

INHALTSÜBERSICHT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	8
3.1	VORLESUNGEN	8
3.2	PRAKTIKA.....	12
3.3	EXKURSIONEN	13
3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN.....	14
4.	PROMOTIONEN.....	31
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	31
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	31
5.2	ENERGIEÜBERTRAGUNG	31
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	31
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	31
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	31
8.	EREIGNISSE UND KONTAKTE	31
9.	PRÜFEINRICHTUNGEN	31
10.	LAGEPLÄNE.....	31

1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2009 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre am Institut und unserer Universität informieren.

Schon im letzten Jahresbericht hatten wir über das Konzept des neuen interdisziplinären Bachelorstudiengangs Erneuerbare Energien berichtet, der nun zum Wintersemester 2009 erstmals an der Universität Stuttgart angeboten wurde. Die Kombination von Modulen der erneuerbaren Energien mit klassischen Studienfächern aus der Elektrotechnik und dem Maschinenbau soll junge Menschen auf die vielfältigen Tätigkeitsfelder der Energietechnik optimal vorbereiten. Als Studiendekan dieses neuen Studienganges freut es mich besonders, dass dieses Konzept einen außerordentlichen Anklang bei den Studienanfängern gefunden hat. Der Studiengang war um ein Vielfaches überzeichnet, so dass wir uns wirklich exzellente Studierende auswählen konnten. Besonders ist dabei auch zu erwähnen, dass der sonst in den Ingenieurwissenschaften eher kleine Frauenanteil bei etwa einem Drittel liegt.

Erfreulicherweise wird die Schaffung der neuen Studienplätze auch von der Politik finanziell honoriert. So werden wir im nächsten Jahr erstmals für unseren Fachbereich eine Juniorprofessur zum Thema „Smart Power Grids“ besetzen können. Die Juniorprofessur soll am IEH das Gebiet der Smart Grids in Forschung und Lehre vertreten und dabei die Auswirkungen auf die Struktur und den Betrieb des elektrischen Netzes untersuchen, die sich durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien ergeben.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben der Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Rene Wimmer zur Ermittlung der Übertragungsfunktion von Großtransformatoren dokumentieren 32 Veröffentlichungen eindrucksvoll unsere Aktivitäten. Allein mit zwölf Beiträgen waren wir beim 16. Internationalen Symposium on High Voltage Engineering (ISH) vertreten, das diesmal in Kapstadt, Südafrika stattfand. Die Veröffentlichungen liegen auch auf unserer Homepage www.ieh.uni-stuttgart.de zum Download bereit.

Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns, in diesem Jahr sechs neue Mitarbeiter einzustellen, die sich neuer Fragestellungen annehmen werden. Dipl.-Ing. Michael Beltle, Dipl.-Ing. Andreas Müller und Dipl.-Ing. Nikolas Schmidt werden Vibrationen, das Gasungsverhalten und das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren untersuchen. Dipl.-Ing. Alexander Probst und Dipl.-Ing. Patrick Wajant werden sich mit Fragestellungen zur Elektromobilität und der Modellierung

dezentraler Einspeiser befassen. Das Ziel der Arbeit von Dipl.-Ing. Martin Reuter ist die Impedanzanalyse von Hochvoltleitungen im Automobil.

Unsere diesjährige „Pfingstexkursion“ mit den Studenten der Vertiefungslinie „Elektrische Energiesysteme“ führte uns in die Schweiz und nach Vorarlberg zu den Firmen ABB, Brugg Kabel, Omicron electronics und Baur. Den Abschluss bildete ein Besuch des neuen Pumpspeicherkraftwerks Kopswerk der Vorarlberger Illwerke. Durch solche Exkursionen können die Studierenden nicht nur die in der Vorlesung theoretisch vorgestellten Dinge in der Praxis ausgeführt sehen, sondern auch die Unternehmen dieser Branche besser kennen lernen. Ich möchte mich daher an dieser Stelle bei den Firmen und Partnern bedanken, die durch ihr Engagement dazu beigetragen haben, diese Exkursionen zu ermöglichen.

Neben den jährlich stattfindenden VDE-Seminaren „Klassische und moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren“ werden wir das traditionsreiche Stuttgarter Hochspannungssymposium wieder am 9.-10.3.2010 im bekannten Rahmen in der Filderhalle in Leinfelden durchführen. Der erste Konferenztag wird dem Thema Diagnostik gewidmet sein. Nachdem im letzten Sommer der Begriff Teilentladung sogar von Politikern in den Mund genommen wurde, ist es sicherlich an der Zeit, über die Möglichkeiten und aber auch Grenzen der Diagnostik zu diskutieren. Dankenswerterweise wird diese Veranstaltung von mehreren Industriepartnern unterstützt, so dass der unabhängige und vor allem sehr praxisnahe Charakter dieser Veranstaltung gewahrt bleiben wird.

Das ausführliche Programm und weitere Informationen hierzu finden Sie auf unserer Homepage www.ieh.uni-stuttgart.de/symposium. Wir freuen uns schon jetzt auf interessante Beiträge und die traditionell lebhaften Diskussionen.

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 2009

Prof. Stefan Tenbohlen

PREFACE

Dear friends!

Our annual report 2009 offers again an overview of new developments concerning lectures and research at our institute and university.

In winter term 2009/2010 the University of Stuttgart finally introduced the new Bachelor of Science in Renewable Energies. The combination of modules from renewable energies with modules of “classic” electrical and mechanical engineering will prepare students in an optimal way to the various fields of power engineering. As being the dean of this new course I am glad to say that this concept provoked an overwhelming interest in the group of applicants for a place to study. The number of applicants for this new bachelor course was so high that we could choose really excellent students. 30 % of the beginners in Renewable Energies are female, which is much more than in the “classic” engineering courses.

Fortunately the government increased the universities’ financial resources to enable a growing number of students. Thus in 2010 a junior professor for “Smart Power Grids” will join the IEH. He or she will be a lecturer as well as a researcher. The research topic will be the effects on the structure and operation of electrical power networks resulting from an increasing usage of renewable energies.

Concerning our scientific work we look back on a very successful year. The PhD-thesis of Rene Wimmer (Determination of the Transfer Function of Power Transformers) and 32 publications document the large variety of our research activities. The most important conference for us was the 16. International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Cape Town/South Africa, where we gave 12 contributions. You can download our publications from our homepage www.ieh.uni-stuttgart.de.

In 2009 a large number of IEH-graduates and a lot of industrial encouragements enabled us to employ 6 additional researchers. Michael Beltle, Andreas Müller and Nikolas Schmidt will analyse vibrations, dissolved gas generation and thermal behaviour of power transformers. Alexander Probst and Patrick Wajant will focus on e-mobility and simulation models for distributed resources. Martin Reuter’s topic will be the analysis of the impedance of automotive high voltage cables.

During this year’s „summer excursion“ with students of electrical power systems we visited ABB and Brugg Cables in Switzerland and in Austria Omicron electronics, Baur and the new pumped storage power plant Kopswerk of Illwerke Vorarlberg. Such excursions show the industrial world to our students and permit valuable contacts to industry. Thus I would like to thank the companies and partners contributing to our excursions with financial help and personal efforts.

In the beginning of March we will organize in collaboration with the VDE two workshops, which will present classic and modern diagnostic methods for power transformers.

On March 9 and 10 the traditional *Stuttgart High Voltage Symposium* will take place again in the Filderhalle in Leinfelden. The first conference day will be dedicated to diagnostics. After failures in nuclear power stations and the following political discussions (even “partial discharge” was used by politicians!) it is now necessary to discuss the possibilities as well as the limits of diagnostics. Our conference will be supported by several industrial partners, so that the independent and very practical character of the symposium will be preserved.

Please find the detailed programme and more information under www.ieh.uni-stuttgart.de/symposium. We look forward to the presentation of new developments and results and to interesting discussions.

Finally I would like to send my sincere thanks to all our friends, who have contributed to our success in many ways. Especially I would like to express my gratitude to the Deutsche Forschungsgemeinschaft and all those partners who supported us with research contracts and donations. We hope that our annual report will strengthen existing collaborations and help to establish new contacts. I also would like to refer to the chapter “diploma thesis” where you can find 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 2009

Prof. Stefan Tenbohlen

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail: vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	Telefon / phone: +49 (0)711-
Institutsleiter / Head of Institute:	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>DIGSILENT 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:	Dipl.-Ing. Michael BELTLE (ab 7.1.2009) Dipl.-Ing. Simon BUROW Dipl.-Ing. Sebastian COENEN Dipl.-Ing. Markus FISCHER Dipl.-Ing. Maximilian HEINDL	685-68061 -341 2075 -685-67869 -685-69197 -685-67857

Dipl.-Ing. Jens HOHLOCH	-341 2075
Dipl.-Ing. Mark JOVALEKIC	-685-67858
Dipl.-Ing. Andreas MÜLLER (ab 7.1.2009)	-685-67868
Dipl.-Ing. Peter MÜLLER	-341 2075
Dipl.-Ing. Anne PFEFFER	-341 2075
Dipl.-Ing. Alexander PROBST (ab 1.9.2009)	-685-69196
Dipl.-Ing. Heinz REBHOLZ	-685-69194
Dipl.-Ing. Martin REUTER (ab 28.9.2009)	-685-67817
Dipl.-Ing. Thomas SCHMID	-685-67867
Dipl.-Ing. Nicolas SCHMIDT (ab 9.11.2009)	-685-67809
Dipl.-Ing. Franz STREIBL	-685-67889
Dipl.-Ing. Patrick WAJANT (ab 17.8.2009)	-685-69193
Dipl.-Ing. Andreas WEINLÄDER	-685-67838
Dipl.-Ing. Dejan VUKOVIC	-685-69195

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
Patrick HACKBARTH, <i>Elektrotechniker</i> (ab 16.9.09)	-685-67863
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> (bis 31.5.09)	
Karl SOBING, <i>Elektromeister</i> (bis 30.6.09)	
Rudolf van de WEYER, <i>Elektromeister</i> (ab 1.7.09)	-341 2075

Gastwissenschaftler /

Visiting scientists:

Su SU WIN, Birma	
DAAD-Stipendiatin	
Dr. habil Zbigniew NADOLNY, Poznan University	
(1.9.2009 bis 29.9.2009)	

3. LEHRE

3.1 VORLESUNGEN

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Elektrische Energietechnik I

Sommersemester, 2 V, 1 S, für 2./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*
- *Belastbarkeit von Kabeln*
- *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*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN
und weitere Dozenten der Fakultäten 4 und 6

Einführung Erneuerbare Energien

Wintersemester, 4 V, 2 S, für 1. Semester des gleichnamigen Bachelorstudiengangs

- *Klimaschutz und Erneuerbare Energien*
- *Solarthermie*
- *Photovoltaik*
- *Windenergie*
- *Wasserkraft*
- *Biomasse*
- *Wasserkraft*
- *Wirtschaftlichkeit*

3.2 PRAKTIKA

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Grundlagenpraktikum in Elektrotechnik

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik im 1. und 3. Semester. Auch Studierende der Informatik mit Nebenfach Elektrotechnik nehmen teil. Die Versuche wurden von den elektrotechnischen Instituten der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik speziell für dieses Grundlagenpraktikum entwickelt und eingerichtet. Herr Dr. Schärli hat im Auftrag der Fakultät die Gesamtorganisation des Grundlagenpraktikums inne.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

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

DR.-ING. W. KÖHLER

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:

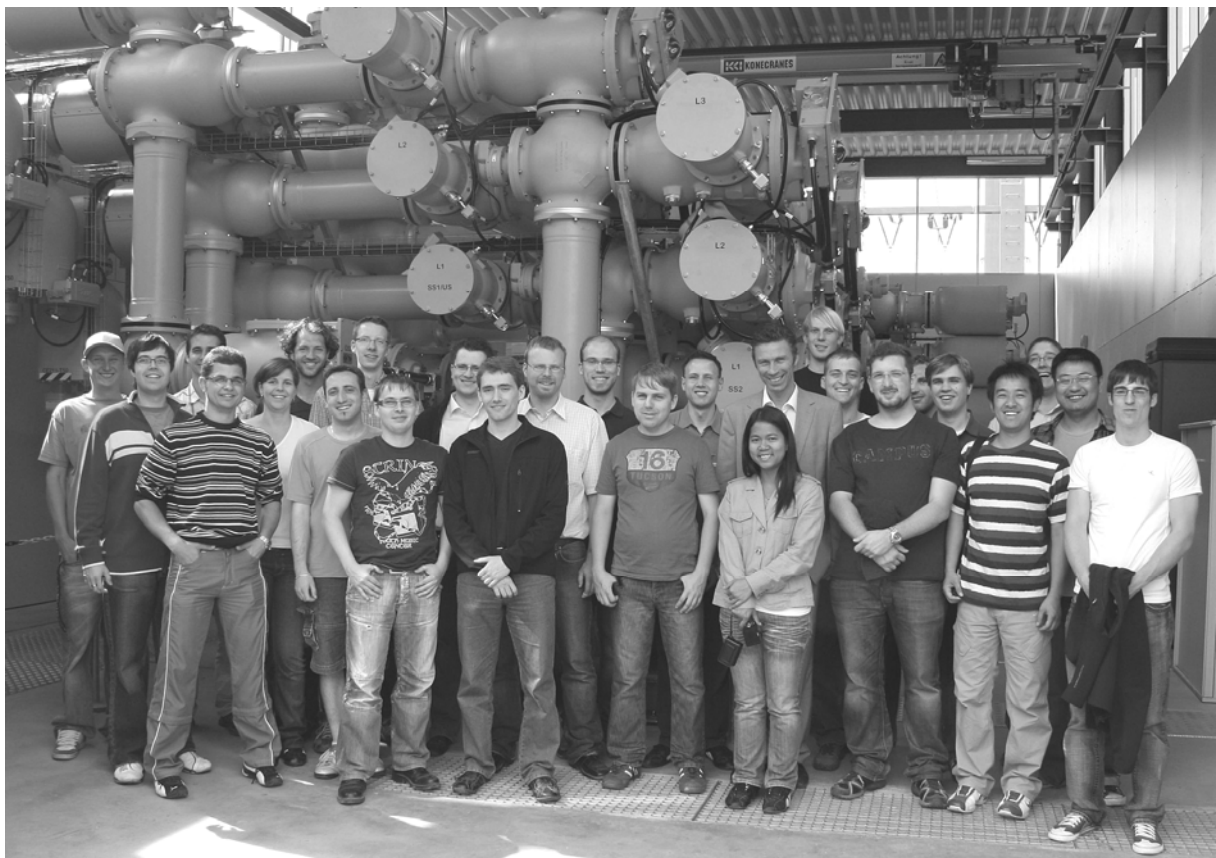
- Versuch 1: Erzeugung und Messung hoher Wechselspannungen
- Versuch 2: Erzeugung und Anwendung hoher Stoßspannungen
- Versuch 3: Netzschutz in Hochspannungsnetzen: Digitaler Schutz
- Versuch 4: Elektrisches Feld: Messmethoden, Berechnungsmöglichkeiten (am PC)
- Versuch 5: Wanderwellenvorgänge: Experiment 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 Teslatriansformator oder Stoßgenerator).

3.3 EXKURSIONEN

2. – 5. Juni 2009: Besuch mit 20 Hörern der Fachvorlesungen bei

- | | |
|------------------------------|---|
| - ABB Schweiz, Zürich: | Gasisolierte Schaltanlagen |
| - BRUGG Kabel, Brugg | Fertigung von Hochspannungskabeln |
| - ABB Micafil, Zürich | Durchführungen |
| - Omicron electronics, Klaus | Prüf- und Messtechnik |
| - Baur, Sulz | Prüf- und Messtechnik für Kabel/Isolierstoffe |
| - Vorarlberger Illwerke | Besichtigung des Kopswerks I/II und des Rifawerks |



Exkursionsteilnehmer vor der gasisolierten Schaltanlage des Kopswerks

15. Mai 2009, ganztägig

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

9. Juni 2009, 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 1.11.2008 bis 31.10.2009:

Arias, Kathleen Pena

Gas-in-Öl-Analyse (DGA) von Pflanzenöl basierten Isolationsflüssigkeiten unter elektrischer Belastung

Die Arbeit befasst sich mit dem Gasungsverhalten der natürlichen Esterflüssigkeit Envirotemp FR3 bei verschiedenen elektrischen Beanspruchungen. Es soll weiter untersucht werden, inwiefern Pflanzenöle als Isolationsmedium in Leistungstransformatoren verwendet werden können. Teilentladungen und Lichtbögen wurden unter Laborbedingungen produziert und das Gasungsverhalten untersucht. Insbesondere wurde mittels der Gas-in-Öl-Analyse die entstandene Gasmenge und die Veränderung über die Zeit beobachtet. Die Untersuchungen wurden sowohl mit Pflanzenöl als auch mit Mineralöl durchgeführt und die Ergebnisse verglichen.

Dissolved gas analysis (DGA) of vegetable oil-based insulating fluids under electrical stress

The present thesis concerns the gassing behavior of a natural ester fluid, Envirotemp FR3, under different types of electrical stresses. The possibility of using this natural ester as a dielectric fluid in power transformers is to be investigated. Different electrical stresses, such as partial discharge and arcing, were generated under laboratory conditions in order to investigate the gassing characteristics of this insulating fluid. Gas analyses were made and the amount, concentration, and change over time of dissolved gases in ester fluid in comparison with mineral transformer oil are presented and discussed.

Beltle, Michael

Automatisierte ESD-Evaluierung von Halbleitern

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines automatisierten Aufbaus zur elektrischen Vermessung von Automotive Chips nach elektrostatischen Entladungen. Vermessen werden die elektrischen Eigenschaften der einzelnen Pins, die mit Nennspannung versorgt werden. Von Interesse sind die Versorgungsströme und Leckströme gegen Masse oder gegen andere Pins. Nachdem der Prüfling mit dem Aufbau verbunden wurde, wird die Messung automatisch durchgeführt. Die Ergebnisse werden in einem Prüfprotokoll zusammengefasst. Die Daten lassen sich über einen Netzwerkanschluss oder über eine eingebaute Speicherkarte auslesen. Der Aufbau ist bedienerfreundlich über ein Touchscreen steuerbar. Das System ist modular aufgebaut, sodass sich Änderungen in der Ansteuerung des DUT leicht realisieren lassen.

Automated Evaluation of Semiconductors after ESD

The present work deals with the development of an automated system measuring the electrical characteristics of automotive chips after electrostatic discharge. The electrical properties of the individual pins are measured while being connected to rated

voltage supply. Of interest are operating currents and leakage current to ground or other pins. After connecting the device under test, the measurement is done automatically. The results are summarized in a measurement protocol. The data is available via a network connection or via a built-in memory card. The system is user-friendly controlled via a touchscreen. The design is modular, thus changes in the interface to the device under test can be easily realized.

Bornowski, Markus

Leitungsunsymmetrien im Höchstspannungsnetz

Leitungsunsymmetrien in Höchstspannungsnetzen können nur durch den konsequenten Einsatz der Verdrillung von Freileitungen beseitigt werden, was allerdings zu gesteigerten Kosten durch die notwendigen Sondermaste führt. Daher ist es wünschenswert, unverdrillte Leitungen zu errichten, was aber zu Überfunktionen des Schutzes führen kann. Im Rahmen der Arbeit wurden die positiven Effekte der Verdrillung und des Phasentauschs von Einfachleitungen betrachtet und Regeln für die Anordnung der Phasen bei unverdrillten Doppel- und Vierfachleitungen hergeleitet, bei denen nur geringe Unsymmetrien auftreten. Zusätzlich wurden am Beispiel einer realen Leitungstrasse die maximal möglichen Unsymmetrien ermittelt, um verbesserte Einstelldaten des Erdkurzschlussschutzes für hochohmige Fehler sowie der Messkreisüberwachung zu gewinnen.

