

## **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. STUDENTISCHE ARBEITEN.....	13
<b>4.</b>	<b>PROMOTIONEN.....</b>	<b>34</b>
<b>5.</b>	<b>FORSCHUNGSARBEITEN.....</b>	<b>40</b>
<b>6.</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN.....</b>	<b>100</b>
<b>7.</b>	<b>MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE .....</b>	<b>105</b>
<b>8.</b>	<b>EREIGNISSE UND KONTAKTE .....</b>	<b>107</b>
<b>9.</b>	<b>PRÜF- UND MESSEINRICHTUNGEN.....</b>	<b>109</b>
<b>10.</b>	<b>LAGEPLAN.....</b>	<b>110</b>
<b>11.</b>	<b>NOTIZEN .....</b>	<b>112</b>

## 1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

die Nutzung Erneuerbarer Energien und Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz sind gefragte Zukunftstechnologien. Der steigende Bedarf an speziell ausgebildeten Fachkräften wird auch in Zukunft in diesem Bereich anhalten. So freut es mich besonders, dass wir nach fast zwei Jahren Planung mit der Akkreditierung die Voraussetzung geschaffen haben, zum Wintersemester 2009/2010 einen neuen Bachelorstudiengang zum Thema Erneuerbare Energien zu starten. Der Studiengang wurde ins Leben gerufen, um junge Menschen auf die vielfältigen Tätigkeitsfelder dieser Wachstumsbranche optimal vorzubereiten. Das Forschungs- und Entwicklungspotential in der Region und an der Universität Stuttgart ist in seiner Konzentration und Vielfalt einzigartig und bietet damit beste Voraussetzungen für einen derartigen Studiengang. Die technologische Vielfalt des Einsatzes von Erneuerbaren Energien spiegelt sich im interdisziplinären Aufbau des Bachelorstudiengangs wider. So sind 21 Institute aus sieben Fakultäten am Studiengang beteiligt. Das Studium besteht aus einem Grund- und Fachstudium, in dem die Studierenden zwischen drei Wahlbereichen ihren Interessenschwerpunkt festlegen können:

1. Elektrische Energiesysteme: Photovoltaik, Windenergie plus Zusatzfächer
2. Thermische Energiesysteme: Biomasse, Solarthermie plus Zusatzfächer
3. Kinetische Energiesysteme: Windenergie, Wasserkraft plus Zusatzfächer

Die interdisziplinäre Kombination elementarer Studienfächer aus dem Maschinenbau, der Elektrotechnik und Informatik sowie Luft- und Raumfahrttechnik öffnet den Zugang zu zahlreichen Kompetenzfeldern. Weitere Information zu diesem in Deutschland ersten Bachelorstudiengang Erneuerbare Energien können Sie unter [www.ee.uni-stuttgart.de](http://www.ee.uni-stuttgart.de) finden.

Im Sommersemester hat Herr Dr.-Ing. Markus Pöller von der DigSILENT GmbH, Gomaringen, zum ersten Mal die Vorlesung „Netzintegration von Windenergie“ gelesen. Diesem aktuellen Thema wurde schon beim ersten Durchlauf von studentischer Seite ein großes Interesse entgegengebracht. Wir möchten Herrn Pöller auch an die dieser Stelle für die Bereitschaft danken, dieses Thema aus der Praxissicht darzustellen, und wünschen ihm viel Erfolg und Freude mit unseren Studierenden.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben der ersten von mir komplett betreuten Dissertation (Dr.-Ing. M. Koch) dokumentieren 38 Veröffentlichungen eindrucksvoll unsere Aktivitäten. Die hervorragende wissenschaftliche Qualität der Dissertation von Dr.-Ing. Maik Koch wurde von der Anton- und Klara Röser-Stiftung mit einem Preis ausgezeichnet. Seine Veröffentlichung beim ISH 2007 „Reliability and Improvements of Water Titration by the Karl Fischer Technique“ wurde mit dem ETG-Literaturpreis ausgezeichnet. Maximilian Heindl wurde für seine Diplomarbeit „Empfindlichkeitsuntersuchung zur UHF-Teil-

entladungsmessung“ von der SAG und dem VDE der SAG-Award für beste Arbeiten der Fachrichtung Elektrotechnik verliehen. In diesem Jahr waren wir unter anderem an den Abschlussberichten dreier CIGRE-Arbeitsgruppen beteiligt (Frequency Response Analysis, Recommendations for Condition Monitoring, Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems). Die Veröffentlichungen liegen auch auf unserer Homepage [www.ieh.uni-stuttgart.de](http://www.ieh.uni-stuttgart.de) zum Download bereit. Das nächste Jahr wird wieder ein Internationales Symposium Hochspannungstechnik bringen, das diesmal in Kapstadt, Südafrika, durchgeführt wird. Wir haben dazu mehrere Beiträge anmelden können.

Im Frühjahr haben wir zusammen mit verschiedenen Herstellern wieder das Stuttgarter Hochspannungssymposium zum Thema „Modernes Design und zuverlässiger Betrieb von Komponenten des elektrischen Netzes“ in der Filderhalle in Leinfelden durchgeführt. Hervorragende Referenten und der traditionell gute Ruf dieser im zweijährigen Turnus stattfindenden Veranstaltung führten 250 Teilnehmer hauptsächlich aus den Bereichen Energieversorger und Hersteller nach Stuttgart. Es ist damit die größte Fachtagung zur Hochspannungstechnik in Deutschland. An zwei Tagen wurden die neuesten Entwicklungen vorgestellt und lebhaft diskutiert. Auf Grund der zahlreichen Nachfragen werden wir das Stuttgarter Hochspannungssymposium am 09. und 10. März 2010 wieder im gleichen Rahmen durchführen.

Vom 02. bis 05.03.2009 werden wir in Zusammenarbeit mit dem VDE zwei Seminare zum Thema „Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren“ anbieten. Hierbei werden sowohl klassische als auch moderne Diagnoseverfahren vorgestellt. Anhand von praktischen Versuchen erlernen die Teilnehmer in diesem Seminar die Handhabung und Interpretation verschiedener Diagnosetechniken. Informationen zu dieser Veranstaltung können Sie 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. Dazu möchte ich besonders auf das Kapitel Diplomarbeiten dieses Jahresberichtes hinweisen, in dem wir zu Ihrer Information auch Kurzfassungen der durchgeführten Arbeiten anführen.

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

Stuttgart, im Dezember 2008

Prof. Stefan Tenbohlen

## PREFACE

Dear Friends!

The usage of renewable energies and processes for higher energy efficiency will be leading technologies of the future. The demand of qualified engineers in this area will remain high. Therefore I am glad to announce that after nearly two years of planning the new Bachelor of Science in Renewable Energies will start in winter term 2009/2010. The study course was developed to prepare students in an optimal way for the various fields of activities in this growing industry. The potential of research and development in our region and at our university is unique concerning the concentration and variety. It offers ideal scientific conditions for the new study course.

The technological diversity for the use of renewable energy is reflected in the interdisciplinary curriculum of the study course. Altogether, 21 institutes from seven faculties are involved.

The course consists of a basic and an elective emphasizing part. During this part the students can choose between three electives:

1. Electrical Energy Systems: Photovoltaics, Wind Energy and additional subjects
2. Thermal Energy Systems: Biomass, Solar Heat and additional subjects
3. Kinetic Energy Systems: Wind Energy, Hydro Power and additional subjects

The interdisciplinary combination of basic fields of study from mechanical engineering, electrical engineering and computer science as well as aeronautical engineering opens the door to numerous fields of competence. You can find more information about Germany's first Bachelor of Science in renewable energies under [www.ee.uni-stuttgart.de](http://www.ee.uni-stuttgart.de).

During summer term 2008 Dr.-Ing. Markus Pöller from DigSILENT GmbH started very successfully with his lecture "Integration of Wind Energy into the Power System". We would like to thank Markus Pöller for presenting his practical experiences to our students and we wish him furthermore success and pleasure for the work at University.

Concerning our scientific work we once again look back on a very successful year. The dissertation of Maik Koch and about 40 publications document the large variety of our research activities. For the outstanding scientific quality of his dissertation Dr.-Ing. Maik Koch received a prize from the Anton- und Klara Roeser-Donation. His publication at the ISH 2007 „Reliability and Improvements of Water Titration by the Karl Fischer Technique“ was rewarded with the Best-Paper-Award of the German Power Engineering Society (ETG). For his diploma thesis, Maximilian Heindl was honoured with a SAG-Award for best papers in the field of Electrical Power Engineering by SAG and VDE.

In 2008 we contributed to the final reports of three CIGRE-working groups (Frequency Response Analysis, Recommendations for Condition Monitoring, Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems). You can download the publications from our homepage [www.ieh.uni-stuttgart.de](http://www.ieh.uni-stuttgart.de). Next year the 16th International Symposium of High Voltage Engineering will take place in Cape Town, South Africa. We submitted several abstracts.

In March 2008 we once again organised the Stuttgart High Voltage Symposium in the Filderhalle of Leinfelden supported by several manufacturers. This years' lectures concentrated on "Modern design and reliable operation of components for the electrical power system". Outstanding speakers and the excellent reputation of this event, taking place every second year, lead 250 participants from utilities and manufacturers to Stuttgart. Thus it is the leading symposium about High Voltage Technology in Germany. For two days, the newest developments were presented and discussed. Due to numerous demands we will once again organise the Stuttgart High Voltage Symposium on March 9 and 10 in 2010 in the same context.

In cooperation with the VDE we will conduct from March 2 to 5, 2009, two hands-on seminars, which will present classic and modern diagnostic procedures for power transformers. In the laboratory the participants will learn to use and interpret different diagnostic methods. Please find more information about this seminar under [www.vde.com/seminare](http://www.vde.com/seminare).

Finally 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 express our gratitude to the Deutsche Forschungsgemeinschaft and to all those who supported us with their research contracts and donations. We hope that our annual report will strengthen existing collaborations and help to establish new contacts. For this purpose I would like to refer to the chapter "diploma theses", where you may find interesting abstracts of our students' work.

For the next year I wish you health, happiness and all the best, also in the name of Professor Feser and all co-workers of the institute.

Stuttgart, December 2008

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 / Head of Institute:	Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN	-685-67871
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER	-685-67875
Honorarprofessoren und Lehrbeauftragte:	Prof. Dr.-Ing. Heinz BRÜDERLIN (entpflichtet) <i>Ehemaliger Vorsitzender des Vorstandes der Technischen Werke Stuttgart AG</i>	
	Prof. Dr.-Ing. Peter F. HEIDINGER (entpflichtet) <i>Ehemaliger Vorsitzender des Vorstandes der Energie-Versorgung Schwaben AG</i>	
	Prof. Dr.-Ing. Ernst HAGENMEYER (entpflichtet) <i>Ehemaliges Mitglied des Vorstandes der Energie-Versorgung Schwaben AG</i>	
	Dipl.-Ing. Ulrich SCHERER <i>EnBW Transportnetze AG</i>	-128-2437
	Dipl.-Ing. Thomas Rudolph <i>AREVA Energietechnik GmbH</i>	
	Dr.-Ing. Markus Pöller <i>DlgSILENT GmbH</i>	
Oberingenieure:	Dr.-Ing. Wolfgang KÖHLER <i>(Leiter des Hochspannungslabors Nellingen-Zinsholz)</i>	-341 2075
	Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI	-685-67878

## Akademische Mitarbeiter /

Scientific Staff:	M. Sc. Jaquelyn ARAGÓN PATIL	-685-69196
	Dipl.-Ing. Simon BUROW (ab 1.11.2008)	685-69193
	Dipl.-Ing. Sebastian COENEN	-685-67869
	M. Sc. Denis DENISSOV	-341 2075
	Dipl.-Ing. Markus FISCHER	-685-69197
	Dipl.-Ing. Maximilian HEINDL	-685-67857
	Dipl.-Ing. Stefan HOEK (bis 30.4.2008)	
	Dipl.-Ing. Jens HOHLOCH (ab 1.8.2008)	-341 2075
	Dipl.-Ing. Mark JOVALEKIC (ab 24.11.2008)	-685-67858
	Dipl.-Ing. Peter MÜLLER	-341 2075
	Dipl.-Ing. Anne PFEFFER (ab 7.1.2008)	-341 2075
	Dipl.-Ing. Heinz REBHOLZ	-685-69194
	Dipl.-Ing. Thomas SCHMID (ab 14.1.2008)	-685-67867
	Dipl.-Ing. Franz STREIBL	-685-67889
	M. Sc. Rummiya VILAITHONG (bis 30.6.2008)	
	Dipl.-Ing. Andreas WEINLÄDER	-685-67838
	Dipl.-Ing. Dejan VUKOVIC	-685-69195
	Dipl.-Ing. Michael ZERRER (bis 30.11.2008)	

## Sekretariat /

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

## Technische Angestellte /

Technical Staff:	Erwin BECK, <i>Zentralwerkstattleiter</i>	-685-67847
	Marija BERGLEZ, <i>Raumpflegerin</i>	-341 2075
	Metin DEMIRHAN, <i>Mechaniker</i>	-685-67847
	Robert HÄBICH, <i>Auszubildender</i>	-685-67847
	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>	-685-67863
	Karl SOBING, <i>Elektromeister</i>	-341 2075

## Gastwissenschaftler /

Visiting scientists:	M.Sc. Hector David Gomez Montoya, San Juan/Argentinien (8.5.2008 bis 25.10.2008)	
	Dr.-Ing. Ebrahim RAHIMPOUR, Iran Georg-Forster-Stipendiat (AvH) bis 30.9.2008	
	M.Sc. Su Su WIN, Birma DAAD-Stipendiatin ab 1.10.2008	

## **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*
- *Energiewandlung in Kraftwerken*
- *Aufbau von Übertragungs- und Verteilnetzen*
- *Betriebsverhalten elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme und Kurzschlussstrombegrenzung*
- *Überspannungen und Isolationskoordination*
- *Sicherheitsfragen*

#### **PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN**

##### ***Hochspannungstechnik I***

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

- *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*
- *Lastflußberechnung*
- *Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme bei symmetrischem Kurzschluss*
- *Symmetrische Komponenten*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*

**PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN****DR.-ING. U. SCHÄRLI*****Elektrische Energienetze II***

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*

**Dr.-Ing. M. PÖLLER*****Netzintegration von Windenergie***

Sommersemester, 2 V, für 8. Semester

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

## 3.2. PRAKTIKA

**DR.-ING. U. SCHÄRLI**

### ***Grundlagenpraktikum in Elektrotechnik***

Dieses Praktikum ist Pflicht für Studierende der Elektrotechnik und Informationstechnik. Im Zuge der Umstellung von Diplom auf Bachelor im Wintersemester 2008/2009 wurden vier grundlegende Versuche neu ausgearbeitet, die von den Bachelor-Studierenden des 1. Semesters zu absolvieren sind. Auch Studierende der Informatik mit Nebenfach Elektrotechnik nehmen teil. Das Grundlagenpraktikum wird im 3. Semester fortgesetzt. Herr Dr. Schärli hat im Auftrag der Fakultät die Gesamtverantwortung des Grundlagenpraktikums inne.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

- *Sicherheitsseminar*
- *Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie*
- *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 für Studierende nach dem Grundstudium in der Regel 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

Alternativ besteht die Möglichkeit, in einer Gruppe von max. 4 Studierenden eine Projektarbeit durchzuführen. Dabei wird typischerweise ein funktionsfähiges hochspannungstechnisches Gerät aufgebaut, das z. B. für Demonstrationsversuche verwendet werden kann (etwa ein Teslitransformator oder Stoßgenerator).

### 3.3. EXKURSIONEN

13. – 16. Mai 2008: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei
- ABB, Hanau: Gasisolierte Schaltanlagen
  - AREVA, Mönchengladbach: Leistungstransformatoren
  - HSP, Troisdorf: Hochspannungsdurchführungen
  - RWE, Grevenbroich: Braunkohlekraftwerk Grevenbroich-Neurath
  - DLR, Köln: Solartechnik



*Exkursionsteilnehmer bei der AREVA in Mönchengladbach*

27. Mai 2008, ganztägig

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

24. Juni 2008, ganztägig

Besuch des Kraftwerks Altbach/Deizisau mit Rundgang; Besichtigung der 380- und 110-kV-GIS-Schaltanlage und Erläuterung der Besonderheiten; zum Vergleich auch Besichtigung der 220-kV-Freiluftschaltanlage Hoheneck

### 3.4. STUDENTISCHE ARBEITEN

#### Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten vom 1.11.2007 bis 31.10.2008:

*Adib, Mounir*

##### **Aufbau einer dreiphasigen Motorsteuerung**

Die Zahl an elektrischen Betriebsmitteln in Kraftfahrzeugen nimmt ständig zu. Besonders im Bereich der neuen Antriebe werden dreiphasige Systeme eingesetzt. In der Diplomarbeit wird mit Hilfe einer Mikrocontrollerschaltung eine Steuerung für dreiphasige Motoren entwickelt. Das Verfahren zur Bestimmung der dreiphasigen Sollwertspannungen wird als Raumzeigermodulation bezeichnet. Die Raumzeigermodulation beruht auf der mathematischen Zerlegung der Sollspannung in einzelne Raumzeiger und lässt sich mit Software in einem Mikrocontroller realisieren.

##### **Three-phase motor control circuit**

The amount of electrical drives is still continuously increasing within automotive applications. Especially within the new electrical drive systems, three-phase motors are in use. In this work, a control unit for an electronic three-phase motor was developed. The control unit is based on a microcontroller circuit for stand-alone applications.

*Burow, Simon*

##### **EMV-Schaltungssimulation für automotive Anwendungen**

In dieser Diplomarbeit werden Möglichkeiten gesucht, um einfache und trotzdem hinreichend genaue Simulationen von leitungsgebundenen Störimpulsen zu erstellen. Dazu werden an elementaren Filtern verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Die Störimpulse werden von gepulsten Leistungsreglern, wie sie in Kraftfahrzeugen häufig zum Einsatz kommen, verursacht und im Bereich von bis zu 110 MHz betrachtet. Zur Verifikation der Simulationen werden sechs Filter erstellt und an Versuchsaufbauten aus Tiefsetzsteller, Bordnetznachbildung und den Filtern die Störspannungen gemessen. Abschließend wird der komplette Versuchsaufbau in LTSpice simuliert. Durch Variation einzelner Simulationseigenschaften der Filter konnten qualitative Einschätzungen des Einflusses einzelner Anordnungen getroffen werden.

##### **EMC layout simulations for automotive applications**

For simple printed circuit boards, a simulation can predict conducted emissions before the system is physically built up. Especially the filter development process can be speed up by a simulation. Six different filter elements are investigated in respect to the filter attenuation for frequencies up to 110 MHz. A buck converter with 500 kHz switching frequency is used as noise source. The filter elements are measured with an impedance analyzer. The gained impedance values are translated into adequate SPICE models. By diversifying individual parameters, qualitative results were found to rate the influence of individual parts of the layout.

*Che, Lin*

### **Einfluss von Leiterunsymmetrien auf die Common-Mode-Generierung**

Um die Einflüsse von Leiterasymmetrien auf die Common-Mode-Generierung abschätzen zu können, wurden asymmetrische Stanzgitter mit vielen verschiedenen Variablen, z.B. Verschiebung der Anregung, zusätzlicher Fläche und Gehäuse mit unterschiedlicher Höhe, in der Arbeit simuliert. Die Simulation erfolgt mit der Simulationssoftware FEKO. FEKO ist eine Software für die Analyse von Problemen im Bereich EMV, Antennen Design usw. Alle Simulationen wurden in einem Frequenzbereich bis 200 MHz durchgeführt. In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss einfacher Filtermaßnahmen im Hinblick auf die Common-Mode –Generierung bzw. -Unterdrückung untersucht. Die Simulationsergebnisse wurden miteinander verglichen und bewertet.

### **Influence of track asymmetries to the common-mode generation**

To find the influence of conductors asymmetry on the common-mode generation, an asymmetrical frame is simulated with different variables. Parameters are a geometrical shift of the voltage source, additional floating conductors, different height of the metal flat under the lead frame etc. The simulations are carried out with the simulation-software FEKO. FEKO is a software suite for the analysis of a wide range of electromagnetic problems. All of the simulations were done up to the desired frequency of 200 MHz. The results are compared and evaluated with each other.

*Dais, Ansgar*

### **Studie zur Dämpfung von schnellen transienten Überspannungen (VFT) größer 600 kV in gasisolierten Schaltanlagen**

In der vorliegende Studie wird die Möglichkeit der Dämpfung von sehr schnellen Überspannungen in gasisolierten Schaltanlagen mit Ferritringen untersucht. Dabei werden im Nennbetrieb der GIS auftretende Spannungen (über 600 kV) und Ströme (4 kA) verwendet. Im ersten Schritt wird der Einfluss hoher Ströme auf das Dämpfungsverhalten betrachtet. Die Studie zeigt, dass die Dämpfungseigenschaften mit steigendem Strom abnehmen. Ein gesättigter Ferrit weist noch eine sehr geringe Dämpfung auf. Im zweiten Schritt wird der Einfluss hoher Spannungen studiert. Auch hier nimmt die Dämpfung mit zunehmender Spannung ab. Die Dämpfung nimmt proportional mit der Anzahl der Ferritringe zu. Des Weiteren steigt die Dämpfung, je höher die Frequenzanteile der VFTs sind.

### **Study for the absorption of very fast transient overvoltages over 600 kV in gas-insulated switchgears**

This paper deals with the possibility of suppressing very fast transients (VFT) in gas insulated substations (GIS) using ferrite rings. In test carried out to that end a rating voltage of more than 600 kV and a rating current of 4 kA are used. At the first stage the effect of high currents on damping VFTs is examined. The tests show the higher the currents are the more the damping effects are reduced. Saturated ferrite has only a slight damping effect. At a second stage the influence of high voltage on damping is tested. Again the result is that the damping effects decrease if the voltage

increases. The damping effects accumulate in proportion to the number of ferrite rings. Moreover higher frequency units of the VFTs cause stronger damping effects.

*Fischer, Markus M.*

### **Erarbeitung eines Verfahrens zur Dimensionierung von Biomasseheizkraftwerken in Abhängigkeit von der Wärmelastkurve**

Im Rahmen eines Projektes zur Konzipierung neuer Biomasseheizkraftwerke wurde in der vorliegenden Diplomarbeit ein Verfahren zur Dimensionierung eines Biomasseheizkraftwerkes in Abhängigkeit von der Wärmelastkurve, der verfügbaren Biomasse und einem vorgegebenen jährlichen Gesamtwirkungsgrad erarbeitet. Hierzu wurde ein thermodynamisches Modell einer Kraft-Wärmekopplungsanlage mit der Simulationssoftware DYMOLA erstellt und ein Interface in Excel entwickelt, das die Benutzung des Modells durch nichtspezialisierte Anwender ermöglicht.

### **Development of a method for the dimensioning of biomass combined heat and power plants in relation to the heat load curve**

In the context of design of new biomass combined heat and biomass power plants a method for the dimensioning of biomass combined heat and power plants in relation to the heat load curve, the available biomass and a given yearly efficiency were developed in this diploma thesis. For this purpose, a thermodynamic model of a combined heat and power plant was developed with the modeling software DYMOLA complete with an excel interface that permits unspecialized users to employ this model.

*Graner, Joachim*

### **Störaussendung elektrischer Komponenten im Fahrzeug im Vergleich zur Komponentenmessung**

In der Diplomarbeit wird die Störaussendung elektrischer Komponenten im Fahrzeug im Vergleich zur Komponentenmessung untersucht und bewertet. Dabei wurden verschiedene Komponenten hinsichtlich ihrer Störspannungen und Störströme auf den Einfluss eines angeschlossenen Kabelbaumes hin untersucht. Dazu wurden ausgewählte Komponenten sowohl auf dem Tisch nach der CISPR25-Norm als auch im eingebauten Zustand in Verbindung mit einem realen Fahrzeugkabelbaum in einem Laborfahrzeug gemessen und miteinander verglichen. Die Arbeit untersucht die Zusammenhänge von leitungsgebundenen Störungen der verschiedenen Messaufbauten untereinander und die Vorhersagbarkeit der leitungsgebundenen Störungen in einem realen Fahrzeug mit Hilfe der kostengünstigeren Tischmessungen sowie der Messungen im Laborfahrzeug.

### **Emission of electronic devices within a vehicle compared to the component measurements**

EMC tests for automotive devices are normally carried out in respect to the CISPR25 regulatory standard. Conducted emissions are decoupled with stabilisation networks on a grounded measurement table. Within the car surrounding, connected to the cable harness, there might be different conducted emission levels, compared to the general component test method. Different devices are tested to conducted emissions

and the values are compared to vehicle measurements. For this purpose, an artificial car body as framework was built up with a complete car harness. Finally, the emission are compared within a real car and compared to the artificial framework model.

*Hamid, Habibullah*

### **Simulation der UHF-Wellenausbreitung in Kabelendverschüssen zur Optimierung der Teilentladungserfassung**

Teilentladungsdiagnose (TE) im ultrahochfrequenten (UHF) Band hat sich seit einigen Jahren für die Zustandserfassung an Hochspannungsanlagen vor Ort im Betrieb als gut geeignet erwiesen. Im Bezug auf Hochspannungskabelendverschlüsse verwendet man dabei speziell entwickelte kapazitive bzw. induktive Feldkoppler (Antennen), die nahe am Kabelstecker angebracht und gleichzeitig effektiv gegen äußere Störungen abgeschirmt sind. Die verschiedenen Antennengeometrien (Rechteck-, Bowtie-, Diamantenform-, kreisförmige Monopolsensoren und Archimedischer Dipol) wurden simuliert und anschließend angefertigt. Die Mehrzahl an Parameterstudien wurde durchgeführt, um eine optimale Größe und Position des kapazitiven Sensors zu finden. Die neu entwickelten Sensoren haben deutlich bessere Eigenschaften wie Gewinn, Richtcharakteristik, Bandbreite, niedriger Reflexionsfaktor und Rauschpegel.

### **Simulation of the UHF wave propagation inside cable terminations for optimal partial discharge detection**

The Partial Discharge diagnostics in the ultra high frequency band has recently become the most suitable approach for the on-site on-line condition assessment of the HV apparatus. In the case of cable terminations, the capacitive or inductive transient field couplers (antenna) are mounted close to the test object and shielded effectively against outside noise. Various antenna geometries (rectangular, bow-tie, diamond, the Archimedean spiral and circle monopole) were simulated and built. Numerous parameter studies to find optimal size and position of the capacitive sensor were conducted. Newly developed sensors have better characteristics, such as higher gain, frequency band, directional characteristic together with lower reflection factor and noise level.

*Han, Yibing*

### **Verfahren zur schnellen Berechnung der Abstrahlung einfacher Leiteranordnungen**

In dieser Arbeit wird das Abstrahlungsverhalten von Kabelbäumen untersucht. Die Leiter werden mit FEKO simuliert und danach ein geeignetes Modell mit Hilfe des Vektor-Fitting Verfahrens erstellt. Zur Bewertung der Abstrahlung dient ein einfacher Monopol der vor dem Kabelbaum aufgebaut wird. Der Monopol kann einfach mit in die Simulation integriert werden. Ist die Transferfunktion vom Monopol zu den EMV-Antennen (bikonische Antenne, Log-Per Antenne) bekannt, kann die Abstrahlung der Modellanordnung auf die reale Messumgebung extrapoliert werden.

### **Fast emission calculation of simple cable harnesses**

This work focuses on the radiation behavior of arbitrary harness configurations. The radiation of the cable harnesses is modeled with the help of the software FEKO. To rate the occurring radiation of the harness, a simple monopole is placed in front of the harness. The monopole can be easily added into the simulation process. With the help of the measured transfer function to the EMC- antennas, the radiation of the harness can be easily calculated.

*Heindl, Maximilian*

### **Empfindlichkeitsuntersuchung zur UHF-Teilentladungsmessung**

Die Arbeit untersucht die Detektion von Teilentladungen mit Hilfe der UHF-Methode in Leistungstransformatoren. Bisher fehlen allgemeingültige Zusammenhänge zwischen Intensität einer TE und den gemessenen UHF-Signalen. Aus der simultanen Messung von TE nach der IEC 60270 und mit der UHF-Methode wurde versucht, Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der physikalischen Größe der scheinbaren Ladungsmenge und verschiedenen Parametern der gemessenen UHF-Signale zu gewinnen. Dabei stellte sich heraus, dass UHF-Wellen abhängig von ihrem Ausbreitungsweg großen Dämpfungen unterworfen sind. Zwischen dem scheinbaren Entladungspegel einer TE und dem betragsmäßigen Maximalwert der gemessenen UHF-Zeitsignale konnte eine positiv korrelierende Beziehung festgestellt werden. Eine Überprüfung des bei gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bekannten Sensitivity Checks ergab, dass dieser keine Kalibrierung der Messmethode erlaubt, sondern lediglich (Worst-Case-)Abschätzungen zulässt.

### **Sensitivity verification of UHF partial discharge measurements**

This thesis investigates the detection of partial discharge events (PD) on power transformers using the UHF technique. So far, there is a lack of universally valid relations between PD intensity and measured UHF signals. Performing IEC 60270 compliant and UHF PD measurements simultaneously has been an approach to implicate the physical value of apparent charge with calculated parameters of the measured UHF signals. As it turned out, UHF waves are subject to be seriously attenuated depending on their propagation path. For a certain propagation path, positive correlation between the apparent charge and the amplitude of UHF PD signals could be established. An examination of the sensitivity check as applied on gas-insulated substations revealed that no reliable calibration can be done, but a worst case estimation.

*Hong, Han*

### **Untersuchung des ESD-Degradationsverhaltens passiver Bauelemente**

Die Beeinflussung elektrischer Bauteile durch elektrostatische Entladungen (ESD) gewinnt aufgrund der steigenden Integrationsdichte und der sinkenden Abmessungen der integrierten Bauteile immer mehr an Bedeutung. Die integrierten Bauteile sind selbst für geringe Entladungsenergien anfällig, die zu Beschädigungen und zum Ausfall des Bauteils führen können. Speziell in sicherheitskritischen Bereichen wie

der Luftfahrt und dem Automobilbau muss jedes Bauteil der Baugruppen in allen Fällen zuverlässig funktionieren. Die Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Effekte von elektrostatischen Entladungen auf diskrete Bauelemente. Ziel ist es, den Einfluss der ESD auf die diskreten Bauelemente durch realistische Modelle vorher sagen zu können.

#### **Analysis of the ESD-Derating behaviour of passive lumped elements**

The influence of electrostatic discharge (ESD) becomes important because of increasing integration levels and smaller dimensions of the integrated components. They are vulnerable even for minor discharge energies. The discharges energies may even cause damage or a breakthrough of the component. Especially in high reliability areas like avionics or automotives there is a need for reliable components in all electronic devices involved. This work considers discrete components during electrostatic discharge. The goal is to analyse the effect of electrostatic discharges on the discrete component's small signal parameters in order to provide a basis for prediction models.

*Hu, Xia*

#### **UHF-TE-Messungen an Kabelendverschlüssen im Frequenzbereich**

Viele Fehler in Kabelsystemen werden durch Kabelgarnituren verursacht. In dieser Arbeit werden die praktischen Erfahrungen bei UHF-TE-Messungen an Hochspannungskabelendverschlüssen im Frequenzbereich diskutiert. Um die TE-Aktivitäten im Frequenzbereich unter Vor-Ort-Bedingungen und im Betrieb sicher zu erkennen, wird die UHF-TE-Diagnostik eingesetzt. Mit Spektrumanalysator wird die Detektion von Teilentladungen an Kabeln im Frequenzbereich untersucht. Hier wird die Teilentladung durch vier Defekte des Kabelendverschlusses verursacht. Ein messtechnischer Vergleich zwischen schmal- und breitbandigen Messungen hinsichtlich der Sensitivität und Störanfälligkeit wurde auch in dieser Arbeit durchgeführt. Außerdem verglichen wir die Energiegewinne der verschiedenen UHF-Sensoren mit Oszilloskopen.

#### **UHF PD measurements on cable terminations in frequency domain**

Many errors in cable systems are caused by cable terminations. In this work the practical experiences with UHF-PD-measurements of high-voltage cable terminations in the frequency domain are discussed. In order to surely find the PD-signal in the frequency domain the UHF-PD-diagnostics was used. With the spectrum analyzer can die detection of PD on cable terminations in frequency domain intersect. Here is the partial discharge caused by four defects of the cable. The comparison between narrow- and wide-band measurements regarding the sensitivity and susceptibility to interference is was done in this work. Furthermore, we compare the energy gains of the various UHF sensors with oscilloscope.

*Kurz, Philipp*

### **Erstellung von Modellen für dynamische Untersuchungen von verteilten Energieerzeugern und –speichern**

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Implementierung von Modellen für Batteriespeicher- sowie Photovoltaikanlagen in einer Netzberechnungssoftware. Die Modelle sollen künftig für Stabilitätsuntersuchungen von Energienetzen im Zeitbereich von bis zu einigen Minuten verwendet werden. Zunächst wurden in der Literatur einige Modelle, welche die physikalischen Eigenschaften von Solarzellen und Batterien beschreiben sollen, ausgewählt. Diese wurden auf ihre praktische Anwendbarkeit hin überprüft. Dabei wurde insbesondere auch auf gute Parametrierbarkeit durch leicht beschaffbare technische Daten geachtet. Anschließend wurde je ein Modell mittels geeigneter regelungstechnischer Blöcke in der Simulationssprache der Netzberechnungssoftware implementiert. Abschließend beleuchtet diese Arbeit einen praktischen Anwendungsfall einer NiCd-Batteriespeicheranlage in einem Inselnetz. Dabei wird zunächst eine grundsätzliche Vorgehensweise zur Dimensionierung der Batterie angegeben sowie anschließend die Möglichkeiten und Grenzen des Modells aufgezeigt.

### **Development of Models of Distributed Generation and Energy Storage Devices for Dynamic Simulation**

The following diploma thesis presents the development of models for battery energy storage systems as well as photovoltaic generators in an integrated power system analysis tool. The models are intended to be used for dynamic simulations in a period up to several minutes. Firstly, several models, which describe the physical characteristics of solar cells and batteries, have been chosen and checked for convenient use. This includes, that the parameters which are needed, have to be accessible easily, for example in technical data sheets of the manufacturer. Subsequently one model has been implemented respectively in the simulation language of the power system analysis tool using block diagrams of control theory. This thesis concludes with a realistic application of a NiCd battery energy storage system in an island network. A method of dimensioning the battery is shown as well as possibilities and limitations of the model.

*Leng, Tobias*

### **Einfluss der Kabelbaumtopologie auf die Einfügedämpfung von EMV-Filtern in Kfz-Steuergeräten**

Die Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Frage, welchen Einfluss die Topologie des Kabelbaumes im Kraftfahrzeug auf die Einfügedämpfung eines EMV-Filters einer daran angeschlossenen Komponente hat. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden EMV-Messungen der Störspannungen und Störströme an Musterkabelbäumen durchgeführt. Für einen Teil der Messungen wurde die Nachbildung einer Fahrzeugkarosserie aus Aluminiumprofilen aufgebaut, um die Kabel entsprechend der Realität zu verlegen. Außerdem wurden im Rahmen von Simulationen unterschiedliche Kabel und Filtertopologien verglichen, um die wichtigsten Faktoren, die den Kabeleinfluss bestimmen, festzustellen. Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass durch

Resonanzeffekte des Kabelbaums in bestimmten Frequenzpunkten eine deutliche Verstärkung der Störung möglich ist.

#### **Influence of connected harness structures to the insertion loss of EMI filters**

The available work concerns with the question, which influence the cable harness topology in a motor vehicle can have on the insertion loss of an EMC filter, used in a component attached to it. For the analysis of this influence measurements of the interference voltages and currents were carried out with sample cable harnesses. For some of the measurements the model of a car framework, made of aluminum profiles, was constructed, to pass the cables similar to the reality. In addition different cables and filter topologies were compared using simulation methods to discover the most important factors who determine the cable influence. The accomplished investigations yield the result that, due to resonance effects, the cable harness could possible cause an amplification of the radio disturbance in certain frequency ranges.

