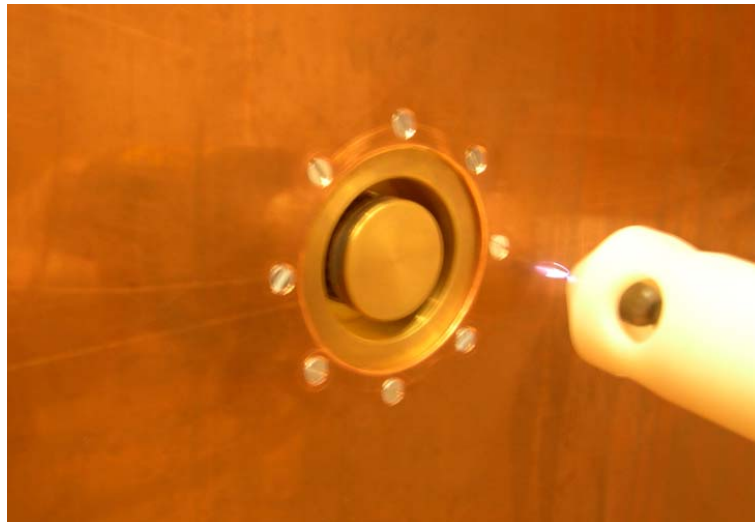


Fig. 2: Vertikale Koppelplatte (Kupfer) mit integriertem Pellegrini Target (Messing) und elektrostatischer Entladung aus einem ESD Simulator (rechts)  
Pellegrini target (brass) integrated into a vertical coupling plane (copper) und electrostatic air discharges from an ESD Simulator (right)

Darüberhinaus wird anhand der Ergebnisse aus den oben genannten Gebieten nach Möglichkeiten gesucht, die Effekte von elektrostatischen Entladungen innerhalb gedruckter Schaltungen zu simulieren. Ein einfacher Simulationsansatz, der eine Abschätzung der Robustheit einer Schaltung gegenüber ESD zuließe, würde bereits in den frühen Entwicklungsstufen eines Produkts Schwächen im Entwurf aufzeigen und könnte den Entwicklungs- und Prüfablauf beschleunigen. Im Moment werden alle Prüfungen bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV, worin ESD-Prüfungen eine Untergruppe bilden) zu einem relativ späten Zeitpunkt im Entwicklungszyklus durchgeführt. Jede Schwäche, etwa gegenüber Entladungen mit statischen Spannungen, führt normalerweise zu einer Gegenmaßnahme in Form einer Änderung im Schaltungsentwurf, also einem vorangegangenen, bereits abgeschlossenen Entwicklungsschritt. Nach einem solchen Neuentwurf müssen alle Prüfungen wiederholt werden. Der gesamte Prozess kann sich wiederholen, bis alle Anforderungen erfüllt werden. Diese ausbessernden Überarbeitungen können höhere Kosten erzeugen, als die gesamte erste Entwicklung.

During the preparation of ESD tests the impulse shape of the ESD simulator usually needs to be verified before applying the impulse to the EUT. For this verification, so-called ESD targets are used (Fig. 2). These targets mainly consist of a low-impedance high-voltage shunt with high bandwidth or a voltage divider. In the past, targets have been defined (electrically and mechanically) for use in test standards although they may lack the bandwidth for faster impulses, being especially necessary with respect to short impulse rise-times (Fig. 3). Therefore, this matter is being investigated.

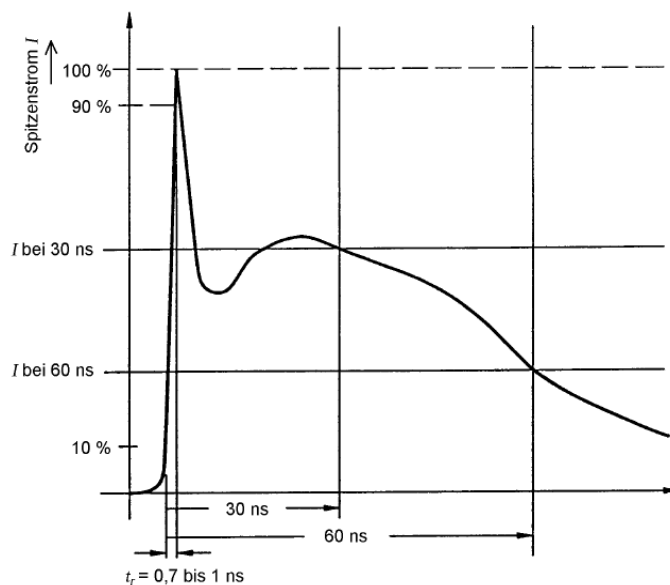


Fig. 3: Human Body Model Impuls gemäß EN 61000-4-2  
Human Body Model Impulse according to EN 61000-4-2

Furthermore, with the results gained from the topics mentioned above, the ability to simulate the effects of an ESD inside a printed circuit is being investigated. A simple simulation approach providing an estimation of the rigidity of a circuit towards ESD would indicate design weaknesses in an early stage of product development and could lead to an accelerated development and test process. Until now all tests of a device regarding electromagnetic compatibility (EMC, among which ESD tests are a subset) are performed at a rather late stage within the product development. Any weaknesses towards static voltage discharges, in particular, likely need to be counteracted by a design change in a preceding and previously already finished development stage. After such a redesign all tests have to be carried out again. The whole process may be repeated until all requirements are met. These redesign loops for improving the end product can even create higher costs than the whole initial development.

## ■ **Stufenschalter-Diagnose basierend auf akustischer Technik**

**M.Sc. Rummiya Vilaithong**

Laststufenschalter (OLTC) sind ein Teil des Systems zur Regelung der Spannung für Verbraucher mit variablen Lastzuständen. Durch Wahl einer geeigneten Anzapfung entlang der Wicklung im sog. Wähler kann das geeignete Wicklungsverhältnis und damit die geforderte Spannung am Ausgang eingestellt werden. Der Laststrom wird im sog. Lastumschalter über elektrische Kontakte kommutiert. Im Allgemeinen werden am Stufenschalter auftretende Fehler in drei verschiedene Kategorien eingeteilt: Elektrische, mechanische und thermische Fehler. Die schwerwiegendsten Fehler sind mechanische Fehler (Kontakterosion, Antriebsprobleme etc.). Sie können zum Verlust der Synchronisation im Wähler oder zwischen Wähler und Lastumschalter führen und ebenso zu elektrischen Fehlern wie Kontaktabbbrand, Zerstörung des Überschaltwiderstands oder Isolationsdurchbruch.

Bei modernen „High-Speed-Resistor“-Stufenschaltern liegt die Dauer der Umschaltvorgänge (die Kommutierung des Stromes im Lastumschalter) abhängig vom verwendeten Umschaltmechanismus zwischen etwa 40 ms und 70 ms. Die Schaltzeit des Lastumschalters sollte konstant sein, solange kein Fehler auftritt. Daher erscheint es sinnvoll, den Zustand des Stufenschalters anhand der Zeitdauer des Schaltvorgangs einzuschätzen. Die elektrischen Kontakte befinden sich in einem großen, ölgefluteten Stahltank. Daher ist eine nicht-invasive akustische Methode zur Überwachung des Stufenschalters angebracht. Akustische Diagnoseverfahren werden bereits in vielen industriellen Bereichen, hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt und der Fertigung, angewandt. Für den Einsatz bei Leistungsschaltern wurden solche Ideen schon oft veröffentlicht. Ähnlich sollten die beim Umschaltvorgang eines Stufenschalters entstehenden Vibrationen zur Beurteilung verwendet werden können.

### **Messung des Zeitlaufs des Schaltvorgangs eines Lastumschalters**

Fig. 1 beschreibt das akustische Überwachungssystem. Es besteht aus einem piezoelektrischen Sensor, einem Verstärker, einem Oszilloskop zur Signaldarstellung, einem Messkreis zur Bestimmung der Schaltzeit und einem Ethernet TCP/IP Feldbus-Koppler mit Analogeingangsmodul, das an einen PC zur Datenerfassung angeschlossen ist. Das System wird automatisch getriggert. Der akustische Sensor wurde auf der Oberseite des Stufenschalters montiert.

## Tap changer diagnosis based on acoustic technique

M.Sc. Rummiya Vilaithong

On-Load Tap Changers (OLTC) are a part of the voltage regulating systems, which are responsible for maintaining the voltage supplied to consumers under varying load conditions. By changing the tapping on a winding, the OLTC allows to vary the turns ratio of the transformer and thus the level of its output voltage. A selection of tapping on the transformer winding is done via a tap changer mechanism. This device switches the load current over sets of electric contacts, generally a so-called diverter switch. The position of the electric contacts is adjusted by a driving mechanism and a control unit, based on the comparison of an output voltage and a reference value. In general, OLTC failures are categorised as electrical, mechanical, and thermal faults. The most serious faults are mechanical faults which can be contact erosions, driving mechanism problems etc. They can lead to loss of synchronisation within the selector switch or between selector and diverter switch. They also lead to electrical faults such as burning of contacts or transition resistors, and insulation breakdowns.

In a modern high-speed resistor tap changer the current transfer over the electric contacts in the diverter switch during a tap-change process takes place in about 40 to 70 ms, depending on the type of mechanism used for switching. This switching time is constant as long as no fault appears. Therefore, an attempt to check the status of OLTCs by monitoring the duration time of the tap-change in the diverter switch is reasonable. The electric contacts are enclosed in large oil filled steel tanks, thus the non-invasive acoustic method is appropriate for a control of the OLTCs.

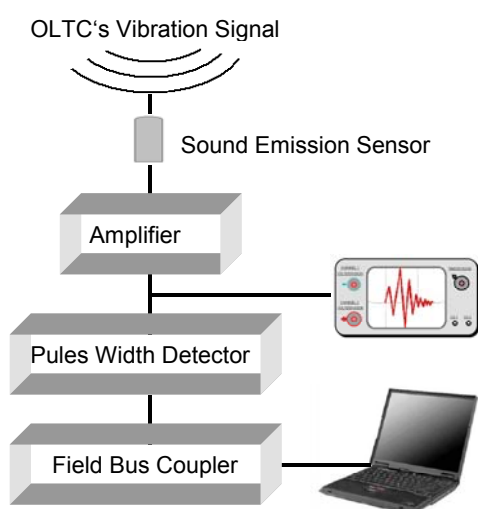


Fig. 1: Acoustic monitoring system  
Akustisches Überwachungssystem



Fig. 2: Investigated tap changer  
Untersuchter Stufenschalter

Die Untersuchung wurde während des Leerlaufs an einem Stufenschalter (Lastumschalter-Wähler, Reihenspannungen bis 220 kV, Stromstärken von 400 bis 1000 A), siehe Fig. 2, vorgenommen.