Influence of untransposed overhead transmission lines

The emerging asymmetries of overhead lines can only be eliminated through consequent use of transposition, which certainly results in increased costs because of necessary non-standard towers. So it would be preferable to build untransposed overhead lines, but this might cause hyperfunctions of protective devices. Within this work favourable aspects of transposition and phase-swapping of single circuit lines have been looked at and rules have been affiliated for the arrangements of phase conductors at double and quad circuit overhead lines without transposition, where only minor asymmetries appear. Additionally the maximum asymmetries have been examined at an example of an overhead power line to gain improved settings for the zero-sequence directional power protection/ground fault protection on high-impedance faults and the measuring circuit self-checking function.

Brix, Jonathan

Entwicklung eines dreiphasigen Systems zur Detektion von Teilentladungs-impulsen in Anlehnung an die IEC 60270

In der Arbeit wird der Aufbau von analogen Integrierern zur Aufnahme von Teilentladungen, die Messung an einer Laboranordnung und deren Auswertung angestellt. Neben der Simulation der Integrierer-Hardware, deren Aufbau sowie Inbetriebnahme wurde auch ein Messaufbau sinnvoll erweitert, um weitere spätere Messungen leicht durchführen zu können. Die verschiedenen Messungen an der Anordnung und die Darstellung der Ergebnisse werden vorgestellt.

Development of a three-phase measurement system to detect PD impulses according to IEC 60270

This thesis contains the construction of analog integrators for partial discharge detection, the measurement on a lab arrangement and the evaluation of the results. Alongside the simulation of the integrator hardware as well as the built-up and activation of it, the optimisation and extension of an existent lab arrangement was done to make later measurements easily achievable. In this thesis the different measurements on the arrangement and their illustration are presented, too.

Drieguez, Ismael

Experimentelle Untersuchung der entstehenden Menge von Fehlgas und der Diffusion durch freies Öl im Konservator

Experimental investigation of the amount of fault gas generated and the diffusion through free oil level in conservator tank

Elek, Željka

Reserveschutz in elektrischen Energieversorgungsnetzen

Das Auftreten von Kurzschlüssen in elektrischen Energienetzen kann nie vollständig verhindert werden. Um die Auswirkung von Kurzschlüssen zu begrenzen, werden Schutzeinrichtungen eingesetzt, die sicher, schnell und selektiv reagieren. Falls das Schutzrelais beim Kurzschluss im Mittelspannungsnetz versagt, muss man einen Reserveschutz sicherstellen. Die Aufgabe dieser Diplomarbeit besteht darin, Kurzschlüsse in einer Netztopologie des Mittelspannungsnetzes zu simulieren und zu bewerten. Mit Hilfe der Software DlgSILENT PowerFactory werden die Kurzschlüsse simuliert und die an Schutzeinrichtungen auftretenden minimalen Kurzschlussströme dargestellt.

Backup protection in distribution grids

Short circuit fault appearance in electrical power network cannot be avoided. In order to minimize the damage caused by faults, relays are inserted to the network grid. Relays provide a selective, secure and fast fault protection of electrical grid. When a primary relay has malfunction or fails to detect a fault then the backup system has to take a role. The aim of this diploma thesis is to simulate and evaluate short circuit scenarios in an electrical power distribution network. Simulation of the short circuit will be performed by means of DlgSILENT PowerFactory Software. Using DlgSILENT Software, minimal short circuit currents, which appear on relays, can be determined.

Guo, Yiqing

Erstellung einer Software zur graphischen Auswertung akustischer TE-Messungen

Die Lokalisierung von Teilentladungen gehört zu einer der wichtigsten Aufgaben bei der Fehlerdiagnose von Großtransformatoren. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Software „PD-Locator“ in der Programmiersprache Delphi entwickelt. Mit Hilfe dieses Software-Tools kann der Ort einer Teilentladung durch graphische Auswertung akustischer TE-Messungen schnell und genau lokalisiert werden. Neben einem neu entwickelten graphisch basierten Verfahren wurde auch der bewährte Ortungs-

algorithmus nach Awange implementiert. Das Ergebnis der Ortung kann in einer 3D-Darstellung visualisiert werden. Die Software erstellt ein umfassendes Testprotokoll in Form einer PDF-Datei. Darüber hinaus können Testdaten in einer Datenbank archiviert, exportiert und importiert werden.

Development of a Software Tool for graphical analysis of PD Measurements

Localisation of PD is one of the most important tasks during failure diagnosis process of large power transformers. In this thesis, a software tool was developed using program language Delphi. The tool enables graphical evaluation of acoustic PD measurements. Besides the proven Awange algorithm, a new developed graphically based localisation method has been implemented. The result of the evaluation is displayed in 3D and a test protocol (PDF file) can be created. All test data can be archived in a database, so that they can be imported and exported.

Haas, Matthias

Aufbau eines Online-Monitoring-Systems zur TE-Messung an Leistungstransformatoren

Ein Ansatz der Zustandsbeurteilung bei Leistungstransformatoren mit Hilfe von Online-Monitoring-Systemen stellt die Analyse von Teilentladungen, welche an Fehlstellen der Isolation entstehen, dar. Diese Teilentladungen strahlen elektromagnetische Wellen im UHF-Bereich ab und können über Sensoren empfangen werden. Zur Erfassung der Teilentladungen wurde am Institut ein System entworfen, welches auf einer Mikrocontrollerschaltung basiert und teure und aufwändige Messsysteme ersetzt. Dieses System soll im Rahmen dieser Arbeit verbessert und in ein Monitoring-System der Industrie integriert werden. Die Arbeit beinhaltet eine kurze Dokumentation der Hardware. Die Software wird verbessert und erweitert und ebenfalls dokumentiert. Die Funktion des Systems wird mit Testmessungen bestätigt.

Development of an Online-Monitoring System for PD Measurements on Power Transformer

An approach for assessing the condition of power transformers with the help of Online-Monitoring systems shows the analysis of partial discharges which be generated in defects of the insulation. These partial discharges radiate electromagnetic waves in the UHF range. To capture these partial discharges a system was developed which is based on a microcontroller circuit and substitutes for expensive and complex measuring systems. This system should be improved within the scope of this work and be integrated into a Monitoring system of the industry. This work contains a short documentation of the hardware. The software is improved and extended and likewise documented. The function of the system is confirmed with test measurements.

Hamid, Habibullah

Simulation der UHF-Wellenausbreitung in Kabelendverschlüssen 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 ver-

wendet 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 Monopolsensor und Archimedien Dipol) wurden simuliert und anschließend gefertigt. 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 bei Gewinn, Richtcharakteristik, Bandbreite, niedriger Reflexionsfaktor und Rauschpegel.

Development of a GPIB-Ethernet-Adapter

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, Archimedean spiral and circle monopole antenna) were simulated and built. Numerous parameter studies to find optimal size and position of the capacitive sensor were conducted. Newly developed sensors have better such as higher gain, wide frequency band, directional characteristic, lower reflection factor and noise level.

Huang, Ju

Entwicklung eines GPIB-Ethernet-Adapters

„General Purpose Interface Bus“ (GPIB) ist eine internationale Normbezeichnung für den externen parallelen Datenbus. Er ist in unterschiedlichen Einsatzbereichen weit verbreitet. Die Hauptanwendung findet sich in Laboratorien zur Steuerung und Kontrolle von Messgeräten. Basierend auf einem am Institut angefertigten Ethernet-RS232-Adapter wird eine Ethernet-GPIB-Brücke aufgebaut. Günstige Mikrocontroller werden dabei eingesetzt. Eine Platine wird aufgebaut, um die GPIB-Kommunikation exakt zu betrachten. Mit der praxisnahen Untersuchung und der GPIB-Standardisierung wird die Software entwickelt und implementiert. Sie unterstützt sowohl Multitasking als auch ereignisorientierte Programmierung.

Development of a GPIB-Ethernet-Adapter

„General Purpose Interface Bus“ is an international standard for parallel data bus. It is widely used in many fields. The main application is in laboratories to control Instruments. An Ethernet-GPIB-adapter is prototyped based on a manufactured Ethernet-RS232-adapter in IEH. Beneficial microcontroller will be used. A circuit board will be designed to investigate the GPIB communication. With the practical Investigation and the GPIB Standardization the software will be developed. It supports either multitasking or event-driven programming.

Kolitsas, Vassilios

Charakterisierung leitungsgebundener Störungen als aktive Vierpole

In dieser Arbeit wird eine Schaltung, die aus mehreren Komponenten besteht, mathematisch beschrieben. Um die entsprechenden Zusammenhänge herzuleiten, werden Theoreme der Vierpoltheorie verwendet. Weiterhin wird untersucht, wie gut

sich Filter aus dem EMV-Bereich zur mathematischen Beschreibung eignen. Das mathematische Modell wird zu weiterführenden Untersuchungen über die Einflüsse verschiedener Parameter verwendet. Ziel dabei ist es herauszufinden, wie die Parameter gewählt werden müssen, damit das mathematische Modell der Realität entspricht. Weiterhin wird auf Fehler eingegangen, die während einer Simulation auftreten können, und es wird der Einfluss dieser Fehler auf das Endergebnis untersucht.

Characterisation of conducted emissions as active fourport circuits

This diploma thesis describes a circuit composed of multiple components. To derive the underlying relations, theorems of the quadripole theory are applied. Additionally it is examined how well certain EMC-Filters are suited for a mathematical description. Later on, the mathematical model is used in further research on the influence of different parameters. This is done by carrying out different simulations in respect of how to choose the model parameters. The errors encountered in the simulations and their influences on the result are analyzed.

Li, Ran

Hochfrequenzmodellierung von Transformatorwicklungen mit verteilten Parametern

Um eine sichere elektrische Energieversorgung zu gewährleisten, ist die Zuverlässigkeit von Transformatoren entscheidend. Eine frühzeitige Erkennung von Wicklungsdeformationen ist zur Vermeidung von Ausfällen notwendig. Eine effiziente Methode zur Erkennung von deformierten Wicklungen ist die sogenannte Frequency Response Analysis. Hierbei wird eine Frequenzgangsprüfung durchgeführt. Dabei sind eine Analyse der Übertragungsfunktion der Transformatorwicklung sowie eine Beurteilung von Art, Ort und Umfang des Wicklungsfehlers erwünscht. In der Arbeit wurden verschiedene Arten von Wicklungsdeformationen bei Transformatoren mit Hilfe eines Hochfrequenz-Modells nachgebildet, um die Zusammenhänge zwischen Deformationsarten und Veränderungen des Resonanzverhaltens der Übertragungsfunktionen der Transformatorwicklung zu untersuchen.

High Frequency Modelling of Transformer Windings using Spread Parameters

The transformers' reliability plays a key role for safe supply of electricity. An early detection of winding deformations is necessary to avoid failures of transformers. An effective method for detection of winding deformations is the Frequency Response Analysis. Analysis of the transfer function of a suspect transformer winding along with assessment of type, location and range of the winding failures are of interest. In this thesis, a high frequency power transformer winding model with different artificial winding deformations was simulated in order to investigate the relationship between the deformation types and the resonance change behaviour of the transfer function.

Li, Yaming

Automatisierter Aufbau zur ESD-Degradationsmessung

Am Institut wird die ESD-Degradation von SMD-Bauteilen schon länger bearbeitet. Die ESD-Beaufschlagung könnte an Komponenten zu Fehlfunktionen oder Zer-

störungen führen. Die elektrische Charakterisierung kann mit einem Impedanz-analyser und Oszilloskop betrachtet werden. Vorher waren die Messungen rein manuell, mehr als die Hälfte der Messzeit wurde für Umbauten verbraucht. In dieser Arbeit ist ein automatisierter Prüfaufbau für eine systematische Prüfung elektronischer SMD-Komponenten auf ihre Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) realisiert worden. Ein bedienerfreundliches Steuerpult wurde aufgebaut. Programmierungsumgebung und Ansteuerhardware sind darin integriert, sodass der Bediener direkt auf einem Touch Panel die Messgeräte des Messsystems ansteuern kann.

Automated setup for measuring the derating under ESD

At the IEH is the ESD Derating Test on SMD Components already longer performed. Electrostatic discharge can damage or destroy the input circuitry. The electrical characterisation methods, such as impedance and network analysis can be used for the Measuring. Before the measurements were manually met, more than half of the measuring time were ineffective for spent working. In this work an automated mechanical setup is realized for measuring the derating of surface mounted devices for electromagnetic compatibility (EMC). Therefore is a control panel built up, in that are Programming Software and Drive Hardware integrated, so that the operator can control directly on a touch panel for the measuring instruments of the test system.

Lopez Pardillos, Mario

Einfluss des Fahrzeugkabelbaums auf leitungsgebundene Störungen

In der Arbeit wird untersucht, wie sich leitungsgebundene Störgrößen durch den Anschluss eines Fahrzeugkabelbaums beeinflussen lassen. Dazu wird im ersten Schritt die Eingangsimpedanz verschiedener Klassen an Fahrzeugkabelbäumen in einer Labornachbildung und im realen Fahrzeug untersucht. Zur einfachen Nachbildung realer Kabelbäume im Labor wird eine resonante Netznachbildung aufgebaut. Damit besteht die Möglichkeit, bereits während der Labormessung eine Abschätzung über den Einfluss der Fahrzeugkabelbäume auf leitungsgebundene Störgrößen zu treffen.

Influence of vehicle harnesses to conducted emissions

This work describes how vehicle harnesses influence the propagation of conducted emissions. Therefore different cable topologies are characterised by measuring their input impedances in order to describe the real behaviour of harnesses. A resonant artificial network has been developed to allow a better characterisation of worst case conditions in real vehicles. In addition, it is investigated how to improve the EMC measurement of electronic devices in respect to CISPR25 due to the resonant behaviour of vehicle harnesses.

Mai, Tim-Felix

Entwicklung einer Software zur Darstellung von Mehrstellen-Teilentladungsmessungen

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Software, die es ermöglicht, verschiedene Teilentladungsmessungen in einem Diagramm phasenbezogen darzustellen und miteinander zu vergleichen. Unterstützt werden zum einen ASCII-Daten, die mit einem Oszilloskop aufgenommen wurden, und zum anderen Daten, die mit

dem kommerziellen Programm mTronix der Firma Omicron gemessen wurden. Es ist auch möglich, Daten in diesem Programm zu bearbeiten, sie zu speichern und anschließend wieder zu laden. Desweiteren bietet die Software die Möglichkeit, die phasenbezogenen Daten in ein Sterndiagramm zu überführen. Hierbei wurden die lineare sowie die logarithmische Darstellung der Daten implementiert.

Development of software to characterize multi-terminal measurements of partial discharges

The subject of this diploma thesis is the development of software to visualize partial discharge measurements in a phased resolved pattern and compare them with each other. The software supports ASCII data which were recorded on an oscilloscope and the data that a commercial measurement instrument generates. You can also modify the data in the developed software, save it so for further analysis in the program. Another option is to convert the phased resolved data with two different algorithms in a STAR-diagram and visualize them linear or logarithmic.

Maurer, Peter

Agenten getriebene Instandhaltung von Leistungstransformatoren unter Einbezug verschiedener Diagnoseverfahren

In Leistungstransformatoren treten aufgrund von Alterung und Verschleiß Fehler auf. Zudem werden Leistungstransformatoren zunehmend zustandsorientiert gewartet. Daher ist es wichtig, geeignete Diagnoseverfahren zu wählen und miteinander zu verknüpfen, um den Zustand möglichst gut zu erfassen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden mehrere Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren untersucht, die sich in ihrer Aussage unterstützen können. Mit einem Agentenansatz wird auf die örtliche Verteiltheit der Betriebsmittel flexibel reagiert. Als Diagnoseverfahren wurden die Dissolved Gas Analysis, die klassische Messung von Teilentladungen und bedingt die Ölkennzahlen gewählt. Für die klassische Messung von Teilentladungen wurde ein Konzept zur Interpretation erarbeitet und umgesetzt. Abschließend wurde ein Prototyp in Java mit der klassischen Messung von Teilentladungen implementiert. Die Funktionalität der Dissolved Gas Analysis wurde aus einer früheren Arbeit übernommen. Für die Umsetzung der Agenten wurde das JADE-Framework verwendet.

Agent driven maintenance of power transformers considering different diagnostic methods

In power transformers occur failures because of aging and wear. Furthermore, power transformers are increasingly maintained based on the actual condition of plant and equipment. Hence it is important to choose appropriate diagnostic methods and to link them in order to collect the condition as well as possible. In this diploma thesis, several diagnostic methods for power transformers which can support each other in their conclusions were investigated. A concept with agents responds flexible to the local distribution of the power transformers. The selected diagnostic methods were the Dissolved Gas Analysis, the measurement of partial discharges and in a limited way the oil testing methods. For the interpretation of the measurement of partial discharges a concept has been developed and implemented. Finally, a prototype for the measurement of partial discharges was implemented in Java. The functionality of the

Dissolved Gas Analysis has been adopted from an earlier work. For the implementation of the agents the JADE framework has been used.

Mieskes, Bruno

Entwicklung und Aufbau eines automatisierten Mehrformmessplatzes zur Netzwerkanalyse elektrischer Netzwerke von DC bis 1 GHz

Zur Erweiterung eines 4-Tor-Netzwerkanalysators (NWA) wird eine automatisierte Messeinrichtung entwickelt und aufgebaut, welche die Vermessung eines Testobjekts mit bis zu 32 Toren erlaubt. Die Erweiterung erfolgt durch zwei 2 x 16 Schaltmatrizen, welche mittels Kaskadierung von Relais umgesetzt werden.

Die Messeinrichtung wird mit Hilfe von MATLAB über die USB-Schnittstelle gesteuert und ausgewertet, was zu einem effizienten und einfachen Messablauf führt. Schwerpunkte der Arbeit sind die Evaluation möglicher Relais, eine geeignete Topologie, die Umsetzung des entworfenen Systems sowie die Validierung anhand einer Beispielmessung.

Design and construction of an automated n-port measuring system for network analysis from DC to 1 GHz

An automated n-port measuring system is developed and built to enlarge a 4-port network analyzer (NWA), which permits measuring of a device under test with up to 32 ports. The enlargement is built up through two 2 x 16 switch matrices, which are realized by connecting relays in series. The measuring system is controlled and evaluated by MATLAB using an USB interface. Thereby it is possible to realize efficient and reproducible measurements. The main focus of the work is the evaluation of possible relays, a suitable topology, and the realization of the system, as well as the validation based on a sample measurement.

Müller, Andreas

Signalausbreitung bei der UHF-Teilentladungsmessung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Signalausbreitung und der Signaldämpfung bei der UHF-Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren. Insbesondere wurde untersucht, ob die UHF-Wellen der Teilentladungen, die von inneren Niederspannungswicklungen stammen, im Transformatorkessel detektiert werden können. Hierzu wurden Messungen sowohl im Labor als auch vor Ort mit künstlichen und natürlichen Teilentladungsquellen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die UHF-Wellen in Transformatoren unterschiedlich stark gedämpft werden. Prinzipiell war eine Detektion der UHF-Wellen zuverlässig möglich. Zusätzlich wurden erste Vor-Ort-Messungen zur UHF-Teilentladungsartung durchgeführt, die vielversprechend verlaufen sind. Um Sensitivity Checks der UHF-Messmethode effektiver durchführen zu können, wurden zwei handliche Teilentladungsquellen zur Montage an Leistungstransformatoren entwickelt und getestet. Die hierzu benötigte Spannungsversorgung, mit der Möglichkeit der Teilentladungsmessung entsprechend der IEC-Norm 60270, wurde aufgebaut.