*Li, Xue*

#### **Einfluss der Komponentenimpedanz auf Emissionsmessungen nach CISPR 25**

In dieser Arbeit werden die Einflüsse unterschiedlicher Eingangsimpedanzen von Fahrzeugkomponenten untersucht. Dazu werden mit Hilfe einer Komponentennachbildung verschiedene Abschlussimpedanzen realisiert und die Auswirkungen auf Antennen-, Stromzangen- und Netzwerknachbildungsmessungen nach CISPR 25 untersucht. Bei der Messung von ohmschen Bauelementen werden hierfür verschiedene Widerstände eingelötet und damit eine Komponentenimpedanz von 50  $\Omega$ , 270  $\Omega$ , 1 k $\Omega$  und 12 k $\Omega$  simuliert. Die Messergebnisse zeigen, dass sowohl die Antennenmessung als auch die Stromzangenmessung eine Korrelation mit der Netzwerknachbildungsmessung der Spannungsversorgung aufweisen und auch ein aussagekräftiger Einfluss auf Korrelationsfaktoren vorliegt. Bei induktiven oder kapazitiven Abschlüssen kann eine solche Korrelation nicht festgestellt werden.

#### **Influence of the DUT's impedance on emission measurements according to CISPR 25**

This work deals with the influence of different impedances to the measurements in the EMC – Laboratory according to CISPR 25. With the help of an emulation of a vehicle's component, different terminating impedances are realised. The effect of the alteration of these impedances are figured out through measurements with the antenna the current probe and the artificial network. To do the measurements, different resistors are soldered into the component emulation. On that way, impedances of 50  $\Omega$ , 270  $\Omega$ , 1 k $\Omega$  and 12 k $\Omega$  are simulated. The results show, that the measurements with the antenna as well as those with the current probe, correlate with the measurements of the artificial network. In this case, the variation of the impedance is clearly to see. Measurements with inductive or capacitive impedances don't show such a behaviour.

*Liao, Jianfeng*

### **Modellierung mehradriger Kabelbäume in LTSpice und FEKO**

In der Arbeit wird das Abstrahlverhalten von verschiedenen Kabelbäumen untersucht. Zunächst werden die Kabelbäume im EMV-Labor auf einem leitfähigen Tisch aufgebaut und mit Hilfe des Netzwerkanalysators vermessen. Dabei wird zur Bewertung der Abstrahlung ein Monopol auf dem Tisch platziert. In einem zweiten Schritt werden aus den gewonnenen S-Parametern SPICE-Modelle erzeugt und anschließend auf ihre Genauigkeit überprüft. Schließlich wird eine Zweidrahtleitung mit Hilfe der Software FEKO modelliert. Die entsprechenden S-Parameter werden simuliert. Dabei wird der Zweidraht und ein Monopol sowohl auf der PEC-Fläche als auch auf einem leitfähigen Tisch modelliert. Anschließend werden die Einflüsse der Masseanbindung der Tischfläche und einer erweiterten Tischfläche nach CISPR25 untersucht.

### **Modelling of multiconductor transmission lines in SPICE and FEKO**

Radiated emissions of multiconductor transmission lines are examined. Therefore different cable harnesses will be built up in the EMC-laboratory. To rate the radiated emissions of the harness, a monopole antenna is used and the scattering parameters are measured with a vector network analyzer. The scattering parameters can be used to build up an electrical model for the circuit simulator SPICE. Then the accuracy of the model is analysed. Furthermore, two parallel transmission lines are modelled in the program FEKO and the scattering parameters are simulated. The lines and a monopole antenna are modelled above a perfect electric conducting plane as well as above a perfect electric conducting table. Finally the influence of the ground wires and the extended table area are examined.

*Mao, Bin*

### **Vierpol-Charakterisierung beliebiger Schaltungen in Spice**

Beliebige aktive Schaltungen können mit Hilfe des Theorems von Thevenin im Frequenzbereich beschrieben werden. In der Diplomarbeit soll eine Software entwickelt werden, die Schaltungen als Vierpol charakterisiert und mit weiteren Matrizen (Netznachbildung, Filter, Kabelbaum, usw.) verbindet. Als Ergebnis erhält man die an den Netznachbildungen auftretenden Störspannungen. Die Störspannung hängt neben dem verwendeten Filter auch von dem angeschlossenen Kabelbaum ab. Die Simulation erlaubt neben dem Austausch der Filterelemente auch die Untersuchung verschiedener Kabelkonfigurationen.

### **Four-port characterization of arbitrary circuits with Spice**

Arbitrary active circuits can be described with the help of Thevenin's theorem within the frequency domain. In this thesis, a software is developed to characterize circuits as four-port matrices and to connect them with additional matrices as stabilization networks, filter, and cable harnesses. The result calculates the noise voltages on both power lines. The occurring noise voltage depend also of the connected cable harness. Thus, the simulation considers also different harness models within the investigations to conducted emissions.

*Mateo Blankenhorn, Ingrid*

### **Empfindlichkeitssteigerung der FRA durch ein externes Netzwerk**

Die frühzeitige Erkennung von Wicklungsdeformationen mit Hilfe des Vergleichs von zeitlich auseinanderliegenden Transferfunktionen ist notwendig für die Vermeidung von Ausfällen. Eine radiale Deformation einer Windung macht sich hauptsächlich in einer Änderung der Koppel- und Erdkapazität bemerkbar. Bei Wicklungspaketen, deren Übertragungsfunktion keine charakteristischen Merkmale aufweist, muss eine Resonanzstelle mittels eines externen Netzwerkes in den betrachteten Frequenzbereich transformiert werden. Um eine Verschiebung dieser Resonanzstelle bei einer kleinen Kapazitätsänderung zu bewirken, muss eine große Induktivität eingesetzt werden. In dieser Diplomarbeit ist es an der untersuchten Wicklung nicht nur gelungen, minimale Veränderungen der Erdkapazitäten zu detektieren, sondern auch weitere Methoden wie die Analyse der Stromübertragungsfunktionen zu überprüfen.

### **Sensitivity Increase of FRA by an External Network**

Transformer diagnostic methods are being improved due to growing requirements for reliability. An early detection of winding deformations using the comparison of time differing transfer functions contributes to safer operation. Radial deformations cause changes in the capacitance between winding and core. On coils whose transfer functions don't have any characteristic resonances up to approx. 2 MHz, there is a need of placing a resonance peak in the examined frequency range by means of an external network. A large inductance provokes a shift of resonance peaks naturally located in higher frequencies. Not only minimal changes of the capacity between winding and core could be detected during this project with an external network, but other methods such as the analysis of the current transfer functions were tested.

*Peicheva, Svetlana*

### **Untersuchung der Möglichkeiten zur Störunterdrückung bei der UHF-TE-Diagnose und Entwurf eines digitalen Filters**

Bei Vor-Ort-Messungen im UHF-Band treten unterschiedliche Trägerfrequenzen von Mobilfunk, Digitalfernsehen und -Radio auf, die einen wesentlichen Rauschpegel im Messsignal verursachen. Teilentladungssignale, die sich noch im Anfangsstadium befinden, können daher im Rauschen unerkant bleiben. In dieser Arbeit wurde eine ausführliche Analyse der Möglichkeiten zur Störunterdrückung im UHF-Band durchgeführt. Um die verschiedenen Filteralgorithmen zu testen, entstand eine Software, die die ferngesteuerte Signalerfassung eines hoch auflösenden Oszilloskops erlaubt. Da zum einen ein Oszilloskop teuer und zum anderen für Vor-Ort-Untersuchungen ein relativ hoher Lern- und Ausbildungsaufwand der Montagetechniker nötig ist, wurde auch ein Hardwarekonzept für ein UHF-TE-Messsystem erstellt.

### **Study of possibilities for noise cancellation in the UHF-PD-diagnostics and design of a digital filter**

During the on-site measurement diverse carrier frequencies from mobile communication, digital TV and radio are occurring. They cause a high noise level in the measuring signal. As consequence, the noise can overlap small partial discharges. This

paper provides an analysis of the possibility of noise cancellation in the UHF-band. In order to test the diverse filter algorithms, software was written, which also allows a remote controlled signal acquisition from a high resolution oscilloscope. Given the fact that an oscilloscope is very cost-intensive for on-site measurement and requires advanced professional training of the assembly technician, a hardware concept for UHF-PD measurement system was developed as well.

*Pfeffer, Anne*

### **Analyse von Blitzstoßspannungen unter Berücksichtigung des k-Faktors**

Die Prüf- und Messtechnik ist ein sehr wichtiges Forschungsgebiet in der Hochspannungstechnik. Die Norm IEC 60060 beschäftigt sich mit der Hochspannungsprüftechnik, darunter auch mit der Auswertung von vollen und abgeschnittenen Blitzstossspannungen. Es wird ein neuer Entwurf aus verschiedenen Laboren der ganzen Welt für die IEC 60060 eingereicht. Dieser wird nun auf seine Tauglichkeit in der Praxis getestet, um mögliche Vor- und Nachteile auf die Auswertung der Blitzstossspannungen herauszufinden. In dieser Arbeit werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen wird eine Software mit Hilfe von Matlab entwickelt, die Blitzstoßspannungen nach dem neuen IEC 60060 Vorschlag auswertet. Zum anderen steht die Auswertung von vollen und abgeschnittenen Blitzstoßspannungen aus zwei verschiedenen Transformatorprüffeldern nach bisheriger Norm und neuem Normvorschlag im Vordergrund. Die Blitzstoßspannungen werden mit Hilfe der Software IAS der Firma Highvolt und dem IEH-Algorithmus ausgewertet und verglichen.

### **Analysis of Lightning Impulse Voltages using the k-Factor**

Measurement and test techniques are an important field of research. The standard IEC 60060 is dealing with high voltage test techniques, general specifications and test requirements, and therefore with the analysis of full and chopped lightning impulse voltages. It exists a new IEC 60060 draft developed in several high voltage laboratories around the world. Now it is interesting if the draft has an adverse or a beneficial effect on standard lightning impulse voltages in practice. In my diploma thesis I had two targets. First of all I developed a software (IEH algorithm) using Matlab to realise the IEC 60060 draft to analyse the lightning impulse voltages. Secondly, I analysed the full and chopped lightning impulse waveforms from several transformer test bays using the IEC 60060 standard and the IEC draft. The lightning impuls voltages are analysed using the IAS software from Highvolt Dresden and the IEH algorithm. Afterwards I compared the results of the IAS and IEH software.

*Röhler, Sebastian*

### **Aufbau eines HF-Feldstärkesensors für eine TEM-Zelle**

In dieser Arbeit wird ein HF-Feldstärkesensor für eine TEM-Zelle aufgebaut. Dieser Sensor verfügt über eine analoge Bandbreite von 350 MHz. Es können Signale im Zeitbereich direkt über einen HF-Ausgang mit einem Oszilloskop gemessen werden. Zusätzlich wird mit einem RMS-Detektor der Mittelwert der Feldstärke bestimmt und über eine optische Übertragungstrecke an einen Empfänger übermittelt. Der Emp-

fänger verfügt über ein LC-Display, das diese Werte anzeigt. Optional kann der Empfänger über die RS232-Schnittstelle mit einem PC verbunden werden, und die Feldstärkewerte können mit einem Terminalprogramm angezeigt werden. Das Gesamtsystem wird entworfen, kalibriert und getestet. Dabei wird auch auf allgemeine schaltungstechnische Grundlagen eingegangen. Die Software für die verwendeten Mikrocontroller wird vorgestellt und erläutert.

### **Design of a RF Field Probe for a TEM Cell**

In this work a RF field strength sensor for a TEM cell is developed. This sensor has an analogue bandwidth of 350 MHz. Due to a RF output jack it is also possible to measure the time domain field signal with an oscilloscope. In addition a RMS detector evaluates the RMS value of the field strength and transmits a corresponding DC signal via a digital fibre optic interface to a receiver unit. This receiver unit has a LC display where the measured values can be read. Via an optical RS232 interface it is also possible to send the measurement data to a PC and the field strength values can be monitored i.e. by a terminal program. The whole system has to be designed, calibrated and tested. Also the basics of the analogue RF circuit design and the developed microcontroller software will be explained.

*Saridis, Anastasios*

### **Bestimmung der Leitungsparameter von Eindrahtleitungen**

Für die Simulation komplexer Kabelbäume ist es notwendig, die Eigenschaften der einzelnen Adern genau zu kennen. Die dielektrischen Eigenschaften des Kabelmantels spielen für eine erfolgreiche Simulation eine erhebliche Rolle. Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung von Parametern der Eindrahtleitung anhand der Reflexionsparameter  $S_{11}$ . Dabei sollen insbesondere der Wellenwiderstand  $Z_L$  sowie die effektive Dielektrizität der Leitung bestimmt werden. Mit Hilfe der Software Maxwell SV wird ein Verfahren zur Ermittlung der Dielektrizitätskonstanten des Kabelmantels erarbeitet.

### **Calculation of transmission line parameters of single wires**

For the simulation of complex cable harnesses, every single wire within the bundle has to be characterized. Especially dielectric parameters are important for successful simulations. A software is developed concerning the evaluation of various parameters of a single-wire transmission line. The parameters are based on one scattering-parameter measurement for a single wire. Parameters of interest are the characteristic impedance as well as the dielectric behavior of the wire coating.

*Schmid, Thomas*

### **Ethernet-basierter Messadapter für Nah-Echtzeit-Messungen**

Ethernet ist bei modernen Embedded Devices Stand der Technik. Es verdrängt mehr und mehr historische Schnittstellen, wie beispielsweise RS232. Daher sollte als Basis für weiterführende Hardwarearbeiten am Institut eine ethernetfähige, auf einem Mikrocontroller basierende Schaltung entwickelt werden. Die Verwendung von gut erhältlichen Mikrochips war dabei eine Grundanforderung. Softwareseitig musste ein

betriebssystemartiger Framework entwickelt werden, der sowohl Multitasking als auch ereignisorientierte Programmierung unterstützt. Anhand einer Seriell-zu-Ethernet-Brücke wurde abschließend das Konzept validiert. Besonders hervorzuheben ist der standardkonforme TFTP-Bootloader, der Programmierschnittstellen und die zugehörige Spezialsoftware bei Firmwareupdates während der Entwicklungsphase und später überflüssig macht.

#### **Ethernet-based measuring adapter for close-realtime-measurements**

Ethernet is state of the art for modern embedded devices. It superseeds more and more legacy interfaces as e.g. RS232 and others. In order to establish a foundation for future hardware developments at the Intitute, an ethernet enabled microcontroller driven curcuitboard should be developed. The hardware was realized with easily available microchips. Beside the hardware, an eventdriven, multitasking operatingsystem like framework was implemented. Everything was rounded up by serial to ethenet bridge which demonstrated the function of the concept. A noteworthy highlight is definitely the standard compliant TFTP bootloader application, which removes the need for legacy programming interfaces and software for firmware updates during the development phase and later.

*Situ, Cuiwen*

#### **Untersuchung des Gasungsverhaltens von Pflanzenöl-Ester für Leistungs- transformatoren**

Die Arbeit befasst sich mit dem Gasungsverhalten einer natürlichen Esterflüssigkeit bei einer elektrischen Beanspruchung mit einer 50 Hz-Wechselspannung und bei einer rein thermischen Beanspruchung bei einem lokalen Heißpunkt. Es wird damit die Eignung von Pflanzenöl als Isoliermedium für Leistungstransformatoren untersucht. Die Untersuchungen bilden verschiedene Beanspruchungen der Isolierflüssigkeiten, die infolge von Fehlern in Leistungstransformatoren auftreten können, unter Laborbedingungen nach. Die aufgrund der Beanspruchung entstehenden gelösten Zersetzungsgase werden für Gas-in-Öl-Analysen aus den Isolierflüssigkeiten extrahiert, photoakustisch untersucht und die Ergebnisse anhand von Interpretationsverfahren beurteilt.

#### **Investigation of Gassing Behaviour of Natural Esters for Power Transformers**

The present diploma thesis reports on the gassing behaviour of insulating liquids caused by different kinds of electrical and thermal stresses. The applicability of a natural ester (vegetable oil) for insulating liquid in power transformers is investigated. Several electrical and thermal stresses were simulated under laboratory conditions to investigate the gassing characteristics of the insulation liquid. Gas-in-oil analyses were made and the amount and the concentrations of dissolved and free gases in mineral oil as transformer oil and in ester liquid are presented and discussed. The ratios of the concentrations of dissolved and free gases are interpreted by the different methods in order to prove the validity of these methods for natural ester liquid.

*Steil, Michael*

### **Optimierungsverfahren zur EMV-Filterberechnung für automotive Steuergeräte**

In dieser Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, welches der EMV-Filterberechnung für automotive-Steuergeräte dient. Das Verfahren basiert auf den Theoremen der Vierpoltheorie. Zunächst werden die mathematischen Zusammenhänge hergeleitet. Dabei wird analog zu der Reihenfolge der späteren Berechnungen vorgegangen. Anhand von Impedanz- und Admittanzmatrizen werden aktive und passive Schaltungskomponenten beschrieben und zusammengefügt. Zur Verifizierung der gefundenen Zusammenhänge werden verschiedene Modelle aufgebaut und untersucht. Dabei werden die Berechnungen mit Matlab und die Simulationen zur Bestätigung der berechneten Ergebnisse mit LTSpice durchgeführt. Nachdem die gesamte Schaltung im Frequenzbereich mathematisch beschrieben und aufgebaut ist, wird das Modell auf den Zeitbereich erweitert. Schließlich wird das Verhalten der Gesamtschaltung vorausberechnet und mit dem realen Verhalten verglichen.

### **Optimisation method for the EMC filter evaluation for automotive control units**

A method is developed to predict the attenuation of EMC filters, used within automotive control units, by evaluation. The method bases upon the theorem of two-port theory. First, the mathematical relations are derived. To verify these relations, different models are built and examined using Matlab and LTSpice. By using a Fast-Fourier-Transformation, the frequency domain analysis is extended to time domain analysis. Finally the validity of the entire model is proved by simulation. In the next step the model is expanded to be used with real measurement components. The parts that have been imported from a simulation are expressed by measured two-port parameters of real components. At least, the behaviour of the entire model is evaluated and compared to the real behaviour. The analysis closes with examinations to improve the precision of the evaluations.

*Wölk, Alexander*

### **Entwicklung und Optimierung von Breitbandantennen für UHF Teilentladungsmessungen**

Aufgrund der heutigen Wirtschaftslage sind die Energieversorger von einer zeitbasierten Wartung der elektrischen Betriebsmittel zu einer zustandsbasierten Wartung übergegangen. Im Rahmen von Online-Monitoring-Systemen für Leistungstransformatoren stellt die Analyse von Teilentladungen ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung des Betriebsmittelzustandes dar. Die aktuellste Methode ist die Messung der elektromagnetischen Wellen im UHF-Bereich (Ultra High Frequency). Die elektromagnetischen Wellen, die bei Teilentladungen entstehen, werden von der Antenne empfangen und an ein Oszilloskop oder an ein Online-Monitoring-System weitergeleitet. Die Schwerpunkte dieser Diplomarbeit liegen bei der Optimierung der ursprünglichen Kegelantenne, der Entwicklung einer Schutzschaltung zur Vermeidung kapazitiver Aufladung, der Untersuchung verschiedener Breitbandprinzipien und der Entwicklung von archimedischen Spiralantennen für Leistungstransformatoren.

### **Design and standardisation of antennas for ultrahigh (UHF) frequencies**

Due to today's economic situation energy providers changed over from time-based maintenance of high-voltage technical devices to condition-based maintenance. Within online monitoring systems of power transformers the analysis of partial discharges is an important criterion for the evaluation of the insulation's condition. One of the newest methods is the measurement of the electromagnetic waves in the UHF range (Ultra High Frequency). The electromagnetic waves which originate from partial discharges are received by the antenna and are passed on to an oscilloscope or an online monitoring system. The key aspects are optimisation of the original cone antenna, development of a protective circuit to avoid capacitive loading, investigation of different broadband principles and the development of Archimedean spiral antennas for power transformers.

*Xia, Siwei*

### **Softwareentwicklung für ein Online-Monitoring-System zur UHF-TE-Messung**

In der Energie- und Hochspannungstechnik sind Teilentladungen (TE) bei Transformatoren unerwünscht, da sie Isolierschichten beschädigen können. Die Messung von TE ist eine etablierte Prüfung zur Erkennung von Isolationsmängeln. Als sehr schnelle elektrische Vorgänge strahlen TE elektromagnetische Wellen mit Frequenzen ab, die bis in den ultrahohen Bereich (UHF: 300 – 3000 MHz) reichen. Diese elektromagnetischen Wellen sind nur mit Hilfe von aufwändigen Messsystemen zu erfassen. Ein neuer Ansatz ist die Verwendung von logarithmischen Verstärkern, auch Powerdetektoren genannt, die die hochfrequenten Signale mit relativ einfacher Hard- und Software handhabbar machen. In dieser Arbeit soll die Erfassung der Messdaten auf Basis einer Mikrocontroller-Schaltung weiterentwickelt werden. Die Messdaten sollen zeitlich zugeordnet und in Speichermedien aufgezeichnet werden. Die Analysen der abgespeicherten Messdaten werden mit einem Visualisierungsprogramm realisiert.

### **Software development of an Online-Monitoring system for UHF PD Measurements**

In energy technology and high-voltage engineering, partial discharges inside transformers are a frequent problem. The measuring of partial discharges (PD) is an established check to recognize isolation defects. Due to their very fast electric processes, PD are radiating electromagnetic waves in frequencies of an ultra-high range (UHF: 300 – 3000 MHz). Only by means of technically most demanding measuring systems it is possible to record data of these electromagnetic waves. There is a new approach by using power-detectors to make these high-frequency signals manageable via relatively simple hardware and software. The acquisition of measurement data based on a micro-controller is refined in this thesis. The measured data are assigned to time and recorded on a data storage unit. The analysis of the stored measurement data will be realized on a visualizing software.

*Xu, Qing*

### **Untersuchung der Störproblematik bei der UHF-TE-Diagnostik von Hochspannungskabelsteckern**

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Untersuchung der Störeinkopplung bei der UHF-TE-Diagnostik an Hochspannungskabelsteckern. Die UHF-TE-Messung ist eines der effektivsten Vor-Ort-Diagnoseverfahren von Hochspannungsgeräten. Trotzdem muss die Störeinkopplung besonders beachtet werden. Mit Hilfe eines Netzwerkanalysators werden die S-Parameter (Transmission) durch die UHF-Sensoren gemessen, um die Beeinflussung des Störsignals zu untersuchen. Außerdem wird die Abschirmung für die UHF-Sensoren durch die Schaumstoffdichtung verbessert. Als Alternative wird eine optische Übertragungsstrecke im Messaufbau eingeführt wodurch die Einkopplung auf das Messkabel vermieden wird.

### **Investigation of interference coupling during UHF-PD detection on HV cable termination**

This thesis reports on the investigation of interference coupling during the UHF-PD-Detection on high-voltage cable terminations. The UHF-PD-Detection is one of the most effective methods of on-site diagnosing of high-voltage power equipment. With the help of the network analyzer the S-parameters (transmission) are measured as a ratio between the radiated signal from antenna and received signal by the UHF sensors. In addition, the shielding of UHF-sensor is improved with the Foam-Based Gaskets. As alternative, an optical transmission circuit is introduced into the measurement setup, so that the influence of the disturbance on the measurement cable can be eliminated.

*Yu, Huafei*

### **Anforderungsorientierte Filtersimulation und Bewertung**

In der Diplomarbeit wird eine Software entwickelt, die zur gezielten Simulation der Filterdämpfung dient. Aus einer vorhandenen Bauteilbibliothek können Filterelemente verschaltet und hinsichtlich ihrer Gleich- und Gegentaktdämpfung untersucht werden. Wichtig ist dabei die Betrachtung der Filterdämpfung in Abhängigkeit der Eingangsimpedanz der Schaltung. Es entsteht eine Kurvenschar, die das Verhalten des Filters über der Frequenz beschreibt. Die Software wird in Matlab entwickelt und angewendet.

### **EMC Filter simulation for given limit values**

In this thesis, a software is developed for automatic EMC- filter simulations. Out of a given filter element library, arbitrary filter circuits can be assembled and simulated in respect to common- and differential mode attenuation. It is also important to calculate the filter attenuation in respect to the possible input impedance of the device under test (DUT). Because the filter attenuation mainly depends on the impedance given by the DUT. The software is developed and used within Matlab.

*Yu, Jingtao*

### **Implementierung von zusätzlichen Sprachelementen der Fuzzy-Control-Language sowie einer Benutzerschnittstelle für eine Fuzzy-Inferenz-Bibliothek**

Fuzzy-Inferenz-Systeme eignen sich zur Modellierung von Fehlerklassifikatoren für die Fehlergasanalyse mit Hilfe von empirischem Wissen. Zur Beschreibung solcher Fuzzy-Inferenz-Systeme existiert ein Sprachstandard in Form der Fuzzy-Control-Language. In unterschiedlichen Programmiersprachen existieren Bibliotheken, die den Sprachstandard mehr oder minder vollständig umsetzen. In diesem Kontext war die Aufgabe dieser Diplomarbeit zweierlei: Erstens sollte eine konkrete JAVA-Bibliothek um wichtige Sprachelemente ergänzt werden. Darunter fielen insbesondere verschiedene Verknüpfungsoperatoren und verschiedene Zugehörigkeitsfunktionen. Zweitens sollte ein Benutzerinterface implementiert werden, das der unmittelbar textuellen Formulierung von Fuzzy-Inferenz-Systemen über die Fuzzy-Control-Language ein Ende setzt. Stattdessen sollte dem Anwender die Erstellung und Manipulation von Fuzzy-Inferenz-Systemen auf grafischer Ebene ermöglicht werden.

### **Implementation of additional elements of the fuzzy control language as well as a user interface for a fuzzy inference library**

Fuzzy inference systems are suitable for the modelling of fault gas classifiers based on empirical knowledge. There is already a language standardized to describe fuzzy inference systems, called fuzzy control language. Furthermore, there are already libraries available for different computer languages that more or less implement the whole range of fuzzy control language. In this context the aims of the diploma thesis were as follows: First, important but missing language elements of the fuzzy control language should be implemented for a JAVA-library. Mainly, different logical operators and different membership functions had to be implemented. Second, a user interface should be realized. Purpose of the user interface was to overcome textual preparations and manipulations of fuzzy inference systems. Instead, the user should be able to prepare and manipulate fuzzy inference systems graphically.

*Zhang, Yelu*

### **Investigation of different neural network architectures to predict transformer top-oil temperature**

In this work, different artificial neural networks to predict transformer top-oil temperature were investigated. Compared to the recurrent neural network and the radial basis neural network structured for the prediction system of different transformers, the feed-forward network had the best performance for the temperature prediction with high predicting accuracy, fast calculating rate and ability to be trained by large size of data. The feed-forward network structures with different number of hidden layer and hidden neurons, trained by numerous training algorithms could also affect the performance of the temperature prediction. Results show that the Bayesian regularization training algorithm provided the best performance in term of temperature deviation between measured and calculated top-oil temperature, whereas, the Levenberg-Marquardt backpropagation provided the best performance in training time investigation. The good performance in top-oil temperature calculation from

each transformer could be found in the models with different number of neurons. It was found the feed-forward neural network with two hidden layer could result in better performance than the network with one hidden layer. However, the difference of the temperature deviation calculated by these two networks stayed in a small range of value. Due to the complicate structure of two hidden layer network which needed more time for calculation, the one hidden layer network was more efficient so long as the temperature deviation remains lower than 2 Kelvin. The recurrent network had more complex network structure and needed much more time to calculate for the large data amount. The fast training algorithm - Scaled conjugate gradient back-propagation provided the best performance in term of accuracy of temperature prediction and fast rate in training time investigation for recurrent network. As the conclusion, the feed-forward neural network is the most efficient network structure of the top-oil temperature prediction for the investigated transformers.

*Zhu, Guorong*

### **Bestimmung der Eingangsimpedanz beliebiger Schaltungen im Zeitbereich**

Zur Auslegung von Filterkomponenten ist es wichtig, dass sowohl die Eingangsimpedanz des Netzes als auch die Eingangsimpedanz des Prüflings bekannt ist. Ansonsten kann im Vorfeld keine Aussage über die erzielte Filterdämpfung getroffen werden. Die Impedanz der Netzversorgung ist während der EMV-Prüfung bekannt und wird über definierte Netznachbildungen sichergestellt. Die Impedanz des Prüflings kann durch Messung aufgeteilt werden in Gleich- und Gegentaktimpedanzen. Dazu sind jeweils zwei getrennte Messungen notwendig. Mit Hilfe der differentiellen Impedanz kann die Dämpfung der einzelnen Moden vorhergesagt werden.

### **Determination of the input impedance of arbitrary circuits within time-domain**

To choose appropriate filter elements, the input impedance of the device under test and the power supply circuitry have to be known. Otherwise the development process can end in a trial and error process. The impedance of the power supply is known due to defined stabilization network used. The impedance of the device under test can be separated into common- and differential- mode impedances for which two separate measurements are necessary. With the help of the differential impedance, the attenuation of the separated modes can be easily calculated.

**Abgeschlossene Studien- und Bachelorarbeiten vom 1.11.2007 bis 31.10.2008:**

NAME	THEMA
Angladagis, Frederic	Konstruktion eines akustischen Diagnosesystems für Stufenschalter Construction of an acoustic measuring system for tap changer
Bettle, Michael	Modularisierung von ESD-Messmitteln Modularisation of ESD Lab Equipment
Beyaz, Fatih	Erstellung eines Messaufbaus zur Erzeugung von Störlichtbögen bis 400 A Construction of a test set-up for generating arcs up to 400 A
Bornowski, Markus	Die TE-Messmethode im UHF-Bereich im Vergleich mit der genormten Messtechnik nach IEC 60270 an verschiedenen Betriebsmitteln The PD measurement method in the UHF range in comparison with the IEC 60270 at different equipment
Brix, Jonathan	Untersuchung der Isolationsfestigkeit von gasisolierten Transformatoren Investigation of insulation strength of gas-insulated transformers
Brodtr, Tatjana	Aufbau eines Systems zur Messung und Speicherung von Wechselströmen Development of a measurement-system for ac current recording
Burow, Simon	Untersuchung zum elektromagnetischen Abstrahlverhalten von Teilentladungen innerhalb von Leistungstransformatoren Investigation to the electromagnetic radiation of PD within power transformers
Elek, Zeljka	Simulation der Lastflusssteuerung mittels Schrägregeltransformatoren Simulation of power flow regulation by use of phase shifting transformers
Gersdorf, Stefan	Experimentelle Untersuchung der Fehlertgasentstehung und -verteilung in Transformatorenöl Experimental investigations on the generation and distribution of dissolved gases in transformer oil
Guo, Yiqing	Vergleich von Transferfunktionen an Fahrzeugen ähnlicher Bauart Comparison of transfer functions of similar shaped vehicles
Hakouna, Abderrazak	Verhaltensanalyse und Modellierung des Power-Detectors AD8318 Analysis and modelling of the power detector AD8318
Hu, Hongshun	Transformation einer allgemeinen Regelbasis eines Fuzzy-Inferenz-Systems in eine normalisierte Form Transformation of an arbitrary rule base of a fuzzy inference system in a normalized form
Huang, Chenxi	Durchschlagsspannung von Stufenschalterwahlstangen eines Transformators Breakdown voltage of transformer tap-changer contacts rod

NAME	THEMA
Küllmer, Alexander	Vergleich von galvanischen und induktiven Einkopplungen in Kabelbäume im Fahrzeug und im Labor Comparison of galvanic and inductive injections into a harness in vehicles and in the laboratory
Li, Jiasheng	Korrelation zwischen UHF-TE-Impulsparametern und scheinbarer Ladung nach IEC 60270 Correlation between UHF PD pulse parameters and apparent charge acc. to IEC 60270
Li, Ran	Untersuchung der häufigsten Montagefehler bei Hochspannungskabelgarnituren nach IEC 60270 und unkonventionell Analysis of the frequent cable termination assembly errors in accordance with IEC 60270 and unconventionally
Li, Yuanhao	Intelligente agentengetriebene Kommunikation zwischen Wissensbasen Intelligent agent driven communication between knowledge bases
Lopez Pardillos, Mario	Entwicklung einer Stückprüfung für UHF-Antennen Development of a routine check for UHF Antennas
Mai, Tim-Felix	Neuentwicklung eines 500-V-Stoßspannungsgenerators mit veränderlichen Parametern Development of a 500 V surge voltage generator with adjustable parameters
Maier, Florian	Datengestützte Optimierung von Fuzzy-Inferenz-Systemen durch Training Data-based optimization of fuzzy inference systems by means of training
Mieskes, Bruno	Erstellung eines Leitfadens zur Durchführung von EMV-Messungen nach DIN EN 55011 bzw. DIN EN 61000 A handout for EMC-Measurements according to DIN EN 55011 respectively DIN EN 61000
Müller, Andreas	Gating der elektrischen Teilentladungsmessung durch UHF-Signale in Leistungstransformatoren Gating electrical partial discharge measurements using UHF signals in power transformers
Pan, Min	Entwicklung einer Triggerbox für PRPD-Aufnahme an Kabelsteckern vor Ort Development of a trigger box for the UHF phase resolved partial discharge acquisition in cable terminations on-site
Pengchuan, Li	Experimentelle Auswertung der Fehlergasentstehung durch Teilentladungen und Durchschläge Experimental study of the generation of fault gases by means of partial discharge and breakdown discharge
Sarpasan, Mustafa	Automatische Temperatur- und Luftfeuchtigkeitserfassung im ESD-Labor Automated temperature and humidity measurement in the ESD laboratory
Schneider, Daniel	Aufbau einer optischen Freiraumübertragungsstrecke Optical free space transmission line

<b>NAME</b>	<b>THEMA</b>
Seeger, Sabine	Dielektrische Messungen zur Qualitätssicherung der Trocknung von Transformatoren Dielectric Measurements for Quality Control of Transformer Drying
Späth, Matthias	Die Ursachen für die Unterschiede beim Vergleich zwischen SFRA und IFRA Investigation of the differences between SFRA and IFRA
Spratler, Christian	Einfluss der Entlademethode auf die Degradation von Bauteilen Influence of the discharge method on the derating of components
Steurer, Christoph	Erweiterung eines ESD-Messwertaufnehmers Extensions of an ESD-Target
Shu, Jiayuan	Ethernet-basierte Datenerfassung Ethernet-based data acquisition
Wajant, Patrick	Entwicklung eines Ankoppelvierpols zur Teilentladungsmessung nach IEC 60270 Development of a measurement impedance for partial discharge measurements according to IEC 60270
Wang, Le	Messung der dielektrischen Festigkeit von Transformatorenöl Measurement of transformer oil dielectric strength
Yang, Zheng	Optimierung der induktiven UHF-TE-Sensoren für Diagnose der Kabelendverschlüsse Optimization of inductive UHF PD sensors for diagnosis of cable terminations
Yu, Jingtao	Implementierung von zusätzlichen Sprachelementen der Fuzzy-Control-Language sowie einer Benutzerschnittstelle für eine Fuzzy-Inferenz-Bibliothek Implementation of additional elements of the fuzzy control language as well as a user interface for a fuzzy inference library
Zhang, Heng	Vergleichstest der dielektrischen Festigkeit von Pflanzen- und Mineralölen Benchmarking of the dielectric strength of vegetable and mineral oils
Zhou, Mi	Optimierung eines ESD-Messwiderstandes Enhancement of an ESD Target
Zhou, Xuan	Erstellung eines Programms zur visuellen Darstellung von Transferfunktionen in Kraftfahrzeugen Implementation of a program to illustrate the distribution of transfer functions in vehicles

## 4. PROMOTIONEN

- **Reliable Moisture Determination  
in Power Transformers**

**Dipl.-Ing. Maik Koch**

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Gubanski,

Chalmers University of Technology, Göteborg

Tag der mündlichen Prüfung: 14.02.2008

This thesis aims to provide reliable methods of assessing moisture in oil-paper-insulated power transformers. Water in power transformers causes three damaging effects: it decreases the dielectric withstand strength, accelerates cellulose aging and causes the emission of gaseous bubbles at high temperatures. Therefore knowledge about the moisture concentration in a transformer is of great importance for safe operation and for further maintenance actions.