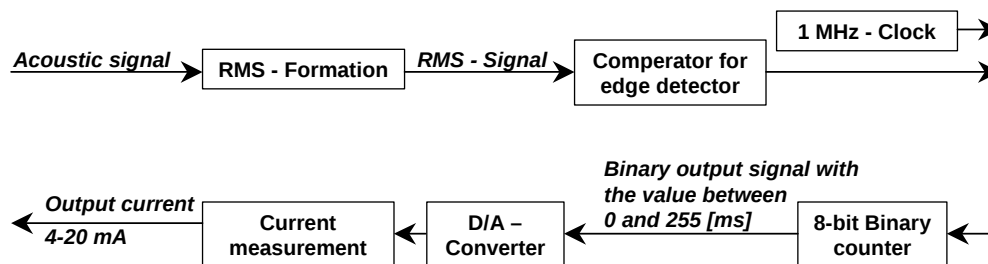


Fig. 3: Measurement of the switching time  
Schaltung zur Impulsbreitenmessung

In Fig. 3 ist das Prinzip zur Messung des Zeitlaufs der Umschaltvorgänge dargestellt. Die Funktion der Schaltung besteht darin, die „Pulsweite“ des akustischen Signals, d. h. die Dauer, in der der Effektivwert des Signals einen bestimmten Wert überschreitet, zu messen. Die Flanken dieses Signals müssen erfasst werden. Zu diesem Zweck wird ein RMS-Baustein (Route Mean Square) verwendet, um den Effektivwert des Audiosignals zu ermitteln. Um die „Breite“ des RMS-Signals zu ermitteln, werden zwei Komparatoren verwendet. Wenn das RMS-Signal am Eingang des ersten Komparators die eingestellte Referenzspannung des Komparators überschreitet, schaltet dieser an seinem Ausgang auf „low“. Fällt das RMS unter die Referenzspannung, so schaltet der zweite Komparator auf „high“. Dieses Ausgangssignal wird über ein Oder-Gatter an den „Toggle“-Eingang des ersten Zählers in einer Kaskade von drei Zählern geleitet. Dadurch wird der Zähler gestartet oder angehalten. Die Ausgangspulsweite des dritten Zählers wird mit einem 8-bit Binärzähler verarbeitet, der einen Zählbereich von 0 bis 255 besitzt. Daher erstreckt sich der Zählbereich aller vier Zähler von 0 bis 255000. Werden diese Zähler mit 1 MHz getaktet, so ergibt sich ein Messbereich zwischen 1 ms und 255 ms. Anschließend wird der binäre Zählerstand des 8-bit-Zählers in einem D/A-Wandler verarbeitet, um die Messdaten als Ausgangsstrom von 0-20 mA auszugeben.

Das akustische Signal, das RMS-Signal und das vom Komparator generierte Pulsweitensignal sind in Fig. 4 dargestellt. Der gesamte Umschaltvorgang des Stufenschalters dauert ca. 30-50 ms.

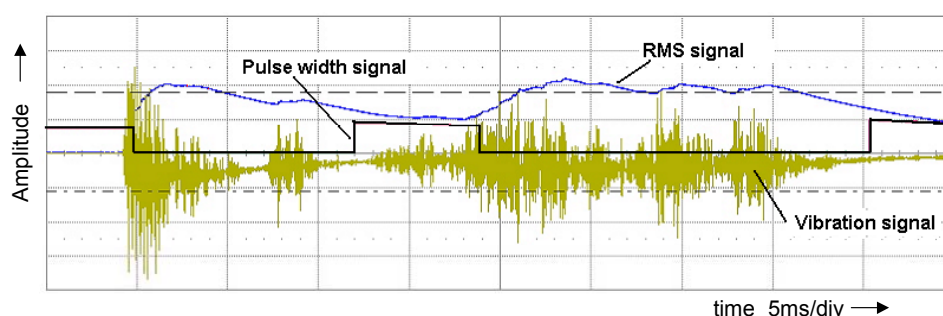


Fig. 4: A recorded vibration signature produced by a complete tap-change process  
Signatur der gespeicherten Vibration durch die Anzapfungumschaltung

Acoustic diagnostic has been successfully applied in many industrial applications, mainly aeronautics and manufacturing. In the field of electrical equipment the same idea has also been applied on circuit breakers by numerous investigators. In a similar way, a record of a vibration signal emitted during the tap-change should reveal many different aspects and phases of the tap changer operation.

Fig. 1 shows the schematic diagram of the acoustic monitoring system. It consists of a piezoelectric sound emission sensor fixed with wax (res.-freq. about 80 kHz), a signal pre-amplification module, an oscilloscope for capturing the complete vibration signature, a measuring circuit for tap-change duration time and an Ethernet TCP/IP field bus coupler with analog input module connected to a PC as the output data acquisition unit. The system can be triggered automatically. The investigation was taken during no load on a tap changer in laboratory (diverter-switch type, series voltage up to 220 KV, current intensity from 400 to 1000 A) as seen in Fig. 2. The acoustic sensor was placed on the top of tap changer.

### **Measurement of tap-change duration time**

The scheme for the measuring circuit is illustrated in Fig. 3. The principle of the circuit is to measure the pulse width of the detected vibration signal waveform. First the clear pulse edges of the signal must be determined. For that reason, the RMS (Route Mean Square) component is used to square the detailed acoustic signal and to form the average value of the signal. To determine the pulse width of the RMS signal, two comparators are used. They compare the voltage of the input signal (RMS signal) with a reference voltage. If the RMS signal exceeds the adjusted reference voltage, the first comparator will switch to the 'ground' output. If the RMS signal falls below the reference voltage, the second comparator will switch to the 'high' output. The outputs from these two comparators are hooked up over an OR gate. The output of the OR gate is fed to the "Toggle" input of the first counter from four counters, subsequently, the counter can be stopped or started. Three decade counters are following each other in a cascade. The measured pulse width as the output of the third counter is fed to the input of an 8-bit binary counter, which covers a range from 0 to 255. Thus the counting range with all four counters is from 0 to 255000. As a result, when a 1-MHz quartz oscillator is fed, a measured time interval can be covered from 1 ms to 255 ms over the counters. After that the binary output is fed to a D/A converter in order to provide the 4-20 mA output current.

The acoustic emission signal waveform, the RMS signal and the pulse of switching time recorded during a tap-change from the investigation in laboratory can be seen in Fig. 4. The whole process of a tap-changing takes around 30-50 ms.

## ■ **Numerische Simulation der Ölströmung im Transformator und Verifikation der Ergebnisse mit Versuchen an hydraulischem Messstand**

**Dipl.-Ing. Andreas Weinläder**

In Transformatoren großer Leistung wird die in den Leitern erzeugte Verlustwärme über das umgebende Isolieröl abgeführt, dem somit eine zweite wichtige Bedeutung zukommt. Die Wärme wird hierbei hauptsächlich konvektiv abtransportiert, d. h. über den Weitertransport des vom Leiter erwärmten Öls in Richtung Kühlanlage entfernt. Somit ist die Berechnung der Erwärmung von ölgekühlten Transformatoren untrennbar mit der detaillierten Kenntnis der Strömungsvorgänge innerhalb des umgebenden Ölkessels verbunden. Den hierbei wesentlichsten und zugleich schwierigsten Teil der Betrachtung stellt die Ölströmung in den vielfach verzweigten Kanälen der Wicklung dar. Insbesondere ist es sehr wichtig, die Strömungsgeschwindigkeit des Öls in der Nähe der Papierisolation der Leiter zu kennen, da der Wärmeübergang zwischen Papier und Öl einen großen Temperatursprung an der sog. Grenzschicht verursacht, deren Dicke maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt.

Die thermische Auslegung von ölgekühlten Transformatoren geschah bisher unter der Annahme stark vereinfachter Gesetzmäßigkeiten und mit Absicherung durch Temperaturmesswerte, die außerhalb der Wicklung gewonnen wurden, an bereits ausgeführten ähnlichen Transformatortypen ohne detaillierte Kenntnis und somit ohne besondere Berücksichtigung strömungsmechanischer Einzelheiten in der Wicklung. Zudem ist die Öltemperatur mangels Zugänglichkeit lediglich an wenigen signifikanten Punkten messbar und die Temperatur des Kupfermaterials - durch Widerstandsmessung - nur als Durchschnittstemperatur ermittelbar. Somit ist nur die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen Kupfer und Öl bekannt, nicht jedoch die maximale, welche aufgrund ungünstiger Strömungsverhältnisse weit über der durchschnittlichen Temperaturdifferenz liegen kann.

Diese Umstände sind dadurch begründet, dass die Messung der Temperatur in einer betriebsfähig isolierten Wicklung nur sehr eingeschränkt möglich ist. Außerdem ist die Messung von Strömungsgrößen, vor allem der Geschwindigkeit, in der Wicklung praktisch nicht möglich, zumal eine Messung der Geschwindigkeit grundsätzlich die Strömung - und somit den Messwert - an der interessierenden Stelle verfälscht und moderne optische Messmethoden mangels Sichtkontakt und Zugänglichkeit ausscheiden. So lassen sich aus der Messung an ausgeführten Transformatoren nur unsichere Gesetzmäßigkeiten des thermischen Verhaltens in Abhängigkeit von Details der Wicklungskonstruktion ableiten. Für eine aussagekräftige Analyse wären zudem Messungen an einer größeren Anzahl von Messpunkten notwendig. Außerdem bestehen bei einer ausgeführten Wicklung praktisch keine Variationsmöglichkeiten von konstruktiven Parametern oder Merkmalen, durch die man deren Einfluss studieren könnte.

- **Numerical simulation of the oil flow in transformers and verification of the results by trials at a hydraulic test set-up**

**Dipl.-Ing. Andreas Weinläder**

In transformers of large performance the losses are transported away by the surrounding insulation oil which therefor has a second important duty. The heat is mainly transported by convection i. e. by the transport of the oil warmed up by the conductor to the cooling system. Hence the calculation of the thermal behaviour of an oil cooled transformer is linked with the detailed knowledge of the oil flow inside the oil vessel. The most essential and also most difficult part of the consideration is the oil flow in the manifold ramified channels of the winding. It is very essential to know the velocity of the oil near the paper insulation of the conductor because the transmission of heat between paper and oil causes a large jump of temperature at the so called boundary layer. The thickness of this boundary layer is strongly dependent on the flow velocity.