Signalpropagation of UHF Partial Discharge Measurements

This thesis deals with signal propagation and signal attenuation using the UHF partial discharge measurement on power transformers. It was investigated whether the UHF waves of partial discharge, coming from the inner low-voltage windings of the transformers, can be detected. These measurements were performed both in the laboratory and on-site with artificial and natural partial discharge sources. UHF waves in transformers are variably damped. However a reliable detection of UHF waves was possible. In addition, initial on-site measurements for UHF partial discharge locating were done successfully. To perform the sensitivity check of UHF measurement more effective two portable partial discharge sources were developed and tested. The required power supply with the possibility of partial discharge measurement according to IEC 60270 standard was established.

Neumüller, Marco Henry

Untersuchung der Gaserzeugung von natürlichem Esteröl in Leistungstransformatoren

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Gasungsverhalten der natürlichen Esterflüssigkeit Cooper Power Systems Envirotemp™ FR3™ bei verschiedenen elektrischen und thermischen Beanspruchungen und wurde dabei mit dem von Mineralöl verglichen. Grundlage dabei ist die Frage, ob Pflanzenöle zukünftig als Isolationsmedium in Leistungstransformatoren Verwendung finden können.

Teilentladungen, punktuelle Heißpunkte bei verschiedenen Temperaturen, natürliche Alterung in einem Langzeitversuch sowie Stoßspannungs-Durchschläge wurden unter Laborbedingungen erzeugt, das Gasungsverhalten in den Ölen mittels der Gas-in-Öl-Analyse nach dem Headspace-Verfahren untersucht und mit dem von Mineralöl verglichen.

Investigation of gas generation in natural ester dielectric fluid used in power transformers

The purpose of the present thesis is to analyse the gassing behaviour of a natural ester fluid, Cooper Power Systems Envirotemp™ FR3™, under different types of electrical and thermal stresses and to compare the results with those of mineral oil.

Different electrical and thermal stresses, such as partial discharge and arcing as well as hotspots and aging in a long-term test, were generated under laboratory conditions in order to analyse the gassing characteristics of these insulating fluids. Gases dissolved in fluid were extracted from oil using headspace method, analysed with a gas chromatograph and compared to each another focussing on the gas concentration and the change over the time.

Reuter, Martin

Elektromagnetisches Abstrahlverhalten von Teilentladungen

Um eine möglichst lange Betriebsdauer und hohe Betriebssicherheit von Leistungstransformatoren zu ermöglichen, ist eine zuverlässige Zustandsbeurteilung nötig. Die Teilentladungsmessung bietet die Möglichkeit, den Alterungszustand eines Transformators zu bestimmen. Für die Teilentladungsmessung stehen verschiedene Mess-

methoden zur Verfügung, die unterschiedlich auf dieselbe Teilentladungsquelle reagieren, je nachdem, wo die Teilentladungen im Transformator entstehen. Ziel dieser Arbeit ist, zu untersuchen, welchen Einfluss die Wicklungsinduktivität auf die Ergebnisse der verschiedenen TE-Messmethoden (elektrisch, UHF, akustisch) hat. Eine neuartige Teilentladungsquelle, die es ermöglicht, Teilentladungen über die komplette Höhe einer Hochspannungswicklung zu erzeugen, wurde mit Messsystemen zur elektrischen, akustischen und UHF-Messmethode untersucht. Dazu fasst eine in MATLAB entwickelte Software die Messergebnisse zusammen, komprimiert, analysiert und visualisiert diese.

Electromagnetic emission characteristics of partial discharges

To achieve long operation periods with high reliability, it is necessary to determine the technical conditions of power transformers. The measurement of partial discharges (PD) is one method to gather information about the current technical state of a transformer. As there are different PD measurement methods, this thesis deals with the influence of a changing series inductance of the high voltage coil on their results. Therefore a PD source was developed, that allows to generate partial discharges along the inner surface of a high voltage coil over its entire elevation and investigated with three PD measurement systems: one for the electrical method, one for the UHF method and an acoustical PD locating system. A software based on MATLAB integrated, compromised, analyzed and plotted the measurement results.

Rivoir, Manuel

Einfluss der Bauteilkopplung auf die Filterdämpfung

In der Arbeit wird die Dämpfung eines im automotiven Bereich eingesetzten Filters untersucht. Das Filter soll im Fahrzeug entstehende Gleich- und Gegentaktstörungen soweit unterdrücken, dass die Komponente im Fahrzeug zum Einsatz kommen kann, ohne dass die gegebenen Grenzwerte überschritten werden. Hierbei wird neben der Untersuchung der Leitungsinduktivitäten und der Impedanzen der einzelnen Komponenten über der Frequenz auch die Verkopplung der Bauteile untereinander bestimmt. Dazu werden die Bauteile zunächst einzeln vermessen, bevor sie in verschiedenen Anordnungen zueinander bewertet werden, um die Kopplung der Bauteile in Abhängigkeit ihrer Positionen zueinander zu bestimmen.

Influence of component coupling to the filter attenuation

In this work the attenuation of an automotive filter is discussed. The filter suppresses occurring common- and differential- mode noise voltages. The filter attenuation depends on the used filter elements, the filter topology, and parasitic elements. Parasitic elements within the filter assembly might decrease the filter attenuation. The investigated parameters are the inductive parts of the connecting wires as well as the capacitive coupling in between the elements.

Shu, Jiayuan

Embedded Software-Programmierung für ein digitales Signalerfassungssystem

Bei der Diagnostik von Hochspannungsbetriebsmitteln gibt es viele messtechnische Herausforderungen. Die Anforderungen an Messmethoden mit hochfrequenten

Signalen im Hinblick auf Störunterdrückung und Auflösungsgenauigkeit sind hoch und stossen bei Messungen on-site oftmals an ihre Grenzen. In dieser Arbeit wurde ein neuartiges Messkonzept zur synchronen, hochgenauen Erfassung von Signalen (16 Bit, bis zu 60 MHz) erarbeitet und ein Prototyp realisiert. Dank der kompakten Bauweise werden Signale frühest möglich digitalisiert. Die Anbindung des Systems geschieht per Ethernet und eröffnet dadurch neue Möglichkeiten bei der Übertragung von Messdaten und bei der Einbindung der Messdaten in ein Monitoringsystem.

Embedded Software Programming for a Digital Data Acquisition System

Diagnosis of high voltage facilities faces a lot of technical challenges concerning the measurement devices. Requirements like suppression of outer disturbances and resolution accuracy are high and often limited when measurements are performed on-site. In this thesis, a new concept for measurement devices was designed enabling high precision synchronous acquisition of signals (16 bit, up to 60 MHz). A prototype was commissioned. Thanks to compact form factor, signals can be digitized as soon as possible. The system features an ethernet interface enabling new opportunities of integrating measurement data into a monitoring system.

Späth, Christian

Eine Untersuchung zur Einbindung einer drahtlosen Temperaturmessung in eine Gasisolierte Schaltanlage

Integration of wireless temperature measurement in GIS

Späth, Matthias

Implementierung einer SPI-Schnittstelle in einem DSP zur Auswertung von Daten eines digitalen Filters

Im Rahmen der Arbeit soll die Basis für ein Messsystem zur Detektion von Lichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen geschaffen werden. Dazu werden ein digitales FIR Filter und ein Blackfin DSP unter μ Clinux mittels SPI verbunden. Da der Blackfin keinen freien SPI-Anschluss besitzt, wird dafür eine andere serielle Schnittstelle verwendet. Um die SPI-Funktion zu emulieren, wird ein Gerätetreiber für diese Schnittstelle entwickelt. Im Verlauf der Arbeit werden die prinzipielle Funktionsweise und der innere Aufbau sowie die Verwendung des Treibers gezeigt.

Implementation of a SPI interface in a DSP for digital filter data analysis

The purpose of this diploma thesis is to create the foundation for a measurement system for the detection of arcs in low voltage switchgear. For this purpose, the combination of a digital FIR filter and a Blackfin DSP running under μ Clinux, connected via SPI, is used. Since the DSP has no available SPI port, another serial interface is used instead. For this interface, a device driver is developed to emulate SPI functionality. This thesis contains the mode of operation and internal structure of the device driver as well as its interface.

Spratler, Christian

Entwurf, Dimensionierung und Bewertung eingebetteter Abblockstrukturen

Zum Schutz vor elektrostatischen Entladungen müssen viele Halbleiterbauelemente mit einer externen Beschaltung versehen werden. Der Stand der Technik ist dabei aus verschiedenen Gründen unbefriedigend. Als Alternative wurden in dieser Arbeit Konzepte entwickelt, die unter Einsatz spezieller Materialien in die Platine eingebettet werden können und so konventionelle Schutzkonzepte mit diskreten Bauelementen ersetzen. Entwurf und Dimensionierung dieser neuen Konzepte bilden den ersten Schwerpunkt der Arbeit. Dabei ist das alternative Konzept in der Größe skalierbar und kann so auf die jeweilige Störquelle und den eingesetzten Halbleiter abgestimmt werden. Dies wird erstmals möglich durch die vollständige simulative Abbildung der Anordnung aus ESD-Quelle, Abblockstruktur und Störsenke. Der Aufbau dieser Simulationskette bildet den zweiten Schwerpunkt der Arbeit. Mit ihr wird das genannte Konzept bewertet. Die Realisierbarkeit der Abblockstrukturen wurde zudem durch den Aufbau eines Prototyps gezeigt. Die Schutzfunktion der Struktur konnte durch Kleinsignalanalysen am Prototyp in guter Übereinstimmung mit der Simulation nachgewiesen werden.

Design, dimensioning and evaluation of embedded filter structures

For the protection of integrated devices from damage caused by static electricity discharges the use of externally applied protection circuits is mandatory in most cases. While for some reasons the state of the art is not satisfying alternatives are developed. The Design and Dimensioning of this protection circuit is the first major topic of this thesis. Using advanced materials those alternative blocking structures can be applied embedded inside the PCB, while no more discrete device is necessary. One big advantage is the scalability, that allows a proper adjustment optimized for the requirements of both ESD-Source and integrated device. This is only possible because of the simulation-based engineering approach which is the second major topic. It covers all components like ESD-Source, protection circuit and integrated device. The viability was shown by realizing the structure as a prototype. The desired characteristics were proofed by a small-signal analysis while showing a good consistency with the simulation.

Wajant, Patrick

Entwicklung von dynamischen Brennstoffzellen und Mikrogasturbinenmodellen in DIgSILENT PowerFactory

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden Modelle von Brennstoffzellen- und Mikrogasturbinenanlagen für dynamische Simulationen in der Netzberechnungssoftware DIgSILENT PowerFactory entwickelt und getestet. Dazu werden zuerst in der Literatur vorhandene Modelle gesucht und auf ihre Praxistauglichkeit hin geprüft. Besonderes Augenmerk wird hierbei darauf gelegt, dass die für die Modelle benötigten Parameter einfach zu ermitteln sind.

Die Modelle werden dann in PowerFactory implementiert und ihre Eigenschaften, wie beispielsweise Zuverlässigkeit und Rechenzeitbedarf, untersucht.

Development of dynamic fuel cell and microgasturbine models in DlgSILENT PowerFactory

In the context of this diploma thesis models of fuel cell systems and microgasturbinegenerators will be developed and tested for dynamic simulations in the power system analysis software DlgSILENT PowerFactory.

In order to achieve this, models from the current literature are sought-after and checked for their suitability for daily use. Attention is especially turned on the fact, that the parameters necessary for the models are easy to determine. The models are then implemented in PowerFactory and tested on their properties, for example reliability and computing time.

Xu, Kan

Vermessung diskreter Bauelemente während elektrostatischer Entladungen

Mit der Einführung integrierter Schaltungen wurde ESD zunehmend zu einem Problem der Elektronikhersteller, das seinen vorläufigen Höhepunkt in den 80er Jahren durch die Miniaturisierung und Herstellung von Bauelementen und Geräten erreichte. Heutzutage werden die diskreten Bauelemente in immer kleineren Gehäuseformen von der Industrie in der Serienproduktion eingesetzt. Hierbei treten Schädigung oder sogar Zerstörung durch elektrostatische Entladungen während der Fertigung, im Betrieb oder bei einer Reparatur immer früher und häufiger auf. In dieser Arbeit werden die Messungen an diskreten Bauelementen während elektrostatischer Entladungen untersucht. Außerdem werden die Simulationsmodelle auch anhand der Messergebnisse erstellt.

Measurements of Discrete Components during Electrostatic Discharges

Electrostatic discharge (ESD) is the sudden and momentary electric current that flows between two objects at different electrical potentials caused by direct contact or induced by an electrostatic field. ESD is a serious issue in solid state electronics, such as integrated circuits. Integrated circuits are made from semiconductor materials such as silicon and insulating materials such as silicon dioxide. Either of these materials can suffer permanent damage when subjected to high voltages; as a result there are now a number of antistatic devices that help prevent static build up. In this work measurements of discrete devices were conducted during electrostatic discharges. Furthermore models for simulations are created with measuring results.

Yan, Zhao

Analytische Modellierung frequenzabhängiger Transferfunktionen von Leistungstransformatoren

Die Anwendung der Frequency Response Analysis für die Zustandsdiagnose und -beurteilung von Leistungstransformatoren ist schon seit vielen Jahren sehr verbreitet. Die Analyse von frequenzabhängigen Transferfunktionen ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Detektion von Wicklungsdefekten, die durch mechanische und/oder elektrische Veränderungen verursacht werden. Um die Eigenschaften von Transferfunktionen genauer zu betrachten, wurde versucht, diese analytisch zu modellieren. Der bekannte Vector Fitting-Algorithmus wurde hierfür angewendet. Im Weiteren

wurde die Konvergenz des Algorithmus durch Segmentierung des Frequenzbereichs verbessert und die Genauigkeit der Approximation erhöht. Es wurde gezeigt, dass die automatische Erfassung von Resonanzstellen von Transferfunktionen zur weiteren Analyse durch die FRA möglich ist.

Analytical Modelling of frequency-dependent Transformer Transfer Functions

Frequency Response Analysis is a diagnostic method to detect winding displacements of power transformers by means of transfer function. Mechanical and electrical defects can cause winding displacements. Winding displacements effect the transfer function and lead to changes in the transfer function. In this thesis, the known and proven Vector Fitting algorithm was used to obtain a complex rational function approximation for transfer functions.

The algorithm vector fitting was improved by means of segmentation of the applied frequency range. With the performance of this method the resonance frequencies can be captured more effective and with higher accuracy.

Yilmaz, Turgay

Degradation diskreter Bauelemente

Die Beeinflussung elektrischer Bauteile durch elektrostatische Entladungen (ESD, electrostatic discharge) gewinnt aufgrund der steigenden Integrationsdichte und sinkender Abmessungen der integrierten Bauteile immer mehr an Bedeutung. Die integrierten Bauteile sind selbst für geringe Entladungsenergien anfällig, die zu Beschädigungen und oder zum Ausfall des Bauteils führen können. Speziell in sicherheitskritischen Bereichen, wie z.B. in der Bordelektronik von Flugzeugen oder der KFZ-Elektronik, muss ein zuverlässiges Funktionieren der Bauteile in den unterschiedlichen Baugruppen gewährleistet werden. Die Arbeit beschäftigt sich mit Messungen an diskreten Bauelementen während elektrostatischer Entladung. Ziel ist es, den Effekt der elektrostatischen Entladung auf die diskreten Bauelemente zu untersuchen und gegebenenfalls Verhaltensmuster zu erkennen, um eine möglichst genaue Grundlage für die zu erstellenden Simulationsmodelle zu schaffen.

Derating of discrete components

The influence of electrostatic discharge (ESD) becomes more and more important because of increasing integration level and declining dimensions of integrated components. The integrated components are vulnerable even for slight discharge energies. These discharges energies can even cause damage or a breakdown of the component. Especially in reliability areas for example in avionics in planes and cars there is a need of solid working components in their different electronic devices. This diploma thesis occupied with researches of discrete components during electrostatic discharge. The goal of this thesis is to prognose the action of the discrete components during electrostatic discharge and as the case may be to find pattern to provide a basis for the simulation models as accurate as possible.

Abgeschlossene Studien- und Bachelorarbeiten vom 1.11.2008 bis 31.10.2009:

NAME	THEMA
Bornowski, Markus	Entwicklung einer Koppel­elektrode zur Messung transien­ter Spannungen mit einer Feldsonde. Design of a coupling device for the measurement of transient voltages with a field sensor.
Burger, Dennis	Untersuchung der Ausbreitung von EMV-Störgrößen beim Trenner-Schalten in Mittelspannungsschaltanlagen. Propagation of EMC-Disturbances during disconnecter operations in medium voltage switchgears.
Brandl, Ron	Aufbau einer Messanordnung und Untersuchung verschiedener Dämpfungsmethoden von schnellen Transienten (VFT) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS). Configuration of a test setup and examination of different possibilities to damp VFTs in GIS.
Hils, Manuel	Speisedraht- und Triaxialverfahren zur Untersuchung der Schirmeigenschaften von Energieleitungen für KFZ-Hochvoltbordnetze. Line Injection and Triaxial measuring setup for testing shielded energy cables for vehicles with high-voltage systems.
Jelting, Niels	Leitfähigkeits- und Alterungsuntersuchungen natürlicher Esterflüssigkeiten. Conductivity measurements and ageing experiments of natural esters (FR3).
Jessen, Simon	Programmierung eines Datenloggers zur selbständigen Triggerung und Speicherung von Daten. Programming a self-triggering data logger for data storage.
Kolb, Daniel	Oberschwingungsanalyse und -monitoring in Nieder­spannungsnetzen. Power Quality Analysis and Monitoring in Low Voltage Distribution Grids.
Küllmer, Alexander	Überarbeitung einer elektronischen Schnellabschaltung für Hochspannungsprüftransformatoren. Redesign of an electronic circuit breaker for high-voltage test transformer.
Kurzenhäuser, Tobias	Untersuchung der Blitzstoß-Durchschlags­spannung von in natürlichen Esterflüssigkeiten versenkten Stufenschalterwahlstangen eines Transformators. Investigation of impulse beakdown voltage of power transformer tap-changer contacts rod immersed in natural ester.
Leng, Yan	Untersuchung der Parameterdrift von SMD-Bauteilen durch HBM-ESD-Impulse. Investigation of the parameter drift of SMD components caused by HBM-ESD impulses.
Li, Cong	Ortung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren. Locating of Partial Discharges in Power Transformers.

NAME	THEMA
Lübbe, Tobias	Grundlagenuntersuchung zur Messung von Vibrationen an Leistungstransformatoren mit Hilfe von optischen Sensoren. Investigation on Power Transformer Vibration Measurements with Optical Sensors.
Petropoulos, Nikolaos	Teilentladungsquellen im Labor und Literaturrecherche. Partial discharge sources in laboratories.
Remmler, Dominik	Entwicklung eines Sensors zur Ortung von Teilentladungen in Leistungstransformatoren. Sensor Development for Partial Discharge Localisation in Power Transformers.
Schuler, Daniel	Entwurf einer Software zur automatisierten EMV-Messung im Zeitbereich. Software for time-domain EMC measurements.
Schwarz, Martin	Verteilte Adapterinfrastruktur mit Mikrocontrollern. Distributed infrastructure of adapters made with microcontrollers.
Seeger, Frank	Mehrfach-Gleichspannungsquelle mit Strommessung. Multiple DC supply with current measurement.
Vensmer, Alexander	Kanalparametrisierung verteilter, asynchroner Datenübertragungsstrecken. Channel Parametrisation of Distributed Asynchronous Transmission Lines.
Viereck, Robert	Feuchtebestimmung mit Hilfe dielektrischer Messungen zur Zustandsbeurteilung cellulose-basierter Hochspannungsisolierungen. Moisture determination with dielectric measurements of cellulose based insulations.
Wang, Huaidong	Automatische Luftfeuchtigkeitserfassung für das ESD-Labor. Automatic Air Humidity Measurement in the ESD Lab.
Wang, Yuan	Berechnung der Störspannung beim Abschalten induktiver Lasten. Calculation of the noise voltage due to switching inductive loads.
Werner, Dirk	Entwicklung der Hardware für ein modulares Monitoring-System für Leistungstransformatoren. Hardware development of a modular monitoring system for power transformers.
Werner, Dirk	Entwicklung der Software für ein modulares Monitoring-System für Leistungstransformatoren. Software-Development for a monitoring system.
Werner, Falk	Realisierung der Rechneranbindung eines Elektrometers zur Datenerfassung und Auswertung von Polarisationsströmen Development of a runtime-measurement aquisition system for polarisation current analysis
Yang, Yang	Simulation von Wicklungsdeformationen bei Leistungstransformatoren. Simulation of Power Transformer Windings Deformation Types.