The traditional method of moisture evaluation, oil sampling with subsequent application of an equilibrium diagram, suffers from severe errors resulting into a very poor accuracy. Similarly, the recently introduced dielectric diagnostic methods under some conditions show contradictory results. This thesis discusses and improves both moisture measurement approaches.

At first, *direct* moisture measurement techniques as Karl Fischer titration and capacitive probes were examined in order to eliminate interferences and provide a reliable basis for measurements by novel approaches.

Then the *indirect* measurement procedure using moisture equilibrium was investigated resulting in the recommended moisture assessment method for on-line application. Therefore moisture adsorption in cellulose (paper, pressboard) and solubility in insulation oils were theoretically described and represented as sorption isotherms and equilibrium diagrams under the special consideration of aging. Several problems led to the key recommendation of this thesis which is to use water saturation in oil *and in paper* to describe water in power transformers. All the effects of water correlate better with water saturation than with the traditionally used moisture relative to weight and it is additionally more precise measurable.

As a second *indirect* measurement procedure the analysis of properties of the dielectric as polarisation currents and frequency domain spectroscopy were investigated. Measurements in time and frequency domain determined the influences of moisture, temperature, aging, oil impregnation and pressboard type on the dielectric

properties. Based on these measurements new software to analyse dielectric properties of real power transformers was written.

Finally the methods were applied to twelve transformers for on-site moisture evaluation comparing conventional to new approaches. Equilibrium diagrams in the shape of moisture isotherms in all cases delivered credible results. Within this work the developed dielectric analysis software proved its capability to compensate for conductive aging by-products and provide dependable results for moisture assessment of power transformers.

## ▪ **Zuverlässige Feuchtebestimmung in Leistungstransformatoren**

**Dipl.-Ing. Maik Koch**

Diese Dissertation beabsichtigt, zuverlässige Messmethoden für Feuchtigkeit in Öl-Papier-isolierten Transformatoren bereitzustellen. Dazu werden im ersten Schritt Methoden zur *direkten* Wasserbestimmung in Öl und Papier vorgestellt und deren Zuverlässigkeit sichergestellt. Danach werden als neue, *indirekte* Messmethoden die Feuchtebestimmung in Öl und Zellulose (Papier, Pressboard) mittels Gleichgewichtsverfahren und die dielektrische Diagnostik vorgestellt und schrittweise verbessert. Schließlich zeigen Messungen an Leistungstransformatoren die praktische Anwendung der neuen Verfahren im Vergleich zu traditionellen Methoden.

### **Zustandsbasierte Instandhaltung verlangt zuverlässige Diagnostik**

Zustandsbasierte Instandhaltungsstrategien versprechen gegenüber der traditionellen zeitabhängigen Instandhaltung nur dann Vorteile, wenn der wirkliche Zustand des Betriebsmittels sicher ermittelt wurde. Leistungstransformatoren stellen das teuerste Glied in der Energie-übertragungskette vom Generator zum Verbraucher dar. Der Kostendruck des liberalisierten Energiemarktes lässt die Energieversorgungsunternehmen auf kostensparende zustandsabhängige Verfahren statt auf traditionelle zeitabhängige Instandhaltung setzen. Dieser Ansatz verlangt zuverlässige Diagnoseverfahren.

Feuchtigkeit in Öl-Papier-Isolierungen ist ein wesentliches Zustandsmerkmal. Der Wassergehalt der Feststoffisolierung beträgt 0,4-1 % für neue Transformatoren und steigt auf 3-4 % am Ende der Lebensdauer von etwa 30-50 Jahren. Das entspricht einer Wassersättigung von 0,5-2 % im Neuzustand und bis zu 25 % für feuchte Transformatoren. Feuchtigkeit schädigt durch drei Wirkungen: Die Durchschlagsspannung von Öl und Zellulose wird verringert, die Alterung der Zellulose beschleunigt und die Emission von Gasblasen bei hohen Temperaturen verursacht. So ist die Kenntnis der Feuchtigkeit im Transformator von hoher Bedeutung für einen sicheren

Betrieb und zustandserhaltende Maßnahmen. Trotz dieser Zusammenhänge führen kommerziell erhältliche Messverfahren für Feuchtigkeit häufig zu widersprüchlichen Ergebnissen, selbst eine Klassifikation in trocken, mittelmäßig und feucht ist nur mit beschränkter Sicherheit möglich.

Dieser Stand der Technik motivierte zur vorliegenden Dissertation.

### **Direkte Messung durch Karl Fischer Titration und Kapazitive Sensoren**

Die Titration nach Karl Fischer repräsentiert den Stand der Technik für *direkte* Feuchtemessungen in den Materialien Öl und Zellulose. Jedoch bewiesen mehrere Blindtests eine unbefriedigende Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Laboratorien, besonders für Ölproben.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen nach eingehenden Untersuchungen eine Ausheiztemperatur von 160°C für Papier und 180°C für Pressboard als am geeignetsten erscheinen. Diese setzt nicht nur mehr Wasser frei sondern erhöht auch die Reproduzierbarkeit und verkürzt die Titrationszeit. Zur Trennung von Öl und Zellulose eignet sich Heptan wesentlich besser als das häufig benutzte Methanol. Bei der Titration von gealterten Ölen erwies sich die direkte Probeninjektion als zuverlässiger gegenüber dem Ausheizen des Öls. Bei der direkten Injektion kann der Störeinfluss durch Alterungsprodukte im Öl mit unter 10 % angegeben werden. Der Anhang beschreibt eine empfohlene Vorgehensweise für Karl Fischer Titrationsen.

Wesentlich einfacher gestaltet sich die Messung der relativen Feuchtigkeit mittels kapazitiver Sensoren. Hier können gesättigte Salzlösungen einfach die Genauigkeit überprüfen. Außerdem bewies ein Vergleich zu Spiegelhygrometern die Genauigkeit und guten dynamischen Eigenschaften kapazitiver Sensoren.

Den häufig diskutierten Diskrepanzen zwischen Titration nach Karl Fischer und kapazitiven Sensoren galt besondere Aufmerksamkeit. Hier machen die unterschiedlichen Messprinzipien (chemische Reaktion gegenüber Wasseradsorption) einen direkten Vergleich unmöglich. Dessen Voraussetzung ist es, ein Prinzip auf das andere zu kalibrieren.

### **Messung durch Feuchtegleichgewicht**

Bei der Vorort-Feuchtebestimmung stellt die Karl Fischer Titration von Ölproben mit nachfolgender Anwendung eines Gleichgewichtsdiagramms immer noch die am häufigsten genutzte Methode dar. Dennoch beschränken verschiedene Einflüsse wie Probenentnahme, Titration, Gleichgewichtsbedingungen und besonders Alterung deren Genauigkeit. Völlig unzureichende Ergebnisse liefert sie zur Zustandsbestimmung als Basis nachfolgender Instandhaltungsmaßnahmen. Trotz des enttäuschenden herkömmlichen Gleichgewichtsverfahrens machen die Ergebnisse dieser Arbeit das Prinzip Feuchtegleichgewicht zur favorisierten Methodik zur Feuchtebestimmung in Transformatoren.

Für dieses Ergebnis wurden zunächst der physikalische Hintergrund von Wasseradsorption und -löslichkeit in Zellulose beschrieben, danach Sorptionsisotherme für Papier und Pressboard experimentell ermittelt. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wassersättigung (Wasserdampfdruck). Auf Zellstoff basierende Materialien besitzen s-förmige Isotherme, welche eine starke Wasserbindung bei niedrigen Wassergehalten und eine exponentiell höhere Verfügbarkeit bei höheren Gehalten anzeigen (> 1,5 %). Die Wasseraufnahmefähigkeit von Pressboard und Papier stellt sich ähnlich dar. Alterung verringert die Wasseraufnahmefähigkeit, wahrscheinlich wegen des Effekts der Verhornung.

Sorptionsisotherme wurden ebenfalls für Mineral- und Pflanzenöle gemessen. Im Gegensatz zu Zellulose zeigen diese eine *lineare* Verknüpfung zwischen Wassergehalt und Wassersättigung. Alterung bewirkt bei Mineralölen eine erhöhte Wasserlöslichkeit, was ebenfalls gegensätzlich zur Zellulose ist. Weiter wurde ein gewisser Zusammenhang zwischen Wasserlöslichkeit und Säuregehalt des Öls beobachtet. Pflanzliche Isolieröle nehmen eine etwa 20-40-fache Wassermenge gegenüber Mineralöl auf.

Wasserdiffusion und -gleichgewicht werden durch Unterschiede in der relativen Feuchtigkeit bestimmt. Feuchtemessungen mittels Gleichgewicht beruhen auf dem thermodynamischen Gleichgewicht. Die Beziehungen zwischen Wasserpotential, Wasserdampfdruck und relativer Feuchtigkeit wurden beschrieben und ihre praktische Anwendbarkeit experimentell überprüft.

Darauf basierend konnten Sorptionsisotherme von Zellstoff und Öl verknüpft werden, was zu Gleichgewichtsdiagrammen führt, welche die Wassermasse in Öl auf die Wassermasse in Zellstoff beziehen. Da diese Diagramme für die wirklich verwendeten Materialien gelten, bieten sie eine höhere Genauigkeit als Diagramme herkömmlicher Literaturquellen. Dennoch tragen sie den wesentlichen Nachteil, dass sie für jedes Öl-Papier-System angepasst werden müssen.

Zu einer deutlichen Verbesserung führt die Verwendung der Wassersättigung des Öls statt des Wassergehalts in ppm. Die Wasserlöslichkeit des Isolieröls muss dann weder für ein Mineral- noch für ein Pflanzenöl berücksichtigt werden. Sorptionsisotherme von Zellstoffmaterialien bestimmen nun die Gewichtsfeuchte in der festen Isolierung aus der Wassersättigung des umgebenden Öls. Dennoch bleibt auch hier ein Nachteil, die Sorptionskapazität von Zellstoff ist materialspezifisch und verringert sich mit der Alterung.

Die Lösung dieses Problems führt zur Schlüsselthese dieser Dissertation: Wassersättigung in Öl und *ebenfalls im Papier* zur Bewertung der Feuchtigkeit von Transformatoren zu benutzen. Alle schädigenden Effekte von Wasser korrelieren besser mit der Wassersättigung als mit dem traditionell benutzten Wassergehalt (Gewichtsfeuchte). Auch für Trocknungsprozesse ist die Wassersättigung besser geeignet, da sie das verfügbare Wasser charakterisiert. Darüberhinaus messen kapazitive Senso-

ren einfach und genau auch während des Transformatorbetriebs. Die Wassersättigung kann ebenfalls durch dielektrische Diagnoseverfahren bestimmt werden.

### **Feuchtebestimmung durch Dielektrische Diagnostik**

Zur Zeit ihrer Einführung versprachen dielektrische Diagnosemethoden eine höhere Genauigkeit als die damals übliche Gleichgewichtsmethode basierend auf der Gewichtsfeuchte in Öl (ppm). Dennoch wurde bald offenbar, dass die zuerst kommerzialisierte Wiederkehrspannungsmethode (Recovery Voltage Method RVM) zu stark von der Ölleitfähigkeit beeinträchtigt wurde. Als viel zuverlässiger erwiesen sich die neueren Ansätze der Polarisationsstrommessung (Polarisation / Depolarisation Currents PDC) und der frequenzabhängigen Verlustfaktormessung (Frequency Domain Spectroscopy FDS). Dennoch offenbarte ein Vergleichstest auch hier Schwächen bei der Kompensation von Ölleitfähigkeit und Isolationstemperatur. Zudem kann keine der herkömmlichen Methoden den Einfluss leitfähiger Alterungsprodukte kompensieren (z.B. Säuren), die Feuchtigkeit stark gealterter Transformatoren wird dann überschätzt.

Messungen an einem Dielektrikum implizieren immer eine Überlagerung der Effekte Grenzflächenpolarisation und Leitfähigkeit, wie theoretische Betrachtungen zeigen. Diese wiederum werden bestimmt durch Feuchtigkeit, leitfähige Alterungsprodukte und Temperatur. Da Feuchtebestimmung das Ziel der Messung ist, besteht die Qualität einer Feuchtigkeitsanalyse in der Unterscheidung dieser Effekte.

Die Feuchtigkeitsanalyse beruht auf einem Vergleich zwischen einer modellierten dielektrischen Antwort aus der Datenbasis und der dielektrischen Antwort des Leistungstransformators. Um eine zuverlässige Datenbasis zu erhalten, wurden die dielektrischen Eigenschaften von Öl und Pressboard im Zeit- und Frequenzbereich gemessen. Mineralöle zeigen eine zeit- und frequenzabhängige Leitfähigkeit, beeinflusst von Ladungsträgerwolken in der Messzelle. Die Leitfähigkeit neuer Öle liegt bei 0,05 pS/m, steigt durch Alterung auf mehr als 1000 pS/m und korreliert leicht mit Wassersättigung und Säurezahl. Die Temperaturabhängigkeit der Ölleitfähigkeit kann mittels der Aktivierungsenergie beschrieben werden, welche hier bei 0,32 bis 0,54 eV lag.

Dielektrische Messungen an Pressboard-Proben im Frequenzbereich wurden besonders umfangreich durchgeführt um den Einfluss von Feuchtigkeit, Alterung, Temperatur, Pressboardtyp und Imprägnierung zu bestimmen. Feuchtigkeit erhöht die Verluste und Polarisierbarkeit, davon nicht unterscheidbar verhalten sich leitfähige Alterungsprodukte. Pressboard mit höherer Dichte (1,1-1,3 g/cm<sup>3</sup>) weist eine höhere Permittivität auf ( $\epsilon' = 4,6$ ) als Material niedrigerer Dichte (0,9 g/cm<sup>3</sup>) mit  $\epsilon' = 3,0$ . Bei der Analyse von Leistungstransformatoren können diese Eigenschaften die Genauigkeit beeinträchtigen.

Zur Auswertung von Messungen an Leistungstransformatoren wurde ein neuer Algorithmus entwickelt. Die Messungen an Öl und Pressboard bekannter Feuchte bilden eine Datenbasis. Der Analysealgorithmus gewichtet die Niederfrequenzdaten, benutzt ein erweitertes Geometriemodell, kompensiert leitfähige Alterungsprodukte und bietet neben dem Wassergehalt auch die Wassersättigung als Ergebnis.

### **Vorort-Messungen an Leistungstransformatoren**

Durch Vorort-Messungen sollen die neu entwickelten Verfahren überprüft und mit herkömmlichen verglichen werden. Das traditionelle Gleichgewichtsverfahren basierend auf dem Wassergehalt im Öl in ppm lieferte in jedem Fall zu hohe Wassergehalte in der festen Isolierung. Im Gegensatz dazu erzielten Gleichgewichtsdiagramme in der Form von Sorptionsisothermen immer glaubwürdige Ergebnisse.

Die dielektrischen Methoden PDC und FDS erwiesen sich in den meisten Fällen als geeignet. Unterschiede im ermittelten Wassergehalt können mit den unterschiedlichen Vergleichsdatensätzen, skaliert mit unterschiedlichen Karl Fischer Titrationsverfahren, begründet werden. Als Nachteil der konventionellen Methoden zeigten sich die lange Messzeit bei der Frequenzbereichsmessung FDS und die mangelnde Möglichkeit, leitfähige Alterungsprodukte zu kompensieren. Dies führte im Fall eines stark gealterten Transformators zu überschätztem Wassergehalt. Die in dieser Arbeit vorgestellte Software konnte den Einfluss leitfähiger Alterungsprodukte kompensieren, jedoch sind hier weitere praktische Messungen nötig.

Der Einfluss von Feuchtemigration auf dielektrische Diagnosemethoden wurde anhand von Berechnungen und praktischer Messungen quantifiziert. Die denkbaren Störungen durch ein Feuchteungleichgewicht während sinkender Temperatur werden durch die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften überdeckt.

Zusammenfassend bewerten dielektrische Diagnosemethoden zuverlässig die Feuchtigkeit in Leistungstransformatoren, wozu jedoch überlagernde Einflüsse durch Ölleitfähigkeit, Temperatur und Alterung kompensiert werden müssen. Feuchtebestimmungen über das thermodynamische Gleichgewicht sind einfach ausführbar, genau und im Betrieb durchführbar. Mit der Wassersättigung bietet sich eine Messgröße an, die direkt mit der Trocknung und den zerstörerischen Effekten von Feuchtigkeit in Öl-Papier-Isolierungen verknüpft ist. Instandhaltungsmaßnahmen sollten auf übereinstimmender Indikation durch beide Verfahren beruhen, dem Feuchtegleichgewicht und der dielektrischen Diagnostik.

## 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.

### **Zustandsbeurteilung und Schutz von Betriebsmitteln**

Der Betrieb der Übertragungsnetze über Bemessungsgrenzen und projizierte Lebensdauer der Betriebsmittel hinaus bedingt eine genauere Überwachung des Betriebszustandes, um die Versorgungssicherheit weiter zu gewährleisten (Life Cycle Management). So werden zum einen die für die einzelnen Betriebsmittel notwendigen Diagnoseverfahren 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.

### **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.

### **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

## RESEARCH ACTIVITIES

Our institute's main research topics are mainly related to the safety and reliability of the public electric power supply. Thus we deal with tasks from the field of high-voltage insulation performance but we also deal with tasks from the field "use of information technology in electric power supply and high-voltage engineering". A special emphasis of our research work is in the field of electromagnetic compatibility (EMC) of both power electric and electronic systems.

### Monitoring and Protection of H.V. Apparatus

The operation of electric power networks above their initial dimensioning levels and longer than their estimated lifespan requires a more detailed monitoring of the operating conditions to ensure a safe supply with electric power also in the future (Life Cycle Management). For this task the diagnostic tools which are necessary for different apparatus are developed or improved. This tools can be used i.e. to predict the residual life time of a H.V. apparatus. On the other side universal service and maintenance strategies for H.V. equipment are developed (asset management).

In addition the increased use of microelectronic devices in network protection and monitoring of H.V. equipment requires the development of especially designed digital algorithms and procedures. In the last years at our institute adaptive procedures for the protection of overhead lines, cables and transformers have been developed. Actually new methods for on-line monitoring of transformers and GIS are being developed.

### High-Voltage Test and Measurement Techniques

At our institute we develop and improve new measurement methods for the measurement of high amplitude impulse voltages and transient electromagnetic fields. Special focus is on the investigation of inaccuracies of H.V. measurements and on the recording of measuring signals with digital instruments having built-in intelligence. In the last years one main topic in this field has become the detection and measurement of partial discharges. Here we basically deal with modern procedures of noise reduction, with acoustic p.d. measurement techniques and with new UHF partial discharge measurement and localisation techniques.

### Gaseous Dielectrics

Since some years for ecological and economical reasons it is tried to replace pure SF<sub>6</sub> as insulating gas in gas insulated switchgear (GIS) by SF<sub>6</sub> mixtures or other insulating gases. For the classification of a environment compatible and economical insulating gas and for the dielectric dimensioning of GIS the performance of the support insulators used in GIS is quite essential. For this reason the influence of typical surface defects on the dielectric strength of different gas mixtures has been investigated. Also knowledge of the influence of atmospheric conditions on the dielectric strength of technical insulation design is very important. Using model test

Spannungsfestigkeit 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**asurement in **T**ime Domain) 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.

set-ups the influence of temperature and humidity on the breakdown voltage in air at different voltage shapes has been investigated

### **Electromagnetic Compatibility**

Since many years the field of „Electromagnetic Compatibility“ has been one of the most important activities. In the beginning of this work we started with the generation and measurement of electromagnetic field impulses with extreme high amplitudes and very short rise times. The aims have been the simulation of NEMP, LEMP and the simulation of circuit breaker operations in GIS.

Newer research work in this field has dealt with fast emission measurement procedures in time domain (FEMIT: **F**ast **E**mission **M**easurement in **T**ime Domain) and with the modelling and measurement of discharge currents of electrostatically charged plastic surfaces.

The most recent EMCV research work which is still in progress are in the field of automotive EMC. One topic is the correlation between full vehicle and single component EMC emission measurement procedures. The main aim is to estimate the emission behaviour of a single component in the car which is not yet available in an early state of its development. Another topic deals with EMC of automotive electric power networks. Due to novel high power electric devices used on modern vehicles it is possible that new impulsive disturbance occur on the electric power supply of the vehicle. For the other electronic system in the automotive electric network these impulsive disturbances may cause new disturbing potential which are not covered by the actual EMC susceptibility standards. The goal of this work is to detect and classify these new impulsive disturbances and also the develop new measurement tools for a convenient recording of these sporadically impulses in the automotive power network with as less coupling disturbances as possible.

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

## ▪ Experimentelle Untersuchung der Diffusionsgeschwindigkeit von in Öl gelösten Gasen

Jackelyn Aragón-Patil, M.Sc.

### Dynamisches Verhalten von in Öl gelösten Gasen

Moderne DGA-Verfahren (Dissolved Gas Analysis) ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung der im Öl gelösten Gase, wodurch ein besseres Verständnis der im Transformatoröl ablaufenden Prozesse erlangt werden soll.

Der Ölkreislauf eines Transformators besteht aus einem konstanten Volumen im Transformator-Kessel und dem „atmenden“ Ausdehnungsgefäß (Fig. 1). Der Ölkreislauf wird z. B. durch den natürlichen Kühlkreislauf, der durch eine Temperaturdifferenz zwischen warmem Öl im Kessel und kaltem Öl im Ausdehnungsgefäß hervorgerufen wird, beeinflusst. Zusätzlich durchläuft das Öl im Kessel einen externen Kühlkreislauf.

Der Ölkreislauf eines Transformators ist ein dynamisches System, das stark durch Last, Temperatur, Umgebungsbedingungen und Fehler beeinflusst wird. Überwachung mit DGA kann einen auftretenden Fehler feststellen. Die Konzentrationen der im Öl gelösten Gase hängen stark von folgenden Faktoren ab:

- Stärke des Fehlers
- Geschwindigkeit des Ölaustausches zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß
- Gasdiffusion

Ein Fehler ruft eine Bewegung eines beliebigen Fehlergasvolumens hervor ( $V_{T(i)}$ ), das sich bis zu einem bestimmten Niveau im Kessel löst und so ein zeit- und ortsabhängiges Konzentrationsprofil entstehen lässt ( $C_{L(i)}$ ). Die Diffusionsrate hängt dabei von der Energie des Fehlers ab. Starke Fehler erzeugen ein großes Fehlergasvolumen, dessen Moleküle sich mit hoher Geschwindigkeit im ganzen Kessel ausbreiten können. Neben der Diffusion beeinflusst die Konvektion die Gasausbreitung. Diese entsteht durch einen meist starken Temperaturanstieg am Fehlerort, der das Öl zersetzt. Durch den Ölaustausch zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß werden Fehlergasmoleküle dort ebenfalls mit einer von den Löslichkeitskoeffizienten der Gase abhängigen Geschwindigkeit an die Luft abgegeben. Daraus resultiert eine Konzentrationsänderung im Ölkreislauf, bis der Gleichgewichtszustand hergestellt ist.

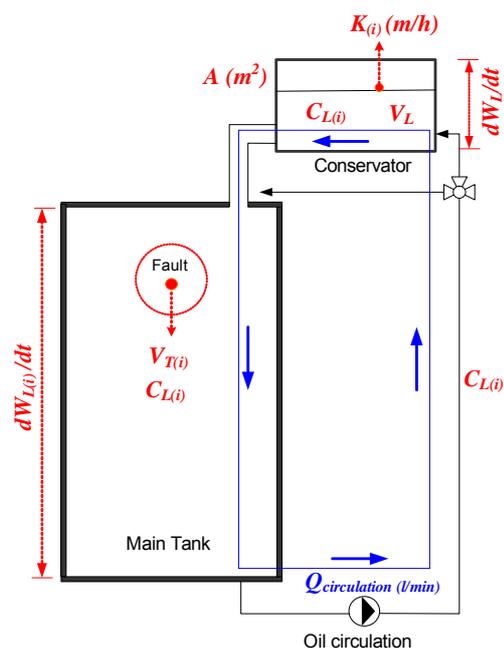


Fig. 1: Ölkreislauf in einem Leistungstransformator

▪ **Experimental investigations on the diffusion of gases dissolved in oil**

Jackelyn Aragón-Patil, M.Sc.

**The dynamic behaviour of gases dissolved in the oil balance**

State-of-the-art DGA (dissolved gas analysis) methods allow continuous monitoring of gas-in-oil concentrations that aim at providing understanding about the processes occurring inside the oil balance of a transformer.

The oil balance of a transformer consists of a oil volume inside the main tank and the “open breathing” conservator tank (fig. 1). The movement of the oil balance is influenced by effects like the thermosyphon or natural cooling circulation caused by temperature difference between hot top oil in the main tank and cold oil in conservator. Additionally, the oil in the main tank circulates through an external cooling system.

The oil balance of transformers is a dynamic system that can be highly affected by load, temperature, ambient conditions, and faults. Monitoring by DGA can aim at identifying a fault occurring in a transformer in a certain moment, however gas-in-oil concentrations are greatly dependent on the dynamic behaviour of the oil balance, which can be influenced by:

- a) Intensity of the fault,
- b) Velocity of the oil circulation between main tank and conservator and
- c) Diffusion of gases.

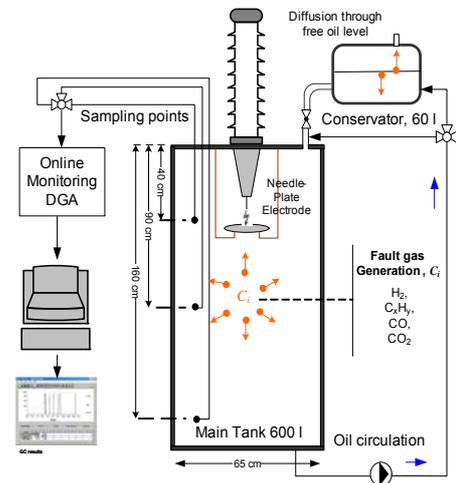


Fig. 2: Test setup for generation of fault gases

As a result of a fault of certain intensity, a volumetric flow of any fault gas molecule is generated (VT(i)), this volume of gas will dissolve up to certain limit into the main tank and it will create a concentration profile (CT(i)), varying with time and location. The diffusion rate will depend on the energy involved in the fault. Thus, faults of high intensity will generate large amount of gases, with molecules that can move randomly at high velocity in all directions inside the main tank. The movement of gases is not only influenced by diffusion but also by a convection process induced by the variation of oil temperature occurring during the fault, given that at the fault location there is usually an immeasurable quick increase of temperature that causes the oil degradation. Because of the oil circulation between main tank and conservator, fault gases are transported to the conservator tank where gases are diffused into the atmosphere at a diffusion rate that depends on the solubility properties of the gas molecule. As a result there is a concentration gradient in the oil balance until an equilibrium state is achieved.

### Laborergebnisse der Gasdiffusionsgeschwindigkeit

Um die Diffusionsgeschwindigkeit bei „frei atmendem“ Ausdehnungsgefäß zu bestimmen, wurde ein kontrollierter Durchschlag im Kessel der Versuchsanordnung (Fig. 2) erzeugt. Die Konzentrationsänderung wurde mit einer kontinuierlichen DGA bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß gemessen. Die Geschwindigkeit der Gasdiffusion ist stark abhängig von der Kontaktfläche zwischen Luft und Öl im Ausdehnungsgefäß, der Öltemperatur sowie der Durchflussgeschwindigkeit und Löslichkeit der Gase. Die Konzentrationsänderung ist die treibende Kraft für den Massentransfer, wobei die Gasdiffusion in einem stetigen Oberflächenvolumen stattfindet. Der Massentransferkoeffizient (KL) gibt also die Diffusionsgeschwindigkeit im Ausdehnungsgefäß an.

Das Konzentrationsprofil (Fig. 3) lässt darauf schließen, dass die entstehende Wasserstoffkonzentration bis zu einem Maximum ansteigt. Part 1 zeigt gleichzeitig ablaufende Prozesse, die nach dem Fehler auftreten, z. B. weitere chemische Reaktionen, durch den Fehler bedingte Konvektionsströmungen, Gasdiffusion in Öl und Molekülschwingungen durch die Fehlerenergie. Part 2 zeigt einen linearen Abfall der Konzentration infolge von Diffusion durch das Ausdehnungsgefäß. Fig. 4 zeigt das Diffusionsprofil für eine erzeugte Wasserstoffkonzentration bei maximaler Durchflussgeschwindigkeit (3l/min).

Durch die schnellere Diffusion und die daraus resultierende geringere Fehlergaskonzentration im Kessel kann ein größerer Fehler irrtümlicherweise als ein weniger schwerwiegender Fehler diagnostiziert werden. Gasdiffusion in die Umgebung und Geschwindigkeit der Gasausbreitung zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß haben

Einfluss auf die Verlässlichkeit der DGA-Diagnostik.

Tabelle 1 zeigt die Diffusionsgeschwindigkeit im „frei atmendem“ Ausdehnungsgefäß (KL), berechnet durch lineare Regression bei unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten.

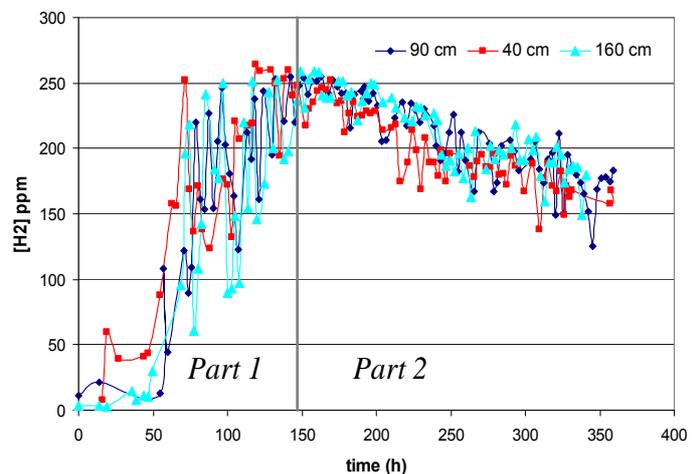


Fig. 3: Time-concentration profile for hydrogen concentration at zero oil circulation

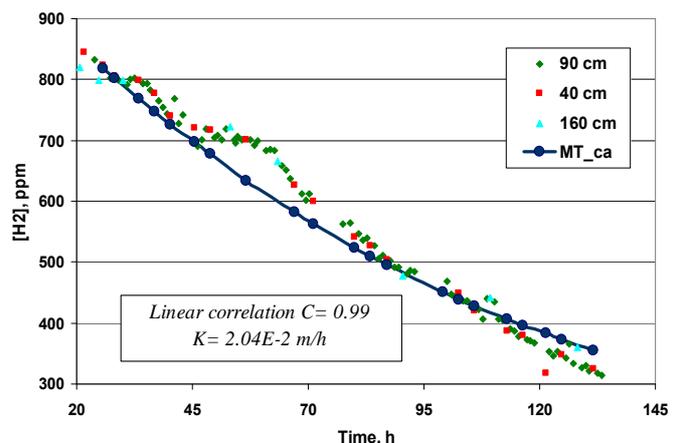


Fig. 4: Diffusion profile for hydrogen concentration and maximum velocity of oil circulation

## Experimental results of diffusion of gases

In order to investigate the rate of gas diffusion through the “open breathing” conservator tank, fault gases were generated by means of a controlled electrical breakdown discharge applied in the main tank (see Fig. 2). The concentration gradient was measured by continuous DGA monitoring at different velocities of oil circulation between main tank and conservator.

The rate of gas diffusion through the conservator is strongly dependent on the oil surface exchange area in the conservator, temperature of oil and velocity of oil circulation between main tank and conservator. The concentration gradient provides the driving force for the mass transfer process, and diffusion of gas molecules occurs through a steady interface of certain thickness. Thus, the mass transfer coefficient (KL) aims at indicating the rate of gas diffusion through the conservator.

The concentration profile displayed in Fig. 3 indicates that the concentration of generated hydrogen tends to increase until reaching a maximum concentration. Part 1 represents concurrent processes occurring after the fault, these can be ongoing chemical reactions, convection due to temperature gradients occurring after the fault, diffusion of gases in oil and molecular oscillations caused by the energy released by the fault. Part 2 shows a linear decrease of hydrogen concentration as a result of diffusion through conservator.

Fig. 4 shows the diffusion profile for generated hydrogen concentration and maximum velocity (3l/min) of oil circulation between main tank and conservator.

Therefore, having a faster diffusion of gases through the conservator means that there is a reduced concentration of dissolved gases in the main tank which can be interpreted wrongly as a small fault, when in fact it is a big fault.

Diffusion of gases into the atmosphere and velocity of the oil circulation between tank and conservator are factors that influence reliability of fault diagnostic by DGA. Therefore it is essential to understand the dynamic behavior of gases dissolved in oil.

By means of linear regression approximation the following diffusion rates for hydrogen were estimated, see Table 1.

- **Elektromagnetische Teilentladungsmessung im ultrahohen Frequenzbereich (UHF) an Leistungstransformatoren**

**Dipl.-Ing. Sebastian Coenen**

In zunehmendem Maße entsteht der Bedarf, die bestehende Isolationsqualität von öl/papierisolierten Transformatoren vor Ort und 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.



Fig. 1: UHF-Sensor für die Online-Messung mit Schubstange, Gehäuse und Flansch  
UHF probe for online measurement with connecting rod, housing and flange

Diese Sensoren können bei laufendem Betrieb über einen zur Ölbefüllung genutzten Flachkeilschieber in das Innere des Transformators eingeführt werden. Im Innern dieses Faradayschen Käfigs ist der Sensor unempfindlich gegen externe elektromagnetische Störquellen. Dadurch kann in der Regel vor Ort eine sichere Aussage über die TE-Aktivität eines Prüflings getroffen werden. Voraussetzung ist eine moderate Dämpfung der elektromagnetischen Wellen, die sich innerhalb des Transformators durch die verschiedenen Materialien und Strukturen hindurch ausbreiten.

Um diese moderate Dämpfung nachzuweisen, wurden 2 einphasige 220-MVA-Spartransformatoren des gleichen Typs für UHF-Wellenausbreitungsexperimente vorbereitet. Die Transformatoren waren zur Verschrottung vorgesehen und ölfrei, hatten aber noch den vollständigen Aktivteil im Innern des Kessels. Um verschiedene Positionen für Ausstrahlung und Empfang von elektromagnetischen Wellen zu erhalten, wurden diverse Löcher in die Kesselwand gebohrt, siehe Fig. 2.

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

Dipl.-Ing. Sebastian Coenen

Examining the existing insulation quality of oil/paper-insulated transformers during full operation or at least in field gets more and more important because of the increasing number of transformers reaching their technical life expectancy. Important judging parameters are given by the measurement of Partial Discharges (PD). PD under oil are very fast electrical processes and radiate electromagnetic waves with frequencies up to the ultrahigh range (UHF: 300 – 3000 MHz). The electromagnetic waves are detectable with UHF probes, as seen in Fig. 1.