So far, the thermal design of oil cooled transformers was done by assuming strongly simplified laws with the coverage of temperature values measured at similar transformers outside the winding without detailed knowledge and without regard of particularities of flow in the winding. Furthermore due to a lack of reachability the temperature of the oil is measurable only at few significant points and the temperature of the copper is only available as an average value by measuring the resistance of the winding. So only the average difference of temperature between oil and copper is known and not its maximum which can be much higher than the average due to unfavourable flow conditions.

These circumstances are founded by the fact that temperatures can be measured in an insulated winding only with great restrictions. In practice the measurement of flow variables is also impossible because the measurement of the velocity influences the flow and therefore it falsifies the value mainly at the position of interest. Modern optical methods are not applicable due to a lack of intervisibility. So measurements at built transformers can only contribute to unconfident correlations between construction details of the winding and the thermal behaviour.

For a meaningful analysis measurements at a larger amount of points would be required. But at built windings there are nearly no possibilities to change the construction or dimensions so that one cannot study their influences. Hence potentials for an optimisation, e. g. the placement of washers in the winding, cannot be detected.

Somit können vorhandene Optimierungspotenziale, u. a. auch beim Platzieren der Ölbarrieren in der Wicklung, nicht erkannt und ausgenutzt werden.

Bei dem hier eingeschlagenen Weg wird die Ölströmung innerhalb der Wicklung mit kommerzieller CFD-Software (Computational Fluid Dynamics) untersucht. Bei dieser Methode wird das interessierende Gebiet (der Bereich, in dem das Öl fließt) in zahlreiche sog. finite Volumina zerlegt. Für jedes dieser Volumina werden die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls aufgestellt, diese werden dann für alle Volumina zu einem Gesamtgleichungssystem zusammengefasst, welches numerisch gelöst wird. Das Ergebnis ist die Geschwindigkeits- und Druckverteilung im gesamten interessierenden Strömungsgebiet (Fig. 1).

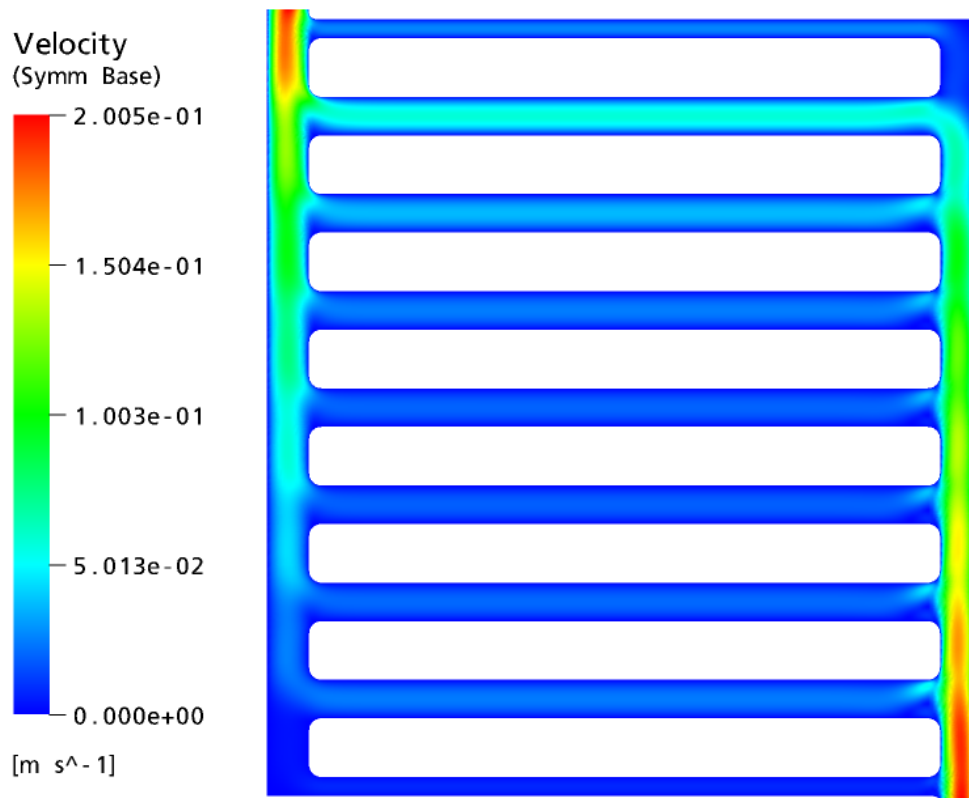


Fig. 1: Contour plot of velocity in a disc-type winding  
Konturplot der Geschwindigkeitsverteilung in einer Scheibenwicklung

Da die Modelle möglichst zeitsparend und auch auf kleineren Rechnern gerechnet werden sollen, ist es notwendig, Vereinfachungen vorzunehmen und deren Fehler zuverlässig abzuschätzen. Deshalb werden ergänzend Messungen an Modellen vorgenommen, deren Geometrie der eines Ausschnittes von realen Transformatorwicklungen entspricht (Fig. 2). Wenn man nun die Teilgebiete eines Transformators hinsichtlich ihres thermohydraulischen Verhaltens kennt, ist es möglich, diese zu einem Gesamtmodell aus diskreten Elementen zusammenzusetzen, mit denen bei wenig Rechenaufwand auch das transiente Erwärmungsverhalten eines Transformators simuliert werden kann.

Here we investigate the flow inside the winding by commercial CFD-software (Computational Fluid Dynamics). With this method the domain of interest (the range in which the oil flows) is disassembled in lots of so called finite volumes. For each of these volumes the equations of conservation of mass and momentum are built up, assembled and solved numerically. The result is the distribution of velocity and pressure in the whole domain of interest (Fig. 1).

Because the calculations should not be not so time consuming and also should run on small computers it is necessary to make simplifications in the modelling and to estimate reliably the error. Therefore in parallel to the numerical simulations measurements are done at models of windings, which are geometrically equivalent to a section of a real transformer winding (Fig. 2). If the particular domains of a transformer are known in the aspect of their thermal-hydraulic behaviour it is possible to reassemble them to a full model of the transformer. Such a model is able to simulate also the transient thermal behaviour of a transformer.



Fig. 2: Hydraulic test set-up with a disc-type winding model in the tank  
Hydraulischer Messstand mit einer Scheibenwicklung im Messtank

## ■ Online Überwachung eines Transformators mittels der Übertragungsfunktion

Dipl.-Ing. René Wimmer

Mechanische Deformationen der Transformatorwicklungen können mit der Übertragungsfunktion (ÜF) detektiert werden. Üblicherweise wird für die Messung der ÜF der Transformator abgeschaltet und kann erst nach ca. 6 Stunden wieder in Betrieb genommen werden (Offline-Messungen). Eine andere Möglichkeit ist, dass die einlaufenden transienten Überspannungen im laufenden Betrieb erfasst und zur Bestimmung der ÜF herangezogen werden (Online-Messungen).

### ÜF-Berechnung mit hochfrequenten Anregungen aus dem Netz

Durch Gewitter und Schalthandlungen entstehen transiente Überspannungen, die sich auf den Leitungen des elektrischen Energieübertragungsnetzes ausbreiten. Diese Signale unterscheiden sich jedoch stark von denen einer Offline-Messung. Leitungskopplungen, Reflexionen und Wiederezündungen von Lichtbögen führen zu einer Reihe von Teilvorgängen. Zudem wird bei solchen Signalen der Schwingkreis, bestehend aus Längsinduktivitäten und Erdkapazitäten des Versorgungsnetzes angeregt, so dass die Signale an den Klemmen des Transformators stark oszillieren. Diese Tatsachen erschweren die ÜF-Berechnung. Die Probleme sind:

- keine klare Unterscheidung zwischen Anregungs- und Antwortsignal möglich.
- die Bandbreite des aufgenommenen Signals ist nicht hinreichend groß.
- unterschiedliche Schaltzustände des Umspannwerkes führen zu unterschiedlichem Reflektionsverhalten.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten Signale eine genügend hohe Bandbreite besitzen. Für die Bestimmung der ÜF ist es jedoch wichtig zu wissen, welches die Anregung und welches das Antwort-Signal ist.

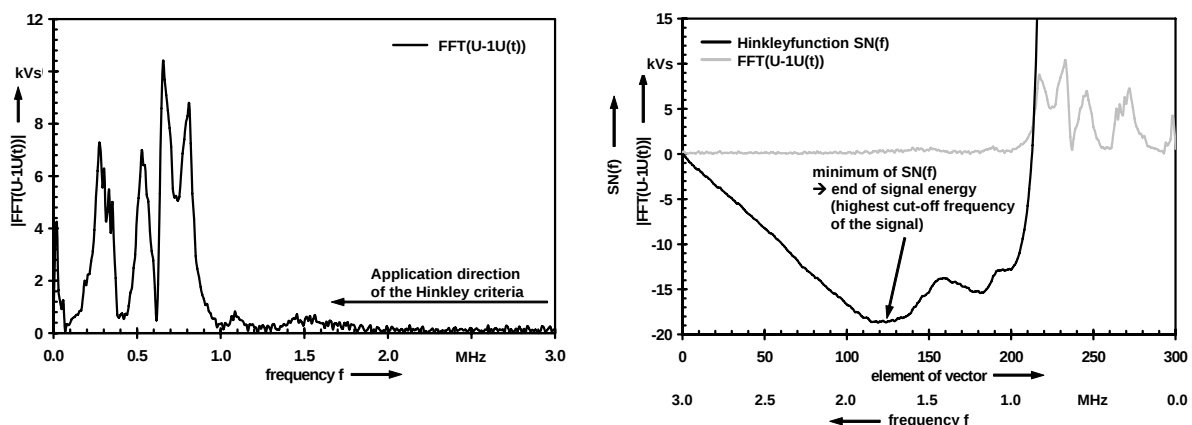


Fig. 1: Bestimmung der Signalgrenzfrequenz mittels Hinkley Kriterium  
Determination of cut-off frequency of the signal by means of Hinkley criteria

## ■ **Online monitoring of a transformer by means of the transfer function**

**Dipl.-Ing. René Wimmer**

Mechanical deformation in transformer windings can be detected with the transfer function (TF). Normally the transformer is disconnected from the power supply during the recording of the TF (offline measuring). Consequently the transformer is out of operation for at least 6 hours. Another possibility is to use the incoming transient overvoltages, which can be measured during operation of the transformer to determine the TF (online measuring).