NAME	THEMA
Zwirlein, Klaus	Bestimmung der Gasverteilungskoeffizienten für die gaschromatographische Headspaceanalyse von alternativen dielektrischen Flüssigkeiten (FR3). Determination of k-factors for gaschromatographic headspace analysis of natural esters (FR3).

4. PROMOTIONEN

- **Die Ermittlung der Übertragungsfunktion von Großtransformatoren mittels On- und Offline-Messungen**

Dipl.-Ing. Rene Wimmer

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. T. Leibfried

Universität Karlsruhe (TH)

Tag der mündlichen Prüfung:

02.11.2009

Hohe Ströme infolge von Kurzschlüssen verursachen hohe mechanische Kräfte in Transformatorwicklungen und können Verformungen und Verschiebungen der Wicklung hervorrufen. Solche Wicklungsschäden führen nicht unbedingt zu einem Ausfall des Transformators, jedoch sind sie aufgrund dieser Vorschädigung einem erhöhten Ausfallrisiko ausgesetzt. Aus diesem Grund ist die messtechnische Erfassung solcher Vorschädigungen wichtig, um geeignete Maßnahmen einleiten zu können. Die einzige derzeit in der Norm anerkannte Prüfmethode zur Detektion von Wicklungsschäden ist die Messung der relativen Kurzschlussspannung (U_K). In der Praxis hat sich allerdings gezeigt, dass die U_K -Messung eine unzureichende Sensitivität gegenüber Wicklungsschäden besitzt. Ein weiteres viel versprechendes Messverfahren, das zur Detektion von Wicklungsschäden herangezogen werden kann, ist die FRA (Frequency Response Aalysis). Die Zustandsbeurteilung der Wicklung erfolgt bei der FRA durch einen Vergleich mit einer Referenzkurve, die idealerweise schon beim Transformatorhersteller gemessen werden sollte. Auf Grund der Tatsache, dass kleine mechanische Wicklungsschäden keine erheblichen Veränderungen des Kurvenverlaufs der FRA ergeben, ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der FRA als Diagnoseverfahren.

Die Signalverarbeitung hat insbesondere bei der Zeitbereichsmessung (der Transformator wird mit einem breitbandigen Impuls angeregt) der FRA einen erheblichen Einfluss. Die ADU-Auflösung, Samplerate und Aufzeichnungslänge haben einen direkten Einfluss auf den Signal-zu-Rausch-Abstand. Ein zu geringer Signal-zu-Rausch-Abstand hat zur Folge, dass die FRA im höheren Frequenzbereich stärker fehlerbehaftet ist und somit keine empfindliche Auswertung mehr möglich ist. Die Anforderungen an die Signalerfassung lauten daher: eine ADU-Auflösung von min. 10 bit, eine Abtastrate von min. 10 MS/s und eine Aufzeichnungslänge zwischen 200 μ s und 500 μ s. Die Fensterung der Zeitsignale bewirkt hingegen eine frequenzabhängige Dämpfung der Polstellen. Bei der Frequenzbereichsmessung (der Transformator wird mit einer Sinusschwingung variabler Frequenz angeregt) haben

Sweepzeit und die Breite des mit dem Sweep mitlaufenden Bandpassfilters einen Einfluss auf die FRA.

Der Einfluss des Messaufbaus betrifft die Zeit- und Frequenzbereichsmessung im gleichen Maße. Es wird gezeigt, dass reproduzierbare Messergebnisse ausschließlich mit geschirmten Leitungen und einem guten Erdungskonzept zu erzielen sind. Es wird auch gezeigt, dass als Leiter für die Erdanbindung ausschließlich Erdungsbänder mit einer großen Oberfläche in Frage kommen. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Prüfschaltungskonzept ist man in der Lage, auch nach über 6 Jahren zeitlicher Distanz zur Referenzmessung reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten.

Weist eine Wicklung keine oder kaum Resonanzstellen im betrachteten Frequenzbereich auf, hat auch die FRA eine unzureichende Sensibilität gegenüber Wicklungsverwerfungen. Theoretisch kann mit Hilfe eines externen Netzwerkes eine Resonanzstelle in dem betrachteten Frequenzbereich erzwungen werden, die sensibel auf Wicklungsdeformationen reagiert. Eine Versuchswicklung, die bis 3 MHz keine Resonanzstelle aufweist, erlaubte die hierzu notwendigen praktischen Untersuchungen. Es zeigte sich hierbei, dass mit Hilfe des externen Netzwerkes auch praktisch eine Sensitivitätssteigerung der FRA möglich ist.

Schalthandlungen und Gewitterüberspannungen erzeugen transiente Wanderwellen, die sich über das elektrische Energieversorgungsnetz ausbreiten. Diese transienten Überspannungen können während des Betriebs des Transformators erfasst und zur Bestimmung der FRA des Transformators herangezogen werden. Allerdings wird hierbei nicht nur das Frequenzverhalten des Transformators erfasst, sondern auch das Frequenzverhalten der Umspannanlage. Mit dem Simulationsprogramm EMTP/ATP wird gezeigt, dass nicht nur unterschiedliche Schaltzustände der Umspannanlage zu unterschiedlichen FRA-Ergebnissen führen, sondern auch der Ort, an dem das transiente Signal entsteht. Aufgrund der oszillierenden transienten Überspannungen ist es schwierig, zwischen Anregungs- und Antwortsignal zu unterscheiden. Trotz dieser Schwierigkeiten wird ein Weg aufgezeigt, wie es dennoch möglich ist, die FRA zu bestimmen. Die gezielte Ausnutzung der transienten Signale, die durch den Einschaltvorgang des Transformators erzeugt werden, erlaubt eine Steigerung der FRA-Empfindlichkeit.

■ The Determination of the Transfer Function of Power Transformers by Means of On- and Offline Measurements

Dipl.-Ing. Rene Wimmer

The deregulation of the electricity market led to a more efficient utilization of existing equipment components in the past 10 years. Both, a stronger extent of utilization and an extension of the run times of the respective operational supplements are aspired. However, such measures increase the default risk of these operating resources. A loss of important equipment components, as e.g. a transformer, endangers not only security of supply, it can be also connected with high follow-up costs. Therefore it is necessary to know the plant condition so that corresponding measures can be introduced in time. At this juncture appropriate diagnostic methods can help to recognize indications of aging or possible damage of operating resources. The reliability of a transformer is a key element of an uninterrupted service of electricity. Parameters such as temperature, overvoltages or current forces directly affect the insulation and mechanical coil condition of a transformer and can impair its service life.

Determination of the winding condition by means of FRA

The determination of the impedance voltage - which is influenced by the winding geometries, particularly the leakage ducts – is, according to standard IEC 76-5 [IEC 76-5, 1979], presently the only accredited test method for detection of winding deformations. With this method, a geometrical change of the coil structure can be detected, if the relative impedance voltage (U_K) deviates by 1-2 % from the reference value. However, experience has shown that the U_K - measurement possesses an insufficient sensitivity in relation to the winding deformation. Due to this fact winding deformations may remain undetected.

A promising and at present strongly discussed approach for more exact recognition of winding deformations is the analysis of the transfer function, also called FRA (frequency response aalysis). It is calculated from the quotient between system response $Y(j\omega)$ and excitation signal $X(j\omega)$. With this diagnostic method the system characteristics of the transformer are not only analyzed at 50 Hz, but over a frequency range between 20 Hz and 2 MHz. Bolduc shows that the FRA has a higher sensitivity than the U_K -measurement.

Like the analysis of the U_K -measurement, the FRA is characterized as a comparative diagnostic method. This means the FRA-measurement has to be compared to a reference measurement. One important assumption is that the transformer can be considered as a passive, time-invariant, complex and linear network. The linearity of the transformer is based on the fact, that the transformer core does not have a

noteworthy magnetization for frequencies higher than 10 kHz. Due to this behavior it is possible to use the theoretic fundamentals of two ports for frequencies above 10 kHz. As a result the FRA is independent from the input signal and can be determined by two different kinds of measurements: the frequency domain measurement (SFRA – sweep frequency response analysis) and the time domain measurement (IFRA – impulse frequency response analysis).

Determination of SFRA

For the SFRA the test object is excited with a sinusoidal signal. The system response is also a sinusoidal signal of same frequency but with another amplitude level and a phase shifting. The ratio of the amplitudes and the phase shift between in- and output signal result in the value of the magnitude and phase function of the SFRA. The frequency dependent SFRA can be determined when the excitation of the transformer takes place with a sinusoidal signal of variable frequency. Normally this signal has constant amplitude and therefore a constant signal-to-noise-ratio (SNR) over the whole regarded frequency range. In spite of the easy determination of SFRA, band pass filtering and sweep time errors can occur and lead to non-reproducible SFRA results.

The big advantages of SFRA are easy handling, no need of additional signal processing, zooms into frequency ranges of special interest (via additional measurement) and constant signal-to-noise ratio over the whole frequency range. A disadvantage of SFRA is that measurements can be very time consuming. Due to the fact, that most network analyzers have only two input terminals it is not possible to measure several response signals simultaneously.

Determination of IFRA

For the IFRA the test object is excited with a wide-band pulse signal. The response signal of this excitation is also a wide-band signal, but deformed according to the pulse response of the test object. To determine the FRA, the recorded signals must be transformed into the frequency domain, where the quotient between output- and input signal is calculated. The determination of the spectra of time-discrete signals is made almost exclusively by the FFT (fast fourier transform). It represents an efficient method to compute the DFT (discrete fourier transform), which is a transformation rule for a periodic, time-discrete signal. With the application of the DFT to non periodic finite signals, the periodicity of these signals is therefore presupposed. With transient signals this is only possible, if both the initial and the final value of the signal amount to zero. However, for the signal processing some additional rules must be considered.

If the tail of the recorded signal has not decayed to zero within the record length T , the FFT-algorithm will interpret the signal end as a saltus to the value zero. Thus, additional non-existent frequency components to the signal spectrum are repre-

sented, commonly called leakage effect. A possibility to avoid the described leakage effect is to extend the record length until no more signal energy is present. But there are problems to this approach; firstly it can lead to a very low signal-to-noise ratio, and secondly it needs a large amount of memory and hence the signals become unmanageable. Another possibility is to multiply the time signals with a window function, which continuously decreases to zero at $t = T$. However, with a window function some more energy will be taken out of the signal, which results in a higher attenuation of the signal spectrum. Different window functions lead to different attenuation of the signal spectrum. Based on this, the IFRA also shows a dependency on the pre-trigger period. If the windowing is applied from the beginning of the signal, a long pre trigger period will result in a higher energy loss and thus in a higher attenuation of the FRA. As stated before, the resonance frequencies themselves are uninfluenced by that behavior.

There are different possibilities to improve the accuracy of IFRA. A higher ADC resolution or a higher ADC sampling rate leads to a higher signal-to-noise ratio. Denoising by means of averaging and/or wavelet transformation is another method to increase the accuracy.

Advantages of IFRA are: nearly no limitation of the test setup, simultaneous recording of different response signals and fast signal recording. Disadvantage of IFRA are: no constant signal-to-noise ratio, constant frequency steps (depending on the record length) and the need for complex signal processing.

Comparison of SFRA and IFRA

IFRA and SFRA rarely show the same results. This is due to the complex signal processing, especially windowing, of the IFRA. Normally, the IFRA has a frequency dependent higher attenuation than the SFRA, which makes a comparison in higher frequency ranges difficult. However, it is possible to get the same result between IFRA and SFRA. This case arises, if there is no need to apply a window function for the IFRA. Nevertheless it is necessary that the measurements are carried out under the same conditions. This includes accordance of the measuring devices' input impedance and identical measuring setup.

Influence of connection and earthing techniques on the reproducibility of FRA-results

As mentioned before, the FRA is a comparative method and therefore always has to be related to a reference curve. Three types of comparisons are available for the FRA: first off time based comparison, i.e. a comparison against a reference curve (fingerprint) measured earlier; second off construction based comparison, i.e. comparing the limbs against each other and third off type based comparison, i.e. a comparison against another transformer of same type.

A precondition for all three methods is that the measurements are as independent as possible of the measurement setup. This particularly applies to the time-dependent comparison, since there may be years between the individual measurements. Therefore, the grounding concept, the arrangement of the cables and the connection technique are of particular interest. Due to the large dimensions of power transformers, it is necessary to bridge long distances between the transformer terminals and the measuring device. This is normally done using up to 30 m long coaxial cables for signal transmission. However, for follow-up measurements it is nearly impossible to arrange the measuring cables in exactly the same way as for the initial measurement.

A requirement to the connection technique is that the user should be able to install the cables as fast and easy as possible. Furthermore, the user should not use any unshielded cables in order to avoid electromagnetic coupling of interferences to the signal lines. Even the use of partly unshielded cables provides degrees of freedom for example in cable arrangement that obviously can lead to measurement errors and consequently to misinterpretations.

To allow for grounding of coaxial cable shields at the transformer, an additional earth connection from the transformer tank to the measuring adapter is required. This line can be generally of any suitable type. However, it has to be observed that in substations external interferences have to be taken into account that can influence FRA measurement. The effects of the interference sensitivity of a normal wire and a ground strap to the FRA shall be determined by experiment. A loop of one winding emitting a sinusoidal interference signal of 80 kHz is placed under the bushing of a 333 MVA autotransformer. This interference signal disturbs the earth connection, which consist for the first FRA measurement of normal wire and for the second FRA measurement of ground strap. The results of this experiment show that the interference liability of a ground strap is much less than that of a normal grounding wire. This effect can be explained with the self-inductance of the grounding line. Ground straps made of thin single wires have a very large surface and, depending on the frequency, provide considerably lower impedance than normal wires of comparable size. The skin effect probably contributes to the higher interference immunity of ground straps, since a frequency of 80 kHz already causes a considerable current displacement from the centre and a resulting skin depth of the interfering signal of only 0.24 mm for copper materials to 0.31 mm for aluminum materials.

Another degree of freedom is the geometrical arrangement of the ground strap. For this purpose two measurements are carried out. In the first case the ground strap is pulled tightly along the bushing, in the second case the ground strap sags freely from the bushing. Comparison of these results shows significant influence of the geometrical arrangement on FRA results. The reason for these differences is that the FRA measurement not only records the reaction of transformer network, but the whole

electrical network consisting of transformer and measuring circuit. In comparison to a tightly pulled ground strap a sagging ground strap has a higher longitudinal inductance, higher resistance and different coupling capacitance between the bushing and the ground strap.

In addition to grounding concept and connection technique, yet other influence factors that affect the FRA exist. For reasons of comfort, additional coaxial cable can be connected on the non-investigated transformer terminals, so that only the cables on the measuring devices have to be replaced for a different test setup. The additional cables exhibit additional earth capacitance, which is measured by the FRA. In a later follow-up measurement, which is carried out without these additional coaxial cables, the additional earth capacitance is nonexistent and the FRA shows another curve progression.

In case of high-impedance voltage measurements, the FRA can be influenced by cable lengths due to cable reflections. This influence cannot be eliminated by a 0 dB calibration for SFRA measurement. In case of impedance matching no obvious change in the FRA is recognizable if different cable lengths are used.

Effect of environmental condition

In addition to the influences of the test setup, also impacts from the transformer itself exist. These include the tap changer as well as the transformer's oil temperature.

As mentioned before, the non-linear characteristics of the transformer's core have to be taken into account when investigating frequencies below 10 kHz. The non-linear characteristics strongly depend on the test setup and can manifest in different ways. The core influence has a direct effect on the FRA, if the transformer terminals of those windings that are not measured are left open. A shift of a resonance frequency is visible, if the FRA is measured with un- and magnetized core. If, however, all transformer terminals that are not measured are connected to ground, the core magnetization has no recognizable effect to the FRA.

Sensitivity increase of the FRA by means of an external network

A radial winding deformation causes mainly changes of earth and coupling capacitance and so the resulting effect is a shift of the appropriate resonance frequency. However, if the investigated winding shows nearly no characteristics in its FRA-curve progression the evaluation of the FRA-curve becomes difficult. In such cases the sensitivity of FRA is not sufficient and it is nearly impossible to detect a winding displacement by means of FRA method. An increase of FRA sensitivity could be established by an external network, which is inserted in the measuring circuit ahead of the transformer. The requirement on such a network is to form a resonance frequency in the regarded frequency range and to react sensitively on changes of earth and/or coupling capacitances.

To determine the design and configuration of such an external network a simulation of the test winding is needed. The used simulation model of the winding is based on a detailed RLC model with self- and mutual inductances. According to Rahimpour this analytical approach is well suitable for the computation of winding parameters. The result of this simulation shows that a longitudinal inductance is sufficient for the external network. Therewith not a new resonance frequency is generated, but resonances in a higher frequency range are shifted to the lower regarded frequency range.

The laboratory tests with this external network show that the sensitivity of the FRA can in fact be increased. The examined winding deformations were not detectable without the help of the external network. Only with the inclusion of the external network the winding deformations were detectable. However, the configuration and optimal values of the external network can be found only by simulation and empirical determination. The inaccuracy of the simulation and time-consuming investigations of the correct external network, which must be made for each winding type, can be a problem for the application of such an external network.

Online Monitoring by means of FRA

In addition to offline FRA measurement, which means that the transformer is out of operation, the FRA can be also measured during operation of the transformer (online measuring). Switching operations or lightning strikes generate transient over voltages and spread out over the power supply lines. These “stochastic” transient overvoltages can be recorded during operation and can be used for determination of the FRA (online measuring). Compared to the offline FRA measurement the online FRA measurement has the advantage a stationary installation and hence an improved reproducibility of the FRA. However, with such an online FRA measurement not only the electrical network of the transformer but also the electrical network of the substation is recorded. Online measured signals are completely different from those measured offline. Capacitive coupling between the lines, reflection and arc-backs induce a sequence of partial events. Additionally, such signals excite the oscillating circuit of the supply network, which consists of longitudinal inductance and the ground capacitance of the lines and causes a strong oscillation on the transformer terminals. This fact complicates the determination of the FRA. The Problems are:

- External / internal surge arrester, which protects the transformer / regulating winding of a too high voltage stress, can lead to a non linear behavior.
- The electromagnetic coupling between the different phases results to a transmission of the transient signals to the other phases and a multiphase excitation of the transformer occurs.
- The bandwidth of the recorded signal might not be high enough
- Distinguishing between excitation and answer signal is difficult
- Different circuit states of the substation induce different reflection behavior

The analysis of the “stochastic” transient overvoltages has shown that the voltage levels are not high enough to turn the surge arresters into conductive condition. It also shows that bandwidth and voltage of the signals vary strongly. Transient signals generated by far switching operations are characterized with a low bandwidth and a low voltage. This is caused by the overhead line and its low-pass behavior. For that reason only the transient overvoltages with a bandwidth greater than 2 MHz and a voltage more than 15 kV are used for the determination of online FRA. This makes sure that the signals only come from close switching operation. Additionally also a multiphase excitation can be precluded, because the degree of coupling depends on the distance.