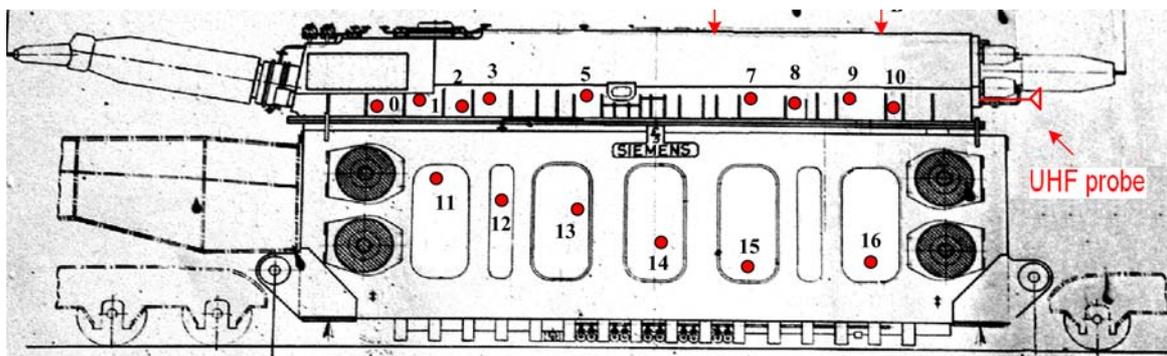


Fig. 2: Position der Löcher an der Frontseite des Transformators (weitere Bohrlöcher befinden sich auf der Rückseite, z.B. Nr. 17-27)  
 Positions of boreholes on the front side of a transformer (other boreholes were at the back of the transformer, e.g. No. 17 – 27)

The probes can be inserted into the transformer during full operation using the oil filling valve. As a result of the shielding characteristics of the transformer tank against external electromagnetic waves, usually a clear decision can be made concerning the PD activity of the test object. Precondition is the moderately attenuated propagation of UHF waves inside the transformer tank within the insulation materials and structures commonly used in transformers.

For analyzing the characteristic of the UHF propagation inside power transformers, two 220 MVA single-phase autotransformers of the same type intended for scrapping were prepared for some experiments. The transformers were oil free but with intact tank, which acted as a faraday cage for external disturbances. More important, the transformers included their complete active parts. To get several different location for injecting and receiving electromagnetic waves through the transformer a lot of boreholes were drilled in the tank wall at various positions around the transformer tank. This is exemplarily shown for the front side view of one transformer in Fig. 2.

Mindestens zwei je 10 cm lange Monopolantennen können so in das Innere des Transformators geschoben werden. Die Dämpfung von unterschiedlichen Ausbreitungswegen wird bestimmt, indem ein Monopol künstliche UHF-Impulse aussendet, die an anderen Monopol gemessen werden.

Mit der Wiederholungsrate von 100 Hz des Impulsgenerators können so viele unverstärkte Einzelimpulse aufgezeichnet und ausgewertet werden. Fig. 3 zeigt die Amplitude der empfangbaren UHF-Signale bei den unterschiedlichen Positionen. Die Signalquelle (der zweite Monopol) wurde hier konstant in einem Bohrloch am Deckel des Transformators gehalten.

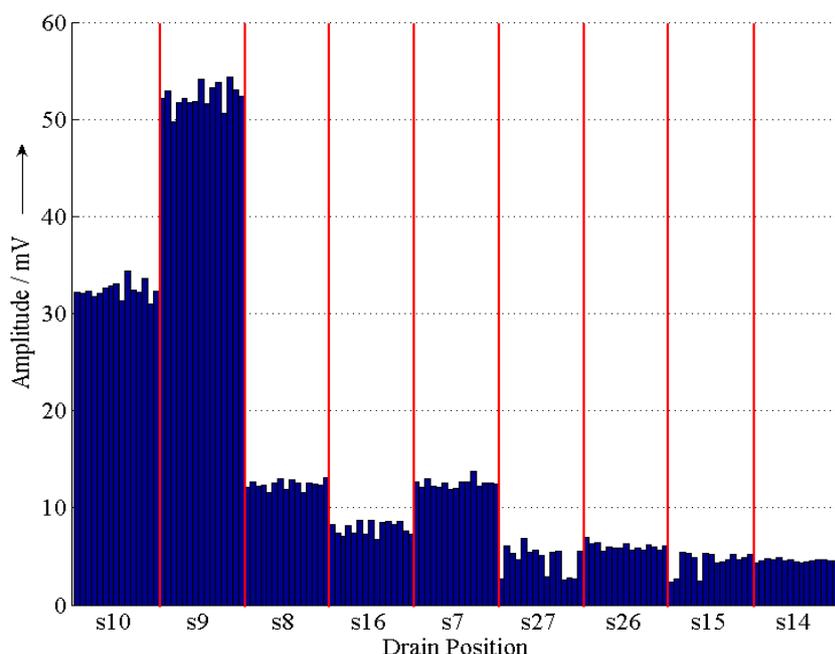


Fig. 3: UHF-Amplitude in Abhängigkeit der Position der Empfangsantenne  
Maximum amplitude of received UHF waves depending on the drain position

Zu erkennen sind die unterschiedlichen Signalamplituden bei unterschiedlichen Positionen. Nimmt man die Position 9 als Referenzposition, so lässt sich in Relation zu dieser Referenzposition die Dämpfung im Vergleich zu anderen Antennenpositionen bestimmen.

Fig. 4 zeigt die berechnete Dämpfung bei Variation der Position der Empfangsantenne (linke Achse). Durch die Kenntnis der Abmessungen des Transformatorrenkesels können die zugehörigen Entfernungen zwischen Sende- und Empfangsantenne bestimmt werden und in das Diagramm integriert werden. Damit kann dann die Dämpfung der UHF-Signale in Bezug zur mittleren zurückgelegten Wegstrecke im Innern des Transformators angegeben werden (rechte Achse).

Aufgrund dieser pfadabhängigen Dämpfung der UHF-Signale von 2 – 6dB/m ist eine Abschätzung der scheinbaren Ladung in pico Coulomb (pC), wie konventionell nach IEC60270 bestimmbar, nicht möglich.

At least two 10 cm long monopoles can be shifted into the transformer through the boreholes. The attenuation of different propagation paths through the transformer can be investigated by feeding one of the monopoles with an UHF impulse generator and measuring the received UHF waves with an other monopole.

With the impulse generator repetition rate of 100 Hz, many non-amplified single pulses could be received and analysed independently. Fig. 3 e.g. shows the maximum amplitude of the received UHF signals at different positions characterized by the number of the borehole, as defined in Fig. 2. The UHF signal source (the emitting monopole) was held on constant location, e.g. here at a borehole on top of the transformer tank.

Immediately recognizable is the clear difference of signal amplitude depending on the position of the receiving antenna. Regarding the antenna position 9 as a reference, the damping factors to the other antenna locations can be calculated. Fig. 4 summarizes an example of one fix UHF source location and different receiving antenna locations by plotting the calculated attenuation factors in decibel (dB), see left axis.

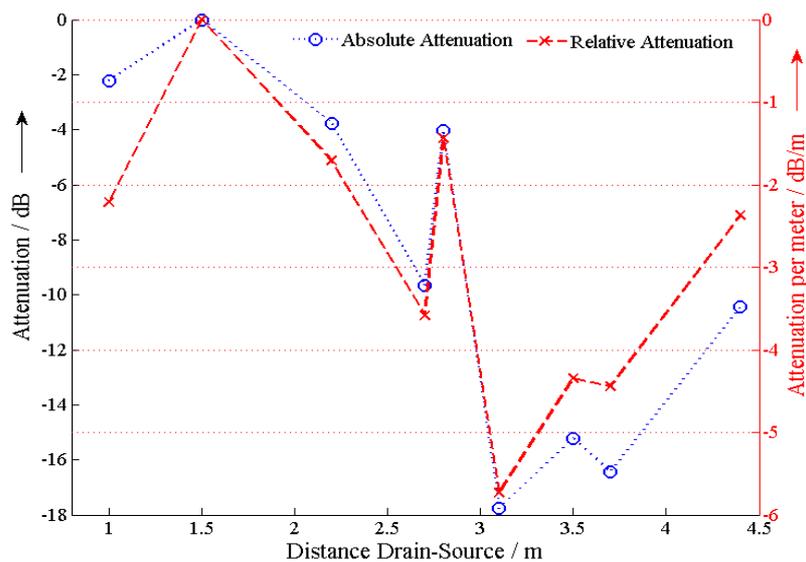


Fig. 4: Dämpfung von UHF-Signalen nach Messung im Zeitbereich  
Attenuation of UHF signals measured in time domain

By knowing the transformer tank dimensions, the corresponding source-receiver antenna distances are calculated and included in the diagram. This results shows general attenuation factors of the UHF signals inside the transformer with the unit dB/m, see right axis in Fig. 4.

Because of the path dependent attenuation (varies between 2-6 dB/m) of UHF signals an estimation of the apparent charge (determined with the measurement according to IEC60270) is not possible.

- **Phasenbezogene Darstellung der Teilentladungen, aufgenommen im UHF-Bereich mit Hilfe eines programmierten Oszilloskops**

**Denis Denisov, M.Sc.**

Vorteile des nach IEC 60270 genormten Messverfahrens sind zum einen die große Erfahrung, aber auch die digitalen Tools für eine phasenbezogene TE-Erkennung, die eine vor Ort durchgeführte Auswertung erleichtern. Die grundlegende Idee der phasenbezogenen Teilentladungs-Interpretation basiert auf der statistischen Verteilung der TE-Impulse mit starker Korrelation zur Frequenz der Prüfspannung. In dem phasenbezogenen TE-Muster sind die Informationen über den Phasenwinkel des Impulses, Amplitude und Wiederholungsrate auf ein 2-D-Diagramm abgebildet. Dieser Beitrag beschreibt unsere Erfahrung mit der phasenbezogenen Darstellung von UHF-TE-Signalen zur Vor-Ort-Zustandserfassung von Hochspannungskabelendverschlüssen.

Die Messung von Teilentladungen (TE) an elektrischen Betriebsmitteln (Kabelanlagen) als Indikator für intelligente zustandsabhängige Instandhaltungsmaßnahmen gewinnt immer mehr an Bedeutung, zumal mehrfach bewiesen ist, dass TE gefährliche Erosionsmechanismen darstellen können. Für die Erfassung möglicher TE-Aktivitäten in Garnituren bieten sich Methoden an, die höhere Frequenzbereiche nutzen, um unabhängig von äußeren elektromagnetischen Störeinflüssen vor Ort zu sein. Die verwendeten Frequenzbereiche reichen bis in den UHF-Bereich und haben bereits weltweit ihre hohe Sensitivität und Vorteile hinsichtlich Selektivität an elektrischen Betriebsmitteln unter Beweis gestellt. Das UHF-Messverfahren basiert auf dem Empfang von elektromagnetischen Emissionen, die aus der TE-Quelle kommen. Der speziell entwickelte UHF-Sensor soll möglichst nahe am Prüfling installiert werden und muss effektiv gegen Störungen aus der Umgebung abgeschirmt werden. Impulse von einigen Nanosekunden Dauer werden vom TE-Defekt emittiert und von UHF-Sensoren aufgefangen. Diese Impulse werden danach vorverstärkt, gefiltert und mit dem Oszilloskop verarbeitet.

In Umgebungen mit erhöhter UHF-Aktivität kann ein sich wiederholendes Signal fälschlicherweise als innere Teilentladung aufgefasst werden. Des Weiteren ist bekannt, dass eine Teilentladung nur zu bestimmten Phasenzeitpunkten auftritt. Diese Charakteristiken ermöglichen eine einfache Sortierung wichtiger und vernachlässigbarer Signale. Eine automatische UHF-Signalaufnahme über mehrere Trigger-Ereignisse und phasenbezogene Darstellung der Impulsaktivität übernimmt die speziell dafür im Matlab/Origin geschriebene Oszilloskop-Steuersoftware. Getriggert wird in diesem Fall direkt auf das UHF-Signal, was die Empfindlichkeit steigert. Der Phasenwinkel im Moment des Triggers wird aus dem Rampenspannungswert der Triggerbox genau berechnet.

- **Phase resolved imaging of partial discharges picked up in the UHF range by programmed oscilloscope**

**Denis Denissov, M.Sc.**

One of the main advantages of the standardized IEC 60270 system is a very broad scale of experience and the presence of digital tools related to phase-resolved PD recognition that support the evaluation of PD measurements. The basic idea of the phase resolved interpretation of PD is that PD pulses are distributed statistically with a strong correlation to power frequency. In PRPD pattern the information on the phase angle of the pulses, as well as magnitude and repetition rate are plotted in one 2D-diagram. This contribution describes our experience in the phase resolved imaging of the UHF PD signals developed for the onsite condition assessment of HV cable sealing ends.

Recently the UHF PD testing has earned wide acceptance in the diagnosis of HV apparatuses in service due to higher signal-to-noise ratio onsite and thus increased detection sensitivity compared to classical IEC 60270. Nanosecond pulses emitted from the PD site and captured with specially developed UHF sensors are consequently pre-amplified, filtered and recorded by the programmed oscilloscope. However often in a noisy on-site environment a repetitive pulse activity picked up by the diagnostic system can be falsely interpreted as possible PD. A code written for a programmable oscilloscope enables us to acquire on-site on-line phase resolved PD pictures similar to Q-phi-N diagrams taken in the laboratory. So, it is easier to make the diagnostic judgment even in extremely noisy situations, having at hand a clear bond between the pulse activity and the phase reference of a supply voltage. Beside phase reference, the pulse's spectral characteristic and repetition rate are important diagnosis parameters as well.

To enable an automated acquisition of UHF PRPD patterns a software was written, which remotely controls the oscilloscope and collect the key parameters of UHF pulses into a database over multiple trigger events. Here the UHF signal is used to trigger the measurement; the exact phase angle at the moment of pulse acquisition is calculated using the output value of a ramped voltage generator. A ramp is generated in sync to a line voltage applied to the tested insulation. Fig. 1 presents the simultaneous measurement on the lab setup by both the IEC 60270 and the UHF methods. The images shown stand for an inner PD activity in the cable sealing end recorded over 5 min. The UHF PRPD image counts over 2500 PD pulses triggered. The shape and phase position of both patterns are very similar. Thus, based on the UHF PRPD images one can easily differentiate between the internal PDs and corona interferences on-site.

Abbildung 1 vergleicht die innere TE im Stecker, aufgenommen durch eine Mtronix MPD540 (links) nach IEC60270 und einem programmierten Oszilloskop (rechts), getriggert auf einem UHF-TE-Signal über eine Zeit von etwa 5 Minuten. Diese Messungen wurden unter Laborbedingungen durchgeführt. Daher war es möglich, einen direkten Phasenbezug herzustellen. In Abbildung 1 ist aufgrund der Phasenlage und TE-Wolkenform eindeutig zu erkennen, dass wir es mit einer typischen „inneren“ Teilentladung zu tun haben. Somit ist die phasenbezogene TE-Darstellung ideal zur Unterscheidung zwischen interner TE und anderen sich wiederholenden Impulsen (z.B. Korona).

Leider ist es nur bedingt möglich, während einer Vor-Ort-Messung in einer Schaltanlage das Phasensignal direkt zu extrahieren. Daher wird eine Strommesszange um die Schirmdrahtausführung angebracht. Die in der Triggerbox generierte Rampe wird dann um einen gewissen Phasendifferenzwert verschoben, um von der Schirmstromphase zur Isolationsspannungsphase zu kommen.

Abbildung 2 zeigt die Erfahrungen aus dem praktischen Vor-Ort-Einsatz des Messsystems. Die Messungen wurden an mehreren 66-kV-Kabelsteckern an GIS durchgeführt, während die Anlage in Betrieb war. Das phasenbezogene UHF-Muster eines defekten Steckers ist links zu sehen. Der für TE-behaftet erklärte Endverschluss wurde aus dem Betrieb genommen und zur Untersuchung ins Labor gebracht. Rechts ist das Ergebnis der Zerlegung zu sehen. Zwei schwarze Flecken sind auf den Kabeloberflächen und inneren Oberflächen des Deflektors leicht erkennbar. Vermutlich sind das Folgen eines Bogens entlang der Kontaktflächen zwischen dem VPE-isolierten Kabel und dem Silikondeflektor.

Die Aufgabenstellung des oben beschriebenen UHF-TE-Prüfsystems sollte darin bestehen, TE-Störstellen in Kabelgarnituren während des Anlagenbetriebes zu erfassen, aber auch die Qualitätslücke zwischen Werksausgangsprüfung und Inbetriebnahme vor Ort, beispielsweise durch Montagefehler, zu schließen, d. h. initiierte TE-Fehlstellen im Nachhinein zu identifizieren.

Kabelgarnituren weisen heutzutage einen sehr hohen Vorfertigungsgrad auf, müssen aber trotzdem weiterhin von Hand vor Ort unter „Baustellenbedingungen“ zusammengesetzt werden und sind demzufolge der höheren Gefährdung einer Qualitätsminderung unterlegen.

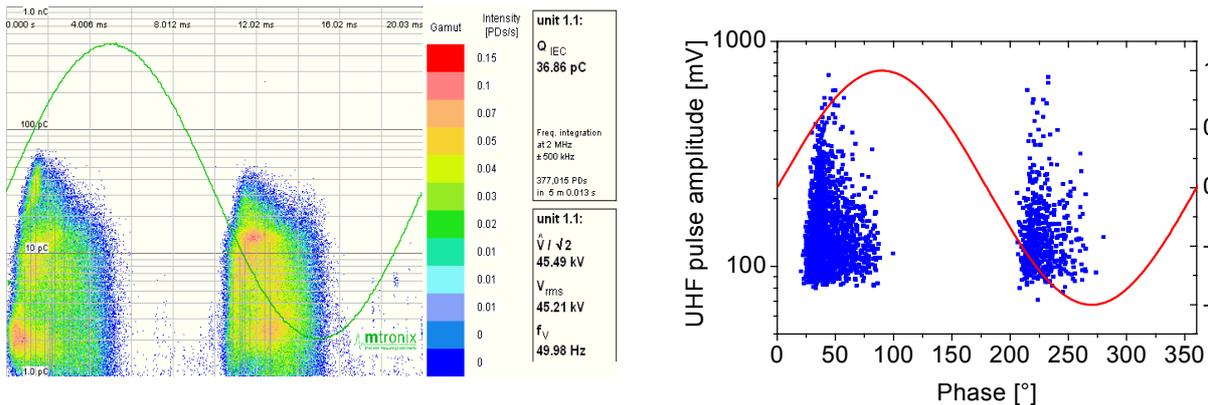


Fig. 1: PRPD images of an internal PD (<80 pC at 45 kV) recorded synchronously acc. IEC60270 (left) and using the UHF signal from the oscilloscope (right)  
Phasenbezogenes TE-Muster nach IEC- (links) und UHF-Prinzip (rechts)

Regarding an on-site testing in the GIS substations there are very few possibilities to extract the corresponding phase signal of a line voltage. A current probe is mounted around the shield wire of each sealing end under test. The ramped output voltage is then shifted by a certain degree found experimentally comparing to the probe signal.

Fig. 2 demonstrates the effectiveness of the on-site test campaign carried out using the developed UHF technique. PRPD image of a suspicious sealing end had classical form of internal insulation fault. This sealing end was taken out of service later and shipped to the lab for visual inspection. On the right side of the Fig. 2 the dismantled termination is shown. Two major black spots can be easily seen on the surface of the cable and adjacent surface of the stress relief cone. Black (carbonized) colour of the spots and yellow colour of neighbouring area of XLPE cable insulation point out to the heavy arcing process taking place across the border “cable-stress cone”.

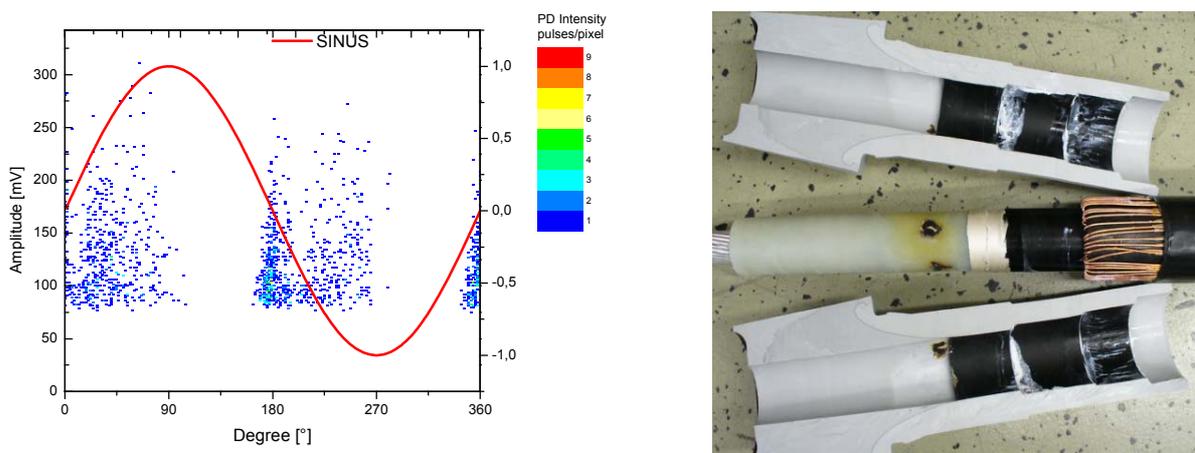


Fig. 2: UHF PRPD image (left) of a faulty 66 kV cable sealing end recorded onsite and visual inspection after dismantling in the lab  
Phasenbezogenes Vor-Ort-TE-Muster (links) eines 66-kV-Steckers und Defektbild (rechts) nach der Zerlegung im Labor

## Optimierte DGA-basierte Fehlerdetektion bei Leistungstransformatoren mit Hilfe trainierbarer Fuzzy-Inferenz-Systeme

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Zunehmender Wettbewerb setzt Energieversorgungsunternehmen (EVU) unter Kostendruck. Um dem zu begegnen, betreiben EVU ein Anlagennahes Asset Management (AAM). Ziel ist es, unter Einsatz des AAM, die Kosten der Betriebsmittel für die Energieerzeugung und –übertragung zu minimieren.

Ein erfolgreiches AAM setzt voraus, dass der Zustand von wichtigen (teuren) Betriebsmitteln möglichst genau bekannt ist. Für die Zustandsklassifikation stellt, wie im vorigen Jahresbericht bereits erwähnt, die Mustererkennung ein probates Mittel dar. In diesem Zusammenhang wurde im vergangenen Jahresbericht auch gezeigt, dass Klassifikatoren sowohl mit regelbasiert arbeitenden Fuzzy-Inferenz-Systemen (FIS) als auch mit statistisch arbeitenden Netzen mit radialen Basisfunktionen (RBF) modelliert werden können.

Da FIS und RBF unterschiedliche Information für die Modellierung nutzen, erscheint deren kooperative Anwendung sinnvoll. Im Hinblick darauf wäre die direkte Kopplung von FIS und RBF denkbar. Es hat sich aber gezeigt, dass es einfacher ist, FIS mit den Trainingseigenschaften der RBF zu erweitern. Das Resultat sind regelbasiert und statistisch arbeitende trainierbare Fuzzy-Inferenz-Systeme (TFIS). Im Folgenden wird nun beschrieben, wie TFIS eingesetzt werden können, um Klassifikatoren für die DGA zu optimieren.

Für die DGA-basierte Fehlerklassifikation steht Vorwissen in Form von konventionellen Diagnosemethoden zur Verfügung. Dieses Vorwissen ist geeignet, um regelbasiert von einem TFIS verarbeitet zu werden. Fig. 1 zeigt exemplarisch Klassifikatoren für „thermische Fehler niedriger Temperatur“, „thermische Fehler hoher Temperatur“, „elektrische Fehler“ und „nicht definiert“, die unter Ausnutzung von Vorwissen aus der Methode nach General Electric regelbasiert modelliert wurden.

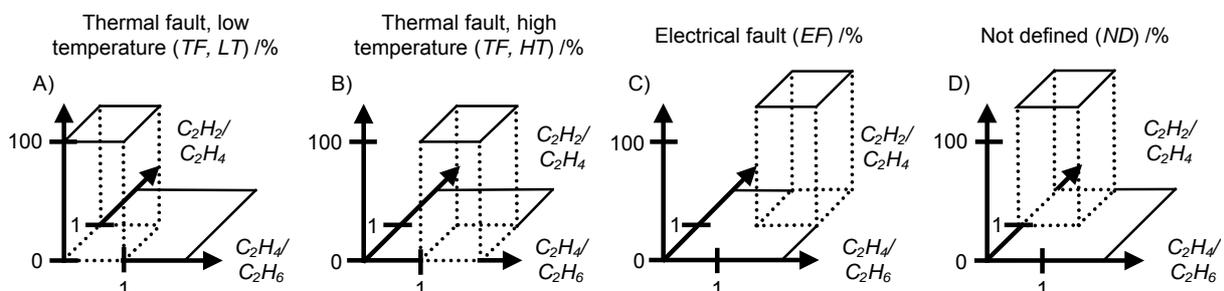


Fig. 1: Vier Klassifikatoren für vier Zustände. Der Eigenschaftsraum jedes Klassifikators ist durch vier Regeln auf den Zustandsraum abgebildet.  
Four classifiers for four conditions. The property space of each classifier is mapped to the condition space by the help of four rules.

## ▪ **Optimized DGA-based fault detection for power transformers by means of trainable fuzzy inference systems**

**Dipl.-Ing. Markus Fischer**

Increasing competition forces electric power companies (EPC) to regard expenses. As expenses are mainly caused by supplies, which are needed for conversion and transmission of electrical energy, EPC practise Plant Asset management (PAM) in order to minimize their expenses.

PAM can only be applied successfully, when the condition of each important or expensive supply is well known. Hence, one has to decide on supply's condition by classification. Classification can be performed by pattern recognition as already mentioned in last years' annual report. In this context, last years' annual report also shows that classifiers can be equally modelled by rule based fuzzy inference systems (FIS) or by statistically working radial basis function networks (RBF).

FIS and RBF utilize different sources of information for modelling. Thus, it seems to be usefull to apply them in a cooperative manner. With a view to cooperation, connecting FIS and RBF would be one possible solution. But it came apparent that instead of connecting FIS and RBF it is easier to extend FIS by RBF's training capabilities. The outcome of FIS' extension is a trainable fuzzy inference system (TFIS) that is based on rules and statistics. Hereinafter, TFIS are applied to optimize classifiers for DGA.

DGA already uses some conventional interpretation methods. These methods provide knowledge for rule-based processing by TFIS. Fig. 1 shows an example of rule-based modelled classifiers using knowledge that is provided by General Electric's interpretation method. Applying these classifiers, four conditions can be distinguished, namely "thermal fault, high temperature", "thermal fault, low temperature", "electrical fault" and "not defined".

- a)  $(C_2H_2/C_2H_4, C_2H_4/C_2H_6; TFLT, TFHT, EF, ND) = (0.1, 0.3; 1, 0, 0, 0)$
- b)  $(C_2H_2/C_2H_4, C_2H_4/C_2H_6; TFLT, TFHT, EF, ND) = (0.2, 0.4; 1, 0, 0, 0)$
- c)  $(C_2H_2/C_2H_4, C_2H_4/C_2H_6; TFLT, TFHT, EF, ND) = (0.9, 0.8; 0, 1, 0, 0)$
- d)  $(C_2H_2/C_2H_4, C_2H_4/C_2H_6; TFLT, TFHT, EF, ND) = (0.2, 0.7; 1, 0, 0, 0)$
- e)  $(C_2H_2/C_2H_4, C_2H_4/C_2H_6; TFLT, TFHT, EF, ND) = (0.6, 0.5; 1, 0, 0, 0)$

Fig. 2: Five training vectors. Training vector c) disagrees with TFIS' rules, training vector a), b) and d), e) agree with them.

Fünf Trainingsvektoren. Trainingsvektor c) widerspricht den Regeln des TFIS, die Trainingsvektoren a), b) und d), e) stimmen ihnen zu.

Like it is shown in Fig. 1, classifiers' property space is divided into four sections. Each section is mapped to the condition space by help of a single rule. In cases where the mapping of a rule is guessed to be not optimal, it is possible to optimize this rule by training.

Der Eigenschaftsraum der Klassifikatoren ist, wie ebenfalls aus Fig. 1 ersichtlich, in vier Sektoren unterteilt. Jeder dieser Sektoren wird durch jeweils eine Regel in den Zustandsraum abgebildet. Wenn eine Regel nicht optimal zwischen Eigenschafts- und Zustandsraum abbildet, besteht die Möglichkeit, sie zu trainieren. Grundsätzlich macht ein Training nur dann Sinn, wenn das Training potentiell in der Lage ist, die Regel zu verbessern. Die Erfüllung dieser Bedingung hängt einerseits von den Trainingsdaten und andererseits von der Trainingsmethode ab. Daher sind als Trainingsdaten nur verlässliche Messdaten heranzuziehen. Mehr Auswahl gibt es bei der Wahl der Trainingsmethode. Bei genauer Betrachtung zeigt sich aber, dass besonders mit dem empirischen Mittelwert gute Ergebnisse erzielt werden können.

Wie ist dies zu begründen? Am Beispiel von General Electric sind Trainingsdaten verifizierte sechs-dimensionale Messvektoren, wobei zwei Dimensionen für die Eigenschaft und vier Dimensionen für den Zustand reserviert sind (Fig. 3a). Ein Messdatum wird entsprechend seiner Eigenschaft in einen der vier Sektoren einsortiert. Betrachtet man anschließend die Messvektoren in einem Sektor, dann können diese als Stichprobe einer Grundgesamtheit verstanden werden. Die Zustandswerte „1“ und „0“ sind in diesem Kontext als Werte einer Zufallsvariablen  $X_i$  anzusehen. Der Erwartungswert der Grundgesamtheit beschreibt dann diejenige Wahrscheinlichkeit, mit der im Klassifizierungsfall ein Eigenschaftsvektor dem betrachteten Zustand zugeordnet wird. Da die Grundgesamtheit nicht bekannt ist, muss deren Erwartungswert mit Hilfe der Stichprobe geschätzt werden. Für die Schätzung eignet sich der empirische Mittelwert (Fig. 3b), da er asymptotisch erwartungstreu ist. Je größer der Stichprobenumfang, d.h. je mehr verifizierte Messdaten berücksichtigt werden, desto genauer ist die Schätzung des Erwartungswerts.

a)  $(C_2H_2/C_2H_4, C_2H_4/C_2H_6; TFLT, TFHT, EF, ND) = (0.1, 0.3; 1, 0, 0, 0)$

b) 
$$\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Fig. 3: a) Beispiel eines Trainingsvektor b) Der empirische Mittelwert  
a) Example of a training vector b) The empirical mean

Für das Training spielen schließlich nicht nur Messdaten eine Rolle, sondern auch das Vorwissen, das bereits in den Regeln des TFIS steckt. Daher müssen Regeln im Vorfeld hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit bewertet und entsprechend in äquivalente Messdaten umgerechnet werden. Hierbei hilft die Regelgewichtung und ein Umrechnungsfaktor, der festlegt, wie viele Trainingsdaten einer Regel entsprechen.

Abschließend sei am Beispiel von General Electric das Training demonstriert. Angenommen, verifizierte Messdaten, entsprechend Fig. 2, würden als Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Weiterhin wäre jede Regel mit „1“ gewichtet und der Umrechnungsfaktor wäre „5“. Dann hätte nach Fig. 4 das Training Auswirkungen auf die Klassifikatoren „thermal fault, low temperature“ und „thermal fault, high temperature“. Die Klassifikatoren „electrical fault“ und „not defined“ blieben aber unberührt, weil sie vom Standpunkt der Trainingsdaten bereits optimal sind.

In general, training of classifiers does only make sense when training is potentially able to improve classifier's rules. The fulfilment of this premise depends on both training data and training method. Thus, only reliable data is permitted to be used as training data. Choosing the training method, is less restrictive. Nevertheless, reviewing possible training methods shows that good results can be achieved by applying the method "empirical mean".

How can that be explained? Using the example of General Electric, measurement data is in fact a data vector which consists of a two-dimensional property vector and a four-dimensional condition vector (Fig. 3a). Data vectors have to be sorted into one of four sections according to their property part. Afterwards, if we look at the data vectors in a certain sector, we can take these data vectors as random sample of the universe. Logical values of the condition, namely "1" and "0", can be understood as values of a random variable  $X_i$ . The expectation of the universe is taken as the probability that describes how often a given property value is classified as a certain condition. Since the universe is unknown, its expectation has to be estimated by the use of the random sample. To do so, calculating the empirical mean of the random sample is suitable (Fig. 3b), because the empirical mean is asymptotically unbiased. The bigger the random sample size, i.e. the more verified random samples are taken into account, the more precise is the estimation of the expectation.

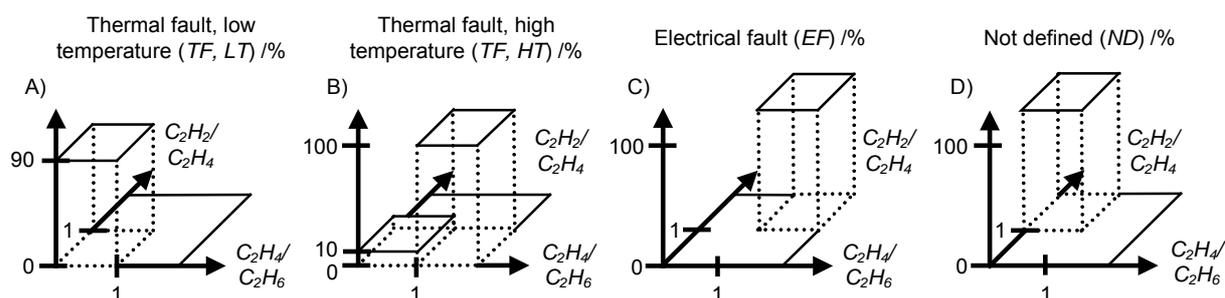


Fig. 4: Classifiers A) and B) are affected by training, but classifiers C) and D) are not, because they are optimal from the viewpoint of the training vectors.  
 Klassifikatoren A) und B) wurden durch das Training verändert.  
 Klassifikatoren C) und D) nicht, da beide vom Standpunkt der Trainingsvektoren bereits optimal sind.

Not only data vectors are important for training, but also knowledge already contained in TFIS' rules. Therefore, the reliability of each rule has to be estimated. According to the results, rules are translated into an equivalent amount of training vectors. In doing so, rule weights and a conversion factor are considered. The conversion factor defines how many training vectors are equivalent to a rule.

Finalizing the report, training will be shown using the example of General Electric. Assuming verified data vectors according to Fig. 2 are provided as training vectors and assuming each rule would be weighted with "1" and the conversion factor would be "5", then according to Fig. 4 training will affect classifiers "thermal fault, low temperature" and "thermal fault, high temperature". However, training will not affect classifiers "electrical fault" and "not defined", because they are already optimal from the viewpoint of the training vectors.

## ▪ **Entwicklung eines Verfahrens zur Zustandsdiagnose bei Leistungstransformatoren mit Hilfe einer frequenzabhängigen Übertragungsfunktion**

**Dipl.-Ing. Maximilian Heindl**

Gegenstand dieser Forschungstätigkeit sind Untersuchungen über die Charakterisierbarkeit und Quantifizierung der Veränderungen frequenzabhängiger Übertragungsfunktionen bei Leistungstransformatoren in Bezug auf verschiedene Fehlerarten.