### **TF calculation using transient overvoltages from the power grid**

Switching operations or lightning strikes generate transient overvoltages travelling along the lines. These signals are completely different from those measured offline. Capacitive coupling between the lines, reflections and reignitions induce a sequence of partial events. In addition such signals excite the oscillating circuit of the network, composed of inductance and earth capacitance of the lines. This causes a strong oscillation at the terminals of the transformer. Therefore, the TF calculation for online measurements is difficult. The problems are:

- Separation between excitation and answer signal is difficult.
- The bandwidth of the recorded signal might not be high enough.
- Different circuit states of the substation result in different reflection behaviour.

Former investigations have shown that many signals have a sufficient bandwidth for TF calculation. However, to determine the TF it is necessary to distinguish the excitation from the answer. It turned out that the old algorithm for detection of the excitation signal was not sensitive enough. The new algorithm sorts the actual recorded signals according to their bandwidth. In a first step the amplitude vector will be reversed, that means the last element of the vector comes to the first position, the element before last comes to the second position and so on. Afterwards the Hinkley criteria are used to detect the beginning (in reality it is the ending) of signal-energy. The vector with the lowest row number (with the highest frequency value) for the beginning (end) of signal-energy is the exciting signal (see fig. 1). Tests with similar excitation and answer signal have shown a high reliability of this algorithm.

It was already mentioned that different circuit states of the substation cause a different reflection behaviour. This fact directly influences the result of the TF. One possibility is to sort the TFs according to different circuit states. But that is not practical for a larger substation. Another possibility is to categorise the TF with respect to a certain tolerance according to different minima and maxima.

Es hat sich gezeigt, dass der bisherige Algorithmus zur Lösung dieses Problems nicht empfindlich genug war. Der neue Algorithmus sortiert die aktuell gemessenen Signale nach ihrer Bandbreite. Hierzu wird zuerst der Amplitudenvektor umgedreht, d. h. das letzte Element des Vektors wird das erste, das vorletzte Element das zweite, usw.. Danach wird das Hinkley-Kriterium benutzt, um den Beginn (tatsächlich ist es das Ende) der Signalenergie zu ermitteln. Der Vektor mit der niedrigsten Zeilennummer (mit dem höchsten Frequenzwert) für den Beginn (das Ende) der Signalenergie ist dann das anregende Signal (Fig. 1). Tests mit ähnlichen Kurvenverläufen für Anregungs- und Antwortsignal haben eine hohe Zuverlässigkeit des Algorithmus gezeigt.

Wie bereits erwähnt, führen unterschiedliche Schaltzustände der Umspannanlage zu unterschiedlichem Reflexionsverhalten, und das wiederum beeinflusst das ÜF-Ergebnis. Eine Möglichkeit, dem entgegen zu treten wäre, dass die ÜF entsprechend dem Schaltzustand der Anlage sortiert werden. Das ist jedoch bei größeren Anlagen nicht praktikabel. Eine andere Möglichkeit ist, die ÜF unter Berücksichtigung einer bestimmten Toleranz bzgl. ihrer Extremwerte zu kategorisieren. Die Idee ist, dass eine Veränderung des Wicklungzustandes des Transformators neue ÜF-Kategorien hervorruft. Ein zuverlässiger Algorithmus zur Extremwertbestimmung wurde hierfür entwickelt. Zuletzt werden die ÜFs einer Kategorie gemittelt und somit deren Genauigkeit erhöht.

### **ÜF-Bestimmung anhand der transienten Überspannung des Leistungsschalters**

Eine andere Möglichkeit ist die gezielte Verwendung der transienten Signale, die beim Einschalten des Transformators durch den Leistungsschalter entstehen. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass die Einflussfaktoren auf die ÜF reduziert werden:

- Beim Einschalten des Transformators ist eine Spannungsebene noch nicht zugeschaltet.
- Der Leistungsschalter erzeugt beim Einschalten transiente Signale mit hoher Reproduzierbarkeit.
- Der Leistungsschalter ist nur wenige Meter vom Transformator entfernt. Das bedeutet, dass die gemessenen Signale am Transformator weniger stark oszillieren und daher wesentlich einfacher eine Unterscheidung zwischen Anregungs- und Antwortsignal möglich ist.

Fig. 2a zeigt einen Vergleich von zwei ÜF, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden sind. Die Unterschiede zwischen den beiden ÜF sind durch die schlechte Aussteuerung des Transientenrekorders erklärbar. Die ÜF aus zwei aufeinander folgenden Impulsen zeigen hingegen eine sehr gute Übereinstimmung (Fig. 2b).

The idea of this approach is, that a change of the mechanical condition of transformer coils creates new categories of TF. A corresponding algorithm was developed to determine the minima and maxima with a high reliability. Averaging of TF within each category increases its accuracy.

### TF calculations with overvoltages from the transformer's circuit breaker

Another possibility is to calculate the TF using only overvoltages generated by the nearby circuit breaker. The great advantage of this method is the reduction of several influence factors:

- One voltage level is disconnected from the transformer during its switching on.
- Good reproducibility of the transient signals because of GIS circuit breaker.
- The circuit breaker generally is located nearby the transformer. So the signals measured at the transformer do not have strong oscillations and it is easier to distinguish between excitation and answer signal.

Fig. 2a shows a comparison of two TF, calculated with such transient signals recorded at different times. The difference in the higher frequency range can be explained with disturbing modulation of the transient recorder. The TF of successive impulses give a very good correlation (fig. 2b).

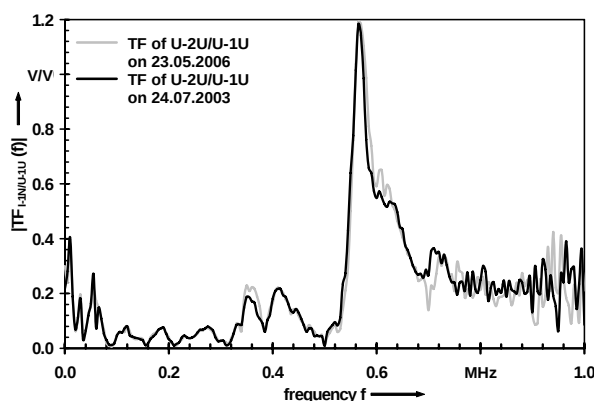


Fig. 2a: Vergleich zweier ÜFs, gebildet aus den transienten Überspannungen des Einschaltvorganges zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Comparison of TF calculated from transient overvoltages of closing events at different times.

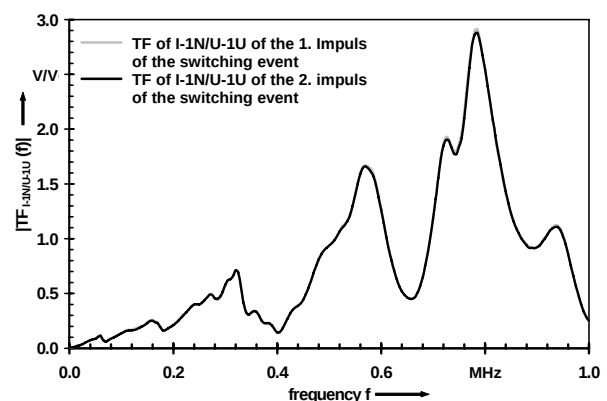


Fig. 2b: Vergleich zweier ÜFs, gebildet aus zwei hintereinander folgenden Impulsen des Einschaltvorgangs. Comparison of two TF calculated from two successive closing events

## ■ **Vergleichbarkeit und Simulation verschiedener Emissionsmessverfahren in der Automobil-EMV**

**Dipl.-Ing. Michael Zerrer**

In Kraftfahrzeugen der heutigen Generation kommen mehr elektrische und elektronische Komponenten zum Einsatz. Aufgrund der immer kürzer werdenden Entwicklungs- und Fertigungszeiten können EMV-Messungen am gesamten Fahrzeug erst zu einem sehr späten Zeitpunkt gemacht werden. Trotzdem muss sichergestellt werden, dass sich die Komponenten im eingebauten Zustand nicht gegenseitig unzulässig stören und dass z. B. ein problemloser Rundfunkempfang möglich ist. Daher sind Ersatzmessverfahren mit entsprechenden Grenzwerten nötig, die eine Beurteilung der einzelnen Komponenten zulassen. Mit dem Vergleich verschiedener Messverfahren erhält man die Möglichkeit, eine Komponente (DUT) hinsichtlich ihres Abstrahlverhaltens zu kategorisieren. Dazu wird das Emissionsverhalten verschiedener Geräte mit der Stromzange, Antenne und Netzwerknachbildung gemessen und simuliert.

### **Zusammenhänge zwischen Störstrom und Funkstörspannung**

Im Frequenzbereich von 150 kHz bis 400 MHz wird die Funkstörspannung an der Netzwerknachbildung sowie der Störstrom mit der Stromzange gemessen. Zunächst wurde versucht, über die Impedanzverhältnisse einen Zusammenhang beider Messmethoden zu finden. Dies erwies sich als sehr schwierig, da eine genaue Messung der Impedanzverhältnisse von vielen Faktoren abhängig ist. Außerdem fordert die Norm, dass die Messungen der Funkstörspannung mit kurzen Kabellängen (20 cm) durchgeführt werden, während zur Messung des Summenstroms lange Kabel (max. 200 cm) benutzt werden. Das dadurch auftretende unterschiedliche Resonanzverhalten erschwert die Korrelation zusätzlich.

Trotzdem kann im Frequenzbereich von 140 – 330 MHz eine Verknüpfungsimpedanz von  $35 \text{ Ohm} \pm 3 \text{ dB}$  gefunden werden. In weiteren Messungen werden insbesondere der Einfluss der Impedanz des DUTs sowie von unterschiedlichen Kabelbaumlängen untersucht.

### **Zusammenhänge zwischen Störstrom und abgestrahlter Feldstärke**

Um die Zusammenhänge zwischen der abgestrahlten Feldstärke und dem Summenstrom näher zu untersuchen, wird ein Aufbau nach Fig. 1 gewählt. Dieser Aufbau wird sowohl simuliert als auch im Labor real vermessen. Dabei wurde ein DUT so modelliert, dass das Verhältnis zwischen direkt abgestrahlter (Feld-)Emission und der Emission auf den Kabelbaum verändert werden kann.

## ■ **Comparison and simulation of different emission measurement methods in automotive EMC**

**Dipl.-Ing. Michael Zerrer**

In modern motor vehicles, the number of electric and electronic components is continuously rising. EMC-Measurements with the whole vehicle are only possible in a quite late state of the development cycle. The main reason for this is the steadily decreasing time for the development of new cars. Nevertheless the assembled electronic control units in the car have to work properly and may not disturb each other. For example the radio reception should always be possible without disturbance. Therefore alternative measurement methods and appropriate limit levels for each of these methods are necessary, so that one can assess the noise level of each component (DUT). By means of comparing different alternative measurement methods, one gets a possibility to categorise the DUTs regarding their emission behaviour. To analyse this, the emission behaviour of miscellaneous DUTs are measured with current probes (total current on all lines), antennas (electrical field strength) and artificial networks (RF-voltage on supply lines).