Due to the oscillation of the “stochastic” transient overvoltages it is difficult to distinguish between the excitation and the response signal on the basis of the curve progression. A method that worked satisfactorily includes considerations about the cut-off frequencies of the partial events. It is assumed that the excitation signal has the steepest rising edge and therefore the highest cut-off frequency. A problem here is that the spectrum of the signal falls below noise level several times, which makes detection difficult. The Hinkley criterion used as a jump detector offers a solution to the problem. It works explained as follows: As long as a signal exist the Hinkley function increases. From the point where noise dominates, the function decreases. The absolute maximum of the Hinkley curve indicates the position of the cut-off frequency, and thus the excitation signal can be identified.

Since online FRA measurements are influenced by the electrical network of the substation, different circuit states or tap changer position pose a problem for reliable analysis. A possibility would be to collect and sort FRA data according to those states in a database. However, it is obvious that such a data base increases with the size of the substation. Hence this method is not practical for larger substations. Another approach would be to categorize the FRA with respect to a certain tolerance according to its minima and maxima. In case of a change in the mechanical condition of the transformer coils, a new category of would be created. The problem to this approach is that many calculation procedures, which have a blurring effect and lead to a reduction of FRA sensitivity, are needed.

For online FRA measurements, using overvoltages from the power-up event of the transformer is advantageous, because there are fewer influence factors in comparison to usage of transient overvoltages from the power grid. The location of the excitation is always the same and one voltage level is completely disconnected from the transformer. Basically there are two kinds of signals, which can be used for the determination of FRA: the VFTO-signals (very fast transient oscillations), generated by the GIS disconnecter, or the transient signals generated by the circuit breaker. FRAs determined from these signals show a higher sensitivity than those from the “stochastic” transient overvoltages. A big problem with both kinds of signals is that the voltage is very high and the surge arrester (internal or external) can turn

into conductive condition. This leads to a non linear behavior of the measured electrical network. Therefore only FRAs with the same excitation level may be compared to each other.

Conclusion

The FRA is affected by some factors in signal processing and measurement setup. Windowing, recording length, ADC-resolution and -sampling rate are the main influence factors in signal processing for the IFRA. By comparison, the SFRA shows significantly less influence factors in signal processing. Both kinds of measurements need a good setup to create reproducible results. Therefore shielded leads and a good earthing concept are absolutely necessary. An increase of sensitivity can be achieved by the usage of an external network.

As opposed to the offline-measurements online-measurements allow a permanent monitoring of the insulation- and winding-condition. Another aspect of online-monitoring is that exceeding voltage- and current stresses can also be monitored. The time signals are affected by a series of additional factors. These influence factors cannot be completely eliminated and consequently the FRA is subjected to a lower sensitivity. A higher sensitivity for the online measured FRA can be obtained by using transient signals generated during the power-up event of the transformer. However, in this case only FRAs with the same excitation level may be compared to each other, in order to prevent an influence of the surge arrester.

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.

Hochspannungstechnik

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

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

Hinsichtlich des *Designs* hochspannungstechnischer Betriebsmittel werden neue Isolierstoffe (z. B. natürliche und synthetische Ester) auf ihre physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften hin geprüft. Durch den Einsatz moderner Softwarewerkzeuge, z. B. Finite Elemente Methode (FEM) und Computational Fluid Dynamics (CFD), wird der Ölstrom und das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren untersucht. Das Forschungsgebiet gasförmige Isolationssysteme ist geprägt durch Themenstellungen wie die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von SF₆ und Mischgasen, des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Spannungsfestigkeit und die Untersuchung der Ausbreitung und Dämpfung von Very Fast Transients in GIS.

RESEARCH ACTIVITIES

Our institute's main research topics are mainly related to the safety and reliability of 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.

High Voltage Engineering

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

The *operation* of electric power networks above their initial dimensioning levels and longer than their estimated lifespan requires a 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 (e. g. partial discharge measurement, Frequency Response Analysis, moisture determination, dissolved gas analysis, vibration measurement, on-line monitoring). These tools can be used to predict the residual life time of a H.V. apparatus. On the other side service and maintenance strategies for H.V. equipment are developed (asset management).

Regarding the *design* of high voltage equipment new materials (e. g. natural and synthetic esters) are investigated concerning their physical, chemical and electric properties. By means of modern software tools, e. g. finite element analysis (FEM) and Computational Fluid Dynamics (CFD), the oil flow distribution and the thermal behaviour of power transformers can be investigated and optimized. The research area Gaseous Dielectrics is characterized by topics like investigation of dielectric properties of pure SF₆ and SF₆-gas mixtures, the influence of atmospheric conditions on the dielectric strength of technical insulation designs and the investigation of generation and damping of very fast transients in gas-insulated switchgear.

Energieübertragung

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 SF₆-Anlagen entwickelt.

Ein neuer Schwerpunkt am Institut ist die Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie durch Smart Grids. Die Forschergruppe beschäftigt sich mit Fragen der Modellierung dezentraler Einspeiser, Elektromobilität, Lastflusssteuerung und der Nutzung moderner Kommunikationstechnik zur Steuerung von Smart Grids.

Elektromagnetische Verträglichkeit

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren ein wichtiger Schwerpunkt. 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 SF₆-Anlagen im Vordergrund. Neuere EMV-Forschungsarbeiten befassten sich mit schnellen Emissionsmessverfahren im Zeitbereich (FEMIT: **F**ast **E**mission **M**easurement 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 den 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.

Power Transmission

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.

A rather new field of work at the institute is the research on Smart Power Grids with distributed power generation. A research group is starting to model distributed resources and also will go to describe the influence of an increasing e-mobility onto the distribution network. Further topics are load flow control and modern communication techniques for Smart Power Grids.

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 EMC research works 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 to develop new measurement tools for a convenient recording of these sporadically impulses in the automotive power network with as less coupling disturbances as possible.

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

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

■ Vibrationsmessungen an Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Michael Beltle

Im europäischen Hoch- und Höchstspannungsnetz spielt die Verlässlichkeit der Betriebsmittel eine entscheidende Rolle. Ausfälle ziehen durch Garantieverträge und Reparaturen hohe Kosten nach sich, die es zu vermeiden gilt. Gleichzeitig sollen die Kosten für Wartung minimiert werden. Besonders Leistungstransformatoren stehen im Focus dieser Betrachtung. Ein Großteil der in Deutschland im Betrieb befindlichen Leistungstransformatoren hat die projektierte Lebensdauer bereits erreicht oder überschritten. Um Veränderungen oder gar Probleme frühzeitig feststellen zu können, ist eine permanente Überwachung während des Betriebs notwendig, das sogenannte Online Monitoring.

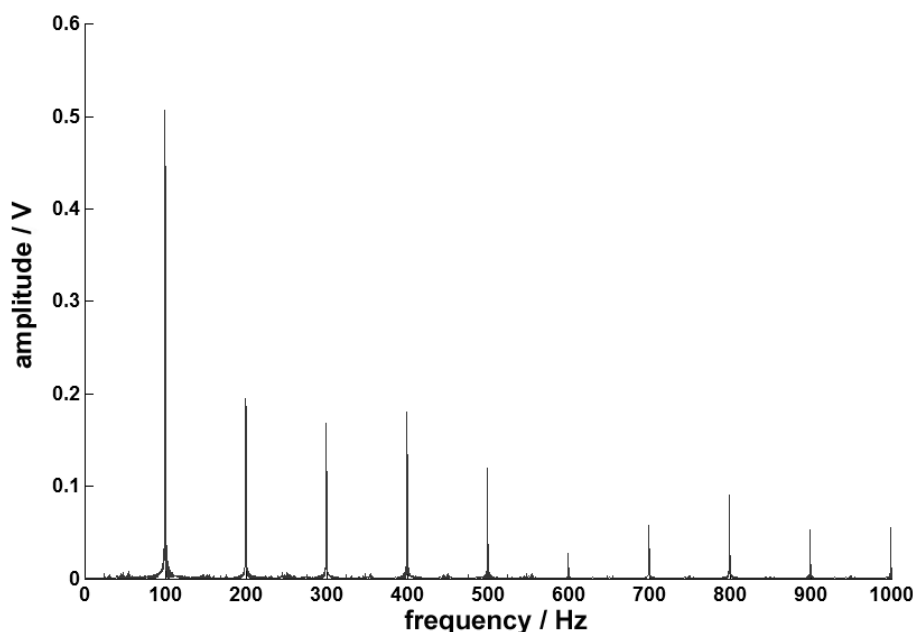


Fig. 1: Typisches Frequenzmuster eines Leistungstransformators
Typical frequency pattern of a power transformer

Eine neue Methode des Online Monitoring ist die Vibrationsüberwachung der Transformatoren. Der Transformator zeichnet sich durch typische Betriebsgeräusche aus, die für die Überwachung herangezogen werden.

Deren Ursache liegt im Wesentlichen in zwei physikalischen Effekten. Zum einen werden die Kernbleche des Aktivteils durch das magnetische Wechselfeld verformt. Diese Längenänderung erzeugt Schallwellen, die sich durch das Eisen und im Isoliermedium ausbreiten. Die Magnetostriktion ist von der Spannung abhängig. Der zweite Effekt wird durch die stromdurchflossenen Wicklungen selbst verursacht. Im magnetischen Wechselfeld wirkt eine Kraft, die sie in Schwingung versetzt.

■ Vibration Measurement on Power Transformers

Dipl.-Ing. Michael Beltle

The reliability of electrical equipment in the European electrical power network is a basic necessity. Guarantee agreements and reparations result in high expenses that have to be avoided. Costs for maintenance should be minimized at the same time. Power transformers in particular have to be observed considering these issues. The majority of transformers in Germany already reached their life expectancy. To be able to discover changes or problems at an early stage permanent surveillance during operation, called online monitoring, is necessary.

A new method of online monitoring is vibration measurement of power transformers. Every transformer can be characterized by its radiated noise, which can be used for surveillance.

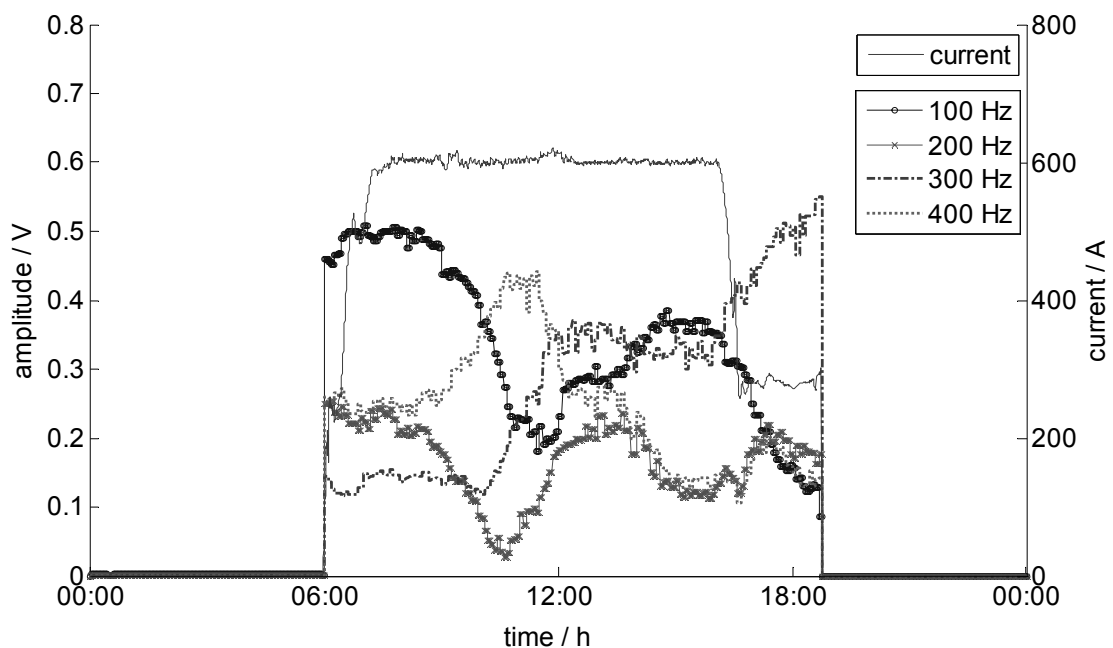


Fig. 2: Zeitlicher Verlauf der einzelnen Frequenzanteile über dem Laststrom
Time dependent change of frequencies correlated with load current

Vibrations are originated from two physical effects. The laminated core is deformed by the alternating magnetic field. Deformation emits sound waves travelling through solid parts and insulating medium. This effect is called magnetostriction. It depends on the applied voltage. The second effect is caused by conducting windings in an alternating magnetic field. The Lorentz force causes oscillation of windings.

For both effects the fundamental frequency is the double rated frequency, in Europe 50 Hz. Furthermore the spectrum contains harmonics. By electrical strain, operating time and other processes vibration characteristics change. Investigations will show if altering characteristics can be used as indicators for changes of the active part like loosened windings.

Beide Effekte haben die gleiche Grundfrequenz, die der doppelten Netzfrequenz, in Europa 50 Hz, entspricht. Hinzu kommen Vielfache der Grundfrequenz, die harmonischen Anteile. Durch elektrische Beanspruchung, lange Betriebszeit und weitere Prozesse verändert sich das Vibrationsverhalten. Im Laufe der Untersuchungen soll festgestellt werden, inwiefern sich daraus Rückschlüsse auf Änderungen im Aktivteil ziehen lassen, wie beispielsweise eine Lockerung der Wicklung.

Die Vibrationen können auf der Kesselwand durch Körperschallsensoren oder Beschleunigungssensoren gemessen werden. Im Laufe des Jahres wurde ein Prototyp eines Messsystems in Betrieb genommen. An einem Maschinentransformator mit 125 MVA Leistung misst ein Sensor in regelmäßigen Zeitabständen den Körperschall. Da der Block des Kraftwerks nicht dauernd in Betrieb ist, werden die Messdaten nur im Lastfall gespeichert, ansonsten verworfen. Ein typisches Frequenzmuster ist in Fig. 1 dargestellt. Fig. 2 zeigt die Änderung einiger charakteristischen Frequenzen über der Zeit. Die Ursachen für die Änderung des Spektrums werden noch untersucht. Beispielsweise ist die Grundschiwingung nach dem Einschaltvorgang auf Grund der Remanenz des Kerns so lange erhöht, bis diese abgebaut ist. Auch soll zukünftig untersucht werden, ob eine Abhängigkeit zwischen dem Vibrationsverhalten und der Temperatur des Isoliermediums besteht. Fig. 3 zeigt im Zeitraum gemäß Fig. 2, wie sich die Temperatur des Öls im Laufe des Betriebs entwickelt und wie sich die gemessenen Frequenzanteile der Vibrationen verändern.

Die Signalstärke der gemessenen Daten ist stark vom Ort auf der Tankoberfläche abhängig. Daher werden mehrere Transformatoren verschiedener Bauform und Leistungsklasse vermessen, um eine Datenbasis für geeignete Sensorpositionen zu ermitteln. Auch gilt es festzustellen, ob sich die Orte mit Amplitudenmaxima einzelner Frequenzen im Laufe des Betriebs verschieben und ob ein eingeschwungener Zustand erreicht wird.

Unter Last ist am Tank nur die Überlagerung aus Kern- und Wicklungsschiwingung messbar, der Anteil der Schwiwingung, welcher von den Wicklungen verursacht wird, ist unbekannt. In Zusammenarbeit mit einem Transformatorhersteller wird untersucht werden, ob sich mit optischen Sensoren direkt am Aktivteil Vibrationen bzw. Deformationen der Wicklungen unabhängig von der Kernvibration messen lassen.

Vibrations can be measured on the tank surface by solid borne sound sensors or acceleration sensors. This year a prototype measurement system was installed at a 125 MVA power transformer. It isn't permanently running, thus measured data is analyzed and only stored if the transformer is on load. Fig. 1 shows a typical frequency pattern. Fig. 2 shows the time based change of the characteristic frequencies correlated with the load current. The reasons for the changes of amplitudes will be investigated. E.g. core magnetic remanence influences the amplitude of fundamental frequency to be higher at start-up until remanence has disappeared. Furthermore the coherence between acoustic damping and temperature of the insulating medium has to be considered. Fig. 3 shows characteristic frequencies versus top oil temperature in the same time period like Fig. 2.

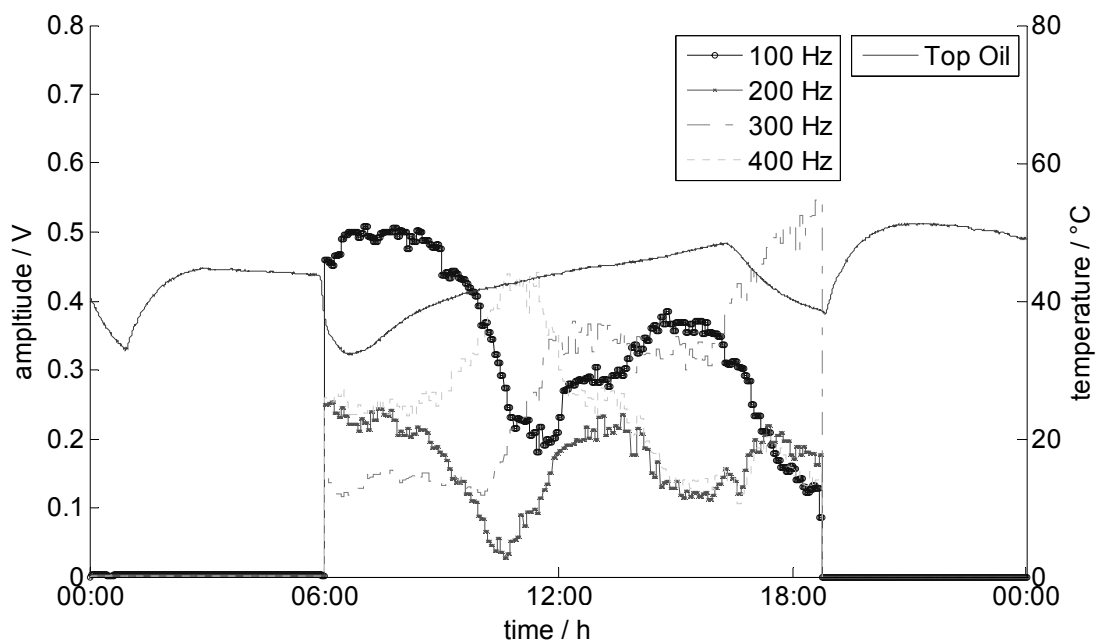


Fig. 3: Zeitlicher Verlauf einzelner Frequenzanteile über der Öltemperatur
Time dependent change of frequencies correlated with oil temperature

The measured signal strength is influenced by the sensor location on the tank surface. Spatial signal strength distribution may also change during operation until a steady state is reached. To determine appropriate positions several power transformers of different structural shape and nominal power will be examined. The results will be incorporated in a database.

On load only the superposition of vibration originated by core and windings are measurable, they can not be separated. In cooperation with a transformer manufacturer an optical system to measure only winding vibrations will be investigated.

- **Entwicklung von Konzepten zur Dämpfung von „Very Fast Transient Overvoltages“ (VFTO) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS)**

Dipl.-Ing. Simon Burow

Gasisolierte Schaltanlagen sind in elektrischen Energieverteilungssystemen weit verbreitet. Ihre platzsparende Bauweise, hohe Zuverlässigkeit und der geringe Wartungsaufwand sind Eigenschaften, die eine gasisolierte Ausführung von Schaltanlagen nicht nur für spezielle Anforderungen interessant machen. In den letzten Jahren entstanden gasisolierte Schaltanlagen mit Nennspannungen von über 1000 kV.