### **Frequency Response Analysis (FRA) als Diagnosemethode**

Das elektrische Übertragungsverhalten von Leistungstransformatoren im Frequenzbereich bis ca. 2 MHz wird maßgeblich durch die kapazitiven Verhältnisse von Wicklungen, Kern und Kessel zueinander bestimmt. Die frequenzabhängige Übertragungsfunktion bildet diese geometrischen Gegebenheiten gleich einem Fingerabdruck ab. Verändern sich die mechanischen Konstellationen im Innern des Transformators, so hat dies Einfluss auf das elektrische Verhalten und damit auf die Übertragungsfunktion. Untersuchungen in der Vergangenheit weisen der FRA als Diagnosemethode ein hohes Maß an Sensitivität aus, um geometrische und elektrische Veränderungen des Aktivteils eines Leistungstransformators zu detektieren. Die Veränderungen sind oftmals Folge elektrischer Fehler wie Kurzschlüsse und können je nach Schwere den Weiterbetrieb des Transformators verbieten, erhöhen mindestens jedoch das Ausfallrisiko.

Auf Erfahrungswerten basierend können folgende Fehlerarten durch die FRA detektiert werden:

- Windungskurzschluss
- Axiale Deformation
- Radiale Deformation
- Wicklungsverschiebungen
- Kernbewegungen

Fig. 1 zeigt den durch einen Kurzschluss in einem 110-kV-Netz verursachten Schaden an Phase U eines 220-kV-/110-kV-Transformators.

Während die Schwerpunkte der bisherigen Forschung im Bereich der FRA meist auf Messtechnik und Simulation des elektrischen Verhaltens gelegen haben, soll in dieser Arbeit die Interpretation von veränderten Übertragungsfunktionen in Verbindung mit verschiedenen Fehlerarten untersucht werden.

- **Development of a Method to Assess Power Transformers on the Basis of Frequency Dependent Transfer Functions**

Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

The purpose of this research are investigations about the problem of characterising and quantifying changes in the frequency dependent transfer functions of power transformers in relation with different kinds of defects.

### **Frequency Response Analysis (FRA) as a method for condition monitoring**

The electrical transfer behaviour of power transformers in the frequency range up to approx. 2 MHz is mainly determined by the capacitive relations amongst windings, core and transformer tank. The frequency dependent complex transfer function  $TF(f)$  represents and displays the geometric structural condition like a finger print. If the mechanical constellations inside the transformer change, the electrical behaviour is affected immediately and the transfer function changes, too. Investigations in the past revealed the FRA as being a highly sensitive method to diagnose electrical and mechanical modifications of a power transformer's active part. Changes are very often a result of electrical failures such as short circuits and may, depending on their severity, deny further operation of the transformer respectively increase the risk of outage.



Fig. 1: Kurzschlusschaden (Radiale Deformation) an 220-kV-/110-kV-Wicklung  
Short circuit damage (radial deformation) at 220kV/110kV-winding

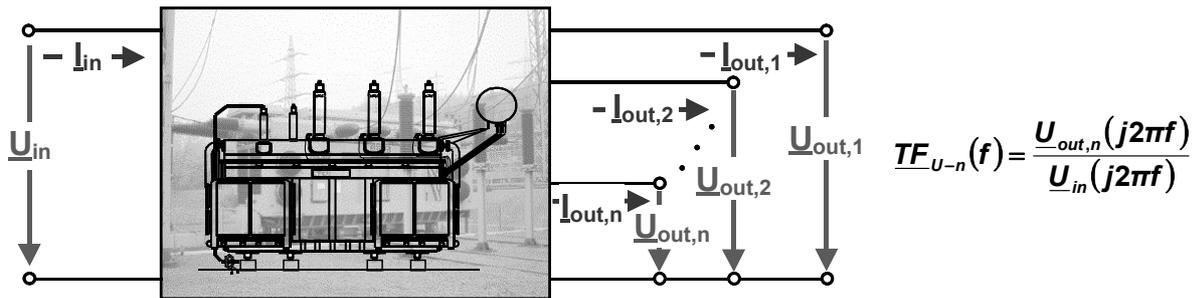


Fig. 2: Transformator als lineares Vieltor-Netzwerk  
 Transformer as a linear network with multiple inputs and outputs

Das Übertragungsverhalten von Transformatoren kann durch ein lineares elektrisches Netzwerk beschrieben werden. Jede messbare Übertragungsfunktion entspricht einer Kombination von Signalen am Eingangs- und Ausgangstor des Netzwerks, dargestellt in Fig. 2.

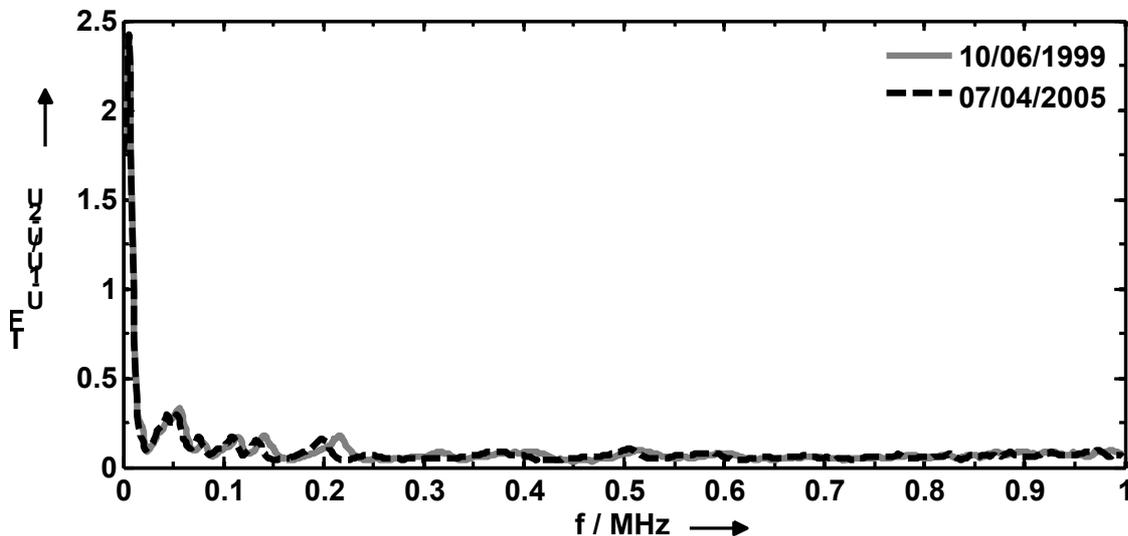


Fig. 3: Transferfunktionen (TF) der übertragenen Spannung vor und nach Kurzschlusschaden  
 Transfer functions of transferred voltage before and after short circuit damage

Interessierende Fehlerarten wie Deformationen wirken sich in der Übertragungsfunktion meist in Form von Verschiebung, Erzeugung oder Verschwinden von Resonanzstellen aus. Fig. 3 zeigt beispielhaft die zum in Fig. 1 gezeigten Schadensfall gehörende Transferfunktion der übertragenen Spannung von Phase U.

Erster Ansatzpunkt für den objektiven Vergleich von Übertragungsfunktionen soll eine Approximation von komplexen Transferfunktionen durch gebrochenrationale Polynome sein. Im ersten Schritt verspricht dieses Verfahren eine Datenreduktion, denn Veränderungen des Resonanzverhaltens bei Transferfunktionen können somit auf Abweichungen im Pol-Nullstellen-Diagramm zurückgeführt werden. Eine weitergehende Analyse soll unter Hinzunahme simulativ gewonnener Ergebnisse prüfen, ob eindeutige Zusammenhänge zwischen verschiedenen Fehlerarten und Veränderungen der Polstellenmuster bestehen (Beispiel eines Polstellen-Diagramms: siehe Fig. 4).

Based on experience, the following fault types can be detected by means of FRA:

- Shorted turns
- Axial deformation
- Radial deformation
- Winding displacement
- Core movement

Fig. 1 shows a winding damage on phase U of a 220kV/110kV power transformer caused by a short circuit within the 110 kV grid.

While the emphasis of research in the field of FRA was lying mostly on measurement techniques and simulation in the past, this work will be about the interpretation of altered transfer functions in relation with different kinds of damage.

The transfer behaviour of power transformers can be described by a linear electrical network. Each measurable transfer function corresponds to a pair of input and output terminals of the network as illustrated in Fig 2.

Damage types of interest, e.g. deformations, have an effect on transfer functions like shifting, creating or disappearing of resonances. As an example, Fig. 3 shows the transfer function of the transferred voltage of transformer phase U corresponding to the damage case shown in Fig. 1.

A first approach to an objective comparison of transfer functions is an approximation by means of complex rational polynomials. In the first step, this method promises data reduction, because changes of resonances of transfer functions can be reduced to variances in the pole-zero diagram. Further analysis will, supported by network simulation results, explore if there are one-to-one correspondences between different fault types and changes of patterns in the pole diagram (see Fig 4 as an example).

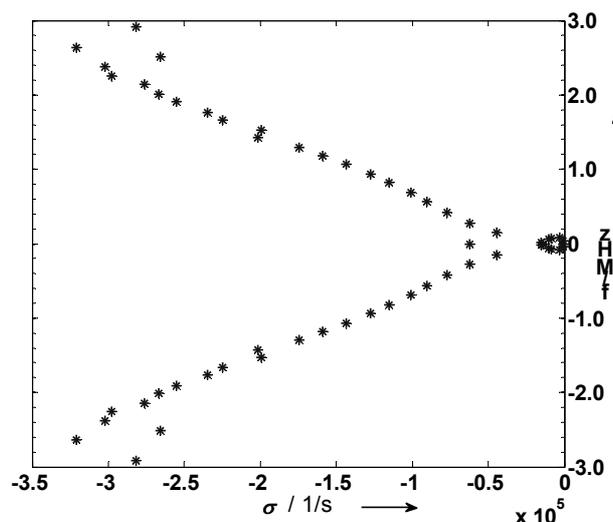


Fig. 4: Polstellendiagramm einer frequenzabhängigen Transferfunktion  
Pole diagram of a frequency dependent transfer function

## ▪ Digitales Messgerät zur normgerechten Messung von Gleich- und Wechselspannungen

Dipl.-Ing. Jens Hohloch

In der Hochspannungstechnik müssen bei der Durchführung von Prüfungen und Versuchen hohe Gleich- und Wechselspannungen ständig gemessen werden. In der Praxis werden häufig Hochspannungsteiler eingesetzt, die ein dem ursprünglichen Hochspannungssignal proportionales Niederspannungssignal zur Verfügung stellen. Dieses Niederspannungssignal kann von elektronischen Geräten weiter verarbeitet und ausgewertet werden.

In Fig. 1 ist ein typischer Hochspannungsprüfaufbau dargestellt, bei dem die vom Hochspannungstransformator bereitgestellte und am Prüfling anliegende Spannung über einen kapazitiven Spannungsteiler gemessen werden soll.

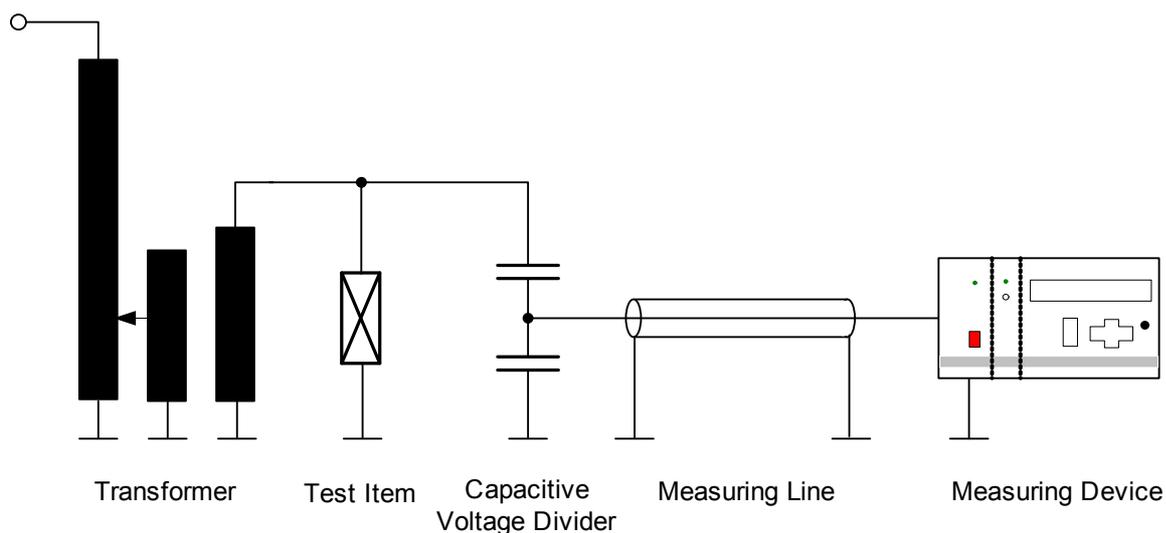


Fig. 1: Prüfaufbau in der Hochspannungstechnik  
Test setup in high voltage technology

Bei Untersuchungen der elektrischen Festigkeit von Hochspannungsisolierungen und Betriebsmitteln ist vor allem der Scheitelwert der Prüfspannung von Interesse. Die Höhe einer Prüfwechselspannung wird deshalb nach VDE in einer vom Scheitelwert abgeleiteten, berechneten Größe ( $\hat{u}/\sqrt{2}$ ) definiert. Bei einer rein sinusförmigen Wechselspannung entspricht dieser Wert dem Effektivwert (RMS) der Spannung. Als Charakteristik einer Prüfwechselspannung wird von der Norm neben einer Frequenz im Bereich von 40 bis 62 Hz die zulässige Abweichung von der Sinusform angegeben.

- **Digital Measuring System for the Measurement of DC and AC voltages according to the Standards**

**Dipl.-Ing. Jens Hohloch**

During high voltage testing high DC- and AC-voltages have to be continuously measured when tests or experiments are accomplished. In practice often high voltage dividers are used which have a low voltage signal at the output proportional to the original voltage. This low voltage signal can be processed and evaluated by electronic measuring instruments.

Fig. 1 shows a typical high voltage test set-up, which consists of a regulation transformer and a high voltage divider as well as the device under test. The high voltage is measured by a capacitive divider and an electronic measurement system at the low-voltage output.

During investigations of the electrical strength of high voltage apparatus mainly the peak value of the testing voltage is of interest. The height of an AC test voltage is therefore defined according to VDE in a value derived from peak value ( $\hat{u}/\sqrt{2}$ ). During a purely sinusoidal alternating voltage this value corresponds to the root mean square value of voltage. As characteristic of an AC test voltage the standard specifies among a frequency within the range of 40 to 62 Hz, the permitted variation from the sine form.

The aim of the work is the development and the assembly of a digital measuring system which meets the requirements of the measuring environment, the measurement setup with a high voltage divider and the definitions made in the relevant IEC standards.

The measuring instrument is designed as an embedded system with central microprocessor for signal processing and functional control. The functional diagram of the complete system is shown in Fig. 2.

The protective circuit makes the analog input resistant against transient overvoltages. In the analog circuit the low voltage signal coming from the high voltage divider is attenuated by a two-stage, capacitive-compensated divider. This signal with reduced level is processed using operational amplifiers. It is amplified with specific factors of each measuring range, filtered (Anti Aliasing Filter) and digitized by a 12-bit AD-converter. The upper limit of the sampling rate is located at 28,6 kHz. The evaluation of the digital signal is done by the microcontroller which works with a clock frequency of 14,7456 MHz.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und der Aufbau eines digitalen Messgerätes, das den Anforderungen, die aus der Messumgebung, der Messanordnung mit Hochspannungsteiler und den in den Normen IEC bzw. VDE getroffenen Festlegungen resultieren, entspricht.

Das Messgerät wird als embedded system realisiert. Dies bedeutet, dass ein zentraler 8-Bit-Mikrocontroller die Ablaufsteuerung der Messungen und die Bedienführung vollständig übernimmt.

Das vom Hochspannungsteiler kommende Niederspannungssignal (max +/- 600 V) wird im analogen Schaltungsteil zunächst über einen zweistufigen, kapazitiv-kompensierten Teiler abgeschwächt. Das in seinem Pegel reduzierte Signal kann von Operationsverstärkern weiterverarbeitet werden. Es wird mit einem Messbereichs-spezifischen Faktor verstärkt, gefiltert (Anti-Aliasing-Filter) und mit einem 12-Bit-AD-Umsetzer digitalisiert. Die maximale Abtastrate liegt bei 28,6 kHz. Die Auswertung des Digitalsignals erfolgt vom Mikrocontroller, der mit einer Taktfrequenz von 14,7456 MHz betrieben wird.

Zur normgerechten Messung von Prüfwechselfspannungen werden Funktionen zur Messung von Spitzenwerten, Spitze-Spitze-Werten, einfachen Effektivwerten (Rechengröße  $\hat{u}/\sqrt{2}$ ), echten Effektivwerten und zur Frequenzmessung implementiert. Zur Bestimmung des Oberschwingungsgehalts können außerdem die Fourierkoeffizienten berechnet werden. Bei Gleichspannungen können der arithmetische Mittelwert und die Welligkeit bzw. Überlagerungsspannungen bestimmt werden. Ein passender Messbereich wird im Messbetrieb automatisch gewählt.

Die Messergebnisse werden an einem großen LC-Display angezeigt, zur Anbindung an einen PC oder ein externes Display steht eine optische, potentialfreie Schnittstelle zur Verfügung.

Die Messelektronik des mikrocontrollerbasierten Geräts ist zusammen mit einem Netzteil und einem Akkumodul in einem geschirmten Einschubgehäuse untergebracht. Die Bedienung des Messgerätes, wie z.B. die Einstellung des Übersetzungsverhältnisses des Hochspannungsteilers, erfolgt über eine Tastatur mit sechs Tasten und einem Inkrementalgeber.

Das Messsystem weist gutes EMV-Verhalten auf, der Messfehler ist stets kleiner als 0,2 %, der Signal-Rausch-Abstand beträgt, bezogen auf den Spitze-Spitze-Wert des Nutzsignals, ungefähr 70 dB.

Functions for the measurement of peak values, peak-to-peak values, simple root-mean-square values, true root-mean-square values and frequency are implemented in order to make measurements of AC test voltages. Furthermore, for the determination of the harmonic content of the voltage signal its Fourier coefficients can be calculated.

With DC voltages the average value and the ripple factors can be determined. In all operation modes the measurement range is selected automatically.

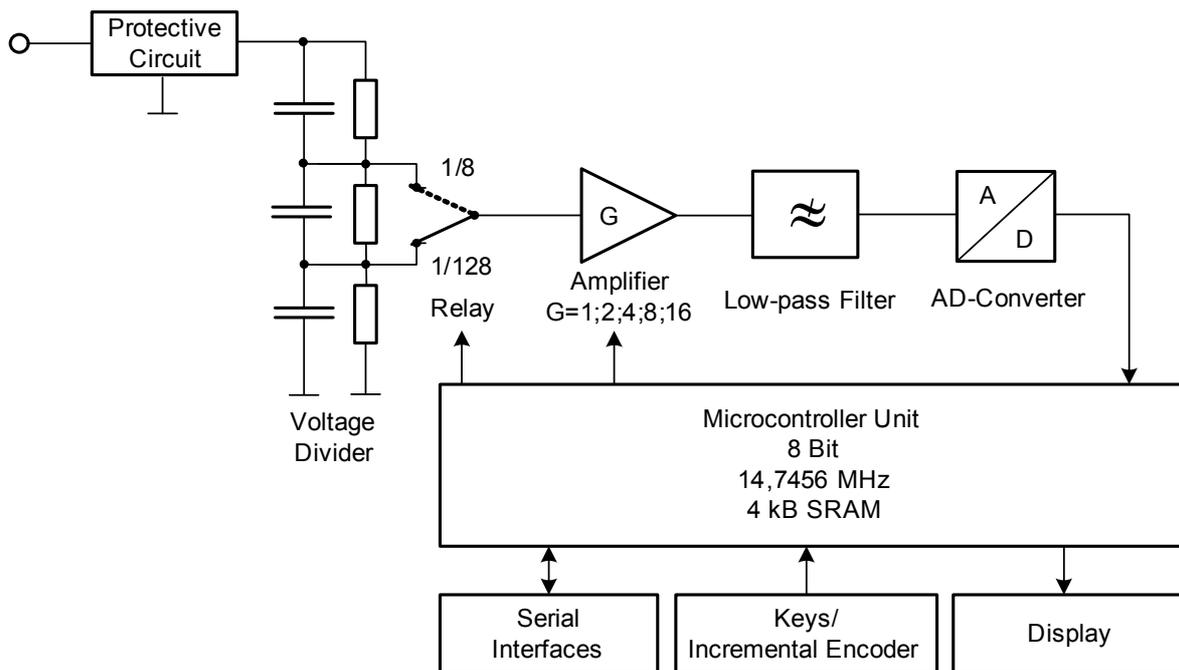


Fig. 2: Prinzipschaltbild des Messgerätes  
Principal diagram of the measurement device

The results of the measurement are displayed on a big LCD-Panel. In order to built up a connection to a PC or an external display, an optical, potential-free interface is implemented.

The electronic measurement unit with a power supply and a rechargeable battery pack are placed together in a shielded metal enclosure.

The menu-driven operation and control of the instrument, for example the setup of the divider ratio of a high voltage divider, is done via a six botton keyboard and an incremental encoder.

The measuring system has a good EMC performance and the measurement uncertainty is always less than 0,2 %. The signal-to-noise-ratio related to the peak-to-peak value of the input signal is about 70 dB.

## ▪ **Detektion stromschwacher Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen**

**Dipl.-Ing. Peter Müller**

Der Systemschutz ist ein integraler Bestandteil jedes Energieversorgungsnetzes. In der Hoch- und Mittelspannungstechnik ist die Störungen vorbeugende Diagnose deshalb ein weites Feld für Wissenschaft und Forschung. Durch den hohen Sachwert von Hochspannungstransformatoren und Schaltanlagen stehen auch ausreichend Mittel zu deren Schutz zur Verfügung. Niederspannungsschaltanlagen hingegen haben einen vergleichsweise geringen Sachwert und rechtfertigen daher auch nur einen vergleichsweise kostengünstigen Störungsschutz. Der Schutz von Schaltanlagen beschränkt sich in den allermeisten Fällen auf Leitungsschalter und Schmelzsicherungen.

Durch immer höhere Ansprüche an die Verfügbarkeit, auch von Niederspannungsnetzen, ist der Bedarf an aktiven Störungsschutzkonzepten gestiegen. Es gilt, insbesondere Störlichtbögen in der Schaltanlage rechtzeitig zu erkennen, da Sammelschienen in Niederspannungsschaltanlagen meist nicht isoliert sind und die auftretenden Stromstärken recht hoch sein können. Eine Möglichkeit, interne Lichtbögen zu detektieren, ist die Strommessung im Leistungsschalter der Schaltanlage. Die hierfür nötigen Stromwandler sind bereits im Schalter vorhanden.

Störlichtbögen in Niederspannungssystemen haben einige besondere Eigenschaften, die sie deutlich von Hochspannungslichtbögen unterscheiden. Hierbei sind vor allem zu nennen:

- Aufgrund der geringen effektiven Spannung von 230 V bzw. 400 V ist ein Durchschlag in Luft in der normalen Konfiguration durch die anzutreffenden Abstände in der Schaltanlage nicht möglich. Ein Lichtbogen zwischen zwei Phasen oder zwischen Phase und Erde ist nur durch einen überbrückenden Gegenstand (vgl. Fig. 1) oder durch anderweitige Verminderung der Isolationsfestigkeit, beispielsweise durch verschmutzte Isolatoren, möglich.
- Neben parallelen Lichtbögen, wie oben beschrieben, gibt es auch serielle Lichtbögen, die durch das langsame Lösen von Schraub- oder Nietverbindungen in einer stromführenden Sammelschiene entstehen können (vgl. Fig. 2). Diese Art von Lichtbögen entsteht nur langsam und erzeugt durch fortschreitende Erosion der Kontaktstelle einen immer größer werdenden Luftspalt, welcher letztendlich von einem Lichtbogen überbrückt wird.
- Durch die geringe treibende Spannung haben Lichtbögen bei Niederspannung einen verlangsamten Stromanstieg beim Durchschlag. Die auftretenden Frequenzen liegen nicht wie in der Hochspannungstechnik (z. B. in der TE-Diagnostik) im MHz-Bereich, sondern weit darunter.

## ▪ Detection of low current arc fault in 400 V switchgear

Dipl.-Ing. Peter Müller

System protection is an essential part of every energy distribution grid. In high and middle voltage level pre-detection of faults is a wide area for research and science. Because of the high asset value of high voltage transformers and switchgears there are enough resources for protection available. However, low voltage switchgears have a relatively low asset value and therefore justify only a comparatively cheap solution. So, protection is mostly limited to circuit breakers and fuses.

Because of increasing requirements on availability also for low voltage distribution networks the demand on active protection concepts is growing. It is essential to detect arc faults in the switchgear as soon as possible, because bus bars are not isolated and the flowing current is quite high. Measuring the current in the circuit breaker of the switch gear is one possibility to detect internal arcing. The requisite current transformers are already available in the switch.

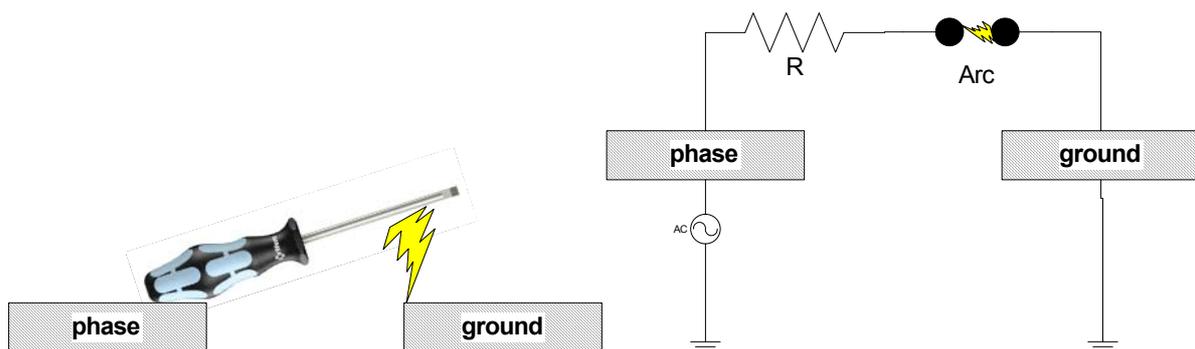


Fig. 1: Fehlerquelle (links) und resultierendes Ersatzschaltbild (rechts)  
Possible source of a fault (left) and equivalent test circuit (right)

Arcs in low voltage systems have some special properties, which are clearly different from arcing in high voltage systems. These include mainly:

- Because of the low effective voltage of 230 V or 400 V a breakdown in air is not possible in the normal configuration encountered by the spacing in the switchgear. An arc between two phases or between phase and ground is only possible through bridging with an external subject (e.g. screwdriver) between the phases (see Fig. 1) or by reduction of the insulation resistance, for example, through polluted insulators.
- Besides parallels arcs as described above there are also serial arcs which may arise by the slow loosening of screw or rivet connections in an electrical bus bar (see Fig. 2). These kinds of arcs arise slowly and create an ever-growing air gap by gradual erosion of the contact area which eventually will be bridged by an arc.

Da die geringe Spannung ein selbständiges Durchzünden der Isolations-strecke nahezu unmöglich macht, muss zum Wiedorzünden des Lichtbogens ein ausreichend heißer Plasmakanal der vorangegangenen Zündung vorhanden sein.

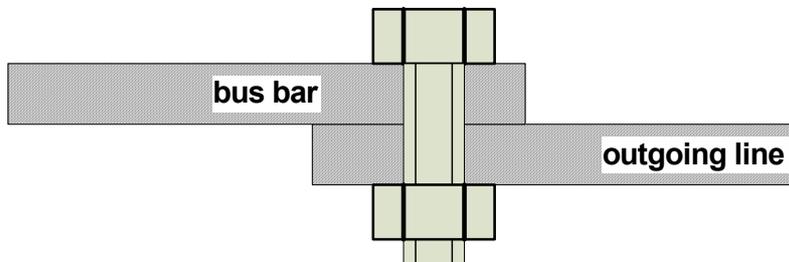


Fig. 2: Lösende Schraubverbindungen als mögliche Fehlerquelle  
Loosening screw fitting as a possible source of error

Diese und weitere Eigenschaften kennzeichnen den Störlichtbogen bei Niederspannung. Sie können auch zur Detektion eines Lichtbogens herangezogen werden. Durch Messung der durch die Anlage fließenden Ströme ist es möglich, eine Auswertung im Zeit- und Frequenzbereich durchzuführen.

Im Zeitbereich lässt sich insbesondere die steile erste Anstiegsflanke des über den Lichtbogen fließenden Stromes detektieren. Durch eine Filterung des gemessenen Stromes mittels Bandpass bleiben nur noch die steilen Anstiegsflanken des Signals übrig. Da die Stromanstiegsflanken bei einem kontinuierlich brennenden Lichtbogen nach jedem Stromnulldurchgang auftreten, entsteht ein unnatürliches, sich wiederholendes Signal, welches auf einen Lichtbogen hindeutet.

Im Frequenzbereich steht die ganze Palette mathematischer Funktionen der Signalverarbeitung zur Verfügung, wie zum Beispiel Wavelet-Transformation oder auch die schnelle Fourier-Transformation (FFT). Durch die Frequenzanalyse lassen sich besonders Unterschiede im Frequenzspektrum des Stromes im ungestörten Betrieb und beim Auftreten eines Lichtbogens feststellen.

Derzeit werden Untersuchungen angestellt, die die Unterschiede im Frequenzspektrum des gemessenen Stromes in einer Schaltanlage bei gestörtem und ungestörtem Betrieb heraus arbeiten. Durch Vergleich der Spektren soll eine Datenbank erstellt werden, welche Frequenzanteile in einem ungestörten Niederspannungsnetz auftreten, die nur durch einen Lichtbogen zu erklären sind. Dies soll durch vielfache Messung in verschiedenen Schaltanlagen, beispielsweise im Netz der Universität, belegt werden. Zudem laufen Untersuchungen, welche Kombination von Algorithmen einen Lichtbogen am zuverlässigsten erkennen lassen.

- Due to the low driving voltage, arcing at low-voltage electricity has a lower current rise-time during the breakdown. The frequency content is not in the range of MHz, unlike in high-voltage industry (e.g. in PD-diagnostics), but far below.
- Since the low voltage level makes an independent breakdown of the insulation gap nearly impossible, a sufficiently hot plasma channel of the previous ignition is necessary for re-ignition the arc.

These and other features characterize the arc fault in low voltage. They can also be used to detect an arc. By measuring the current in the switchgear an analysis in time and frequency domain is possible.

In time domain particularly the steep first rise of the current flowing through the arc is detectable. By filtering the measured current using a band-pass only the steep slope of the signal remains. Because of the continuously burning arc the slopes occur after each current zero crossing. They generate a non-natural, repeating signal, which suggests an arc.

In the frequency domain the whole range of mathematical functions for signal processing is available, e.g. wavelet transformation or the Fast Fourier Transformation (FFT). Using the frequency analysis particularly the differences in the spectrum of the current during an undisturbed operation and with an arc may be determined.

Investigations will be performed to compare the differences in the frequency spectrum of the current measured in a switchyard/gear in disturbed and undisturbed operations. By comparing the spectra a database shall be created which enables the comparison of signal frequencies in an undisturbed low-voltage network with the spectra caused by an arc. This will be achieved and documented doing multiple measurements in various switchgears, for example, in the university owned network. In addition to ongoing investigations combinations of algorithms are being evaluated to determine the highest possible reliability in detecting arc faults.

## ▪ Mehrstellen-Teilentladungsmessungen an Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer

Defekte in der Isolation eines Transformators können Teilentladungen (TE) hervorrufen, die schrittweise die Isolierfestigkeit des Materials verschlechtern und somit einen elektrischen Durchschlag verursachen können. Daher ist eine frühe Feststellung von Teilentladungen eines Betriebsmittels von Bedeutung. TE-Messungen enthalten ebenfalls Informationen über den Alterungszustand eines Transformators und lassen Rückschlüsse über dessen Lebensdauer zu. Spezielle phasen-aufgelöste Muster (fingerprint – Fig. 1) helfen bei der Identifikation von Fehlertypen und ermöglichen eine genauere Lokalisierung des TE-Fehlers.

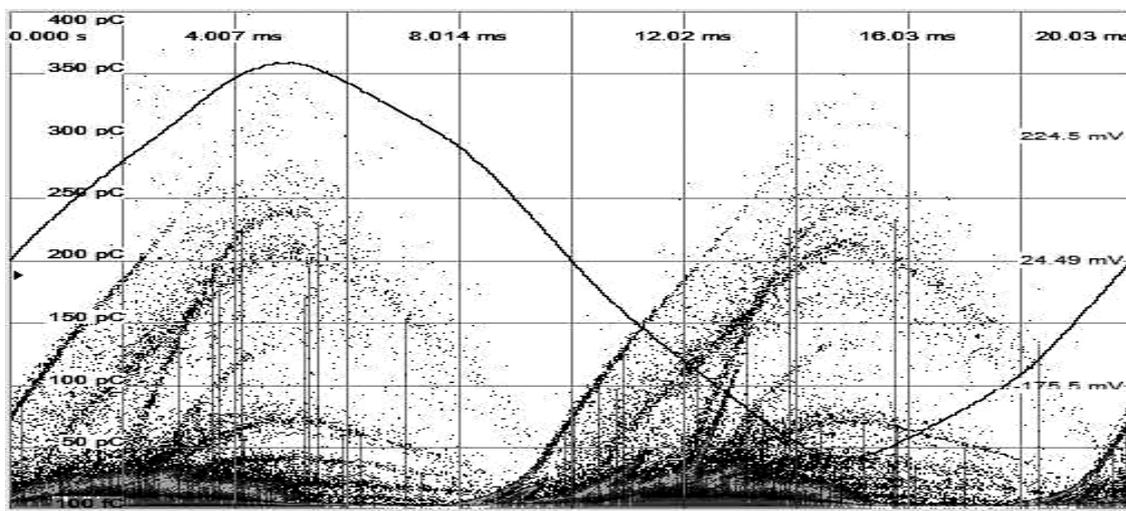


Fig. 1: Beispiel eines PRPD (Phase Resolved Partial Discharge)-Musters  
Example of a PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) Pattern

Aufgrund der vorhandenen Kopplungen der drei Phasen in einem Transformator können einzelne Teilentladungsimpulse einer Phase als Spannungssignal in allen Phasen gemessen werden. Dieses Phänomen nennt man *cross-talk*, und es macht die Identifikation der TE schwierig. Die Entwicklung der mehrstelligen TE-Messung stellt einen Ansatz dar, um externe Störungen aus den Signalen zu filtern und darüber hinaus zwischen mehreren Teilentladungsquellen innerhalb eines Musters unterscheiden zu können. Um Mehrstellenteilentladungsmessungen durchzuführen, benötigt man mindestens drei Koppelkapazitäten, drei Ankoppelvierpole und drei Teilentladungsmessgeräte. Der Messaufbau zur elektrischen Teilentladungsmessung nach IEC 60270 ist bei Hochspannungslaboren in alltäglicher Verwendung. Entladungen in Lufteinschlüssen unter Öl können Anstiegszeiten im Bereich von wenigen Nanosekunden aufweisen. Die konventionelle TE-Messung nach IEC 60270 kann vor Ort in einer Schaltanlage aufgrund eines hohen Interferenzpegels nicht empfindlich genug sein. Die IEC 60270 erwähnt Ultrabreitbandgeräte für die Detektion von Teilentladungen, mit denen man jegliche Entladungen ermitteln kann.