### **Interrelationship of total current and RF voltage on supply-lines**

Measurements of the RF voltage on supply lines and total current have been carried out in the frequency range from 150 kHz to 400 MHz. In the first step it was tried to find a interrelationship between these two measurement methods based on the impedance ratios. This was very difficult because of the influence of several incalculable conditions. Furthermore the CISPR-25 standard demands different harness lengths for the measurement with the artificial network (20 cm) and the measurement with the current clamp (150-200 cm). This results in a different resonance behaviour and makes correlation (ratio of RF voltage / total current) even more difficult.

In spite of this a catenation impedance could be found in the frequency range from 140 to 330 MHz with a value of  $35 \text{ Ohm} \pm 3 \text{ dB}$ . Further measurements will explain the influences of different parameters, such as the impedance of the DUT or the length of the cable harness.

### **Interrelationship between current over all lines and radiated emission**

A measurement setup (fig.1) was selected, to investigate the interrelationships between the current over all lines and the radiated emission. Real measurements in the EMC-Lab as well as simulations were carried out.

Damit können Komponenten simuliert werden, die nur Störungen auf dem Kabelbaum verursachen, bzw. Komponenten, die nur ein elektrisches Feld abstrahlen und beliebige Kombinationen davon.

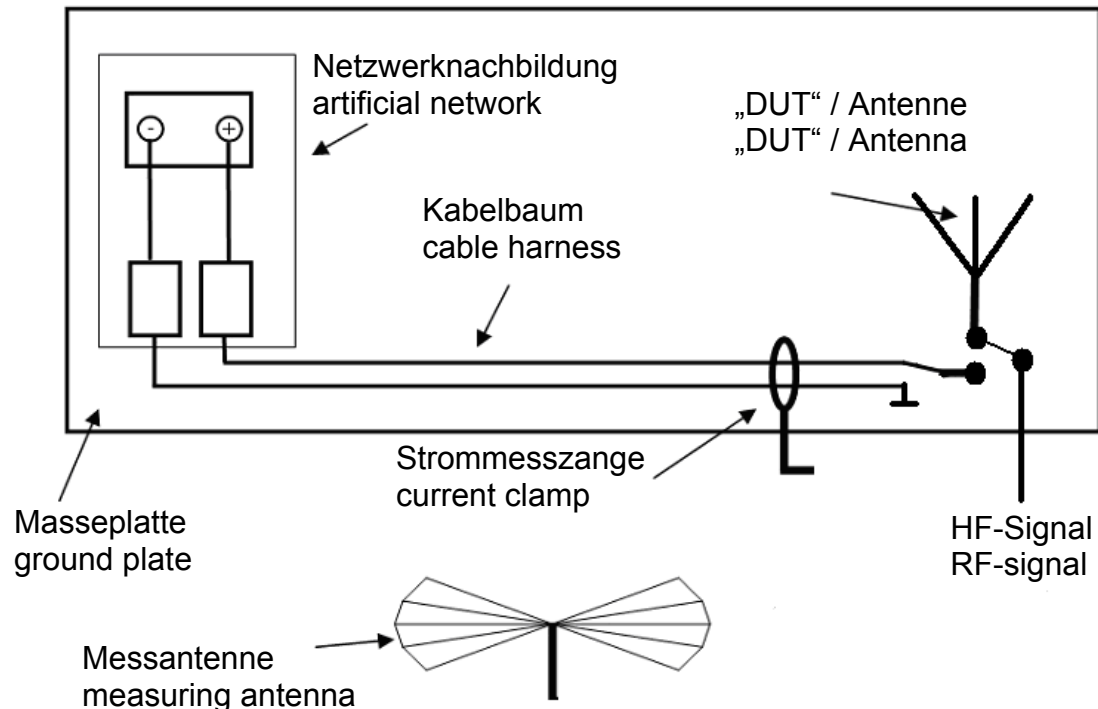


Fig. 1: Messaufbau für Korrelationsbetrachtungen  
Measuring setup for investigation of correlation

Die Simulationen werden mit Microwave Studio durchgeführt. Vergleiche mit realen Messungen zeigen eine grundsätzlich gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Kurvenverläufen. Abgesehen von kleinen Frequenzverschiebungen der Maxima und Minima sind die Abweichungen kleiner  $\pm 5$  dB.

In Fig. 2 ist die Korrelation von Antennen- und Stromzangenmessung zu sehen. Dabei wird einmal nur das Störsignal über den Kabelbaum abgestrahlt, das andere mal nur über die Antenne. Eine Abstrahlung über den Kabelbaum hat einen konstanten Verlauf über der Frequenz. Wird dagegen die Antenne mit dem Störsignal angeregt, zeigt sich eine Korrelationskurve, die mit 20 dB/Dekade ansteigt.

Der Grund liegt darin, dass der Kabelbaum aufgrund seiner geometrischen Länge ein grundsätzlich anderes Abstrahlverhalten gegenüber einer Fahrzeugkomponente mit kleineren Abmessungen hat. Zusätzlich muss beachtet werden, dass der Kabelbaum als Sende- und Empfangsantenne wirkt, weswegen die von der Fahrzeugkomponente emittierte Feldstärke auch eine Auswirkung auf den gemessenen Summenstrom auf dem Kabelbaum hat.

Damit ist es möglich, anhand von Korrelationskurven Aussagen über spezielle Eigenschaften der vermessenen Komponente zu treffen.

A special DUT was modelled in a way, that the ratio of directly emitted noise and the emission from the cable harness is variable and adjustable. So it is possible to simulate DUTs with only field emission or only emission over the cable harness and arbitrary combinations.

The simulations were carried out with Microwave Studio. Despite of displacements of resonances in frequency the deviation between simulated and real measured data is less than  $\pm 5$  dB.

Fig. 2 shows the correlation of antenna measurements versus current clamp measurements. One of the curves shows the correlation of the DUT only exciting the harness, the other curve shows the behaviour when the DUT is only emitting an electromagnetic field. If the noise source is exciting the harness, the frequency response characteristic is flat. If the excitation is caused by a local electrical field only, the curve increases with 20 dB/decade.

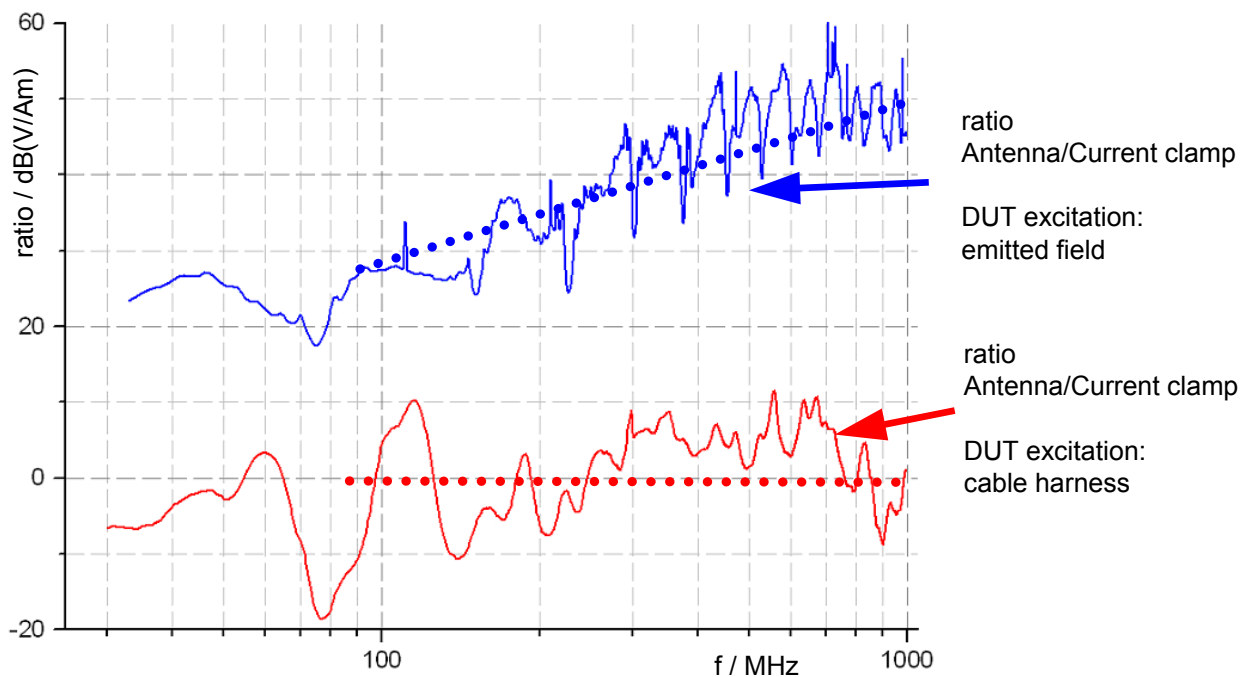


Fig. 2: Korrelation von Antennen und Stromzangenmessung  
Correlation of antenna- and current clamp measurements

The reasons are the geometrical lengths of the cable harness and the DUT, resulting in different frequency-responses of their radiated emissions. Furthermore it should be considered, that the cable harness acts as a receiving antenna as well as a sending antenna. Therefore the emitted radiation of a DUT will influence the measured current over the harness.

In that way it is possible to get particular information about the emission properties of the tested DUT based on different emission measurement methods.

## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

J. Christian, R. Wimmer

*Comparability of transfer function results.*

European Transactions on Electrical Power, 2006, Vol. 16, No. 2, pp. 137-146

S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous

*Elektromagnetische Teilentladungsmessung bei Leistungstransformatoren.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006, Kassel, S. 351-356.

D. Denissov, W. Köhler, S. Tenbohlen, T. Klein

*Praktische Probleme beim Einsatz der UHF-TE-Diagnostik an Hochspannungskabelsteckern im Betrieb.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006, Kassel, S. 303-308.

M. Fischer, J. Aragon Patil, S. Tenbohlen

*Interpretation der Gas-in-Öl-Analysen von Leistungstransformatoren durch Einsatz von Fuzzy Logik mit dem Ziel einer präziseren IT-gestützten Zustandserfassung.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006, Kassel, S. 415-420.