Schaltheandlungen und Störfälle können in gasisolierten Schaltanlagen zu transienten Ausgleichseffekten führen. Diese hochfrequenten Überspannungen werden auch „Very Fast Transient Overvoltages“ (VFTO) genannt und können Amplituden besitzen, die einem Vielfachen der Nennspannung entsprechen. Durch die hohen Amplituden der VFTO werden die Isoliersysteme sowohl innerhalb der GIS als auch in angrenzenden elektrischen Betriebsmitteln stark beansprucht. Die Amplituden und die Steilheit von VFTO müssen bei der dielektrischen Dimensionierung der Betriebsmittel berücksichtigt werden, um Überschlüsse zu vermeiden.

Für die Untersuchung einfacher Methoden zur Dämpfung der VFTO wurde eine 8 Meter lange GIS aufgebaut (Fig. 1). Mit Hilfe von Stossspannungsimpulsen und einer Funkenstrecke innerhalb der GIS können damit VFTO zuverlässig und reproduzierbar erzeugt werden. Für eine störungsfreie Messung der VFTO wurde ein Sensor entwickelt (Fig. 2). Dazu wurde eine Kapazität, die aus einer beidseitig mit Kupfer beschichteten Leiterplatte besteht, an einem Flansch in die GIS eingebracht. Sie dient als Niederspannungskapazität eines Teilers und wird über geeignete Anschlüsse nach außen geführt.



Fig. 1: Versuchsaufbau
Experimental Setup

Development of Conceptions to Damp „Very Fast Transient Overvoltages“ (VFTO) in Gas Insulated Substations (GIS)

Dipl.-Ing. Simon Burow

Gas insulated substations are widely used in energy distribution systems. Less required space, high reliability and the low need of maintenance are some of the advantages of GIS. Therefore GIS are of interest not only for special applications. During the last years GIS with rated voltages above 1000 kV have been engineered.

Switching operations and failures in GIS could cause transient equalisation effects. These high frequent overvoltages are called „Very Fast Transient Overvoltages (VFTO)“ and could reach a multiple of the rated voltage. Insulating systems in the GIS and in connected devices are stressed or may be damaged by these high amplitudes of overvoltages. So, the dielectric stress caused by the amplitude and steepness of the VFTO must be taken into account for the construction to avoid flashovers.

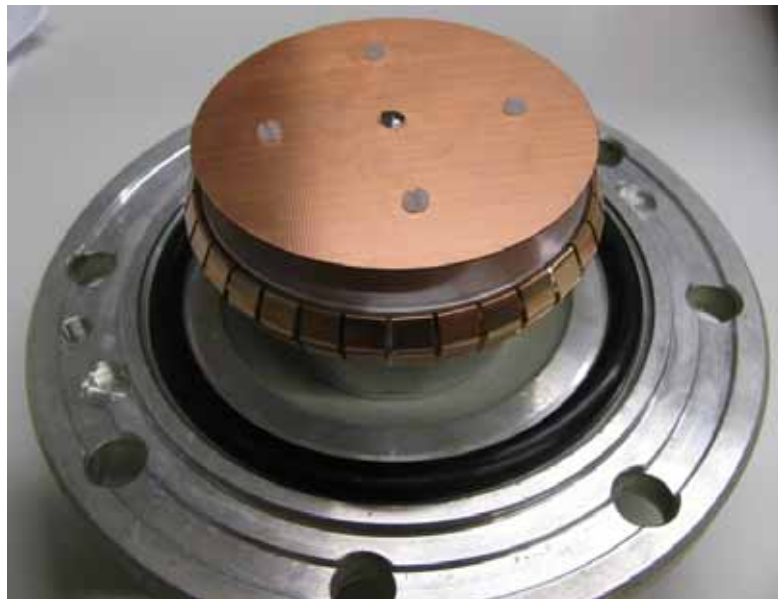


Fig. 2: Sensor zur Messung von VFTO
Sensor for VFTO measuring

A GIS 8 meters long was created to investigate simple methods of damping VFTO (Fig. 1). They could be generated reliably and reproducibly by supplying a surge voltage on a spark gap inside the GIS. In order to measure the VFTO without failures, a sensor was developed (Fig. 2). A printed circuit board with a copper layer on both sides is installed on a flange inside the GIS. The board serves as the low voltage capacity of a potential divider. The signal of the divider is lead outwards through a suited junction.

- **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 Standard Öl-Schieber (DN80/DN50)
UHF Sensor for standard oil filling valve (DN80/DN50)

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

Diverse Messungen an verschiedenen Transformatoren führten zu neuen Erkenntnissen. Erste Messungen erfolgten an einem 110/220 kV, 210 MVA-Netzkupplungs-Transformator, siehe Fig. 2. Die Vor-Ort-Messungen erfolgten mit externer Spannungsversorgung über die tertiären Wicklungen des Transformators.

Bei Nennspannung waren UHF-Signale messbar. Fig. 3 zeigt ein exemplarisches Zeitsignal sowie die dazugehörigen Frequenzanteile. Gemessen wurden diese Signale unverstärkt mit einem Transientenrekorder mit einer analogen Bandbreite von 3 GHz. Der ausreichende Signal-Rausch-Abstand ließe zusätzlich eine breitbandige Verstärkung zu.

■ **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 (see Fig. 1).



Fig. 2: 210-MVA-Netzkuppler mit TE-Aktivität bei Nennspannung
210 MVA Grid-Coupling Transformer with PD occurrence at nominal voltage

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.

In 2009 several measurements on-site at various transformers were performed. First measurements were carried out on a 110/220 kV, 210 MVA grid-coupling transformer, see Fig. 2. The on-site measurements were performed off-line and an external PD free generator step-up unit (110 kVA) was used to excite the transformer over the tertiary side to the operating voltage.

At nominal voltage inside the transformer UHF signals are measurable. Fig. 3 shows an exemplary time signal and the calculated frequency spectrum.

Das gemessene UHF-Signal enthält Frequenzanteile bis zu 1 GHz, welche normalerweise in dieser breitbandigen Form nur von inneren TE unter Öl ausgestrahlt werden. Externe Störungen sind in der Regel schmalbandig, zum Beispiel bei 500 MHz für digitale Fernsehsignale oder bei 900 MHz für mobile Telekommunikation.

Eine weitere Bestätigung, dass diese Signale von TE stammen, liefert die phasen aufgelöste Darstellung (PRPD). Vergleichbar zur genormten IEC 60270-Messung entstehen typische Muster, die internen TE zugeordnet werden können, siehe Fig. 4. Phasenstabile Signale entstehen zudem nur durch spannungsabhängige TE, und die Muster geben Hinweise auf die Art der TE sowie auf ihren Ort (d.h. welche Phase des Prüflings betroffen ist).

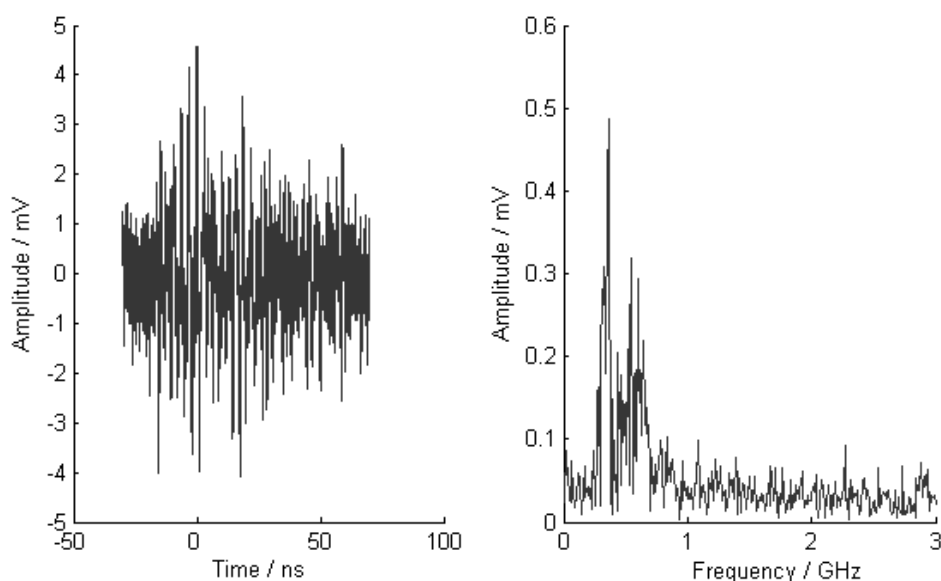


Fig. 3: UHF-Signal bei Nennspannung (links) und Frequenzanalyse (rechts)
UHF signal at nominal voltage (left) and frequency analyses (right)

Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Messungen die Schirmungseigenschaft des Transformatorkessels gegen externe Störungen nachgewiesen. Eine künstliche Koronaentladung durch einen Draht an der Transformatordurchführung führte zu unveränderten UHF-TE-Messdaten. Das belegt, dass die UHF-TE-Messungen auch in gestörter Umgebung sehr belastbar sind hinsichtlich der Aussage, ob der Transformator TE hat oder nicht.

Mit diesen Eigenschaften kann die UHF-Messmethode andere TE-Messmethoden sehr gut unterstützen. Ein weiteres Verfahren, Gating genannt, kann die IEC 60270-Messungen durch geeignete Kombination der Messverfahren unterstützen. Zusätzlich liefern UHF-Signale empfindliche Informationen über den Auftrittszeitpunkt von TE und können so als Triggersignal für zusätzliche akustische Messungen zu Ortungszwecken eingesetzt werden. Untersuchungen in Zukunft sollen zeigen, ob eine TE-Ortung durch alleinige Nutzung von UHF-Signalen machbar ist.

The signal, with a signal to noise ratio of 5:1, was recorded without amplification using an oscilloscope with an analogue bandwidth of 3 GHz. Because of that signal to noise ratio it is also possible to use a broad-band or narrow-band amplifier.

The signal features frequency portions up to 1 GHz which is normally emitted by a broad band emitter of UHF waves like an internal PD in oil. External noise would have been narrow banded, e.g. around 500 MHz for digital video broadcasting or around 900 MHz for global communication systems.

For further proof that signals correlate to PD, PRPD's (Phased Resolved PD pattern) of the signals can be recorded. Similar to the IEC PD measurements typical pattern according to theory for internal PD are visible, see Fig. 4.

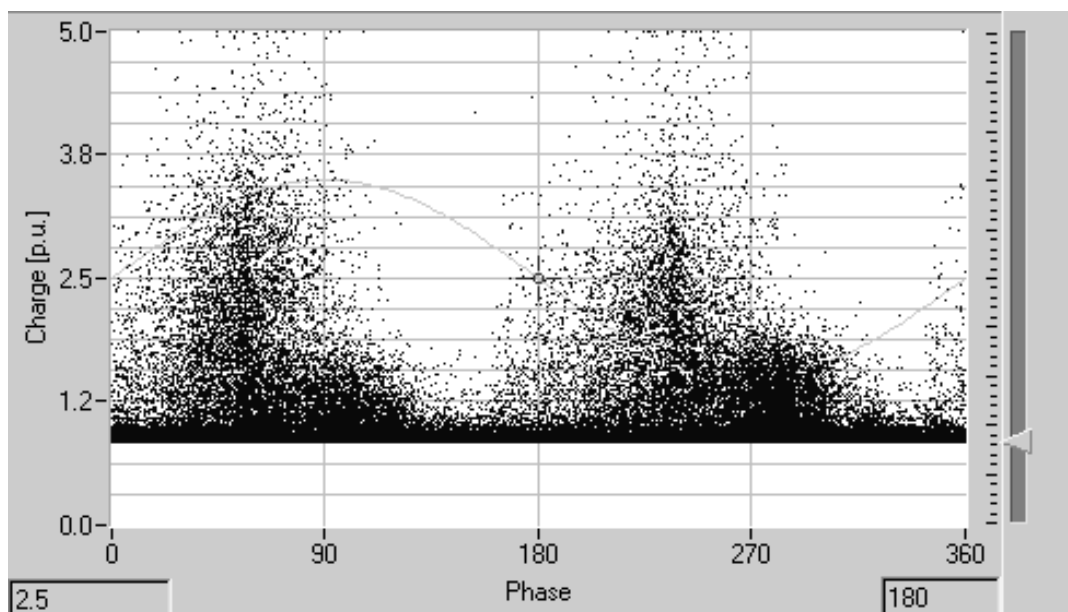


Fig. 4: UHF PRPD - synchronisiert mit angelegter Prüfspannung – 3 min
PRPD UHF – synchronised to applied test voltage – 3 min

Phase stable signals occur only in case of PD and the pattern might give hints of the PD's location (which phase) and type of PD.

The shielding character of the tank was also proofed. A corona discharge directly located at the transformer bushing didn't lead to any disturbances of the UHF measurements. So with UHF PD measurements a clear statement is possible, if the transformer has internal PD or not, even in very noisy surrounding.

With that characteristic, UHF PD measurements can support other PD measuring methods. A procedure called Gating might improve the IEC 60270 measurements by additionally measuring UHF PD signals. Further UHF PD measurements provide a sensitive triggering event for combined UHF and acoustic PD localisation. Research in future might show if a PD localisation with solely UHF measurements is possible.

■ **Synthese der Einzelaussagen von DGA-Interpretationsmethoden**

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Die Instandhaltung von Leistungstransformatoren erfolgt heute zunehmend zustands-, zuverlässigkeits- oder risikoorientiert. Allen Strategien gemeinsam ist die Berücksichtigung des Zustandes. Um den Zustand zu kennen, bedarf es der Inspektion.

Eine der meistverbreiteten Inspektionsmethoden ist die Gas-in-Öl-Analyse (DGA), deren Optimierung im vergangenen Jahresbericht im Vordergrund stand. Es wurde gezeigt, wie zunächst die DGA-Interpretationsmethoden durch Einsatz von Fuzzy-Inferenz-Systemen exakt nachgebildet und dann mit Hilfe verifizierter Daten trainiert werden, um damit falsch positive bzw. falsch negative Aussagen zu verringern.

Gegenstand dieses Jahresberichts ist die Zusammenführung der Einzelaussagen der trainierten Interpretationsmethoden. Das ist aus zwei Gründen sinnvoll: Für ein und dasselbe Gasmuster können zwei Interpretationsmethoden unterschiedlich differenzierte Zustände bestimmen. Während beispielsweise eine Interpretationsmethode nur einen „thermischen Fehler“ detektiert, grenzt die andere die Temperatur weiter auf eine „hohe Temperatur“ ein. Interpretationsmethoden können sich auch widersprechen. Während die eine einen „elektrischen Fehler“ feststellt, diagnostiziert die andere einen „thermischen Fehler“. Die Zusammenführung ergibt nun dort, wo sich die Aussagen der Interpretationsmethoden überlappen, eine größere Zuverlässigkeit der Gesamtaussage und dort, wo sie sich nicht überlappen, eine noch differenziertere Gesamtaussage.

Vor der Zusammenführung werden zunächst noch die Schwellwerte der Interpretationsmethoden entfernt. Erreicht wird das dadurch, dass in den zugrunde liegenden Fuzzy-Inferenz-Systemen die unstetigen durch stetige Zugehörigkeitsfunktionen ersetzt werden. Fig. 1 zeigt den Vorgang durch einen Vorher-Nachher-Vergleich am Beispiel des Klassifikators von General Electric (GE). Die unstetigen Übergänge bei $C_2H_2/C_2H_4=1$ und $C_2H_4/C_2H_6=1$ (links) sind stetigen Übergängen (rechts) gewichen.

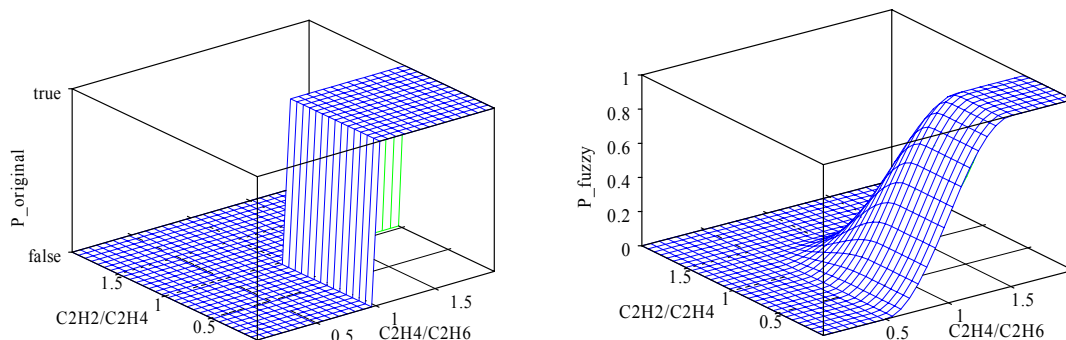


Fig. 1: Klassifikator von General Electric, links unstetig und rechts stetig
General Electric's classifier, left discontinuous and right continuous

■ Synthesis of DGA-Interpretation Methods' Single Statements

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Today condition based, reliability centered or risk based maintenance strategies become more and more important for the maintenance of power transformers. All these strategies consider the power transformer's condition. In order to assess a power transformer's condition it has to be inspected.

One of the most commonly used inspection methods is the dissolved gas analysis (DGA). The optimisation of DGA interpretation methods was already subject of last year's annual report. Back then, at first the interpretation methods were modelled by fuzzy inference systems. Finally, they were trained with verified training data in order to reduce false positive and false negative statement of the interpretation methods.

Subject of this annual report is the combination of the interpretation methods in such a way, that all the single statements are replaced by an overall statement. This is reasonable because of two facts: The interpretation methods can distinguish transformer conditions more or less detailed. For the same gas pattern two interpretation methods might state conditions that differ in detail. Whereas one interpretation method states "thermal fault" only, the other states more precisely "thermal fault with high temperature". Interpretation methods can also be inconsistent with one another. While one method detects an "electrical fault", the other might detect "thermal fault". Thus, the combination of the interpretation methods causes a higher reliability where statements of interpretation methods overlap or a more detailed statement where they do not overlap.

Before combining interpretation methods, either method's thresholds have to be replaced by smooth transitions. This can be achieved by replacing discontinuous by continuous membership functions in the underlying fuzzy inference systems. Fig. 1 shows the procedure by a pre-post comparison using the example of General Electric's (GE) classifier. The discontinuous transitions at $C_2H_2/C_2H_4=1$ and $C_2H_4/C_2H_6=1$ (left) are replaced by continuous transitions (right).

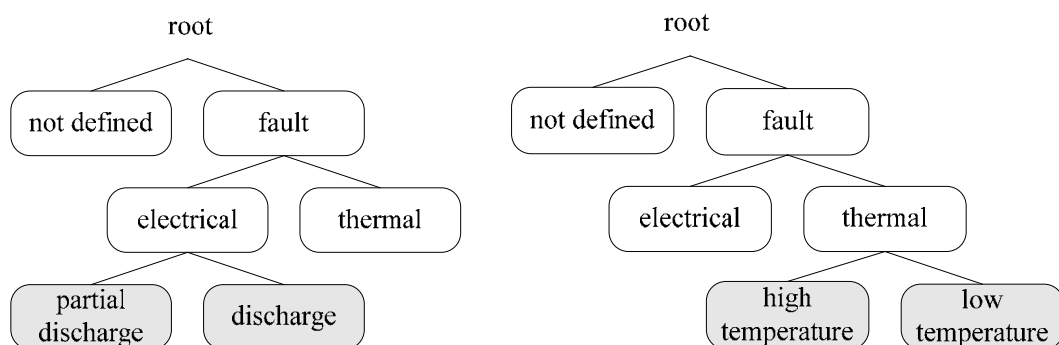


Fig. 2: Die Zustandsbäume "Doernenburg R." (links) und "General Electric" (rechts)
The condition trees „Doernenburg Ratios" (left) and „General Electric" (right)

Für die angestrebte Verdichtung muss zunächst für jede Interpretationsmethode ein Zustandsbaum erstellt werden. Dessen Knoten ergeben sich aus den von der Interpretationsmethode identifizierbaren Transformatorzuständen. Die Knoten sind hierarchisch geordnet. Wie diese Zustandsbäume aussehen, zeigt Fig. 2 exemplarisch anhand der Interpretationsmethoden „Doernenburg Ratios“ (links) und „General Electric“ (rechts). Für jeden Knoten muss die Wahrscheinlichkeit (P), mit der der Zustand vorliegt, abgeschätzt und die Zuverlässigkeit (R), mit der die Abschätzung erfolgt, berechnet werden. Für die Endknoten (grau) sind P und R unmittelbar, für alle inneren Knoten (weiß) mittelbar aus P und R der Nachfolgeknoten zu bestimmen.