## ▪ Multi-Terminal Partial Discharge Measurements on Power Transformers

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer

Defects in transformer insulation cause partial discharges (PD), which can progressively degrade the insulating material and can possibly lead to electrical breakdown. Therefore, an early detection of partial discharges is important. PD measurements can also provide information about the ageing condition of transformers and thus enable conclusions about their lifetime. Specific phase-related representations (fingerprints – Fig. 1) may assist to identify the fault type and a more precise localization of the fault. Due to the coupling of the three phases inside a transformer, single partial discharge pulses in one certain phase can be measured as voltage signals in all phases. This phenomenon is called cross-talk and it makes the identification of PD difficult. The evaluation of multi-terminal PD measurements establishes a straight forward approach to remove external disturbances and, furthermore, to clearly distinguish between multiple PD sources. Multi-terminal PD measurement use at least three coupling capacitors, three measurement impedances and three PD instruments. The basic PD measurement circuit is in common use in high voltage labs according to IEC 60270.

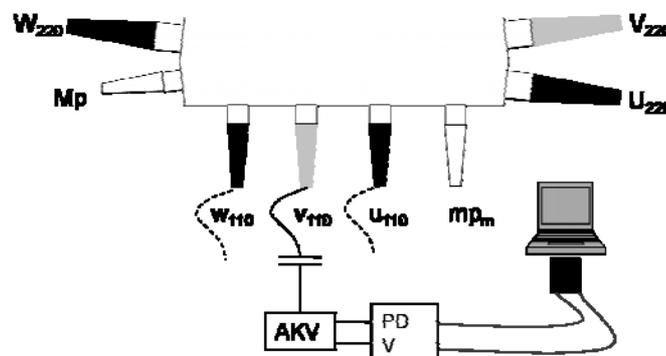


Fig. 2: IEC 60270 TE Messkreis mit Koppelkapazität und Ankoppelvierpol in Reihe  
IEC 60270 PD circuit with coupling capacitor in series with quadrupole

Discharges in small voids may have rise times in the range of few nanoseconds. The conventional PD measurement according to IEC 60270 is not sensitive enough in some cases because of the high interference level in field. The conventional multi-terminal measurements are performed with a high frequency band to identify small discharges.

The PD pattern of a multi-terminal measurement is illustrated in a star diagram (addition of the amplitude vectors of the three phases with a phase shift of 120 degrees – Fig. 3). Assuming that each individual PD fault source leads to a unique cluster, each cluster represents one specific fault location within the transformer. External disturbances or noise with similar amplitudes lead to clusters located next to the point of origin.

Die TE-Muster mehrstelliger Messungen werden in einem Sterndiagramm dargestellt (Addition der Amplitudenvektoren aller drei Phasen mit einer Phasenverschiebung von 120 Grad – Fig. 3). Angenommen, dass jeder TE-Fehler individuell zu einem einzelnen Cluster führt, stellt jedes Cluster einen speziellen Fehlerort im Transformator dar. Äußere Störer oder Rauschen mit ähnlicher Amplitude bilden im Sterndiagramm ein Cluster in der Nähe des Ursprungs.

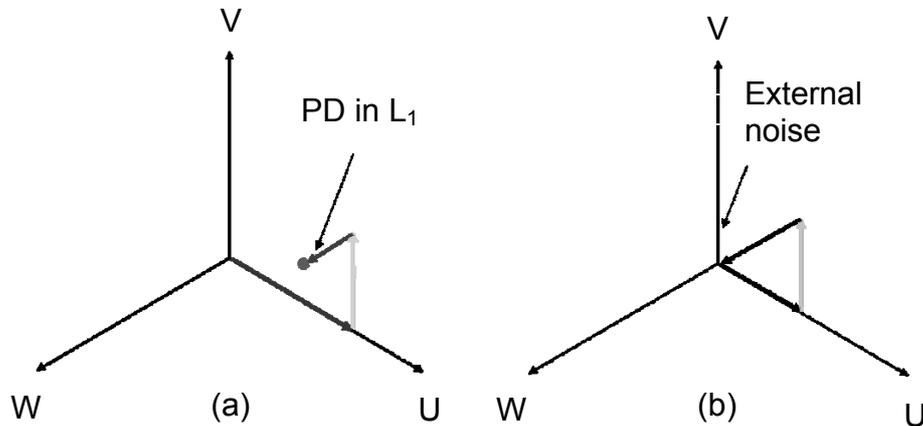


Fig. 3: TE-Fehler im Sterndiagramm: intern (a), extern (b)  
PD fault in star diagram: internal (a), external (b)

Bei den Messungen vor Ort an einem 110/220-kV-Leistungstransformator, der aus dem Betrieb genommen wurde, lag das Augenmerk auf den PRPD-Mustern. Das Sterndiagramm wird zukünftig mit Hilfe einer Matlab-Software aus den gewonnenen Daten ermittelt. Die Messungen wurden an allen drei Phasen der 110-kV-Ebene gleichzeitig durchgeführt (siehe Fig. 2). Für die Messung standen drei Koppelkapazitäten von 100 pF/100 kV (AC) zur Verfügung. Die Messung ergab Teilentladungsfehler an den Phasen v und w (Fig. 4). An Phase w ist das typische Muster einer Blase (void) zu erkennen, und an Phase v sind mindestens zwei Fehler zu sehen. Einer der Fehler stellt eine Oberflächenentladung und der andere eine Blase dar. Die Phase u weist außer dem Störpegel keine Teilentladungen auf. Diese Muster konnten ebenfalls auf der 220-kV-Ebene gemessen werden. Die Koppelkapazitäten für die Messungen der 110-kV-Ebene konnten nicht für die 220 kV verwendet werden, da sie nicht für diese Spannungen ausgelegt sind. Daher fungierten die isolierten Durchführungen als Koppelkapazitäten. Diese Messungen stellten sich jedoch als nicht aussagekräftig heraus, da alte Transformatoren keine richtigen Messanschlüsse aufweisen. Somit lassen sich nur teilweise Schlüsse auf die Überkopplungen der einzelnen Phasen dieses Transformators ziehen.

Weitere Untersuchungen unterschiedlicher TE-Quellen werden im Hochspannungslabor mit einem dreiphasigen Messaufbau durchgeführt. Die Überkopplungen der drei Phasen und auch die Mustererkennung sind die weiteren Forschungsgebiete des nächsten Jahres.

For onsite measurements of a power transformer 110/220 kV (out of service) the attention was directed towards the PRPD patterns. In the future the data obtained will be used to evaluate the star diagram with the help of Matlab.



The measurements were performed on all three phases of 110 kV levels simultaneously (see Fig. 2). For these measurements three coupling capacitors of 100 pF/100 kV (AC) were available. The measurements showed partial discharge faults on phase v and w. Phase w showed the typical pattern of a void and phase v at least two partial discharge sources. One of these faults is a surface discharge and the other a void.

Except for the level of the external noise the measurement device couldn't detect any PD on phase u.

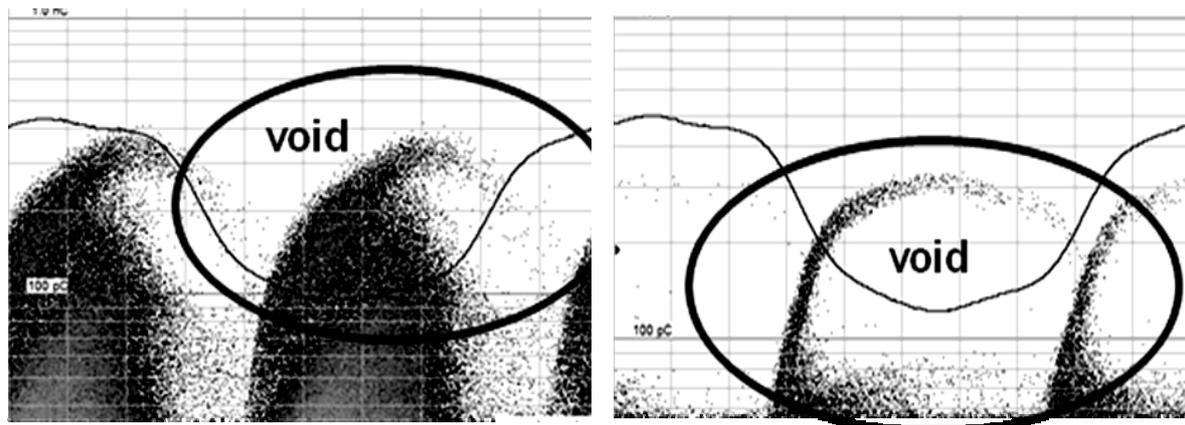


Fig. 4: TE-Fehler des Transformators: Phase v (links) und Phase w (rechts)  
PD fault of the transformer: phase v (left) and phase w (right)

The measurements on the 220 kV voltage level replicated these patterns shown in Fig. 4. The capacitors used for the measurements of the 110 kV level couldn't be applied to the 220 kV side because they aren't designed for these voltages. In this case the 220 kV bushings were used as coupling capacitors. However, these measurements weren't as meaningful as the results of the 110 kV level, because measurement ports do not exist on bushings of old transformers. Though conclusions can be only drawn partially about the coupling between the windings of each phase of this transformer.

Further investigations will be performed with a three-phase measurement setup and different PD sources in the high-voltage laboratory. The topics of further researches are the coupling between three phases and the recognition of pattern.

## ▪ Charakterisierung von hochfrequenten Störquellen zur Auslegung von Leitungsfiltern

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Aufgrund der steigenden Anzahl elektronischer Komponenten im modernen Kraftfahrzeug ist es unerlässlich, dass die Störemission der einzelnen Geräte definierte Grenzwerte nicht überschreitet. Besonders leitungsgebundene Störungen, die sich über den Kabelbaum ausbreiten, müssen für das reibungslose Zusammenspiel der Elemente unterdrückt werden. Mit dem Einsatz von passiven Filterelementen können leitungsgebundene Störungen in vielen Fällen unterdrückt werden. Allerdings gestaltet sich die Auswahl der Filterelemente als zeit- und somit kostenintensive Angelegenheit. Nicht selten sind viele trial- and error-Versuche notwendig, bis das passende Filter gefunden wurde. Dies ergibt sich aus der Abhängigkeit der Filterdämpfung als Funktion der Eingangsimpedanz der Applikation (DUT, device under test). Nur falls die Impedanzverhältnisse bekannt sind, kann eine Aussage über die erzielte Dämpfung eines Filters gemacht werden. Das Ziel ist es somit, das Verhalten einer Störquelle (DUT) über der Frequenz zu beschreiben.

Entsprechend dem Theorem von Thevenin ist es möglich, jedes beliebige Netzwerk über eine passive Impedanzmatrix sowie zusätzlichen Spannungsquellen an jedem Netzwerkport zu beschreiben.

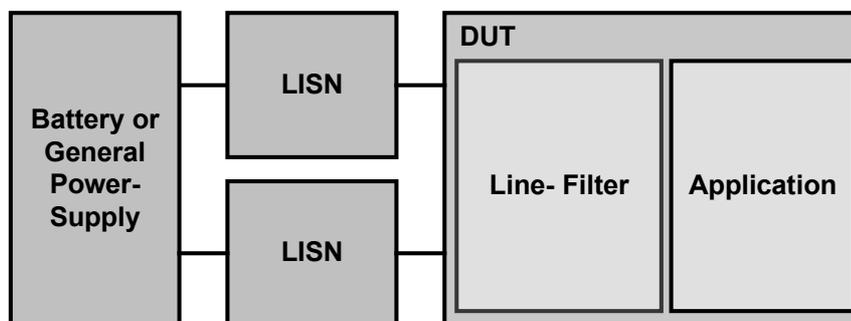


Fig. 1: Messaufbau zur Bestimmung der leitungsgebundenen Störspannungen  
Measurement setup to determine conducted emissions

Fig. 1 zeigt den Gesamtaufbau mit Netznachbildungen (LISN) zur Auskopplung der leitungsgebundenen Störungen entsprechend CISPR25. Die Netznachbildungen dienen zum einen zur Entkopplung der Batterieversorgung sowie zur Nachbildung eines fahrzeugtypischen Kabelbaums. Der betrachtete Frequenzbereich erstreckt sich von 0,15 – 108 MHz. Der gesamte Aufbau bzw. das Verfahren ist natürlich nicht auf automobile Applikationen beschränkt, sondern kann auch auf Haushalts- und Industrieprodukte angewendet werden.

▪ **Characterization of RF sources for the filter development process**

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Due to the increasing level of components within a modern automotive it is necessary to decrease the radio frequency emissions of every single unit below given limit values. Especially conducted emissions, using the cable harnesses as propagation medium, have to be reduced to guarantee the function and communication between the units. Passive line filters are able to reduce occurring conducted emissions. However, to find appropriate filter elements, a lot of trial and error attempts might be necessary. The main problem during the filter selection is that the filter attenuation depends on the input impedance of the device under test. Only for known source impedances it is possible to estimate the attenuation for a given filter assembly. Thus it is necessary to characterize the noise source over the whole considered frequency range. In respect to the Thevenin theorem, an arbitrary network can be expressed with the help of one passive impedance matrix and additional voltage sources. Fig. 1 shows the measurement setup with line impedance stabilization networks (LISN) to measure conducted emissions along the power lines. The LISN represents similar impedance values like a real cable harness and decouples the battery supply from the device under test (DUT). Frequencies from 0.15 up to 108 MHz are considered.

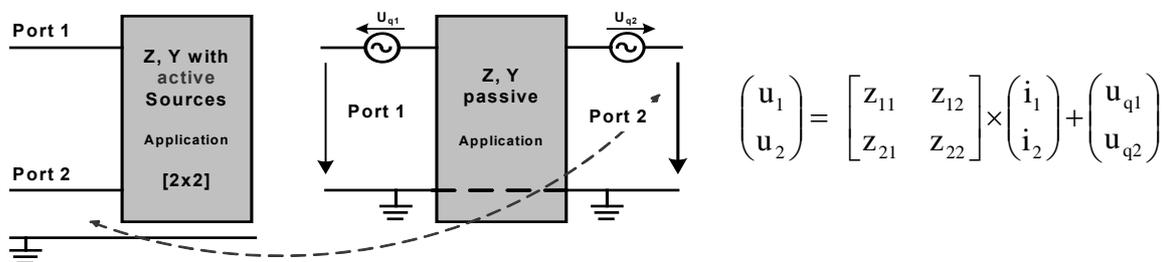


Fig. 2: Darstellung der Störquelle in Matrixform  
Source description as a two-port matrix

Fig. 2 shows the translation from the general known source description to the two-port matrix model. The full source is characterized through four elements, describing the passive part  $z_{11}$  to  $z_{22}$  and two active sources. To evaluate the parameters six measurements are necessary. First, the open circuit voltages  $u_{q1}$  and  $u_{q2}$  are evaluated. In the second step, both ports are consecutively loaded with a known impedance  $Z_e$  and the voltage drop of the port as well as the open circuit voltage of the other port is recorded with an oscilloscope. With the help of a Fast Fourier Transform, the impedance matrix of the DUT can be calculated in the frequency domain.

Fig. 2 zeigt die Umwandlung von der gewohnten DUT-Darstellung zur Matrixdarstellung mit aktiven Quellen. Die Störquelle wird über vier komplexe Impedanzparameter,  $z_{11}$  bis  $z_{22}$ , sowie zwei aktive Spannungsquellen beschrieben. Zur Bestimmung der Parameter sind sechs Messungen notwendig. Im ersten Schritt werden die Leerlaufspannungen  $u_{q1}$  und  $u_{q2}$  ausgewertet. Im zweiten Schritt werden die Ports abwechselnd mit einer bekannten Impedanz  $Z_e$  belastet und der Spannungsabfall über  $Z_e$  sowie die Spannung des zweiten Ports mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Mit Hilfe der Fourier Transformation ergibt sich die gesuchte Impedanzmatrix der Störquelle im Frequenzbereich.

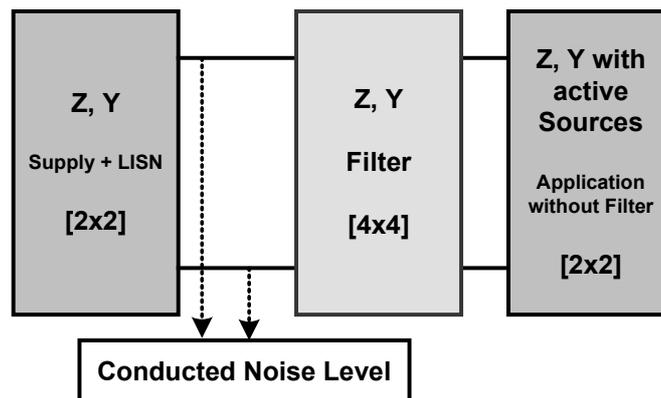


Fig. 3: Matrixbeschreibung aller im System vorhandener Elemente  
Matrix description of every subsystem

Damit die Filterdämpfung vorhergesagt werden kann, müssen alle im System befindlichen Elemente in Matrixschreibweise vorhanden sein. Die Einzelelemente des Filters werden über Messungen mit dem Impedanzanalyzer und Networkanalyzer (VNA) charakterisiert und danach in äquivalente SPICE-Netzwerkmodelle umgewandelt. Somit entsteht eine Bibliothek verschiedener Filterelemente, wodurch die gewünschte Filterstruktur generiert werden kann. Die Impedanzmatrix der Netznachbildung wird über eine Zweiportmessung mit dem VNA ermittelt. Aus der Zusammenschaltung aller drei Teilelemente ergibt sich die gesuchte Störspannung mit Filterelement und damit die Filterdämpfung. Als Beispiel wird ein Breitbandimpulsgenerator als Störquelle betrachtet. Die Filterschaltung besteht aus zwei Kondensatoren, geschaltet in Y-Struktur. Fig. 4 zeigt die berechneten Störspannungen, die sich mit den Kondensatoren als Filterelemente für die Batterie Plus- und Minusleitung ergeben (grau). Die Kontrollmessung zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den berechneten Werten über dem gesamten Frequenzbereich. Zusätzlich ist die Störspannung ohne Filterelement als Referenz angegeben. Die Kondensatoren erzielen somit eine maximale Dämpfung von ca. 40 dB bei 7 MHz, welches der Eigenresonanz der Kondensatoren entspricht.

Für den Fall, dass die Störquelle genau beschrieben werden kann, ist es somit möglich, die Störspannungen mit Filterelement genau vorherzusagen. Das Verfahren funktioniert, solange periodische Störgrößen betrachtet werden und wenn die Admittanzmatrix der Filterelemente definierbar ist.

To calculate the filter attenuation, all elements within the measurement setup have to be characterized as impedance or admittance matrices, as seen in Fig. 3. The single filter elements are described with measurements carried out with an impedance analyzer for two-port elements and a vector network analyzer (VNA) for four-port elements. The filter can now be set up out of the single elements. The impedance matrix of the stabilization network is derived by one two-port VNA measurement. As an example, a broadband impulse generator is used as DUT. The filter circuit consists of one pair of capacitors, routed as Y-structure. To show the accuracy of the method a control measurement is compared to the calculated data.

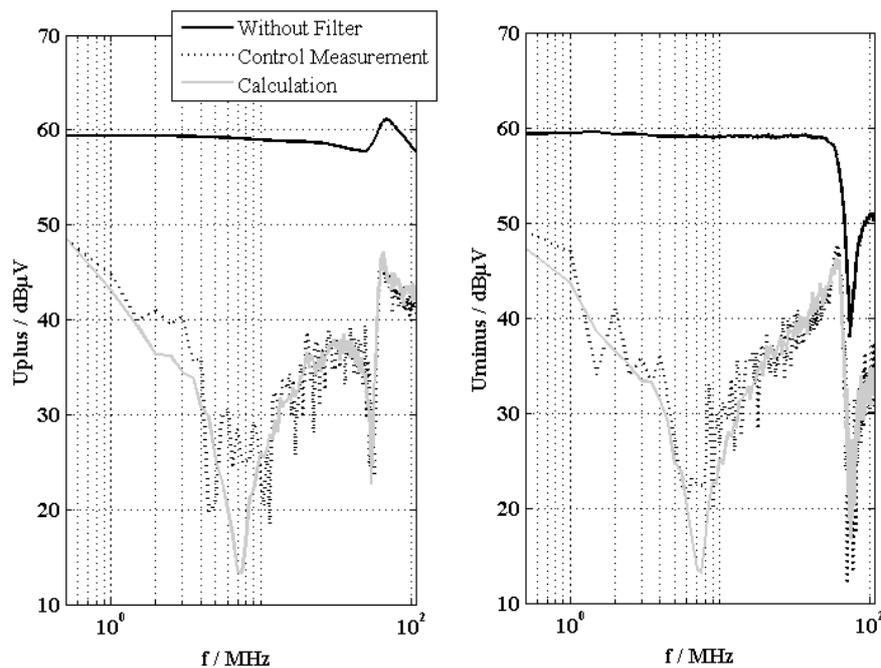


Fig. 4: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Störspannungen  
Comparison of calculated and measured conducted noise voltages

Fig. 4 shows the calculated noise voltages with filter element (grey line) compared to the control measurement (dotted black line). Both values match over a wide frequency range with deviations less than 3 dB. The black lines show the noise voltages without any filter element.

If it is possible to characterize an arbitrary DUT with one passive impedance matrix and additional active sources the noise voltage on both power lines can be calculated for arbitrary filter elements. The method is limited to problems with periodical noise sources which generate a constant and reproducible noise spectrum. The proposed method is of course not limited to automotive applications and can be easily transferred to consumer and industrial products.

## ▪ Simulation von minimalen Kurzschlussströmen in Verteilnetzen

Dipl.-Ing. Thomas Schmid

Kurzschlüsse in Energienetzen sind unvermeidbar. Durch im Fehlerfall auftretende Ströme werden Betriebsmittel sowohl thermisch als auch mechanisch überlastet. Ein länger anliegender Kurzschluss führt daher meist zur Schädigung oder Zerstörung von Betriebsmitteln. Dementsprechend muss die Störung schnell und zuverlässig vom Netzschutz erkannt und das betroffene Netzsegment freigeschaltet werden. Dies muss auch beim Ausfall eines primären Schutzgerätes sichergestellt sein.

Daher kommt in Energienetzen ein mehrstufiges Schutzkonzept zum Einsatz. In Verteilnetzen ist der Primärschutz meist ein Distanzschutz, der mit einem Reservechutzkonzept, meist Überstromzeitschutz, gegen Ausfälle und Schalterversagen abgesichert wird.

Neben stromstarken Kurzschlüssen treten im Netzbetrieb auch Fehler auf, die nur kleine Kurzschlussströme verursachen. Beispielsweise haben Kurzschlüsse an weit entfernten Knoten, hinter Abgängen mit leistungsstarken Verbrauchern, oft nur kleine Kurzschlussströme. Damit der Überstromzeitschutz diese sicher abschaltet, muss der Anregestrom kleiner als der minimal mögliche Kurzschlussstrom sein. Andererseits soll der Schutz auch erhöhte Ströme bei Netzengpässen tolerieren. Dementsprechend muss die Anregeschwelle deutlich über dem geschätzten Engpassstrom liegen. Abbildung 1 zeigt diese Abhängigkeit beispielhaft.

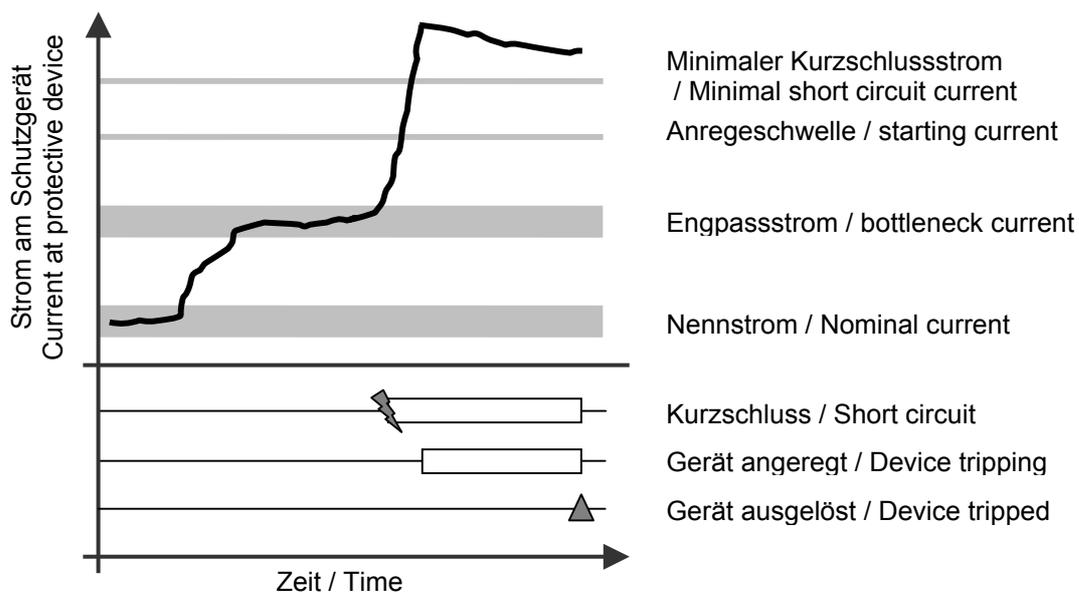


Fig. 1: Schwellwerte eines Überstromzeitschutzes  
Current levels for an overcurrent protective device

## ■ **Simulation of Minimal Short Circuit Currents in Distribution Networks**

**Dipl.-Ing. Thomas Schmid**

Short circuits are inevitable in electrical distribution networks. Furthermore the excessive current caused by a short circuit puts high thermal and mechanical stresses to the affected equipment in the distribution network. Therefore it is essential that protective devices react quickly and reliable if a failure occurs. The affected network segments are deenergized in order to protect the equipment from severe damage. This has to be ensured even if the primary protective device fails.

Electrical power systems rely on multistage protection concepts. In distribution networks a distance protection usually serves as primary protective device. It is backed up by an over current protection.

Short circuits do not necessarily cause high currents. For example failures at the far end of a network, behind high loads, may result in small short circuit currents. The over current protection has to be aware of such conditions. This requires the tripping current to be on the one hand below the minimal possible short circuit current. But on the other hand it has to be well above the currents caused by short-term bottlenecks and high load situations, in order to prevent false positive tripping. Figure 1 shows this dependency.

A more precise knowledge of the short circuit current generally results in better tripping levels for the over current relays. And this makes it possible to use the full load capacity of the distribution network.

Therefore an application for simulating and analyzing the minimal short circuit currents is developed. The computational core for the short circuit calculations is DIGSILENT PowerFactory. It is scripted and automated by an external application.

Determining the minimal short circuit current requires to cover all elements of the distribution network which gives a wide variety of calculations. To be more precise, for every element of the network a short circuit has to be simulated while the currents at the relays are captured. This results in a separate list for all relays containing the short circuit currents seen by the relay in relation to the fault position. This list is then used to evaluate the minimal short circuit current for a specific relay.

Especially short circuits in dual fed loops of electrical distribution networks may be hard to detect. As illustrated in figure 3 a short circuit nearby the bus bar in combination with a tripping of S1 might increase the current at S2 only slightly.

Je exakter das Wissen über den minimal möglichen Kurzschlussstrom, desto besser lässt sich der Anregestrom einstellen.

Zu diesem Zweck wird ein Werkzeug entwickelt, das für den Netzschutz in Verteilnetzen die minimal auftretenden Kurzschlussströme durch Simulation ermittelt. Für die Berechnung kommt das Programmpaket DigSILENT PowerFactory zum Einsatz, das über eine externe, in C# programmierte Anwendung gesteuert wird.

Für die Bestimmung des absolut minimalen Kurzschlussstroms wird eine vollständige Abdeckung des Netzes benötigt. Dementsprechend hoch ist die Anzahl der Berechnungen. Für jede Leitung im Mittelspannungsnetz muss ein Kurzschluss simuliert werden. Bei jeder dieser Simulationen wird der am Ort des Schutzrelais auftretende Kurzschlussstrom erfasst. Somit ergibt sich für jedes Relais eine separate Liste, die den Strom in Abhängigkeit des Kurzschlussortes enthält. Aus dieser Liste kann der für das Relais zu erwartende minimale Kurzschlussstrom ermittelt werden.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist die Kombination aus einer zweiseitigen Einspeisung in einen Ring und einem Kurzschluss nahe der Sammelschiene eine große Herausforderung an den Schutz. Die an der Stelle S2 erfasste Stromstärke wird sich nach dem Öffnen des Schalters S1 im ungünstigen Fall nur geringfügig erhöhen.

Durch eine „intelligente“ Netzanalyse kombiniert mit Brute-force-Algorithmen wird es möglich, solche „worst case“ Situationen in beliebigen Netzen zu erkennen und deren minimale Kurzschlussströme zu ermitteln.

Für die Visualisierung (Abbildung 2) der Ergebnisse wurde eine in der Kommunikationstechnik weit verbreitete Darstellung gewählt.

Das Netz wird als Baum um einen Referenzpunkt dargestellt. Die Elemente des Baumes zeigen den Strom an, den der Referenzknoten bei einem Kurzschluss an diesem Knoten sieht. Zur leichteren Erkennbarkeit sind die Knoten nach ihrer Stromstärke farblich codiert (abfallend von grün nach rot; im Druck nicht darstellbar). Diese Ansicht lässt sich dynamisch für jeden Punkt im Netz erzeugen. Neben dieser Baumstruktur wurden auch andere Darstellungsformen untersucht.

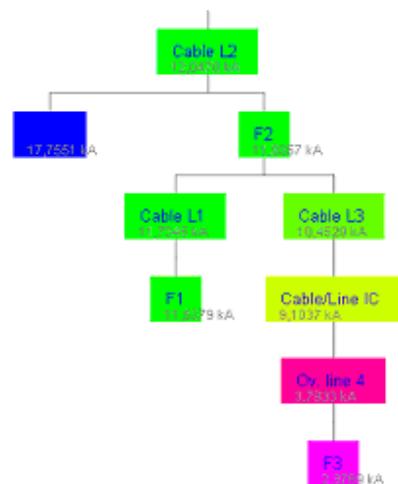


Fig. 2: Visualisierung  
Visualization

Damit die Algorithmen ihre Praxistauglichkeit nachweisen können, müssen sie noch mit realen Energienetzen überprüft werden.

Auch werden bisher bei der Simulation nur die Schutzgeräte betrachtet. Durch Schaltvorgänge kann sich die Netztopologie jedoch erheblich ändern. Die Ergebnisse werden bei Berücksichtigung der möglichen Schaltzustände aussagekräftiger.

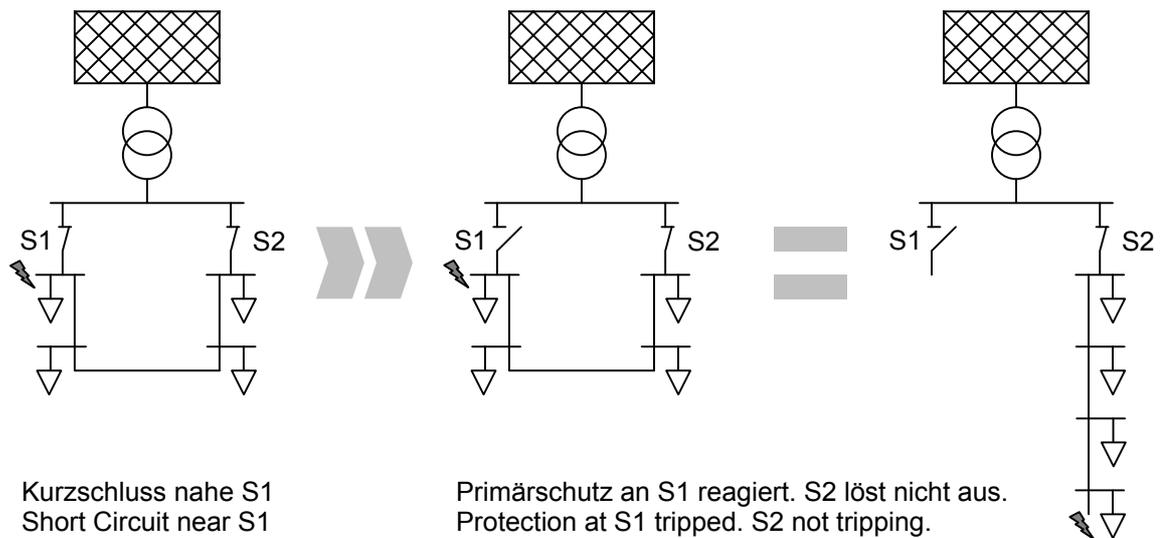


Fig. 3: Fehlerfall mit kleinen Kurzschlussströmen  
Failure with low short circuit currents

An “intelligent” network analysis combined with brute force algorithms allows to detect such constellations in arbitrary networks. So the knowledge of minimum failure currents becomes more reliable.

Some concepts widely used in the communication technology were adopted to visualize the results. As shown in figure 2 the network is converted into a tree which is centered on a reference node. The tree elements show the short circuit currents at the reference element. For a better usage the elements are coloured depending on the current amplitude (from red to green; not shown in printed version). This view can be dynamically adopted for every node in the distribution network.

The algorithms have to be tested with real distribution networks. Furthermore up to now the circuit state (of the switches) is not considered during simulation. But as switching may dramatically change the topology of the network, evaluating the practically used circuit states will improve the simulation results.

## ▪ Einfluss von elektrostatischen Entladungen auf elektrische und elektronische Bauteile

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Die Messbarkeit von elektrostatischen Entladungen (ESD) mit hoher Orts- und Zeitauflösung stellt nach wie vor eine Herausforderung dar. Sowohl die Bemühungen um verbesserte Messtechnik, also der Aufbau von geeigneten Sensoren und Prüfanordnungen, als auch die Diagnostik von ESD-Degradationseffekten an Bauteilen wurden fortgesetzt.

Der erste Ansatz zur Messung von ESD-Effekten an Prüflingen hat im alltäglichen Laboreinsatz deutliches Verbesserungspotential aufgezeigt. Da es sich bei den auftretenden Phänomenen um statistische Effekte handelt, kann eine sinnvolle, allgemeingültige Aussage nur aufgrund von Mittelwerten getroffen werden. Um jedoch brauchbare Mittelwerte zu erhalten, ist eine Wiederholung von einzelnen Messungen unabdingbar.



Fig. 1: SMA-Hochfrequenz-Stecker mit Federkontakt-Innenleiter  
Standard SMA-RF plug with integrated pogo pin

Deshalb wurde der auf dem Normaufbau basierende Prüflingsadapter überarbeitet, um halb-automatische Messreihen zu ermöglichen. Es wurde darauf geachtet, dass der Messadapter die mechanischen Abmessungen des bisherigen Aufbaus übernimmt, um bereits bestehende Prüfanordnungen weiter nutzen zu können. Außerdem sollen Messergebnisse am neuen Prüfaufbau möglichst mit den früher erzielten Messergebnissen vergleichbar sein. Die Zeitersparnis für den Messbetrieb wird durch ein universelles Anschlusskonzept erreicht, das sich sowohl für manuelle, als auch automatische Kontaktierung des Prüflings eignet.

## Investigation of Electrostatic Discharges on Electrical and Electronical Components

Dipl.-Ing. Franz Streibl

The ability to measure electrostatic discharges (ESD) with a high spatial and timely accuracy still remains a challenge. Efforts concerning the diagnostics of derating effects caused by ESD as well as efforts finding improved measuring techniques are continued. The latter includes the construction of suitable sensors and measurement setups.