S.M. Gubanski, J. Blennow, L. Karlsson, K. Feser, S. Tenbohlen, C. Neumann, H. Moscicka-Grzesiak, A. Filipowski, L. Tatarski

*Reliable Diagnostics of HV Transformer Insulation for Safety Assurance of Power Transmission System - REDIATool - a European Research Project.*

CIGRE Session 2006, Paper D1-207, Paris, Frankreich

S. M. Hoek, U. Riechert, T. Strehl, S. Tenbohlen, K. Feser

*Teilentladungsortung in GIS im Frequenzbereich.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006, Kassel, S. 171-176.

T. Klein, D. Denissov, S. Markalous, W. Köhler

*Neue Technologien in der steckbaren Anschlusstechnik – Entwicklung einer Steckdurchführung und TE-Diagnose an Hochspannungskabelsteckern.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006 „Zustandserfassung und –beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“, 15. - 16. März 2006, Stuttgart

M. Koch, S. Tenbohlen

*Wasser in Leistungstransformatoren – Richtig messen und den Zustand beurteilen.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006 „Zustandserfassung und –beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“, 15. - 16. März 2006, Stuttgart.

M. Koch, S. Tenbohlen, T. Stirl

*Advanced Online Moisture Measurements in Power Transformers.*

CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis,  
Changwon, Korea, April 2-5, 2006

M. Koch

*Water in Power Transformers - Sources, Risks and Measurement Methods.*

Workshop "Diagnostic Measurements on Power Transformers", 12.-13. September  
2006, Dornbirn, Österreich

M. Koch, S. Tenbohlen

*Ein neues Verfahren zur Online-Feuchtemessung in Leistungstransformatoren.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006,  
Kassel, S. 143-148.

M. Koch, S. Tenbohlen

*Der Bubble-Effekt und das Risiko eines dielektrischen Fehlers in Leistungstransformatoren.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006,  
Kassel, S. 377-382.

M. Koch

*Dielektrische Diagnoseverfahren im Vergleich.*

Leistungstransformatoren – Monitoring und Instandhaltung, Energy-Support / VWEW  
Fachtagung, 25.-26. Oktober 2006, Fulda

S. Markalous

*Neues Verfahren zur On-site Ortung von TE in Transformatoren.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006 „Zustandserfassung und –beurteilung  
von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“, 15. - 16. März 2006, Stuttgart.

S. Markalous, R. Zieschang, T. Strehl, S. Tenbohlen

*Neue Ansätze zur laufzeit-basierten Ortung von Teilentladungen in Transformatoren.*

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006,  
Kassel, S. 125-129.

M. Muhr, T. Strehl, E. Gulski, K. Feser, E. Gockenbach, W. Hauschild, E. Lemke  
*Sensors and Sensing used for Non-Conventional PD-Detection.*

CIGRE Session 2006, Paper D1-102, Paris, Frankreich

Z. Radakovic, E. Cardillo, M. Schäfer, K. Feser

*Design of the winding–bushing interconnections in large power transformers.*

Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag, Vol. 88, No. 3,  
March 2006, pp. 183-190.

M. Stiegler, M. Fischer

*Asset Management für SAP / Integration von Expertenwissen über technische  
Betriebsmittel in xRCM durch Einsatz von Fuzzy-Logik.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006 „Zustandserfassung und –beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“, 15. - 16. März 2006, Stuttgart

S. Tenbohlen, S. Hoek, D. Denissov, R. Huber, U. Riechert, S. Markalous, T. Strehl, T. Klein

*Electromagnetic (UHF) PD Diagnosis of GIS, Cable Accessories and Oil-paper Insulated Power Transformers for Improved PD Detection and Localization.*

CIGRE Session 2006, Paris, Frankreich, paper No. D1-104

C. Neumann, R. Huber, D. Meurer, R. Plath, U. Schichler, S. Tenbohlen, K.-H. Weck  
*The Impact of Insulation Monitoring and Diagnostics on Reliability and Exploitation of Service Life.*

CIGRE Session 2006, Paris, Frankreich, paper No. C4-201

R. Vilaithong, S. Tenbohlen, T. Stirl (Areva)

*Investigation of Different Top-oil Temperature Models for On-line Monitoring System of Power Transformer.*

CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006, Paper No. 661

R. Vilaithong, S. Tenbohlen, T. Stirl

*Modelle zur Online-Berechnung der Deckelöltemperatur von Leistungstransformatoren.* ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006, Kassel, S. 439-443.

R. Wimmer, M. Krüger

*Erhöhung der Reproduzierbarkeit von FRA-Messungen durch Standardisierung.* Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006 „Zustandserfassung und –beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“, 15. - 16. März 2006, Stuttgart, S. 45-67

R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, M. Krüger

*Richtlinien für den Messaufbau für eine hohe Reproduzierbarkeit der FRA-Messergebnisse.* ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, 19.-20. September 2006, Kassel, S. 361-366.

M. Zerrer, K. Feser, W. Köhler, S. Tenbohlen

*Vergleichbarkeit verschiedener Emissionsmessverfahren in der Automobil-EMV.* HF-Report EMV-Magazin, Februar/März 2006 / 20. Jahrgang, S. 34-37

M. Zerrer, W. Köhler, M. Aidam, S. Tenbohlen, K. Feser

*Vergleichbarkeit verschiedener Emissionsmessverfahren in der Automobil-EMV.* Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 7. - 9. März 2006, S. 445-461

S. Tenbohlen

*Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren.*

Leistungstransformatoren – Monitoring und Instandhaltung, Energy-Support / VWEW Fachtagung, 25.-26. Oktober 2006, Fulda

## 7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 07.12.05 Sitzung der VDE-/ETG-Arbeitsgruppe "Weiterbildung" in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 19.-22.01.06 Abschlusstreffen des EU-Projekts REDIATool in Ludvika;  
Prof. Feser, Prof. Tenbohlen, Dr. Schärli, Vorträge von  
S. Markalous: „*Enhanced PD detection and localization with acoustic and electromagnetic signals*“  
M. Koch: „*Moisture determination using conventional and new methods*“  
M. Koch: „*REDIATool round robin test on Karl Fischer titration*“  
R. Wimmer: „*Repeated FRA-measurements on a 200 MVA transformer*“
- 27.01.06 Sitzung des deutschen Arbeitskreises DAK SC D1 „*Materials and Emerging Technologies*“ in Dresden, Prof. Tenbohlen
- 07.03.06 Sitzung des FA 7.1 der GMM „*EMV von Anlagen, Systemen und Netzen*“, Düsseldorf, Prof. Feser
- 08.03.06 Sitzung K122 „*Isolationskoordination*“, Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 07.-09.03.06 Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf. Prof. Tenbohlen, Dr. Köhler, H. Rebholz, F. Streibl; Vortrag durch M. Zerrer.  
Ehrung von Prof. Feser für seine Verdienste um die EMV-Konferenz am Komitee-Abend.
- 15.-16.03.06 Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006 „*Zustandserfassung und –beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes*“, Stuttgart. Organisation durch das IEH. Vorträge von R. Wimmer, M. Koch
- 21.03.2006 Sitzung des Fachbereichs Q2 „*Werkstoffe, Isoliersysteme und Diagnostik*“ der ETG, Hannover, Prof. Tenbohlen
- 28.-29.03.06 VDE-Seminar „*Moderne Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren*“ in Stuttgart; Vorträge durch Prof. Tenbohlen, S. Markalous, R. Wimmer, M. Koch
- 01.-04.04.06 IV. International Workshop on Power Transformers, Recife, Brasilien, Prof. Tenbohlen
- 11.-12.05.06 Sitzung der Cigre-Arbeitsgruppe WGA2.27 „*Recommendations for Condition Monitoring Facilities*“ in Regensburg, Prof. Tenbohlen
- 01.06.2006 „*Baur Sales Network meets Mozart: Developments and challenges in High Voltage Engineering*“, Salzburg, Vortrag von Prof. Feser
- 11.-12.07.06 DFG-Kolloquium im Schwerpunktprogramm „Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und Anlagen der elektrischen Energieversorgung“, München. Prof. Feser, Prof. Tenbohlen;  
Vortrag durch R. Wimmer: „*Online-Überwachung von Transformatoren mittels der FRA*“ und S. Markalous „*TE-Lokalisierung in Leistungstransformatoren*“

- 26.08.2006 Cigre WG A2.26 „*Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)*“, Meeting während der Cigre Session 2006 in Paris, Prof. Tenbohlen
- 27.08.2006 Cigre TF D1.01.14, Mitarbeit und Vortrag „*Dielectric response methods in comparison*“, Meeting während der Cigre Session 2006 in Paris, Prof. Tenbohlen, Maik Koch
- 28.08.2006 Cigre WG A2.30 „*Moisture in transformers*“, Meeting während der Cigre Session 2006 in Paris, Prof. Tenbohlen, M. Koch
- 29.08.2006 Cigre AG D1.03, „*Insulating Gases*“, Meeting während der Cigre Session 2006 in Paris, Prof. Tenbohlen
- 2006 Cigre WG A2.30, Mitarbeit und Redaktion einer Broschüre „*Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems*“, Prof. Tenbohlen, Maik Koch
- 04.-07.09.06 Sitzung von CIGRE WG D1.33 „*High voltage test technique*“ in Larnaca, Zypern, Prof. Feser, Prof. Tenbohlen
- 11.-15.09.06 13. Workshop on High Voltage Engineering, Söllerhaus im Kleinwalsertal. Teilnehmer: Prof. Tenbohlen, Prof. Feser, Dr. Schärli, Dr. Moukengue; Vorträge durch Dr. Köhler, S. Coenen, D. Denissov, S. Hoek, M. Koch, R. Wimmer
- 19.-20.09.06 ETG-Fachtagung „*Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*“, Kassel, Teilnehmer: Prof. Tenbohlen, S. Coenen, D. Denissov, M. Fischer, J. Aragon Patil, S. Hoek, M. Koch, R. Vilaithong, R. Wimmer
- 20.-21.09.06 Teilnahme am 85-Jahre-Jubiläum der Firma Pfisterer, Esslingen, Prof. Feser, Prof. Tenbohlen
- 05.-06.10.06 Feierlichkeiten zum 50-jährigen Jubiläum des Hochspannungsinstitutes der TU Graz, Prof. Tenbohlen
- 25.-26.10.06 VWEW-Fachtagung „*Leistungstransformatoren – Monitoring und Instandhaltung*“ in Fulda, Einführungsvortrag von Prof. Tenbohlen „*Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren*“, Vortrag von M. Koch „*Dielektrische Diagnoseverfahren im Vergleich*“
- 08.11.06 Sitzung des Deutschen Arbeitskreises DAK CIGRE SC A2 „*Leistungstransformatoren*“ in Zwickau, Prof. Tenbohlen
- 09.-10.11.06 Sitzung der CIGRE-Arbeitsgruppe TF D1.01.15 „*DGA*“ in Venedig, Prof. Tenbohlen
- 15.11.06 Sitzung des Deutschen Arbeitskreises DAK CIGRE SC C4 „*System Technical Performance*“ in Dortmund, Prof. Tenbohlen