Überlagert man nun die einzelnen Zustandsbäume, ergibt sich ein Gesamtzustandsbaum. Fig. 3 gibt beispielhaft den Gesamtzustandsbaum wieder, der sich aus den Elternzustandsbäumen „Doernenburg Ratios“ und „General Electric“ zusammensetzt. Knoten, die in beiden Elternzustandsbäumen vorkommen, sind weiß gefärbt; Knoten, die in nur jeweils einem Elternzustandsbaum vorkommen, sind grau gefärbt.

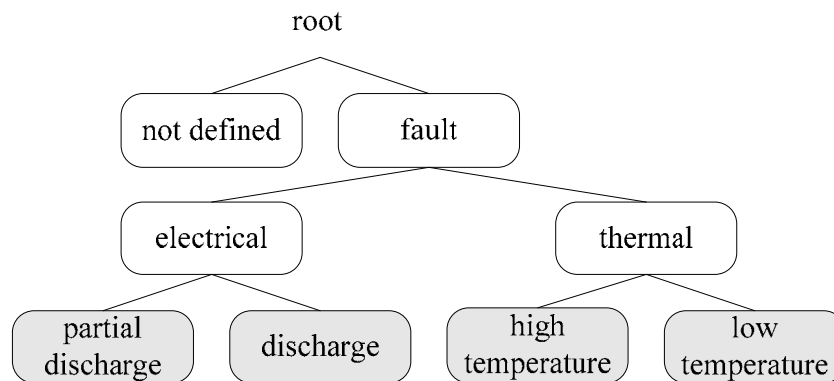


Fig. 3: Überlagerung einzelner Zustandsbäume zu einem Gesamtzustandsbaum
Superposition of single condition trees to an entire condition tree

Für alle Knoten des Gesamtzustandsbaumes sind wieder eine Wahrscheinlichkeit (P) und eine Zuverlässigkeit (R) definiert. P und R bei den nicht überdeckten Knoten sind unmittelbar durch P und R der korrespondierenden Knoten des Elternzustandsbaumes festgelegt. Bei allen anderen Knoten ergibt sich P und R mittelbar durch Überlagerung von P und R der korrespondierenden Knoten der Elternzustandsbäume.

Abschließend eine Demonstration der Leistungsfähigkeit des Gesamtzustandsbaumes. Die Messung an einem 385 MVA-Maschinentransformator ergab folgende Gas-in-Öl-Werte in ppm: H₂ (300), CH₄ (1740), C₂H₂ (<1), C₂H₄ (3500) und C₂H₆ (1190). Die Interpretationsmethoden „Doernenburg Ratios“ und „General Electric“ konstatierten einen thermischen Fehler bzw. einen thermischen Fehler hoher Temperatur. Fig. 4 zeigt die Einschätzung des Gesamtzustandsbaumes. Beginnend mit der Wurzel ist der wahrscheinlichste Zustand ein Fehler (P=64%). Dieser prägt sich schwach elektrisch (P=10%) und stark thermisch (P=64%) mit hoher Temperatur (P=55%) aus. Die Inspektion ergab einen Teilleiterbruch, der sich in Teilleitungen, einem Heißpunkt und einer Degeneration der Zelluloseisolation äußerte. Der Gesamtzustandsbaum ist also in der Lage, einen Fehler in seiner Komplexität besser zu erfassen, als es die einzelnen Interpretationsmethoden zu leisten vermögen.

For each interpretation method it is necessary to build a condition tree. Each node of a condition tree represents one of the transformer conditions that the underlying interpretation method can identify. The nodes are hierarchically ordered. Two examples of such condition trees are given by Fig. 2. The condition tree for “Doernenburg Ratios” is depicted on the left and on the right the condition tree for “General Electric”. For all nodes the probability (P) of the corresponding transformer condition must be estimated. In addition, also the reliability (R) of the estimation needs to be calculated. For each leaf node (gray), P and R are directly calculated; for all other nodes (white) they are calculated indirectly via P and R of the succeeding nodes.

The superposition of single condition trees produces an overall condition tree. Fig. 3 depicts an example. It is a superposition of the two condition trees “Doernenburg Ratios” and “General Electric”. Nodes that are part of both parental condition trees are coloured white, while all other nodes are coloured gray.

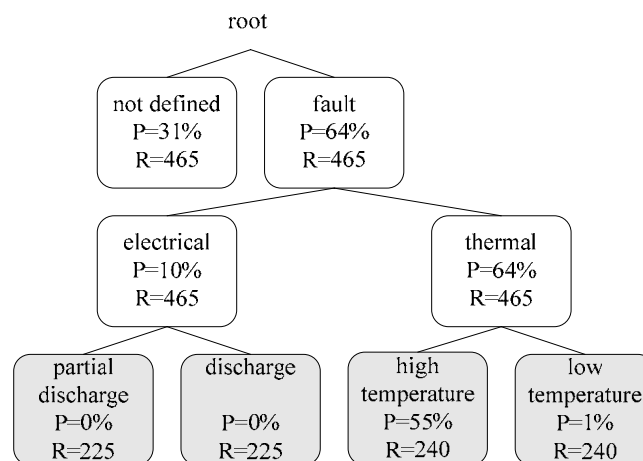


Fig. 4: Mögliche Zustände, bewertet durch Wahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit
Possible conditions rated by probability and reliability

For all nodes of the overall condition tree again probability (P) and reliability (R) are defined. P and R of all non-overlapping nodes are directly defined by P and R of the corresponding nodes of the parental condition tree. For all other nodes P and R are defined as the superimposed P and R, respectively, of the corresponding nodes of the parental condition trees. Finally, the following example shows the overall condition tree's performance. The measurement of dissolved gases on a 385 MVA generator transformer resulted in the following gas concentrations in ppm: H₂ (300), CH₄ (1740), C₂H₂ (<1), C₂H₄ (3500) and C₂H₆ (1190). The interpretation methods “Doernenburg Ratios” and “General Electric” stated a “thermal fault” and a “thermal fault with high temperature”, respectively. Fig. 4 shows the statement of the overall condition tree. Starting at root, the most probable condition is a fault (P=64%). The fault has two components, a weaker electrical (10%) and a stronger thermal (P=64%) with high temperature (P=55%). The true fault was identified by inspection. It was a partly broken winding which causes partial discharge, hot spot and degradation of cellulose. Thus, the overall condition tree is capable to cover more of the complex fault than the single interpretation methods.

■ **Erkennung von Wicklungsschäden bei Großtransformatoren mit Hilfe der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion**

Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

Gegenstand dieser Forschungstätigkeit sind Untersuchungen über die Charakterisier- und Quantifizierbarkeit von Veränderungen frequenzabhängiger Übertragungsfunktionen bei großen Leistungstransformatoren in Bezug auf verschiedene Beschädigungsarten des Aktivteils.

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 $\underline{TF}(f)$ bildet diese geometrischen Gegebenheiten gleich einem Fingerabdruck ab. Verändern sich die mechanischen Konstellationen im Innern des Transformators, so hat dies unmittelbaren 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 am Aktivteil eines Leistungstransformators zu detektieren. Auf Erfahrungswerten basierend werden die Fehlerarten Windungskurzschluss, radiale Wicklungsdeformation, axiale Wicklungsverschiebung, Leiterverkipfung sowie Beschädigungen des Kerns unterschieden. Die Beschädigungen sind oftmals Folge elektrischer Fehler wie Kurzschlüsse und können je nach Schwere den Weiterbetrieb des Trafos verbieten, erhöhen mindestens jedoch das Ausfallrisiko. Fig. 1 zeigt den durch einen Kurzschluss in einem 110-kV-Netz verursachten Schaden an Phase U eines 220-kV/110-kV-Transformators.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Interpretation von Veränderungen bei Übertragungsfunktionen in Verbindung mit verschiedenen Fehlerarten. 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.

Bekannte Fehlerarten wie Deformationen wirken sich in Form von Verschiebung, Erzeugung oder Verschwinden von Resonanzstellen in der Übertragungsfunktion aus. Ansatzpunkt für die Untersuchung dieser Zusammenhänge ist die Überführung der gemessenen Übertragungsfunktion in eine analytische, gebrochen-rationale Funktion. Neben einer Datenreduktion verspricht dieses Verfahren, Veränderungen des Resonanzverhaltens von Transferfunktionen objektiv messbar zu machen: Unterschiede in den Resonanzen können auf Veränderungen im Pol-Nullstellen-Diagramm zurückgeführt werden.

- **Recognition of Power Transformer Winding Failures by Means of Frequency Response Analysis (FRA)**

Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

Purposes of this research are investigations about the characterisation and quantification of changes in frequency responses of large power transformers in relation with different types of defects of the active part.

Frequency Response Analysis (FRA) as 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 $\underline{TF}(f)$ represents and displays the geometric structural condition like a finger print. If the mechanical constellations inside the transformer change, the electrical behaviour is affected inherently and therewith 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. Based on experiences, the fault types shorted turn, radial deformation, axial shift, tilting and core defect can be identified and detected by means of FRA. These damages are 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 shows a winding damage on Phase U of a 220kV/110kV power transformer caused by a short circuit within the 110kV grid.



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

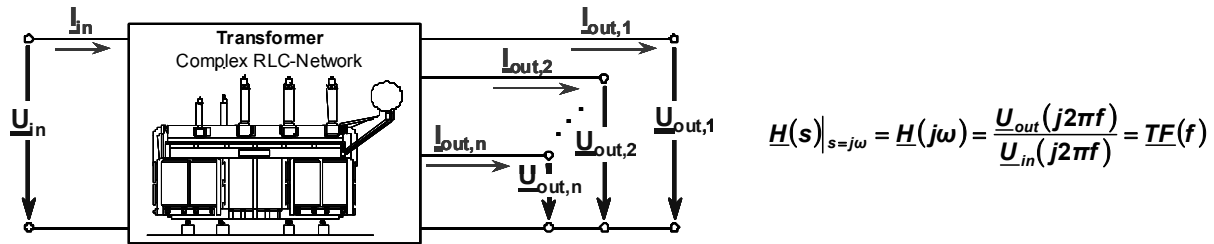


Fig. 2: Transformator als lineares Vektor-Netzwerk
Transformer as a linear network with multiple inputs and outputs

Fig. 3 zeigt zwei voneinander abweichende Betrags-Übertragungsfunktionen mit der Frequenzlage der Polstellen für beide Kurven. Der vergrößert dargestellte Bereich verdeutlicht die veränderten Resonanzeigenschaften. Die Resonanzverschiebungen können unter Zuhilfenahme der Polstellen wie angedeutet direkt bestimmt werden.

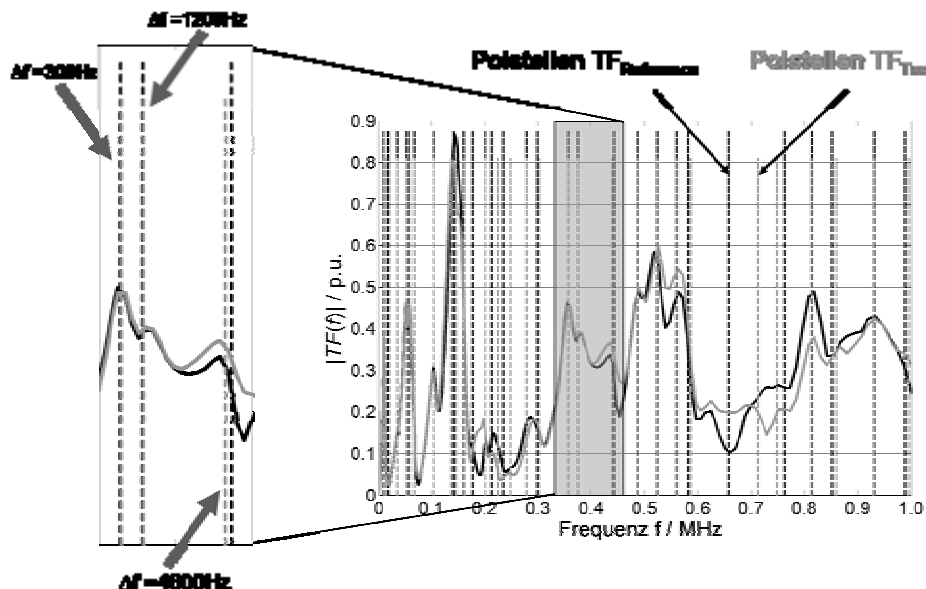


Fig 3: Abweichende Referenz- und Test-Übertragungsfunktion mit zugehöriger Frequenzlage der Polstellen und bemessener Resonanzverschiebung
Deviating Reference and Test Frequency Response with corresponding frequency position of poles and determined resonance shift

Um Veränderungen von Übertragungsfunktionen physikalischen Veränderungen am Aktivteil zuzuordnen, können im Frequenzbereich der Kurven Sub-Frequenzbänder identifiziert werden, in denen sich bestimmte Fehlertypen bemerkbar machen, siehe Fig. 4. Der Kurvenverlauf in jedem der abgebildeten Frequenz-Teilabschnitte FB1 bis FB5 wird durch unterschiedliche elektrische Effekte hervorgerufen.

Die weitergehende Forschungsarbeit beschäftigt sich mit Bewertungsalgorithmen, die unter Einbeziehung der analytischen Modellbildung basierend auf Pol- und Nullstellen, der Frequenz-Subbänder sowie eines elektrischen Äquivalenzmodells eine Eingrenzung der Fehlerart, ausgehend von gemessenen abweichenden Transferfunktionen erlaubt.

Emphasis of this research is the interpretation of altered transfer functions in relation to different failure types. The transfer behaviour of power transformers can be described by a linear electrical network. Each measurable transfer function equates to a pair of input and output terminals of the network illustrated in Fig. 2.

Known damage types, e.g. deformations, have an effect on the transfer functions like shifting, creating or disappearing of resonances. An approach to the investigation of these correlations is the approximation of frequency responses by means of complex rational polynomials. Besides reduction of data, this method promises objective measuring of changes of the resonance behaviour: Differences between resonances can be ascribed to changes of poles and zeros. Fig. 3 shows an example of two deviating magnitude transfer functions with corresponding frequency position of poles for both curves. The marked frequency shown in zoom view on the left side of the figure highlights the altered resonances. The resonance shifts can be determined directly using poles as implied. In order to relate changes of frequency responses to physical changes of the active part, frequency sub-bands can be identified that typically show certain failure types, see fig. 4.

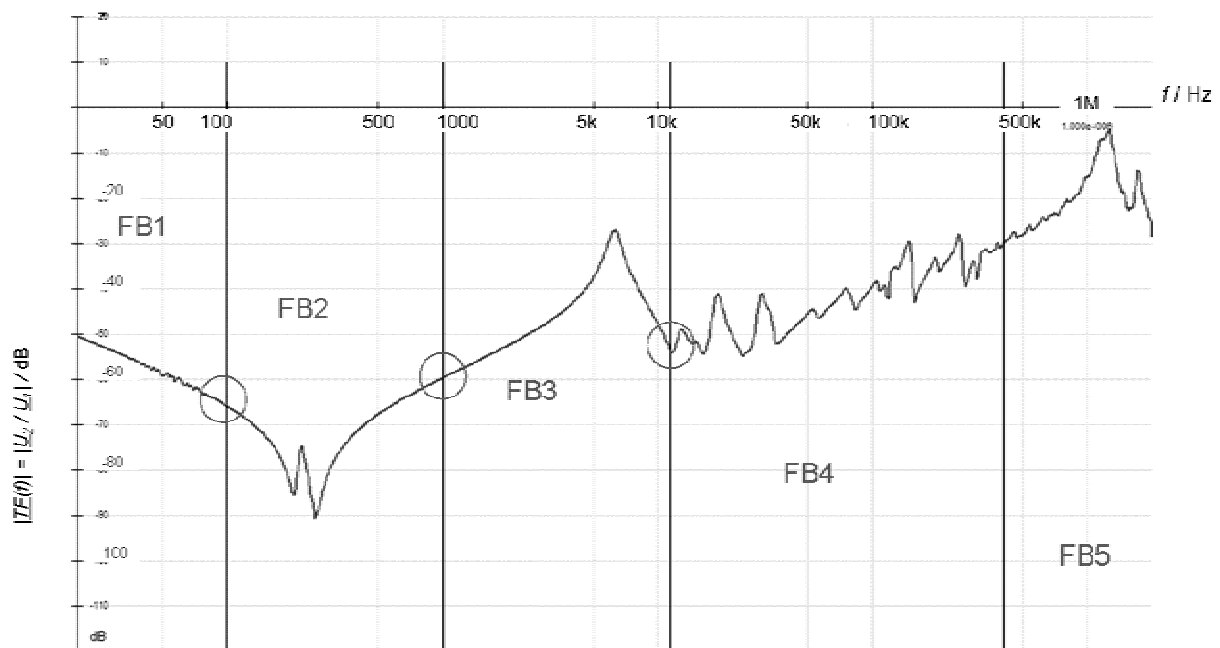


Fig. 4: Transferfunktion in doppellogarithmischer Darstellung mit charakteristischen Frequenzbändern
Frequency response (double logarithmic plot) with characteristic frequency subbands

The curve shape within each of the shown sub-bands FB1 to FB5 is determined by different electrical effects.

The ongoing research work will – under integration of the analytical modelling, i.e. pole-zero representation, classification of different frequency subbands as well as an equivalent electrical model – dedicate to evaluation algorithms that help bordering failure types based on the fact of measured frequency responses.

■ Physikalisch-chemische Charakterisierung von natürlichen Estern und Diagnose estergefüllter Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Die Umweltfreundlichkeit und ihr hoher Flammpunkt ($>300^{\circ}\text{C}$) machen den Einsatz der natürlichen Ester als alternative Isolations- und Kühlflüssigkeit interessant. Die gegenüber Mineralöl veränderten physikalischen Eigenschaften, wie z.B. Viskosität oder Permittivität, haben Auswirkungen auf das thermische und dielektrische Design von Transformatoren. Für den Betrieb sind die Kenntnisse des Alterungsverhaltens und die Entwicklung bzw. Anpassung der Diagnoseverfahren wichtig.

Die Forschungsarbeit ist in diesem Bereich angesiedelt. Neben den eingangs erwähnten Vorteilen gibt es auch Nachteile. So ist die Oxidationsstabilität der natürlichen Ester deutlich geringer als die der Mineralöle. Zurzeit ist es daher ratsam, mit natürlichen Estern befüllte Leistungstransformatoren in hermetischer Ausführung zu betreiben. Vorteilhaft dagegen könnte die Tatsache sein, dass durch die erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit der Ester die wasserbedingte Alterung der Papierisolation positiv beeinflusst werden kann (Fig. 1). Mit Hilfe von Alterungsexperimenten wurde die Veränderung der Durchschlagsspannung, Neutralisationszahl, Farbzahl und Sättigungsfeuchte untersucht. Die Ergebnisse sind in Fig. 3 zu finden, wobei mehrere natürliche Ester wie Sonnenblumenöl (HOSO), FR3, Midel eN sowie synthetische Ester (Midel 7131) und ein ausgewähltes Mineralöl (Nynas Nytro 3000X) im Alterungsverhalten verglichen werden.