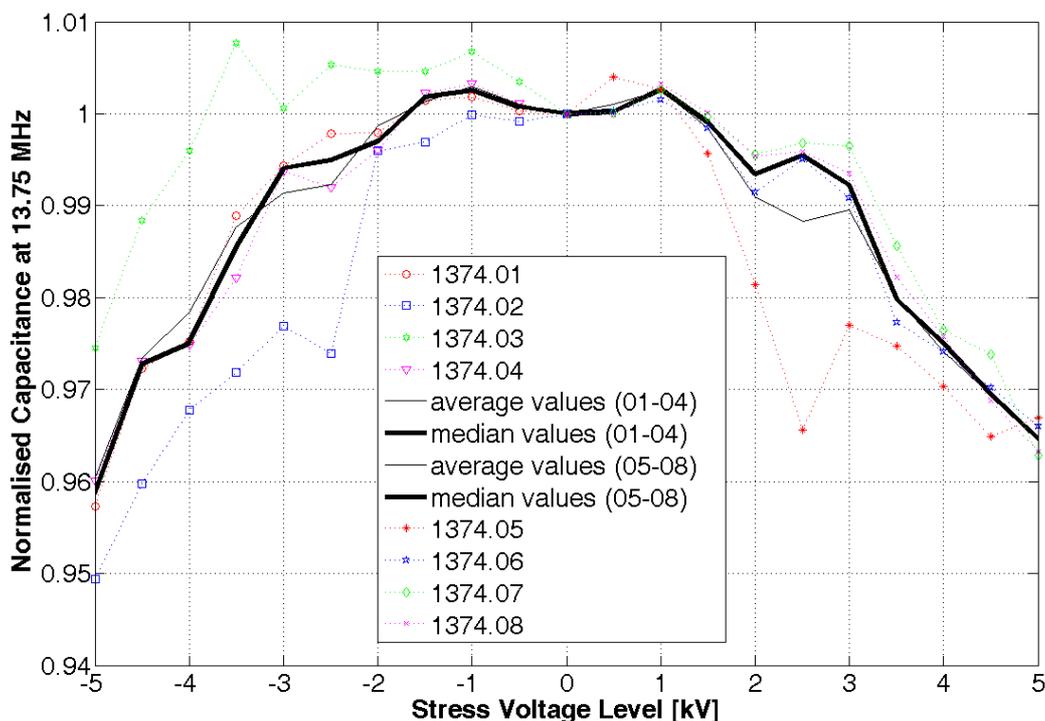


Fig. 2: Degradationsverlauf der Kapazität über der Belastungsspannung  
Derating of capacitance vs. stress voltage

The first approach measuring ESD effects on devices under test has shown a lot of potential for improvements in the everyday laboratory work experience. Since the phenomena under investigation are statistical effects, a lot of measurements are needed to provide usable mean values. Therefore the measurements have to be repeated often to get the mean values.

Den Anforderungen an die Bandbreite und an die Isolationsfestigkeit wurde bei der Konstruktion im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten Rechnung getragen. Das echte Novum des neuen Aufbaus besteht in der Optimierung der Handhabung für Mensch und nun auch Maschine. Zeitintensive Umbaumaßnahmen werden auf ein notwendiges Minimum reduziert. Eine vollständige Automatisierung des Messablaufs wird jedoch nicht angestrebt. Messreihen sind mit dem neuen Prüfaufbau in Arbeit, jedoch noch nicht abgeschlossen.

Bereits durchgeführte Messreihen an SMD-Keramikkondensatoren, wie sie häufig als Stecker-Eingangsbeschaltung Verwendung finden, haben gezeigt, dass Degradationseffekte bereits bei wenigen hundert Volt ESD-Impulsbelastung den Kapazitäts-Nennwert verändern. Dieser veränderte Bauteilwert wirkt sich dann auch bei Kleinsignalbetrieb aus. Weiterführende Betrachtungen zum Degradationsverhaltens von Standardbauteilen sind geplant.

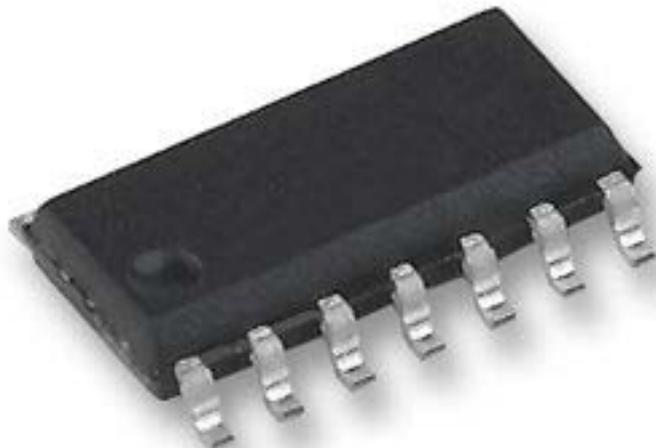


Fig. 3: Oberflächenmontierbares Gehäuse eines integrierten Schaltkreises  
Surface mountable package of an integrated circuit (SOIC 14)

Was oben für passive SMD-Bauteile beschrieben und umgesetzt wird, befindet sich auch für integrierte Halbleiterschaltungen in Vorbereitung. Diese Messungen sind jedoch aufwendiger, da eine reine Zweipol-Betrachtung aufgrund der Anzahl der Anschlusspins von komplexen, integrierten Schaltkreisen nicht umgesetzt werden kann, nicht einmal unter vereinfachenden Annahmen. Sowohl die Messtechnik als auch die Diagnostik sind zwar grundsätzlich verwandt, jedoch nicht von den passiven Zweipol-Bauelementen auf mehrpolige Halbleiterschaltkreise übertragbar.

Taking existing standardised measurement setups as a basis, a fixture for the device under test was constructed from scratch in order to enable semi-automated test series. The outer mechanical dimensions of the existing reference test setups were considered and adopted. The mechanical compatibility was maintained so that existing measurement setups can still be used and previous measurement results remain comparable. The saving of time during measurement sequences is achieved by means of an universal connection concept which is suitable for manual and also for automated contacting of the device under test. Technical requirements regarding both bandwidth of the setup and insulation strength were considered during the construction phase and were accounted for within the given limits. The new setup is optimised in the handling for man and also machine. Time consuming setup procedures are reduced to a minimum. Measurements with the new setup have started but are not yet finished.

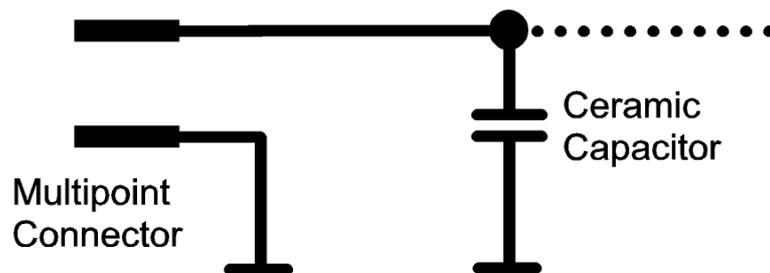


Fig. 4: Schaltbild einer üblichen Stecker-Eingangsbeschaltung  
Schematic of a common connector input circuit

Standard SMD-type ceramic capacitors often used in input circuits were tested with respect to their ESD derating. The measurements have shown that derating effects of the nominal capacitance value already appear at ESD peak stress levels of only a few hundred volts. The change of capacitance also affects the small signal behaviour of the device. Further investigations on the derating behaviour of standard devices are planned.

Similar experiments as described above for passive SMD elements are under preparation for integrated semiconductor devices. These measurements are more complex since a simple two terminal approach is generally not sufficient to describe the structure of integrated semiconductor circuits even if simplifications are applied. The measurement setup as well as the respective ESD diagnostics are principally related, however the approach used for passive two terminal devices cannot be simply taken over to multipolar semiconductor circuits.

## ▪ Verwendung von isolierenden Flüssigkeiten auf der Basis von Pflanzenöl

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

In Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik werden meist Isolationssysteme verwendet, die aus einer Kombination von festen und flüssigen Isolierstoffen bestehen. Die Anforderungen, die an die flüssigen Isolationstoffe gestellt werden, berücksichtigen nicht nur das dielektrische und thermische Verhalten, sondern auch den Umweltschutz sowie das Dehydrationsvermögen. Auf Grund ihres nicht-fossilen Ursprungs (Tab. 1) können Flüssigkeiten auf Pflanzenölbasis (natürliche Ester) eine entsprechende Antwort auf berechnigte Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsfragen sein und gleichzeitig dazu beitragen, die überdurchschnittliche Beanspruchung von Transformatoren zu reduzieren sowie die Lebensendkosten des Betriebsmittels zu senken. Die große Wasser-Absorptionsfähigkeit von natürlichen Estern kann auch für die Dehydration von Zellulosebestandteilen des Isolationssystems eingesetzt werden.

Advantages	Limitations
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Renewable resources</li><li>▪ Much higher flash and fire point</li><li>▪ Environmentally friendlier (higher biodegradability, non-toxic)</li><li>▪ High hygroscopicity</li><li>▪ Improved cellulose End-of-Life time</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Inferior oxidation stability</li><li>▪ Poorer low temperature properties</li><li>▪ Higher viscosity</li><li>▪ Higher produce costs</li></ul>

Tab. 1: Vor-/Nachteile von Flüssigkeiten auf Pflanzenölbasis gegenüber Mineralölen  
Vegetable oil-based fluids vs. mineral oil

In Bezug auf die elektrische Festigkeit ist Öl für gewöhnlich die Schwachstelle im Isolationssystem. Die elektrische Beanspruchung ist dabei umgekehrt proportional zur Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$ . Da Flüssigkeiten auf Pflanzenölbasis eine höhere Dielektrizitätskonstante als Mineralöle aufweisen (2,2 für Mineralöle gegenüber 3,2 für natürliche Ester, was näher bei  $\epsilon_r = 4,4$  von Papier liegt), hat die elektrische Beanspruchung vornehmlich Auswirkungen auf das feste Material. Dies bedeutet, dass Gleitentladungen verhindert werden können und außerdem auf Grund der größeren Dielektrizitätskonstante eine höhere elektrische Beanspruchung der Flüssigkeit möglich wird.

Für Mineralöle gibt es seit langem Kurven, aus denen die Grenzen der elektrischen Beanspruchung im flüssigen bzw. festen Isoliermedium sowie entlang von Oberflächen entnommen werden können.

▪ **Application of vegetable oil-based fluids in design of high voltage insulation system**

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

The combination of solid and liquid materials is the typical insulation system in high voltage apparatus. The requirements on the liquid part of the insulation system are not only its dielectric and thermal performance but also the performance regarding environmental requests and dehydration capability. Because of its non fossil origin (Tab. 1) vegetable oil-based fluids (natural esters) could be an appropriate response to environmental, safety and health problems and could reduce the exploitation and end-of-life costs for transformers. The high capacity of natural ester fluid to absorb water can also be used for the dehydration of the cellulose component of the insulation system.

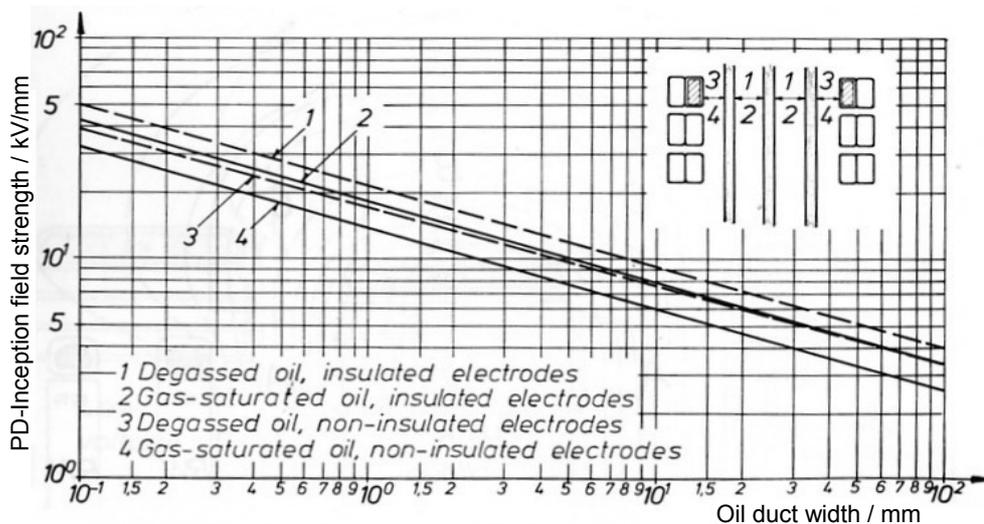
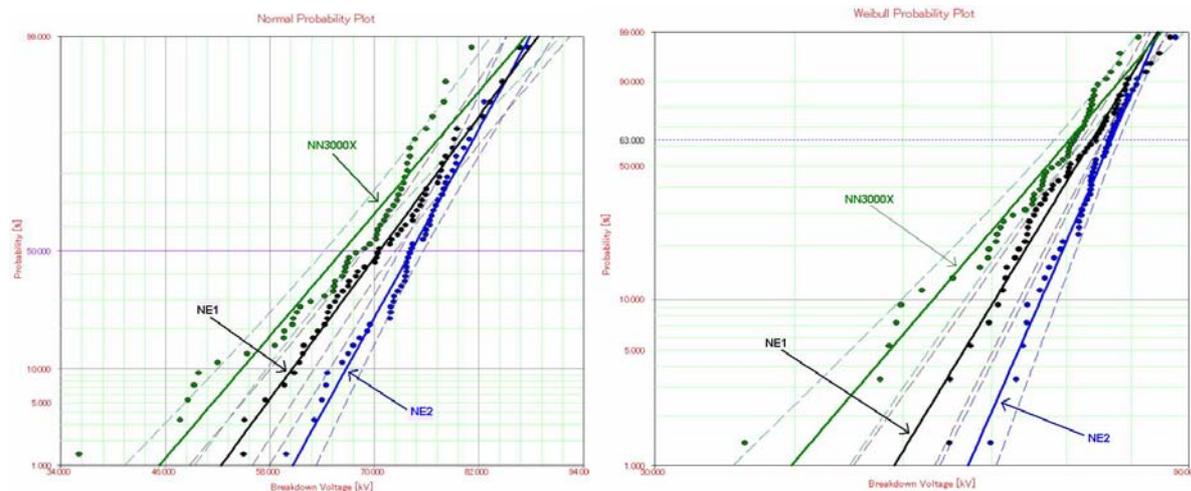


Fig. 1: Elektrische Festigkeit von Mineralöl  
Electric strength of mineral oil

Regarding the electrical stress, the oil is normally the weakest point in the insulation system. The electrical field strength is inversely proportional to the relative permittivity  $\epsilon_r$ . Since vegetable oil-based fluids have a higher  $\epsilon_r$  than mineral oil ( $\epsilon_r$  mineral oil = 2.2,  $\epsilon_r$  natural ester = 3.2, which is closer to the relative permittivity of paper,  $\epsilon_r$  paper = 4.4), the electrical field strength in paper grows. This means prevention of creep discharges and an advantage in insulation systems where the stress in the fluid limits the average stress. Design curves have been established for mineral oil (Fig. 1) which give limits to the allowable stress in the fluid, in the solid insulation and along the interface.

Diese Kurven entstanden bei Messungen von Wechselspannungsdurchschlägen in einer homogenen elektrischen Feldanordnung. Durchschlagsspannungen mit einer höheren Standardabweichung führen zu einer niedrigeren Stehspannung, was bedeutet, dass natürliche Ester (NE1, NE2) eine höhere Spannungsfestigkeit als Mineralöle (NN3000X) haben, selbst wenn sie ähnliche Mittelwerte der Durchschlagsspannung aufweisen. Die Stehspannung hängt auch von der verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion ab. Die Weibull-Verteilung führt zu niedrigeren Stehspannungen (Fig. 2). Für Stossspannungen (Blitz- und Schaltstoß) wurde ein Äquivalenzfaktor (DIL-Faktor) eingeführt, um die bei Netzfrequenz bewährten Designmethoden verwenden zu können (Fig. 3). Da sich der Durchschlag in den beiden Flüssigkeiten unterschiedlich entwickelt, ist kein universeller Äquivalenzfaktor zu erwarten. Der DIL-Faktor wird derzeit für natürliche Esterflüssigkeiten bei Ölkanälen mit verschiedenen Abständen untersucht.



Fluid	Weibull Distribution				Normal Distribution			
	$\alpha$	$\beta$	$U_{1\%} / \text{kV}$	$U_{63\%} / \text{kV}$	$\mu$	$\delta$	$U_{1\%} / \text{kV}$	$U_{50\%} / \text{kV}$
NN3000X	70.38	8.04	39.7	70.4	66.36	9.05	45.3	66.4
NE1	73.75	11.30	49.1	73.8	70.59	7.83	52.4	70.6
NE2	76.74	15.61	57.2	76.7	74.25	5.86	60.6	74.3

Fig. 2: Stehspannung von Mineralöl und natürlichen Estern im homogenen elektrischen Feld (2 mm)  
 Withstand voltage of mineral oil and natural esters in homogeneous electrical field (2 mm)

Die Designmethoden für Mineralöle müssen überprüft und neue Kurven für natürliche Esterflüssigkeiten bestimmt werden. Um die Unterschiede in den Durchschlagmechanismen der beiden Flüssigkeiten verstehen zu können, bedarf es der Beobachtung und Analyse der Durchschläge. Die Vielfalt der physikalischen Prozesse, die beim Einsatz der Streamerentladung sowie bei deren Ausbreitung beteiligt sind, verlangt Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und die Aufzeichnung der transienten Ströme und Lichtemissionen.

These curves are established by the measurement of oil breakdown strength in homogeneous AC electrical field arrangement. Breakdown values with higher standard deviation lead to a lower withstand voltage. This means that natural esters (NE1, NE2) have a higher withstand voltage than mineral oil (NN3000X) even if they have similar mean breakdown voltage. The calculated withstand voltage also depends on the probability distribution function used. A Weibull distribution gives lower withstand voltages (Fig. 2). An equivalence factor (DIL factor) for impulse (lightning, switching) failure is established to permit power frequency design methods to be used (Fig. 3). Since the mechanism of breakdown is not the same in both fluids, a universal equivalence factor is not appropriate. The DIL factor for natural esters is going to be verified on oil gaps with different distances.

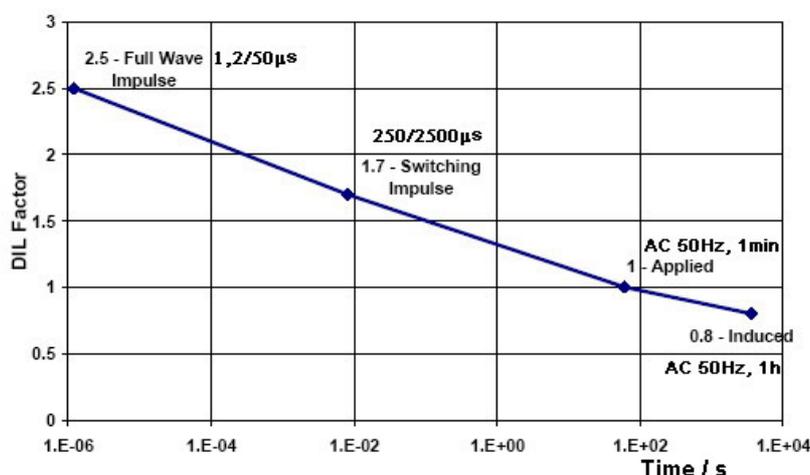


Fig. 3: DIL-Faktor f. dielektrische Festigkeit von Mineralöl  
DIL factor for dielectric strength of mineral oil

Design methods used for mineral oil have to be reviewed and new design curves for natural esters have to be established. In order to understand differences in breakdown mechanisms of these two fluids the pre-breakdown processes will be observed and recorded. The large variety of physical processes involved during streamer initiation and propagation calls for high speed visualizing techniques and recording of transient currents and light emission. This involves measurement of streamer inception voltage, streamers frequency, stopping length, streamers velocity, streamer charge, etc.. Acquired data basis will allow predicting behaviour of streamers when the liquid nature or stress conditions are changed.

## ■ **Thermohydraulische Untersuchung von Transformatorwicklungen durch CFD-Simulation**

**Dipl.-Ing. Andreas Weinläder**

Die Temperaturverteilung in ölgekühlten Transformatorwicklungen wird bei der Auslegung eines Transformators üblicherweise durch die Verwendung von empirischen Daten - gewonnen aus einer Vielzahl von Messungen an gebauten Transformatoren - ermittelt. Da der Einfluss größerer Abweichungen von den gewohnten Auslegungsmerkmalen nur unzuverlässig abgeschätzt werden kann, ist ein Erkennen und Ausschöpfen etwa vorhandener Optimierungspotentiale kaum möglich. Außerdem müssen beim konventionellen Entwurf die Sicherheitsreserven so bemessen sein, dass die Überschreitung von Grenztemperaturen auch mit den eher ungenauen Berechnungsverfahren sicher vermieden wird. Dies führt in der Praxis oft zu einem mehr oder minder überdimensionierten Transformator.

Mit dem hier verfolgten Ansatz soll zunächst die Ölströmung innerhalb der Transformatorwicklung hinsichtlich ihrer Geschwindigkeits- und Druckverteilung berechnet werden. Mit Kenntnis dieser Größen ist es anschließend möglich, die ansonsten nur grob abschätzbare Wärmeübergangszahl zwischen Öl und Papierisolation zu bestimmen. In einer darauf aufbauenden Lösung der Wärmeleitungsgleichungen wird das Temperaturfeld in der gesamten Wicklung bestimmt, wobei hauptsächlich die Stelle mit der höchsten Temperatur, der sog. „Heißpunkt“, interessiert. Für diese Simulationen wird das CFD-Softwarepaket „CFX“ verwendet, welches auf Basis der Finite-Volumen-Methode arbeitet.

Als Anwendungsbeispiel soll der Vergleich der Strömungsverteilung in einer Wicklung mit zickzack-förmigen Ölkanälen gezeigt werden, welche im einen Fall mit konventionellem Mineralöl, im anderen Fall mit Pflanzenöl gekühlt wird. Pflanzenöl besitzt gegenüber Mineralöl eine um etwa den Faktor 5 höhere Viskosität und eine um etwa 40% höhere Wärmeleitfähigkeit. Insbesondere durch die höhere Viskosität ist bei Pflanzenöl eine andere Aufteilung des Ölvolumenstroms auf die einzelnen Horizontalkanäle zwischen den Wicklungsscheiben zu erwarten. Da der Wärmeübergang an der Grenzfläche Papier-Öl hauptsächlich von der Fließgeschwindigkeit des Öls im Kanal bestimmt wird, kann oft eine rein hydraulische Simulationsrechnung genügen, um kritische thermische Verhältnisse aufzeigen.

Zu diesem Zweck wurde die Geometrie der Ölkanäle innerhalb der Wicklung modelliert und mit ca. 150.000 Zellen diskretisiert. Eine 2D-Modellierung war zulässig, da die Kanäle in Umfangsrichtung hinreichend weit ausgedehnt sind und Wandeffekte durch die begrenzenden Distanzstücke daher vernachlässigt werden können. Am Eingang des Pakets wurde ein bestimmter Ölvolumenstrom durch Vorgabe eines parabolischen Geschwindigkeitsprofils eingepreßt. Der Ausgang wurde durch einen eingepreßten hydrostatischen Druck abgeschlossen.

- **Thermal-hydraulic investigation of transformer windings by means CFD-simulation**

**Dipl.-Ing. Andreas Weinläder**

Usually the temperature distribution in oil cooled transformer windings is evaluated by means of empirical data, which are the result of many measurements done at formerly built transformers. Since the influence of larger deviations from the usual design rules cannot be estimated reliably, it is hardly possible to recognise and to take advance from existing optimisation potentials. Furthermore, in a design according to conventional rules one has to be sure that an exceeding of temperature limits is avoided, even when rather inaccurate methods are used for calculation. This leads in practice to a more or less overdimensioned transformer.

With the approach followed here, at first the oil flow in the winding is calculated concerning the distribution of pressure and velocity. With the knowledge of these quantities it is possible to calculate the heat transfer coefficient between oil and paper insulation, which otherwise can only be estimated roughly. Based on this a solution of the equations for heat conduction can be done and the field of temperature in the whole winding is obtained. The point of the highest temperature, the so called "hot spot", is of particular interest. For these simulations the CFD-software package "CFX" is used, which uses the Finite-Volume method.

As an application example the comparison of the flow distribution in a winding with zigzag-formed oil channels shall be demonstrated, in one case with mineral oil and in another case with vegetable oil as coolant. Vegetable oil has an about five times higher viscosity and an around 40 % higher heat conductivity than mineral oil. Mainly caused by the higher viscosity one may expect that the distribution of the flow especially in the horizontal channels between the winding discs will differ significantly. Since the heat transfer on the interface layer between oil and paper is mainly determined by the oil velocity inside the channel, critical thermal situations can often be predicted with a pure hydraulical simulation.

For this purpose the geometry of the oil channels inside the winding was modelled and discretized with around 150,000 cells. A 2D-model was sufficient since the channels are wide in circumferential direction and the wall effects caused by the interfering spacers are negligible. At the inlet of the pass a defined volume flow of oil was impressed with a parabolic velocity profile at this location. The outlet was closed by an impressed hydrostatic pressure. According to the properties of the oils, simulations with different material data were done and the results were compared.

Durch Vorgabe von unterschiedlichen Materialdaten - entsprechend den Eigenschaften von Mineral- und Pflanzenöl - wurden die jeweiligen Fälle untersucht.

In Fig. 1 ist exemplarisch das Bild der Stromlinien innerhalb des Pakets bei einer Durchflussrate von 6l/min (bezogen auf einen Kanalauschnitt zwischen zwei Distanzleisten) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich im Bereich des Eintritts der unteren Horizontalkanäle Ablösewirbel bilden, die den Kanal gewissermaßen „blockieren“. Folglich ist die Strömungsgeschwindigkeit in den unteren Kanälen wesentlich niedriger als in den oberen. Es ist jedoch festzustellen, dass diese Wirbel bei Pflanzenöl deutlich schwächer ausgeprägt sind als bei Mineralöl. Die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung werden deutlich, wenn die Geschwindigkeiten entlang der in Fig. 1 eingezeichneten „scanning line“ aufgenommen und aufgetragen werden (Fig. 2, rechts). Die Geschwindigkeitsverteilung ist im Fall von Pflanzenöl deutlich homogener als beim Einsatz von Mineralöl, was insbesondere zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung innerhalb der Wicklung führt.

Dieses Ergebnis, zusammen mit der bei Pflanzenöl höheren Wärmeleitfähigkeit, darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass der hydraulische Widerstand der Wicklung durch die weit höhere Viskosität von Pflanzenöl stark zunimmt. Dem lässt sich bei pumpengetriebener Kühlung (OD/OF) relativ leicht durch eine stärker dimensionierte Pumpe entgegenwirken. Bei natürlicher Umlaufkühlung (ON) müssten zur Aufrechterhaltung eines ausreichenden Ölvolumenstromes jedoch die Radiatoren erhöht aufgestellt bzw. die Abmessungen der Ölkanäle vergrößert werden.

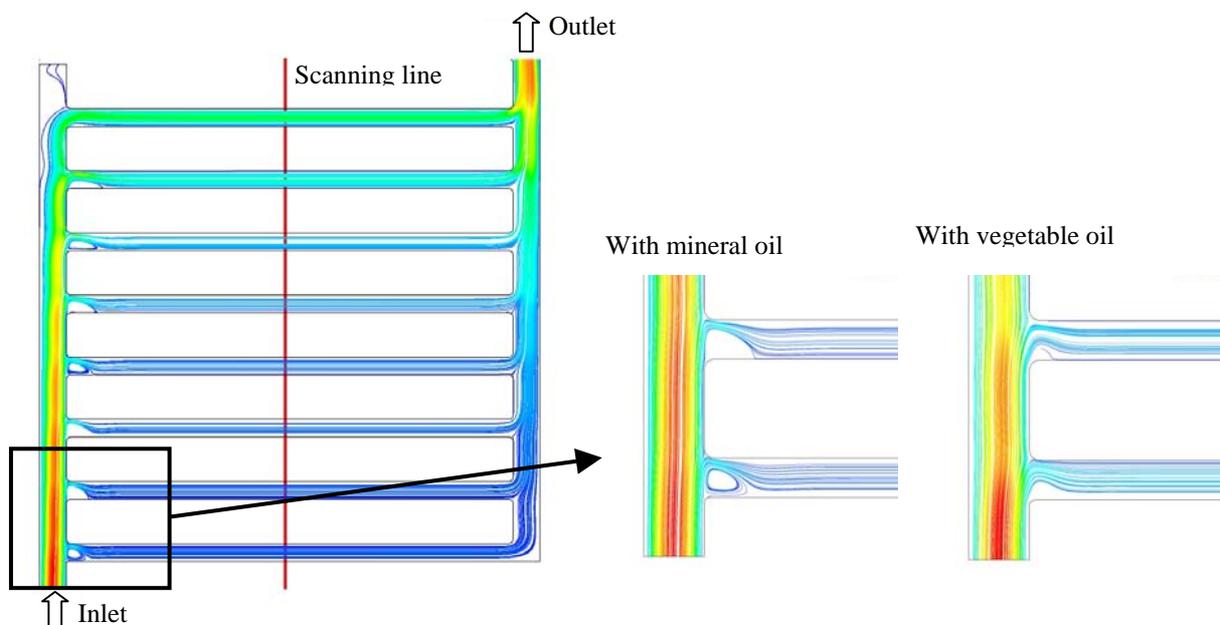


Fig. 1: Stromlinien innerhalb eines Wicklungsabschnittes  
Streamlines within one winding pass

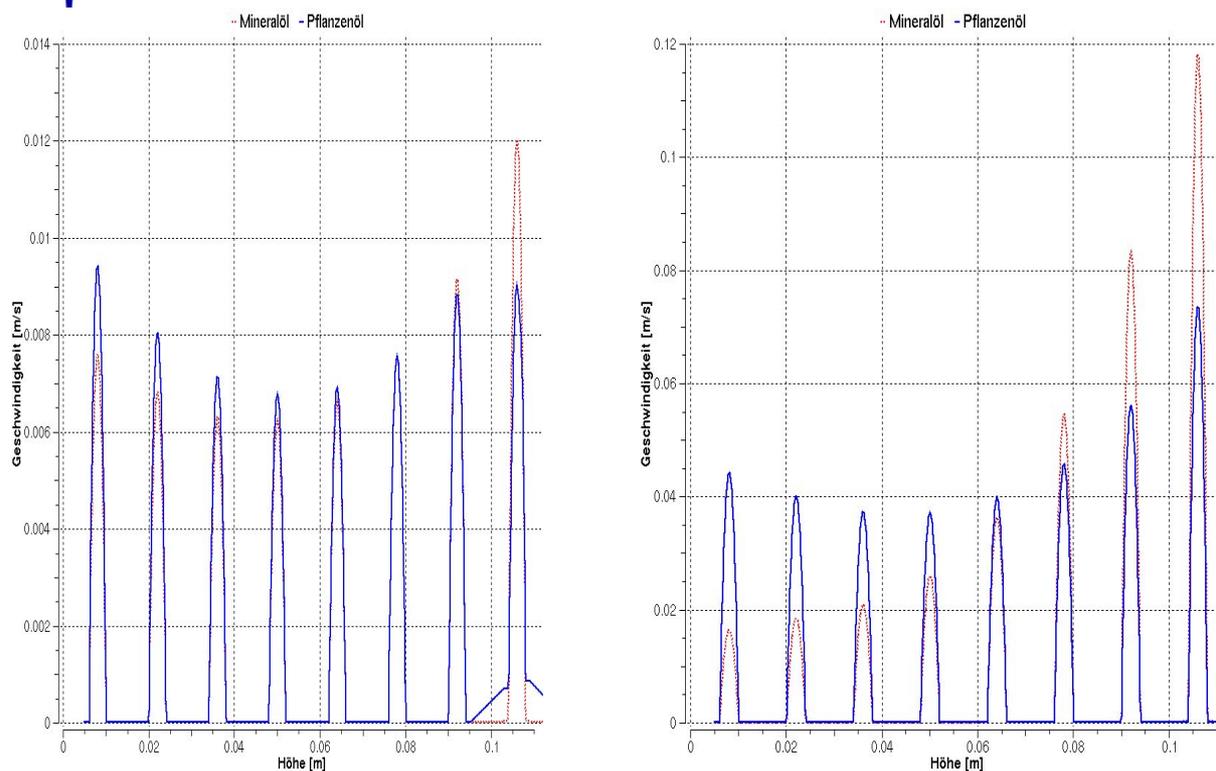


Fig. 2: Geschwindigkeitsverteilung bei 1l/min (links) und bei 6l/min (rechts)  
Velocity distribution at 1l/min (left side) and at 6l/min (right side)

As an example, in Fig. 1 the streamlines within the pass are shown for a flowrate of 6l/min (referred to a channel section between two distance sticks). It is obvious that separation eddies are present in near the entrance of the lower placed horizontal channels, which are “blocking” them more or less. Therefore the flow velocity is significantly lower in the lower channels than in the upper ones. But this effect is clearly less pronounced for vegetable oil than for mineral oil. The impact on the velocity distribution becomes obvious when the velocity in the channels is acquired along the “scanning line” (Fig. 1) and plotted (Fig. 2, right side). The velocity distribution is much more homogenous compared to the case of mineral oil, resulting in a more uniform temperature distribution in the winding.

But this result in combination with the higher heat conductivity of vegetable oil should not hide the fact that the hydraulic resistance of the winding strongly increases because of the much higher viscosity of vegetable oil. For a forced cooling unit (OD/OF) one may counter this problem with a powerful pump.

But for a natural oil flow (ON) the radiators should to be lifted and/or the dimensions of the oil channels should be increased to maintain a sufficient volume flow of the oil.

## ▪ **Einsatz charakteristischer Transferfunktionen zur Abschätzung der EMC-Performance von Kraftfahrzeugen**

**Dipl.-Ing. Michael Zerrer**

In der Automobilbranche werden die Entwicklungszyklen moderner Fahrzeuge immer kürzer. Gleichzeitig steigt die Komplexität der vielfältigen elektrischen und elektronischen Steuergeräte an, da der Nutzer nicht auf Komfort und Sicherheit verzichten möchte. Die Aufgaben der elektrischen Komponenten reichen von der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik wie Rundfunk, TV und Mobilfunk bis hin zu sicherheitsrelevanten Einrichtungen wie Motormanagement, Brems- und Spurassistenten oder Abstandswarner. Neben den gesetzlichen Vorgaben bezüglich der EMV des Gesamtfahrzeugs muss auch die fahrzeuginterne Elektronik störungsfrei arbeiten. Besonders kritisch sind dabei Beeinflussungen von Fahrzeugkomponenten, die systembedingt eigene Antennen besitzen, wie Rundfunkantenne oder Antennen für GPS oder Radaranwendungen.

Die kurzen Entwicklungszyklen moderner Fahrzeuge erlauben keine ausgiebigen EMV-Messungen an Prototypen. Während vor einigen Jahren noch genügend Zeit zwischen der Prototypenherstellung und dem Serienanlauf eines Fahrzeugs verblieb, sind diese Spannen heutzutage so geschrumpft, dass die elektrischen Komponenten zu diesem Zeitpunkt schon nahezu serienreif sein müssen. Änderungen sind dann sehr aufwändig und dementsprechend kostenintensiv. Ziel ist es daher, Verfahren zu entwickeln, die möglichst frühzeitig eine Abschätzung der Störbeeinflussung auf die im Fahrzeug verbauten Antennen zulassen.

Mit Hilfe von Transferfunktionen können einzelne Einbauorte in Fahrzeugen hinsichtlich ihres Störpotentials auf unterschiedliche interne Antennen abgeschätzt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass Transferfunktionsmessungen neben grundsätzlichen Erkenntnissen auch fahrzeugspezifische Eigenheiten aufweisen. Messungen an verschiedenen Fahrzeugen haben gezeigt, dass charakteristische Transferfunktionsmessungen innerhalb einer Baureihe große Ähnlichkeit besitzen. So kann mit Hilfe vorhandener Fahrzeuge das Verhalten von neuen Fahrzeugen der gleichen Baureihe abgeschätzt werden.