## 8. EREIGNISSE UND KONTAKTE

### IEH Exkursion 2006

(Bericht von Anne Pfeffer)

„Mit einem freundlichen „Hopp Schwiez, hopp“ machte sich dieses Jahr das IEH mit 31 Studenten, Mitarbeitern und Professor auf die Reise nach Zürich. Am 6. Juni 2006 brachte unser Busfahrer uns erst einmal gut in den Schwarzwald. Dort besuchten wir das Pumpspeicherkraftwerk Wehr und die Schaltzentrale aller Kraftwerke der Schluchseewerke. Gewaltige Maschinen, Hochspannung und eine Unmenge an Wasser waren zu sehen, was uns gleichzeitig auf unser Ziel Zürich und den zugehörigen See einstimmte. Gestärkt durch das Frühstück ging es am 7. Juni zur ABB Schweiz nach Örlikon, um die Herstellung von gasisolierten Schaltanlagen, zu begutachten. In einem sehr interessanten Vortrag stellte uns Dr. Claessens ein Entwicklungsprojekt für eine neue Schaltkammer vor. Beim anschließenden Fabrikrundgang konnten schrittweise die Herstellung einer Schaltanlage nachvollziehen. Nach einem Imbiß mit der Geschäftsleitung ging es weiter nach Baden ins Forschungszentrum der ABB Schweiz. Es war wirklich sehr aufschlussreich, die verschiedenen Bereiche, wie Leistungselektronik, numerische Feldberechnung und weitere Bereiche, an denen hier geforscht wird, zu besichtigen.

Nach einer Kaffeepause stieg dann eine nette Dame der ABB Schweiz Micafil in unseren Bus und entführte uns ins Knusperhüsli. Es erwartete uns eine echte Hexe, die darauf wartete, uns mit Hähnchen, Pommes, Nachtisch und Wein zu mästen, um uns dann später wie den armen Hänsel verspeisen zu können. Es war wirklich ein sehr unterhaltsamer Abend. Die Hexe hat uns doch am Leben gelassen, und so konnten wir dann am 8. Juni die Herstellung von Durchführungen bei ABB Micafil begutachten. Nach Brotzeit und Kaffee ging es gestärkt zu unserem letzten Schweizer Ziel nach Brugg, wo wir die Kabelwerke besichtigten. Hier verfolgten wir genauestens, wie aus einem kleinen



Draht ein großes Hochspannungskabel entsteht. Nach einem letzten Abend am Züricher See mit zwei allgemein Aufsehen erregenden Kisten Tannenzäpfle ging es am Freitag, 9. Juni, dann ins Schwabenländle zu Bosch Schwieberdingen. Dort wurden wir durch verschiedene Bereiche geführt, und zum Schluss durften noch alle mit auf eine rasante Fahrt auf die ABS-Teststrecke. Es war mal wieder eine gelungene Exkursion. Ich danke stellvertretend für alle anderen Studenten dem IEH für die Organisation und allen Firmen, die uns viele Eindrücke auf den weiteren Weg mitgegeben haben.“

### **Stuttgarter Hochspannungssymposium 2006**

Auszug aus dem Stuttgarter unikurier Nr. 97, Mai 2006

„Die „Zustandserfassung und –beurteilung von Betriebsmitteln des elektrischen Netzes“ war Thema des „Stuttgarter Hochspannungssymposiums 2006“, das vom 15. bis 16. März 2006 in der Filderhalle in Leinfelden stattfand, organisiert vom IEH und mitgetragen von allen großen deutschen Transformatorenherstellern. 250 Teilnehmer konnte Prof. Tenbohlen zu dem sehr praxis- und industrienahen, aber dennoch seinen unabhängigen Charakter bewahrenden Symposium begrüßen, das im zweijährlichen Turnus stattfinden wird und mit hochkarätigen Referenten aus dem gesamten deutschsprachigen Raum aufwartete.

Um in den liberalisierten, deregulierten und globalisierten Energiemärkten betriebswirtschaftlich optimal agieren zu können, sei für die Netzbetreiber das Wissen um den tatsächlichen und erwarteten Zustand der eingesetzten Betriebsmittel, einschließlich einer aussagekräftigen Betriebsmitteldiagnostik, immer wichtiger, betonte Dr. Thomas Gößmann, Mitglied des Vorstands der EnBW Regional AG, Stuttgart. Die Optimierung der Kosten für Wartung und Instandhaltung und die Verlängerung der



Restnutzungsdauer der Betriebsmittel sprach Peter Werle, ABB AG, Halle, als wichtige Punkte an und ging auf Strategien ein, die bei kritischen Zuständen besonders wertvoller oder relevanter Einheiten ein effektives, betriebsbegleitendes Management ermöglichen. Voraussichtlich ab 2007 wird der Strommarkt in der Schweiz zu rund 70 Prozent geöffnet sein – Philippe Scheuzger von der CEO Axpo Vertrieb AG, Zürich, erwartet dann „einen tiefgreifenden Strukturwandel“.

Transformatoren und Generatoren können 20 bis 35 Jahre alt werden, bei fachgerechter Instandhaltung bis zu 60 Jahre. Allerdings: Mit dem Alter nimmt ihr Isoliervermögen ab und das Risiko eines Ausfalls, der gravierende finanzielle Verluste nach sich ziehen kann, zu. Immer mehr Transformatoren und Generatoren werden daher mit einem permanenten Monitoring-System ausgerüstet. „Neben den konventionellen Messgrößen, wie Temperatur oder physikalisch-chemischer Parameter, wird dabei immer mehr auch die elektrische Teilentladungsmessung mit einbezogen“, berichtete Thomas Strehl, Lemke Diagnostics GmbH, Volkersdorf/Dresden, führen Teilentladungen doch zu potenziellen Fehlstellen. Als zukünftige Ziele des Online-Monitorings nannte Strehl unter anderem zuverlässige Sensoren zu günstigen Preisen, eine kontinuierliche Überwachung sowie eine optimierte Datenauswertung durch verbesserte Modelle und gute Analysetechniken. Schon mehrfach habe das Online-Monitoring geholfen, katastrophale Schäden zu vermeiden, berichtete Tobias Stirl von AREVA Energietechnik GmbH, Mönchengladbach, aus der Praxis. Verschiedene Messverfahren, um in Öl-Papier-isolierten Leistungstransformatoren das „Alterungsprodukt Wasser“ zu erfassen, das einen Totalausfall bewirken kann, stellte Maik Koch vom IEH vor. Der so genannte Hermetiktransformator ist von den zwei Alterungsquellen Feuchtigkeit und Sauerstoff vollkommen abgeschlossen und verspricht daher sowohl weniger Wartung als auch Alterung im Vergleich zu konventionellen Leistungstransformatoren. Ein seit Jahrzehnten optimiertes Verfahren zur zuverlässigen Überwachung des Isolationszustands von Öl/Papier-Isolationssystemen ist die konventionelle Gas-in-Öl Analyse. Für die Vor-Ort-Analyse der Fehlergase präsentierte Dr. Michael Hahn, ECH Elektrochemie Halle GmbH, einen mobilen Gaschromatografen MobilGC.

Aufgrund der geänderten ökonomischen Anreize im liberalisierten Markt wird es wohl zu Verlagerungen in der Erzeugung der elektrischen Leistung kommen und der Energiehandel über größere geografische Entfernungen zunehmen. Jedoch: „Die bestehenden elektrischen Netze erfahren dadurch Lastflussverteilungen, für die sie zur Zeit ihres Baus nicht ausgelegt wurden“, erklärte Dr. Dietrich Bonmann von ABB AG Division Energietechnik – Transformatoren, Bad Honnef. Als ein erprobtes Betriebsmittel zur Steuerung von Lastflüssen benannte er die Querregeltransformatoren und stellte typische Anwendungsfälle sowie in jüngster Zeit realisierte Projekte vor.“

Der Tagungsband kann über das Institut bezogen werden.

## **Gastwissenschaftler und Institutsleben**

Von Juli bis September 2006 besuchte uns der Humboldt-Stipendiat Dr. Zlatan Stojkovic, Associate Professor an der Universität Belgrad. Unsere ehemaligen Kollegen Dr. Ebrahim Rahimpour (Universität Zanjan/Iran) und Dr. Adolphe Moukengue Imano (Universität Douala/Kamerun) arbeiteten mit Unterstützung des DAAD von Juli bis September 2006 bzw. von August bis September 2006 am Institut. Für sieben Monate besuchte uns auch Frau Dr. Emel Onal von der Universität Istanbul.

Zur Stärkung der Kontakte mit Polen fand vom 11.-15. September 2006 der 13. International Workshop on High Voltage Engineering statt. Seit den achtziger Jahren treffen sich an wechselnden Orten junge polnische und deutsche Wissenschaftler zum Austausch und zur Diskussion über Themen aus der Hochspannungstechnik. Das IEH organisierte den Workshop auf dem Söllerhaus der Universität Stuttgart im Kleinwalsertal, das mit 40 Teilnehmerinnen und Teilnehmern voll belegt war. 30 interessante Vorträge und eine Bergwanderung bei strahlendem Sonnenschein trugen zum Erfolg der Veranstaltung bei.

Ebenfalls auf dem Söllerhaus fand vom 5.-7. April 2006 der Mitarbeiter-Workshop des Instituts statt. Die Mitarbeiter berichteten über den aktuellen Stand ihrer Arbeit und nutzten die Möglichkeit zur Diskussion mit den Kollegen. Die freie Zeit konnte mit Wanderungen und Skilaufen verbracht werden.

Bei der "Langen Nacht der Wissenschaften" am 07. Juli 2006 präsentierte das Institut einem interessierten Publikum Experimentalvorführungen in der Hochspannungshalle. Im Hörsaalfoyer fanden bis nach Mitternacht zahlreiche Diskussionen mit Besuchern und Beratungsgespräche mit Studieninteressierten statt.

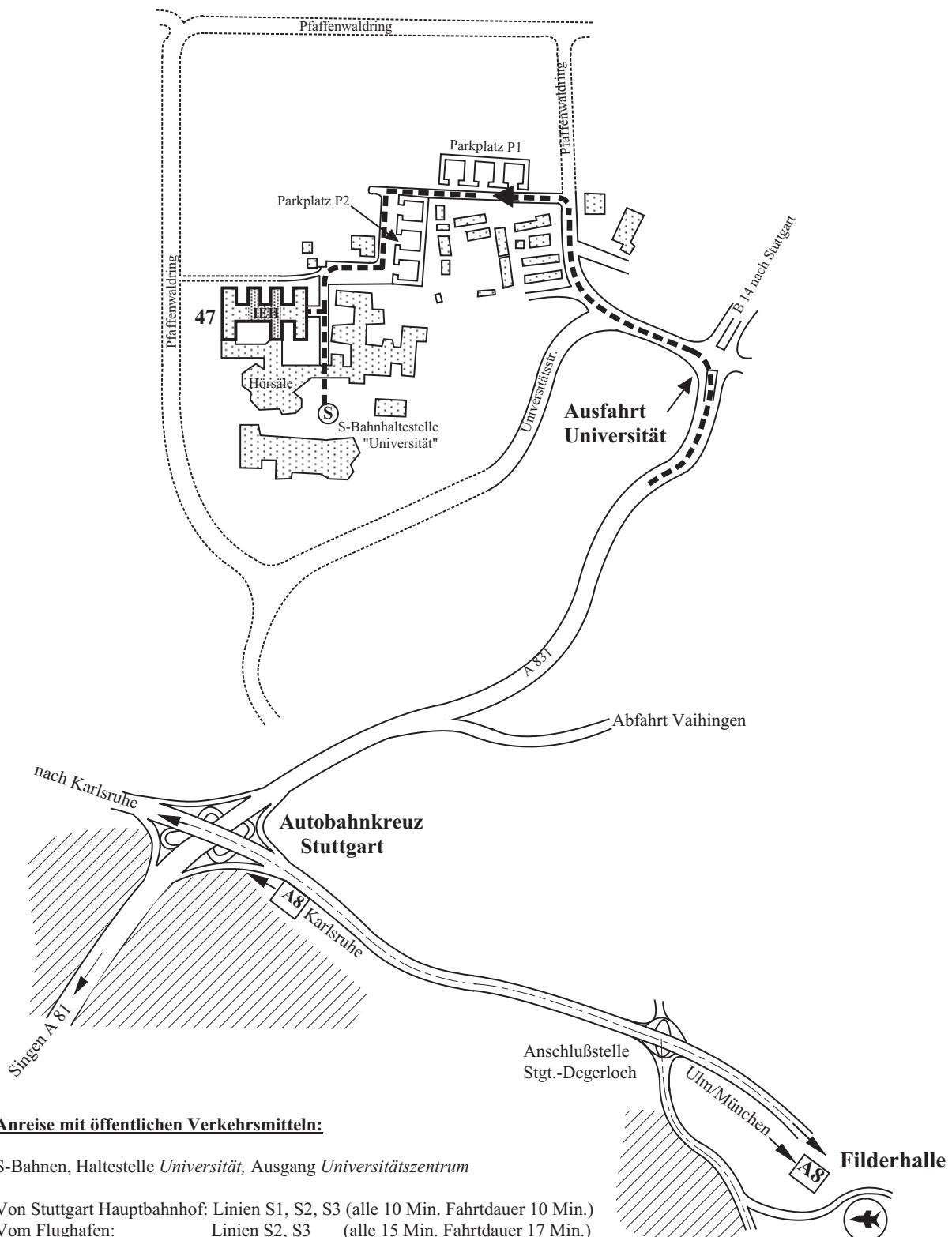
Der Institutsausflug am 1. August 2006 führte uns auf die Schwäbische Alb und dort zunächst an den Fuss des Hohen Neuffen. Nach schweisstreibendem Anstieg wurden wir durch eine engagierte Führerin belohnt, die viel Interessantes über die Geschichte der Burg und die Geschicke ihrer Bewohner berichtete. Gestärkt durch ein ausgiebiges Grillvesper wagten sich einige auf dem Weitemarsch sogar in die Bamberghöhle. Das „Bauernloch“ liessen wir aber lieber links liegen. In Neuffen angekommen konnten wir uns im Keller der Weingärtnergenossenschaft Hohenneuffen-Teck an einem Buffet stärken, bevor der Täleswein und die urigen Trinksprüche des Vorkosters ihre Wirkung zeigten. Einen herzlichen Dank an den Organisator Markus Fischer!

## 9. PRÜF- UND MESSEINRICHTUNGEN

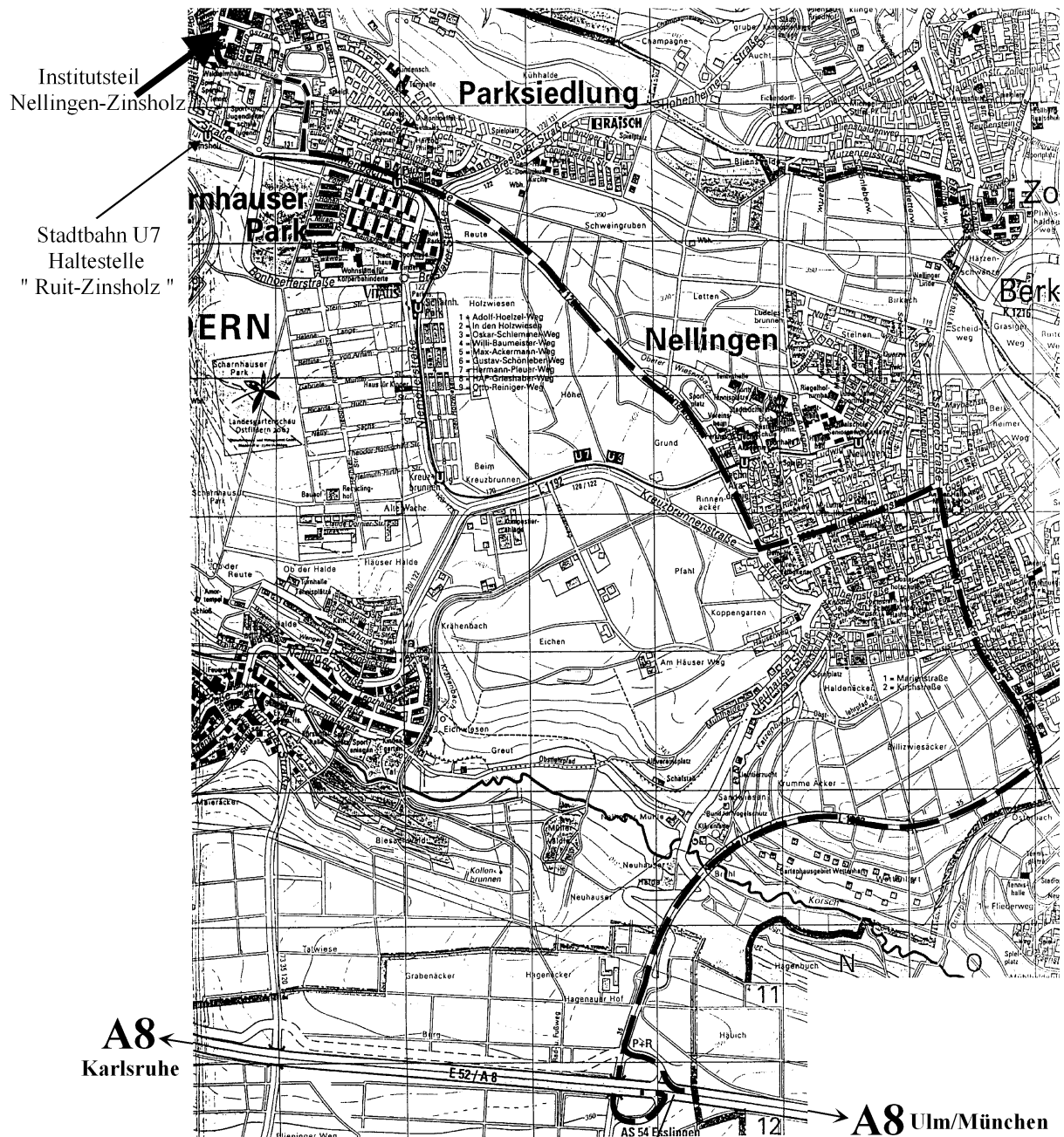
|                                                |                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stoßspannungsanlagen                           | bis 2000 kV, 100 kJ                                                                                                                                                                   |
| Generator für schwingende Schaltstoßspannung   | bis 1300 kV                                                                                                                                                                           |
| Schwingende Blitzstoßspannung                  | bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)                                                                                                                              |
| Stoßstromanlage                                | bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ                                                                                                                                                             |
| Stoßstromanlage                                | bis zu 6 Impulse wechselnder Polarität, 80 kV, 150 kJ                                                                                                                                 |
| Wechselspannungskaskade                        | 2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung                                                                                                                                               |
| Wechselspannungsanlage                         | 300 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz                                                                                                                                             |
| Gleichspannungsanlage                          | bis 600 kV, 10 mA                                                                                                                                                                     |
| EMP-Generator                                  | bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluftantenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m <sup>3</sup> (B x L x H) mit rechnergeführter Anlagensteuerung und Messwertverarbeitung  |
| 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 Entladungen, Einkopplung von Störspannungsimpulsen ins Netz, Prüfung von Bauteilen und Geräten mit Mikroelektronik-Schaltungen |
| CW-EMV-Absorberräume                           | mit Leistungsverstärkern, div. Antennen, Feldmesssystem, opto-analoge Messwertübertragungsstrecke bis 1 GHz, Messempfänger bis 2,7 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 %                                                                |
| Verschmutzungskammer                           | 5 x 5 x 5 m <sup>3</sup> , Spannung bis 150 kV                                                                                                                                        |
| Hochgeschwindigkeitskamera, Bildwandlerkameras |                                                                                                                                                                                       |
| Einpolige SF6-Anlage                           | Un = 525 kV, Länge mit Abzweigen ca. 25 m                                                                                                                                             |
| Dreipolige SF6-Anlage                          | Un = 110 kV, Länge ca. 3 m                                                                                                                                                            |
| Digitale und analoge Messgeräte                | für periodische und einmalige Vorgänge mit Abtastraten bis über 4 GHz, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren                                                  |
| Teilentladungsmeßgeräte                        | zur phasenaufgelösten Messung und Interpretation                                                                                                                                      |
| Öllabor                                        | Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlagspannungsmessgerät,                                                                                                               |

## 10. LAGEPLAN

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



**Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:**

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

**Anschlußstelle  
54 Esslingen/Ostfildern**

## 11. NOTIZEN