Fig. 1 zeigt einen typischen Aufbau zur Ermittlung von Transferfunktionen an einem Fahrzeug. Dabei wird mit einem Netzwerkanalysator an bestimmten Stellen des Fahrzeugs eingespeist und an den interessierenden Antennen die Fußpunktspannung gemessen. Zur besseren Übersicht wird das Fahrzeug in mehrere Abschnitte unterteilt, wie z. B. Motorraum, Innenraum, Kofferraum (Fig. 2).

Mit Hilfe eines Verstärkers kann der Signal-Rauschabstand vergrößert und damit die Messung unempfindlicher gegen Störeinflüsse von außen gemacht werden.

- **Application of characteristic transfer functions to estimate the EMC-Performance of motor vehicles**

**Dipl.-Ing. Michael Zerrer**

Since several years, the timeslot for the development process of modern vehicles is steadily decreasing. In the same time, the complexity of the manifold electric and electronic components in a vehicle is rising because the drivers don't want to miss comfort and safety issues. These components perform tasks to support the driver, reaching from safety systems like motor management, break-assistant or distance control as well as comfort functions like entertainment systems, radio broadcast or mobile communication. Beside the limits for the emitted radiation for the whole vehicle, given by law, the components in the vehicle may not disturb each other. This means a challenge especially for all those components requiring an antenna system, such as the radio broadcast antenna or antennas for GPS or radar application.

The shortened development cycles of modern passenger cars do not allow extensive EMC measurements with a prototype. A few years ago there was enough time between the first prototype and the start of production to allow changes of electrical components, if necessary. But changes at this late state of the development cycle are very laborious and quite expensive. Therefore early estimations of the EMC-performance of a vehicle are very valuable.

With the help of transfer functions the disturbances of different assembly locations to the vehicles antenna(s) could be assessed. Measurements on several vehicles show that characteristic transfer functions within one type series have a very similar behaviour. Therefore transfer functions of current type series may be used for the further development of vehicles within the same type series.

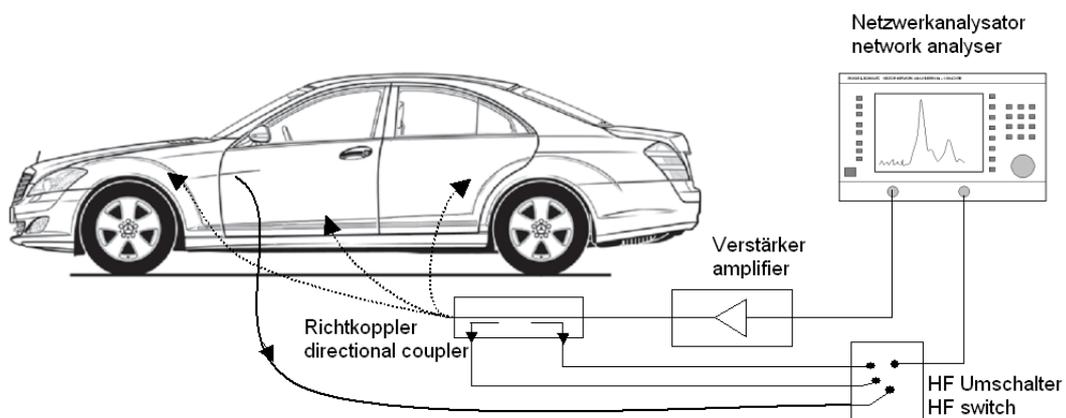


Fig. 1: Schematischer Aufbau zur Ermittlung von Transferfunktionen an verschiedenen Einkoppelpunkten am Fahrzeug  
Schematic setup to measure transfer functions of different injection locations in a vehicle

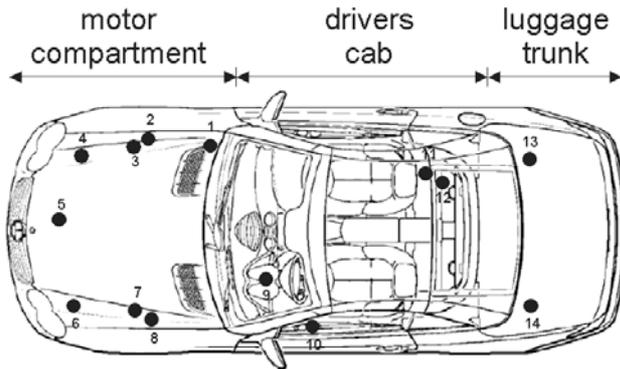


Fig. 2: Unterteilung des Fahrzeugs in drei Hauptteile  
Division of a vehicle in three main areas

Da im Fahrzeugkabelbaum Impedanzen im Bereich von mehreren hundert Ohm vorherrschen, die Ausgangsimpedanzen von Verstärker und Netzwerkanalysator aber  $50 \Omega$  betragen, ist ein Richtkoppler notwendig, um die tatsächlich ins Fahrzeug eingekoppelte Leistung zu bestimmen. Damit können Messfehler wegen der unvermeidlichen Reflexionen aufgrund von Fehlanpassung korrigiert werden.

Neben der direkten galvanischen Einkopplung in einzelne Leiter kann mit Hilfe einer Stromzange auch in mehrere Leiter eines Kabelbaums eingekoppelt werden. Fig. 3 zeigt eine solche Einkopplung in eine Sensorleitung im Fahrzeug.

Fig. 3: Einkopplung eines Störsignals in einen Kabelbaumabschnitt im Fahrzeug  
Injection of the interference signal in a part of the vehicle's harness



In Fig. 4 werden drei Transferfunktionen von verschiedenen Fahrzeugen gezeigt. Die jeweiligen Einkoppelpunkte sind an vergleichbaren Orten im Fahrzeug gewählt. Als Empfangsantenne wird die fahrzeugeigene Rundfunkantenne verwendet, weshalb das Hauptaugenmerk auf den FM-Frequenzbereich gelegt wird. In Fig. 4 ist dies durch die gestrichelten, vertikalen Linien dargestellt. In dem Schaubild ist zu sehen, dass Fahrzeuge der gleichen Baureihe (Car 1 und Car 2) eine gute Übereinstimmung der Transferfunktionen zeigen, während die Transferfunktion des Fahrzeugs anderer Bauart (Car 3) eine deutliche Abweichung aufweist.

Auf diese Weise können mittels Transferfunktionen bereits zu einem frühen Zeitpunkt in der Entwicklung neuer Fahrzeuge die möglichen Überkopplungen von verschiedenen Einbauorten auf die Fahrzeugantennen abgeschätzt werden. Die unterschiedlichen Einbauorte können somit hinsichtlich ihres Störpotentials bewertet werden. Dies kann bei der Dimensionierung und Festlegung von Grenzwerten für entsprechende Steuerkomponenten, abhängig von deren Einbauort, berücksichtigt werden, ohne dass ein Prototyp des Fahrzeugs notwendig ist.

Fig. 1 shows a typical measurement setup to acquire transfer functions of a vehicle. With the network analyser an injection on different assembly locations takes place, and the voltage on the antenna base point is measured. An additional amplifier could be used to increase the signal-noise ratio. In that way measurements without a screened room are possible.

An additional directional coupler is required because the impedances of the cable harness in the vehicle are typically in the range of 200 to 400  $\Omega$ , whereas the impedance of the network analyser and the amplifier is 50  $\Omega$ . With the directional coupler one can measure the power injected into the cable harness and the power reflected due to impedance mismatch.

Beyond the direct galvanic injection into a single wire of the vehicle's harness, an injection clamp could be used to couple into several wires of the harness. Fig. 3 shows such an injection clamp mounted over a sensor cable in a vehicle.

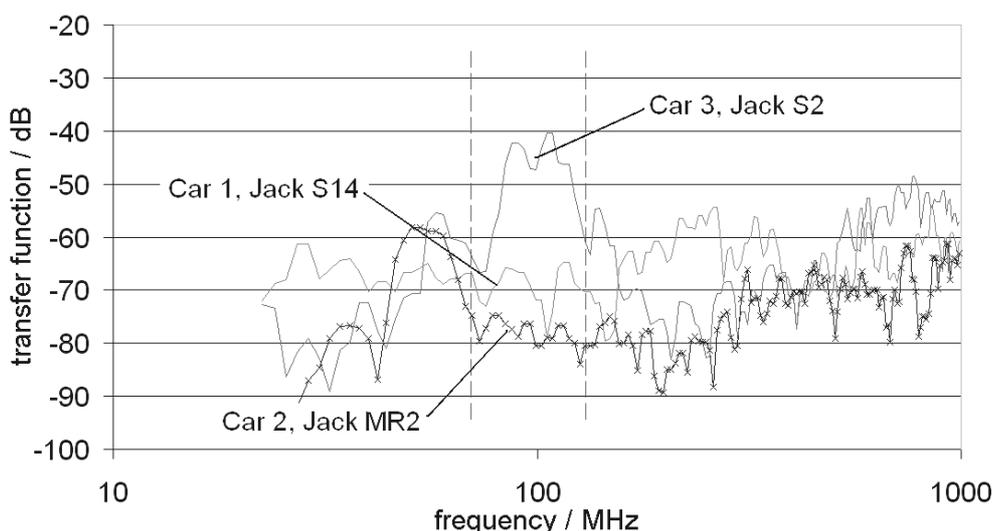


Fig. 4: Vergleich ähnlicher Einkoppelpositionen an unterschiedlichen Fahrzeugen gleicher (Car 1, Car 2) und verschiedener (Car 3) Bauart  
 Comparison of similar injection points on different vehicles of the same (Car 1, Car 2) and other (Car 3) type series

Fig. 4 shows a comparison of three different vehicles. The injection locations are chosen as similar as possible in all vehicles. The coupling is measured between the injection locations and the radio broadcast antenna, therefore the attention should mainly be drawn to the FM-range marked with vertical, dashed lines in the diagram. This diagram demonstrates that vehicles of the same type series (Car 1, Car 2) show a good accordance, while the vehicle of the other type series (Car 3) shows a big deviation in the interesting frequency range.

With the help of such transfer functions the disturbance capability of different assembly locations could be assessed in an early stage of the development process, without the need to measure at a prototype vehicle.

## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

H. M. Rebholz, S. Tenbohlen

*Simulationsmodelle zur Bestimmung der Funkstörfeldstärke beliebiger Leiteranordnungen für den Komponentenaufbau nach CISPR25.*

EMV 2008, Düsseldorf, 19.-21. Febr. 2008, Konferenzband S. 195

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

*Einsatz von Transferfunktionen zur Klassifizierung von Einbauorten elektronischer Steuergeräte im Kraftfahrzeug.*

EMV 2008, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 19.-21. Februar 2008, Band zum Kongress, Seite 439

G. Voigt, S. Tenbohlen

*Tan Delta Messungen und Teilentladungsdiagnose bei VLF Prüfspannungen.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, 05.-06. März 2008, Stuttgart

S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl

*Sensitivity of UHF PD measurements.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, 05.-06. März 2008, Stuttgart

M. Koch, M. Krüger, S. Tenbohlen

*Moderne Verfahren zur Wasserbestimmung in Leistungstransformatoren.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, 05.-06. März 2008, Stuttgart

R. Seibold, S. Tenbohlen

*Wasseraufnahmevermögen und Alterungsverhalten von Pflanzenölen für Leistungstransformatoren.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, 05.-06. März 2008, Stuttgart

A. Weinläder, C. Schmied

*Die Kühlung von Transformatoren bei Einsatz von Pflanzenölen.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, 05.-06. März 2008, Stuttgart

R. Grund, D. Denissov, T. Klein, L. Zühlke, W. Köhler, S. Tenbohlen

*Anwendung der UHF-TE-Messtechnik an Hochspannungskabelgarnituren.*

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, 05.-06. März 2008, Stuttgart, pp. 191-200

P. Jarman, B.-O. Stenestam, I. Hunter, A. Garnitschnig, E. Mortensen, K. Viereck, R. Kuppuswamy, S. Tenbohlen, S. Meijer, A. Wilson, M. Chauke, M. Judd, J.

Vancotthem, D. Woodcock, C.J. Dupont, J. Harley, N. Fantana, J. Aubin, V. Sokolov,

S. Mehta, B. Ward

*Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers.*

Report WG A2.27 (CIGRE), Electra, No. 237, April 2008, pp. 48-57

P. Picher, J. Lapworth, T. Noonan, J. Christian, M. Alpatov, D. Bormann, R. Breytenbach, P. Dick, A. Drobyshovski, I. Dumbrava, R. Fisher, H. K. Hoidalén, P. Jarman, I. Kispal, A. Kraetge, T. Leibfried, R. Malewski, R. Ocon, E. Perez, J. Rickmann, Y. Shirasaka, S. Tenbohlen, M. Tiberg, Z. Wang, P. Werelius, R. Zaleski  
*Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA).*

Report WG A2.26 (CIGRE), Electra, No. 237, April 2008, pp. 34-46

P. Jarman, B.-O. Stenestam, I. Hunter, A. Garnitschnig, E. Mortensen, K. Viereck, R. Kuppuswamy, S. Tenbohlen, S. Meijer, A. Wilson, M. Chauke, M. Judd, J. Vancotthem, D. Woodcock, C.J. Dupont, J. Harley, N. Fantana, J. Aubin, V. Sokolov, S. Mehta, B. Ward

*Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers.*

Brochure 343, WG A2.27 (CIGRE), April 2008

P. Picher, J. Lapworth, T. Noonan, J. Christian, M. Alpatov, D. Bormann, R. Breytenbach, P. Dick, A. Drobyshovski, I. Dumbrava, R. Fisher, H. K. Hoidalén, P. Jarman, I. Kispal, A. Kraetge, T. Leibfried, R. Malewski, R. Ocon, E. Perez, J. Rickmann, Y. Shirasaka, S. Tenbohlen, M. Tiberg, Z. Wang, P. Werelius, R. Zaleski  
*Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA).*

Brochure 342, WG A2.26 (CIGRE), April 2008

S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl

*Attenuation of UHF signals regarding the Sensitivity Verification for UHF PD Measurements on Power Transformers.*

IEEE Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Peking, China, April 21-24, 2008, paper No. K1-4

S.M. Hoek, S. Coenen, M. Bornowski and S. Tenbohlen

*Fundamental Differences of the PD Measurement according to IEC 60270 and in UHF range.*

IEEE Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Peking, China, April 21-24, 2008, paper No. A2-1

M. D. Judd, S. Meijer and S. Tenbohlen

*Sensitivity check for RF PD detection for power transformers.*

IEEE Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Peking, China, April 21-24, 2008, paper No. K1-03

- D. Denissov, W. Köhler, S. Tenbohlen, R. Grund, T. Klein  
*Wide and narrow band PD detection in plug-in cable connectors in the UHF range.*  
International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008, Peking, China, April 21-24, 2008, K1-09
- M. Koch, M. Krüger, S. Tenbohlen  
*Onsite-Diagnostik zur Feuchtebestimmung in Transformatoren*  
Bulletin SEV/AES 13/2008
- D. Denissov, W. Köhler, S. Tenbohlen, R. Grund, T. Klein  
*Simulation of UHF PD wave propagation in plug-in cable terminations.*  
2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, ISEI 2008, Vancouver, Canada, June 8–11, 2008, pp. 547-550
- V. Sokolov, J. Aubin, V. Davydov, H.-P. Gasser, P. Griffin, M. Koch, L. Lundgaard, O. Roizman, M. Scala, S. Tenbohlen, B. Vanin  
*Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems.*  
Report WG A2.30 (CIGRE), Electra, No. 238, June 2008, pp. 24-33
- V. Sokolov, J. Aubin, V. Davydov, H.-P. Gasser, P. Griffin, M. Koch, L. Lundgaard, O. Roizman, M. Scala, S. Tenbohlen, B. Vanin  
*Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems.*  
Brochure 349, WG A2.30 (CIGRE), June 2008
- T. Hayder, U. Schärli, K. Feser, L. Schiel  
*Universal Adaptive Differential Protection for Regulating Transformers.*  
IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, Vol. 23, No. 2, pp. 568-575
- P. Karimifard, G. B. Gharehpetian und S. Tenbohlen  
*Determination of axial displacement extent based on transformer winding transfer function estimation using vector-fitting method*  
European Transactions on Electrical Power, 2008, Vol. 18, pp. 423–436
- A. Pfeffer, T. Steiner, S. Tenbohlen  
*Neuerungen bei der Auswertung von Blitzstoßspannungsverläufen bei der Transformatorprüfung.*  
ETZ, Heft 8/2008, S. 50-53
- H. M. Rebholz, S. Tenbohlen  
*A Fast Radiated Emission Model for Arbitrary Cable Harness Configurations Based on Measurements and Simulations.*  
EMC 2008, Detroit, USA, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 18-22, 2008, pp. 1-5

H. M. Rebholz, S. Tenbohlen

*Prospects and Limits of Common- and Differential-Mode Separation for the Filter Development Process.*

EMC Europe 2008, Hamburg, 08.-12. September 2008, Proceedings - Part II, paper No. 130, pp. 419-424

F. Streibl, S. Tenbohlen, J. Hartmann, M. Zerrer

*Derating of Ceramic Capacitors during Electrostatic Discharges.*

EMC Europe 2008, Hamburg, 08.-12. September 2008, Proceedings - Part II, paper No. 299, pp. 187-190

H. M. Rebholz, S. Tenbohlen

*Efficient Characterization of RF Sources for the Design of Noise Suppression Filters.*

ISAPE 2008, International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 02.-06. Nov. 2008, paper No. 072

S. Tenbohlen, M. Koch, D. Vukovic, A. Weinläder, J. Baum, J. Harthun, M. Schäfer, S. Barker, R. Frotscher, D. Dohnal, P. Dyer

*Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers*

CIGRE Session 2008, Paris, France, August 24-29, 2008, paper No. A2-102

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

*Application of UHF method for on-line PD diagnostics of cable terminations.*

CIGRE Session 2008, Paris, France, paper No. B1-203

J. Aragón-Patil, M. Fischer, S. Tenbohlen, Z.D. Wang, M. Schäfer, I. Atanasova-Höhlein

*Investigation on Sampling, Measurement and Interpretation of Gas-in-Oil Analysis for Power Transformers.*

CIGRE Session 2008, Paris, France, August 25-29, 2008, paper No. D1-204

S. Tenbohlen, A. Weinläder

*Modellierung der Ölströmung und Temperaturverteilung in Leistungstransformatoren.*

Transformer Life Management Tagung, Hannover 2008

A. Weinläder, S. Tenbohlen

*Thermohydraulische Untersuchung von Transformatorwicklungen durch Messung und Simulation.*

ETG-Fachtagung: Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Würzburg 2008

M. Koch, S. Tenbohlen

*Der Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften auf dielektrische Messungen an Öl-Papier-Isolierungen*

ETG-Fachtagung: Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Würzburg 2008

S. Tenbohlen, M. Koch, R. Seibold

*Das Alterungsverhalten verschiedener Esterflüssigkeiten für Leistungstransformatoren*

ETG-Fachtagung: Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Würzburg 2008

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

*The Benefit of Characteristic Transfer Functions in Automotive EMC.*

ISAPE 2008, International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 02.-06. November 2008, paper No. 089

S. Tenbohlen, S. Hoek, D. Denissov, S. M. Markalous

*Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range.*

IEEE Tr. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp. 1544-1552

S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous, T. Strehl

*Sensitivity of UHF PD Measurements in Power Transformers.*

IEEE Tr. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp. 1553-1558

S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser

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

IEEE Tr. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp. 1576-1583

## 7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 25.01.08 Sitzung des DK Cigre D1 am Institut
- 29.01.08 Sitzung des ETG-Vorstandes in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 15.02.08 Sitzung der CIGRE Arbeitsgruppe WG D1.01.14 „*Dielectric response diagnosis for transformer windings*“ am Institut
- 19.-21.2.08 EMV 2008, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, Vortrag M. Zerrer
- 05.-06.03.08 Stuttgarter Hochspannungssymposium "*Modernes Design und zuverlässiger Betrieb von Komponenten des elektrischen Netzes*", Filderhalle Leinfelden-Echterdingen, Vorträge von S. Coenen, D. Denissov, S. Hoek, S. Tenbohlen, A. Weinländer
- 02.04.08 Sitzung der VDE-Kommission K 122 „*Isolationskoordination*“ in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 17.04.08 Sitzung des DAK CIGRE A2 in Mönchengladbach, Prof. Tenbohlen
- 21.-24.04.08 IEEE Konferenz „*Conference on Conditon Monitoring and Diagnosis*“, Peking, S. Coenen: 2 Vorträge, 1 Poster
- 09.06.08 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, Canada, June 8–11, 2008, Vortrag von D. Denissov
- 16.-17.06.08 "Transformer Life Management" 2008, Tagung in Hannover, Vortrag von Prof. Tenbohlen „Modellierung der Ölströmung und Temperaturverteilung in Leistungstransformatoren“
- 26.-27.06.08 Sitzung der VDE-Kommission K 124 „*Hochspannungsprüftechnik*“ in Berlin, Prof. Tenbohlen
- 30.06.08 Sitzung des ETG-Vorstandes in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 03.-04.07.08 CIGRE-Sitzungen TF D1.03.09 und WG D1.25 in Berlin, Prof. Tenbohlen
- 24.-29.08.08 CIGRE-Session 2008 in Paris, Prof. Tenbohlen
- 01.-05.09.08 Tagung der CIGRE-Arbeitsgruppe WG D1.33 „*Hochspannungsprüf- und Messtechnik*“ auf Mallorca, Prof. Tenbohlen
- 08.-12.09.08 EMC Europe 2008, Hamburg  
Prof. Tenbohlen, Vorträge von H. Reholz und F. Streibl
- 16.-17.09.08 ETG-Tagung „Grenzflächen in elektrischen Energiesystemen“, Prof. Tenbohlen (Mitglied des Programmkomitees), M. Heindl, A. Weinländer (Vortrag)
- 19.09.08 Sitzung der CIGRE-Arbeitsgruppe WG D1.01.16 „*Dielectric response diagnoses for transformer windings*“ in Grenoble, Prof. Tenbohlen
- 22.-26.09.08 14<sup>th</sup> Int. Workshop on High Voltage Engineering, Dymaczewo, Poland, Prof. Tenbohlen, Vorträge von S. Coenen, M. Heindl, P. Müller, A. Pfeffer, T. Schmid und D. Vukovic
- 05.-09.10.08 IEEE/PESTransformers Committee Fall 2008 Meeting in Porto, Prof. Tenbohlen

- 10.10.08 Sitzung der CIGRE-TF D1.01.15 „*New Applications for DGA*“ in Porto, Prof. Tenbohlen
- 02.-06.11.08 ISAPE 2008, International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, Vorträge von H. Rebholz und M. Zerrer
- 05.-06.11.08 Sitzung der CIGRE-WG A2.35 „*Experiences in service with alternative fluids*“ in Manchester, Prof. Tenbohlen
- 04.-05.11.08 VDE-Kongress, München, S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Heindl
- 04.12.08 Sitzung der CIGRE-TF D1.03.09 "*Risk Assessment of Defects in GIS based on PD Diagnostics*" in Stuttgart, Prof. Feser, Prof. Tenbohlen
- 05.12.08 Sitzung der CIGRE WG D1.25 "*Review of UHF and acoustic PD detection on GIS*" in Stuttgart, Prof. Feser, Prof. Tenbohlen
- 09.-11.12.08 Sitzung der CIGRE WG A2.38 "*Thermal Modelling*" in Stuttgart, Prof. Tenbohlen, A. Weinläder

## 8. EREIGNISSE UND KONTAKTE

Vom 28. April bis 7. Mai 2008 besuchte uns Herr Assoc. Prof. Dr.-Ing. Krasimir Ivanov aus Gabrovo/Bulgarien und hielt Vorträge über die Entwicklungen auf dem bulgarischen Energiesektor. Außerdem war Herr M. Sc. Hector David Gomez Montoya aus San Juan/Argentinien sechs Monate bis Ende Oktober 2008 am Institut, um mehr Erfahrung mit der Messung von Transferfunktionen von Leistungstransformatoren zu gewinnen. Seit Anfang Oktober arbeitet Frau M. Sc. Su SU WIN aus Birma mit einem Stipendium des DAAD auf dem Gebiet der Teilentladungsmessung bei uns.

Traditionell fanden auf dem Söllerhaus vom 26.-28. März 2008 und vom 30. September bis 2. Oktober 2008 die Mitarbeiter-Workshops statt. Die akademischen Mitarbeiter berichteten über den aktuellen Stand ihrer Arbeit und nutzten die Möglichkeit zur Diskussion. Die freie Zeit konnte mit Wanderungen und Skilaufen verbracht werden.

Zum ersten Mal wurde im Mai diesen Jahres die Hochspannungshalle zur Partyzone umfunktioniert. Überwiegend Studenten, Mitarbeiter und Ehemalige, aber auch neugierige Leute aus dem Umfeld der Universität hatten sich bei einigen Getränken zusammen gefunden um zu feiern. Ein DJ sorgte für die nötige Musik, damit das Tanzbein in der Halle geschwungen werden konnte. Dank der Unterstützung der Fachschaft (Sound, Bar, Licht ...) und allen fleißigen Helfern war das Fest ein voller Erfolg. Die Location wurde allseits als extrem cool gelobt. So wird der Maiball auf jeden Fall nächstes Jahr seine Wiederholung finden.

Der Institutsausflug am 22. Juli 2008 führte uns mit der Bahn zur Ostalb nach Heubach, wo zunächst der Rosenstein angegangen wurde. Von Bier und Vesper aus dem Catering-Wagen Pfeffer gestärkt ging es weiter zur Ruine Rosenstein und zur Grillstelle bei der Waldschenke. Alle, die sich vorsorglich mit einer Taschenlampe ausgestattet hatten, konnten einen Abstecher zum "Finsteren Loch" machen, eine Höhle, die sich weit in den Berg hineinzieht. Wieder zurück in Heubach gab uns ein erfahrener Braumeister Einblick in die Herstellung der Heubacher Biere. Zu guter Letzt stärkten wir uns im Alten Sudhaus in sehr angenehmer Atmosphäre. Einen herzlichen Dank an Anne für die Organisation!

IEH steigt ins Fernsehgeschäft ein! An drei Drehtagen wurden durch ein Filmteam des Fernsehsenders ProSieben Strommythen untersucht. „Stromexperte“ Sebastian Coenen zeigte durch verschiedene Experimente eindrucksvoll, warum es gefährlich ist, bei Gewitter im Schimmbad zu sein und wann Strom gefährlich ist. Dabei musste unter anderem die Feuerwehr Büsnau ein Schwimmbecken in der Hochspannungshalle aufbauen und füllen. Es war für uns alle eine neue Erfahrung, vor der Kamera zu stehen und komplizierte Sachverhalte in ein sehr kurzes, auch für Laien verständliches Statement zu pressen. Die oscarverdächtigen Beiträge wurden in zwei

verschiedenen Folgen des Wissensmagazins Galileo im Vorabendprogramm ausgestrahlt. Die Mitschnitte können Sie unter <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/links/> abrufen.



### *Dreharbeiten in der Hochspannungshalle für Galileo Beitrag*

Am 22.10.2008 fand am Institut das erfolgreiche Audit zum neuen Bachelorstudiengang „Erneuerbare Energien“ statt. Die Auditoren der Agentur ASIIN trafen sich dabei mit allen Beteiligten zum Gespräch und Austausch. Das große Interesse, das diesem Studiengang in der Universität entgegengebracht wird, zeigt sich durch die Teilnahme der Hochschulleitung mit Rektor Prof. Dressel, eine große Gruppe von Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern sowie 25 Fachkollegen, die in dem neuen Studiengang lehren werden. Nach fast zwei Jahren intensiver Planung freuen wir uns nun alle auf die Studierenden, die diesen Studiengang ab dem nächsten Wintersemester belegen werden.

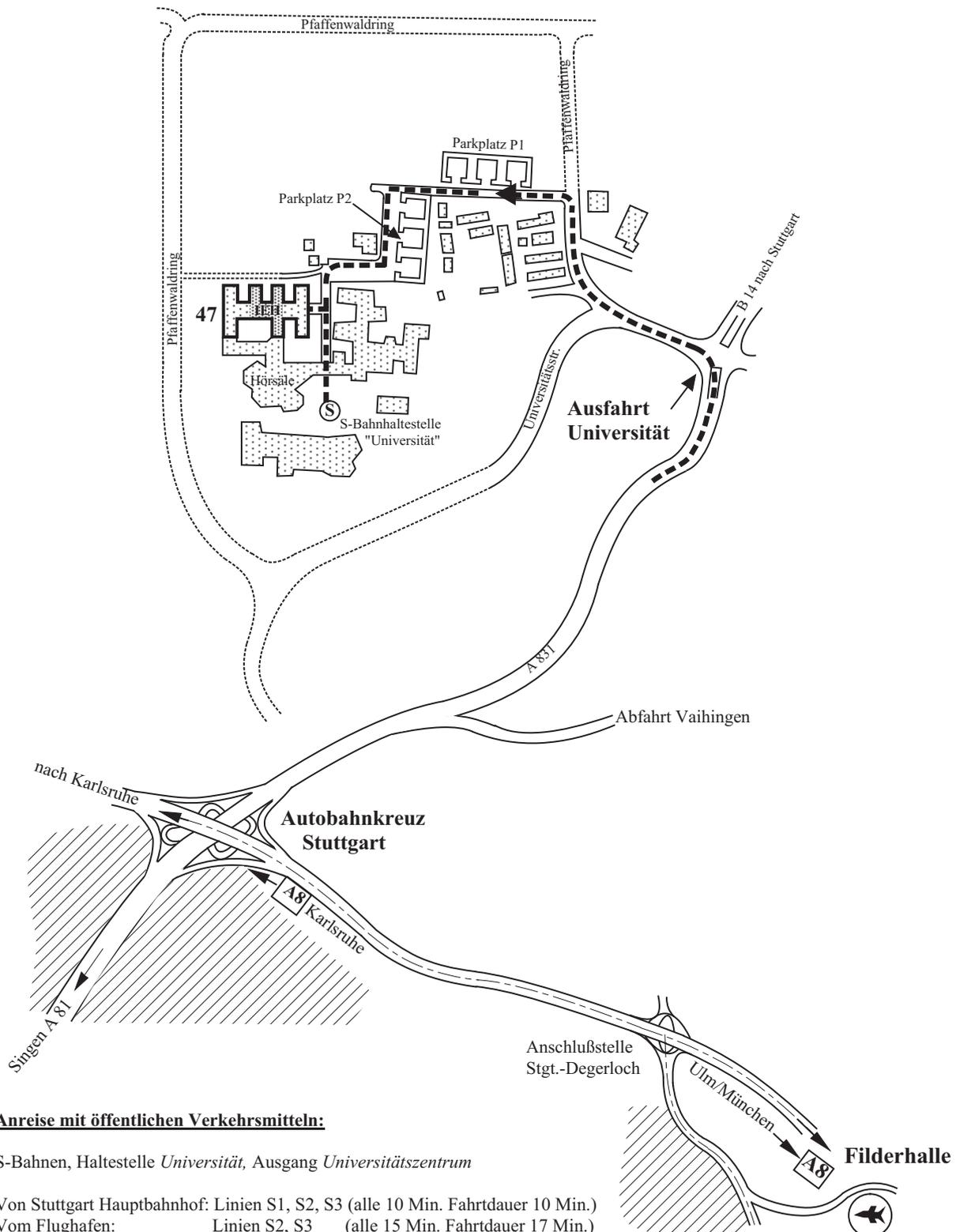
Im Rahmen des Jahreskongresses des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V. (VDE) in München wurde am 3. November 2008 Maximilian Heindl mit dem SAG Award für seine Diplomarbeit "Empfindlichkeitsuntersuchung zur UHF-Teilentladungsmessung" ausgezeichnet. Das IEH gratuliert ihm zu dieser schönen Anerkennung. Die SAG Awards werden gemeinsam von der SAG GmbH und dem VDE ausgelobt.

## 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, Gaschromatographen

## 10. LAGEPLAN

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



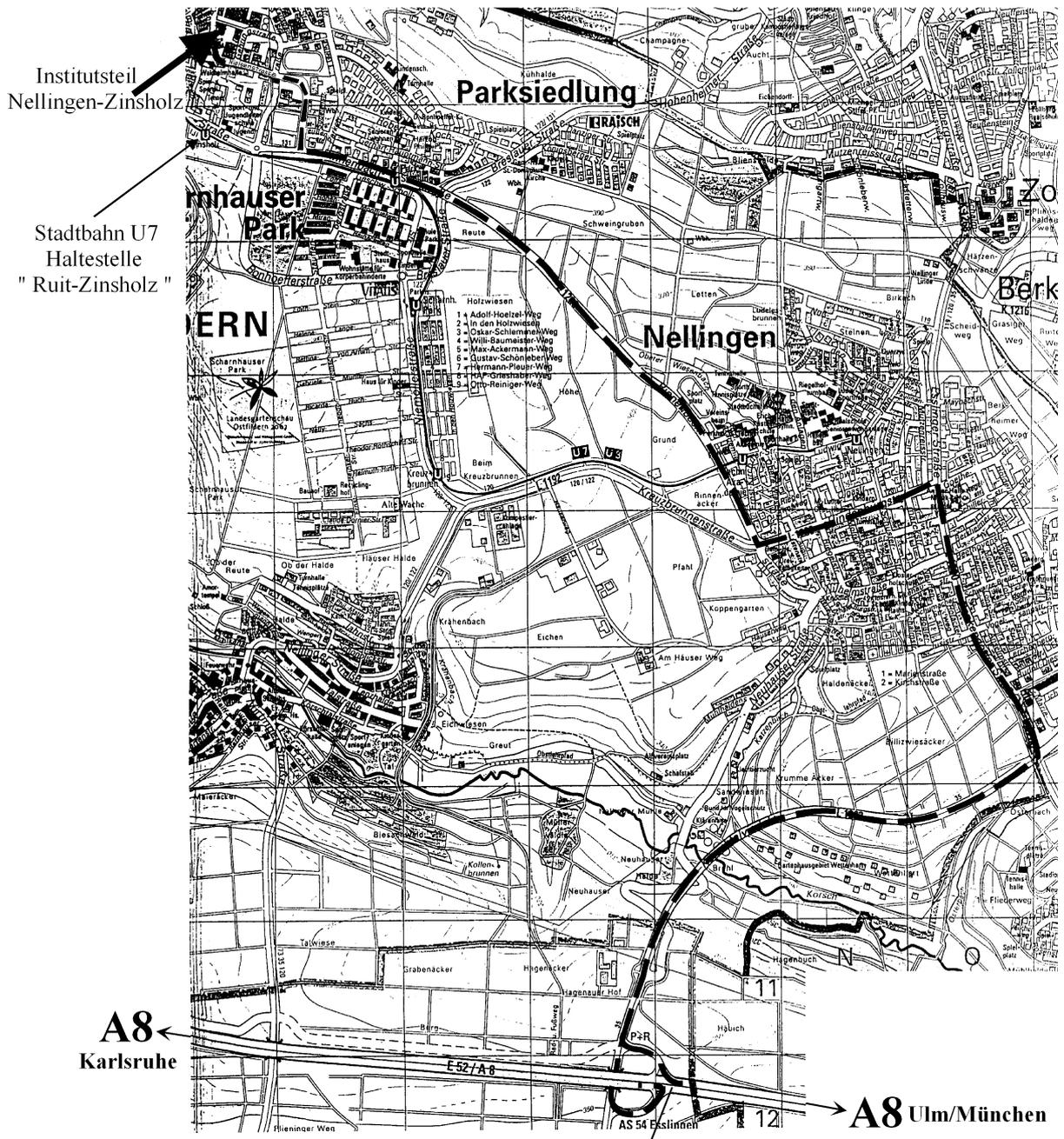
### Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

S-Bahnen, Haltestelle *Universität*, Ausgang *Universitätszentrum*

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

Vom Flughafen: Linien S2, S3 (alle 15 Min. Fahrtdauer 17 Min.)

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



**Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:**

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

**Anschlußstelle  
54 Esslingen/Ostfildern**

## 11. NOTIZEN