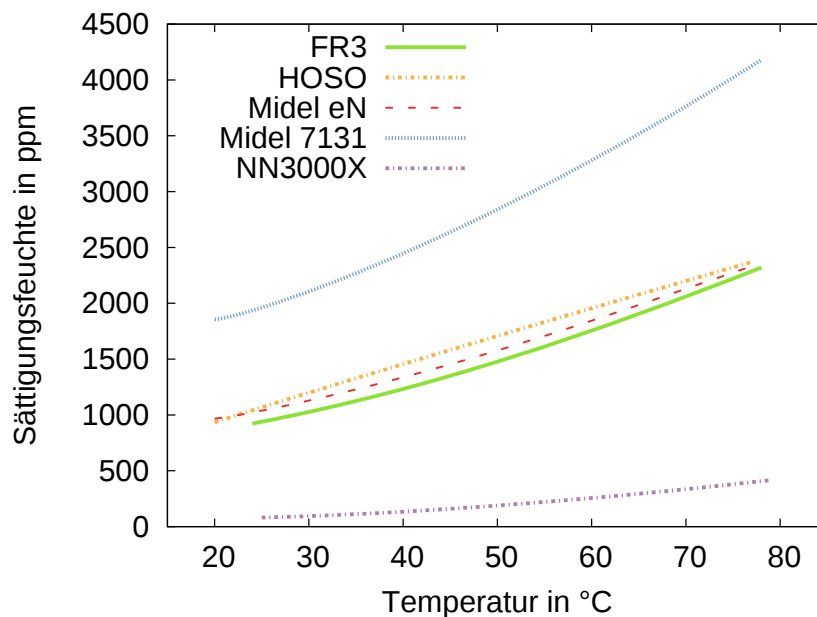


Fig. 1: Vergleich der Sättigungsfeuchten der Isolationsflüssigkeiten
Moisture saturation curves for the different insulating fluids

■ Physico-Chemical Characterisation of Natural Esters and Diagnosis of Ester Filled Transformers

Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Due to their biodegradability and the high flash point ($>300^{\circ}\text{C}$) natural esters are promising insulating and cooling fluids for power transformers. The different physical properties compared to mineral oil, like viscosity or permittivity, have consequences on the thermal and dielectric design of transformers. For transformers in service the understanding of the ageing processes and the usage of adequate diagnostic methods is essential.

The presented research work focusses on these topics. First experiences show that natural esters have a lower oxidation stability than mineral oil. An advantage is the significantly higher water absorption capacity (Fig. 1), which could reduce the ageing rate of cellulosic insulation caused by moisture. The ageing experiments investigate the change of breakdown voltage, total acidity number, colour number and moisture saturation. The results are shown in Fig. 3, where natural esters like high oleic sunflower oil (HOSO), FR3, Midel eN, synthetic esters (Midel 7131) and a selected mineral oil (Nynas Nytro 3000X) are compared.



Fig. 2: Gaschromatograph für die Gas-in-Öl Analyse
Gas chromatograph for dissolved gas analysis

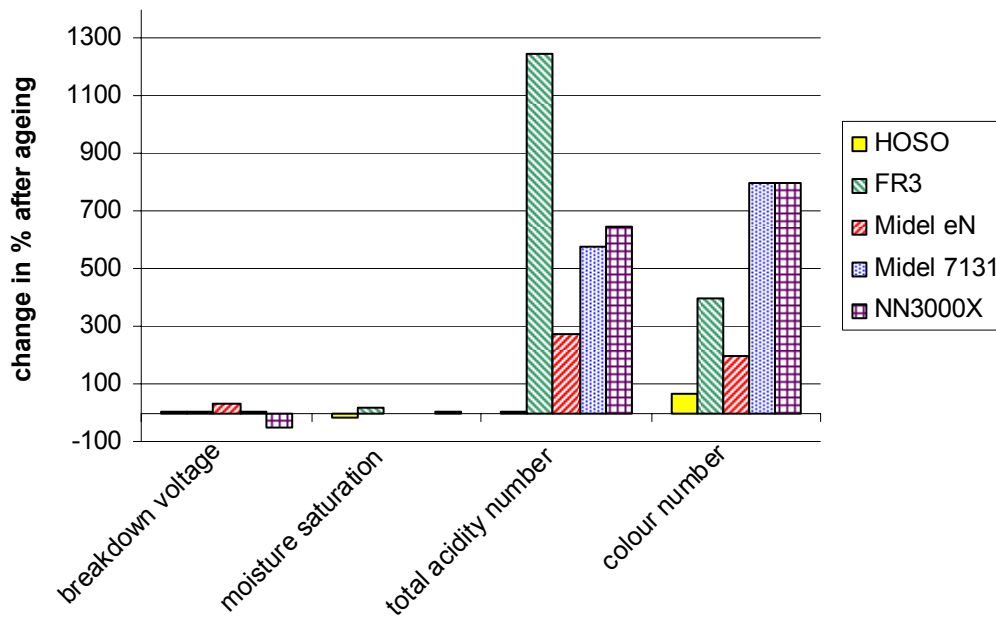


Fig. 3: Änderung der Ölkennzahlen nach Alterungsexperimenten
Comparison of oil properties after ageing experiments

Neben der Alterung ist auch das **Gasungsverhalten** der natürlichen Ester für die Diagnose eine charakteristische und bedeutende Messgröße. Die Gas-in-Öl-Analyse ist ein seit Jahrzehnten erfolgreich und zuverlässig eingesetztes Verfahren zur Zustandsbeurteilung und Fehlerbestimmung bei Transformatoren. Zum Einsatz kommt ein Gaschromatograph mit Headspace-Technik und Autosampler. Detektiert werden können die Luftgase (Stickstoff, Sauerstoff, CO₂) sowie Kohlenwasserstoffe (Methan bis Propen) und reiner Wasserstoff.

Im Labor werden typische Fehler nachgebildet und die dabei entstehenden Spaltgase untersucht. Zunächst wurden Experimente mit der bereits kommerziell erhältlichen natürlichen Esterflüssigkeit FR3TM durchgeführt. Sie umfassen thermische und elektrische Fehler starker und schwacher Ausprägung, d.h. Hotspots, thermische Überlastung, Durchschläge und Teilentladungen. Nach Möglichkeit wird das Gasungsverhalten mit dem von Mineralöl verglichen. Erste vielversprechende Ergebnisse zeigen in den Abbildungen 4 und 5 die Gaserzeugung für Durchschläge und Teilentladungen (TE). Schlüsselgase sind dabei Ethin (Acetylen) und Wasserstoff, wobei im Fall von TE die H₂-Erzeugung bei FR3 deutlich höher ist als bei Mineralöl. Die Auswirkung thermischer Fehler ist Gegenstand laufender Experimente.

Als Zwischenfazit kann gezogen werden, dass die relevanten Spaltgase für die Gas-in-Öl-Analyse natürlicher Ester nachgewiesen werden können. Zukünftig müssen neue Grenzwerte festgelegt werden sowie ein Vergleich des Gasungsverhaltens verschiedener natürlicher Ester durchgeführt werden.

The gassing behaviour of natural esters is also a characteristic and important measurement variable. The dissolved gas-in-oil analysis (DGA) is a well-known and accepted diagnostic method since decades. As a measurement device a gas chromatograph with headspace technology and automatic sampler is utilized, which is sensitive to combustible and air gases (H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 , methane up to propane).

Under laboratory conditions typical faults are generated and the fault-gases are analysed. First experiments were carried out with a commercially available natural ester FR3TM. They cover strong and weak electrical and thermal faults e.g. hotspots, thermal overheating, partial discharges and breakdowns. Where possible the gassing behaviour is compared to that of mineral oil. First results show the gas generation for lightning impulses and partial discharges (PD) in Fig. 4 and 5. Key gases are acetylene and hydrogen and in case of PD FR3 has a considerably higher hydrogen production than mineral oil. The gassing effects of accelerated thermal ageing and faults are currently under investigation.

At the moment one can conclude that the DGA is applicable for natural esters and the relevant fault gases are detectable with existing equipment. In future new gas limits and ratios for interpretation schemes (IEC, MSS, Duval etc.) have to be determined for natural esters. Due to the current diversity of available natural esters more comparing experiments have to be accomplished.

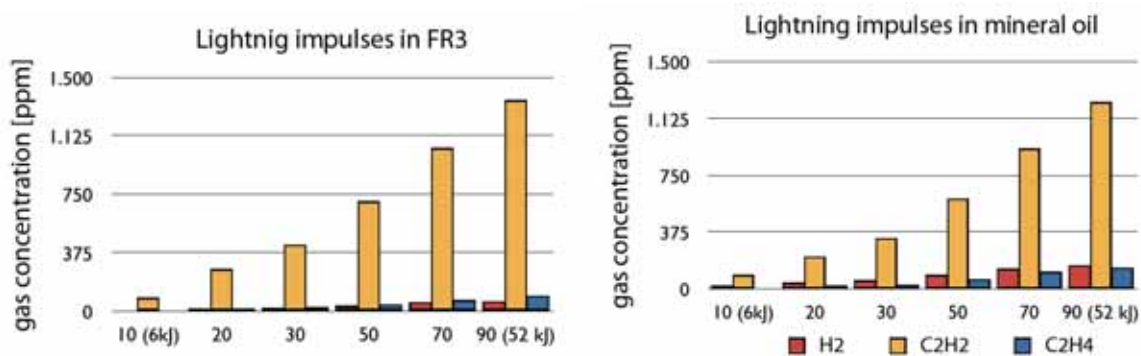


Fig. 4: Gaserzeugung in FR3 und Mineralöl bei 1,2/50 μ s Blitzstößen
Gas generation in FR3 and mineral oil under lightning impulses

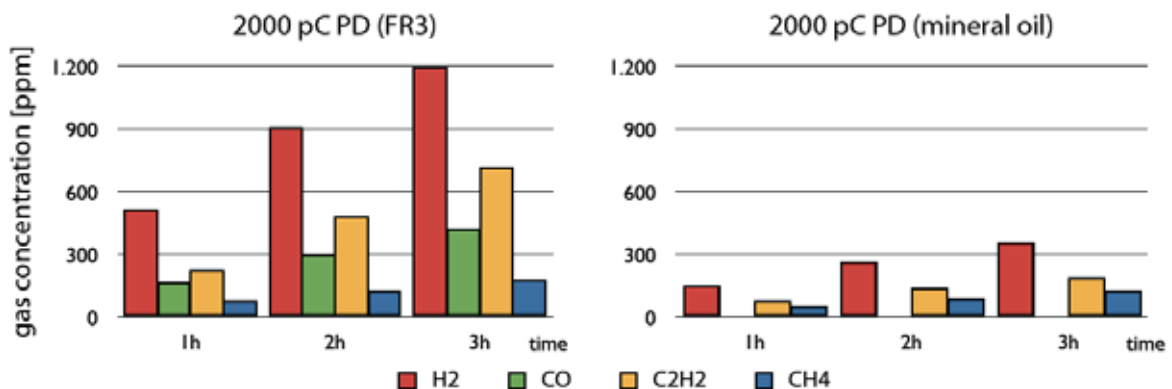


Fig. 5: Gasgenerierung in FR3 und Mineralöl bei einer TE Intensität von 2000 pC
Gas generation of FR3 and mineral oil under partial discharges at 2000 pC

■ Online Gas-in-Öl-Untersuchung an einem Maschinentransformator

Dipl.-Ing. Andreas Müller

Leistungstransformatoren sind die Bindeglieder in der Elektroenergieversorgung, daher ist die Überwachung ihres Zustandes von besonderem Interesse. Ein bekanntes Überwachungsverfahren stellt die Gas-in-Öl-Analyse dar. Dieses Messverfahren beruht auf der Tatsache, dass elektrische oder thermische Fehler in einem Transformator bestimmte Gase bilden, die sich im Transformatorenöl lösen. Nachdem eine Ölprobe gezogen und im Labor untersucht wurde, kann über die enthaltenen Fehlgase auf den vorliegenden Fehler im Transformator geschlossen werden. Da dieses Vorgehen bei kritischen Transformatoren zu seltenen Ergebnissen liefert, werden zunehmend Messsysteme eingesetzt, welche die gelösten Gase im Öl kontinuierlich im Betrieb des Transformators bestimmen können.

Die Anwendung eines solchen Systems, ein Hydran 201Ti der Firma GE (Fig. 1), soll im Folgenden gezeigt werden. Dieses Messsystem kann die Summe ausgesuchter Fehlgase (Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Ethin und Ethen) kontinuierlich bestimmen.



Fig. 1: Hydran Messsystem der Firma GE
Hydran measuring system from GE

Nach längerer Standzeit soll ein Maschinentransformator (Fig. 2: Hersteller Siemens, 125 MVA, Baujahr 1965) wieder in Betrieb gehen. Um den Zustand beurteilen zu können, wurden mehrere Messungen durchgeführt, unter anderem die Messung der Widerstände und Kapazitäten, elektrische und UHF-Teilentladungsmessung, FRA und die Bestimmung der Ölkennzahlen. Abschließend wurde der Transformator 14 Tage unter Spannung, aber ohne Last betrieben. Während dieser Zeit war ein Hydran-Sensor am Transformator montiert, der die Entwicklung der gelösten Gase im Öl überwachte. Auch wurden in kurzen Abständen Ölproben gezogen und in einem Labor auf mögliche Fehlgase untersucht.

■ Online Dissolved Gas Analysis on a Generator Step-Up Unit

Dipl.-Ing. Andreas Müller

Power transformers are the interconnection in the electrical energy supply, therefore the monitoring of their condition is of special interest. A well known method to detect faults is the dissolved gas analysis. It is based on the fact that electrical or thermal failures in transformers generate various gases which then dissolve in the transformer oil. After taking an oil-sample and analysing it in the laboratory, it is possible to ascertain the transformer's internal error. Due to the time it takes to get a result using this approach, online measurement systems are used increasingly for critical transformers. These can determine dissolved gases in the oil continuously during the transformers' full operation.

The application of such a system, a Hydran 201Ti from GE (Fig. 1), is shown below. This measuring device can determine the sum of selected fault gases (hydrogen, carbon monoxide, ethine and ethene) continuously.

After being out of service for a long time, a generator step-up unit (Fig. 2: manufacturer Siemens, 125 MVA, built in 1965) is scheduled to be put into operation.



Fig. 2: Maschinentransformator, 125 MVA
Generator step-up unit, 125 MVA

To assess the transformer's condition several measurements have been carried out, including the measurement of the resistance and capacitance, electrical and UHF partial discharge measurement, FRA and the determination of oil characteristics. Finally, the transformer was operating 14 days under voltage, without load. During this time a Hydran sensor was mounted on the transformer, monitoring the development of dissolved gases in oil. In addition, oil samples were taken at frequent intervals and analysed in a laboratory for possible fault gases.

Fig. 3 zeigt die gemessene Gaskonzentration des Hydran-Sensors während des 14-tägigen Probebetriebs. Die Punkte stellen im Labor durchgeführte Gas-in-Öl-Analysen dar. An den gestrichelten senkrechten Linien ist zu erkennen, wann der Transformator in Betrieb war (insgesamt 207 Stunden).

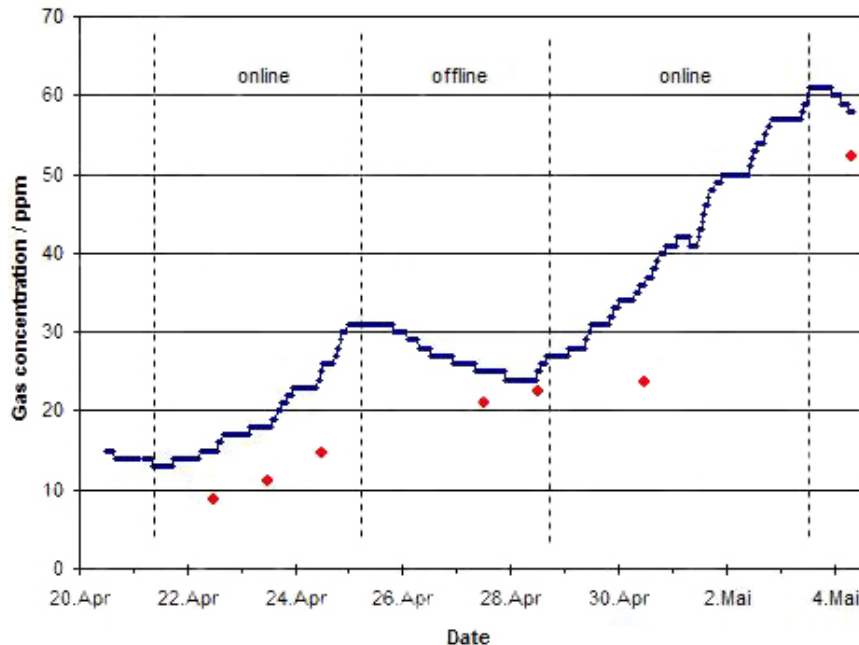


Fig. 3: Gaskonzentration des Transformators während des Probelaufs
Transformer's gas concentration during test run

Um die weitere Entwicklung des Gasungsverhaltens bestimmen zu können, wurde ein Modell aufgestellt. Dabei wurde die Gasgeneration als linearer Vorgang zugrunde gelegt. Der Verlust an Gasen zum Beispiel durch das Ausdehnungsgefäß kann in erster Näherung als exponentiell angenommen werden. Dies führt zu der Differenzialgleichung für die Konzentration C : $\frac{\partial C(t)}{\partial t} = g - k \cdot C(t)$ und deren Lösung:

$C(t) = \frac{g}{k} (1 - e^{-kt})$. Die Lösungsfunktion stellt den erwarteten Verlauf der im Öl gelösten Gase dar. Für die Bestimmung der Variablen wurde im ersten Schritt der Verlustfaktor an Gasen k durch ein Kurvenfitting während des Stillstandes des Transformators bestimmt. Im zweiten Schritt wurde die verbleibende Unbekannte (Gasgenerationsrate g) der Lösungsfunktion ebenfalls durch ein Kurvenfitting ermittelt (Fig. 4).

Durch diese Berechnung ist es möglich die maximale Gaskonzentration im Öl abzuschätzen. Mit Hilfe einer Grenzwertbetrachtung ist mit einem stationären Gaslevel von 180 ppm zu rechnen, d.h. es wird soviel Gas generiert wie verloren geht. Dies konnte in der Realität allerdings nicht beobachtet werden, da der Transformator nicht so lange für eine Messung zur Verfügung stand.

Eine Verbesserung des Modells kann durch Berücksichtigung der Erwärmung des Transformators durch elektrische Verluste und weiterer Randeffekte erreicht werden.

Fig. 3 shows the measured gas concentration of the Hydran sensor during the 14-day test run. The dots represent the laboratory analysis of the dissolved gases. The dashed vertical lines mark the interval limits of the transformer's operation (total 207 hours).

A model was generated to determine the further development of the gassing behaviour. The gas generation is presumed as a linear process. The loss of gases through the conservator tank can be assumed to be exponential as a first approximation. This leads to the following differential equation for the concentration C : $\frac{\partial C(t)}{\partial t} = g - k \cdot C(t)$, and their solution: $C(t) = \frac{g}{k}(1 - e^{-kt})$. The solution function shows the expected development of dissolved gases in oil. For the determination of the variables in the first step, the loss factor k of gases was approximated through a curve fitting while the transformer was offline. In the second step, the remaining unknown variable (the gas generation rate g) of the solution function is also determined by a curve fitting (Fig. 4).

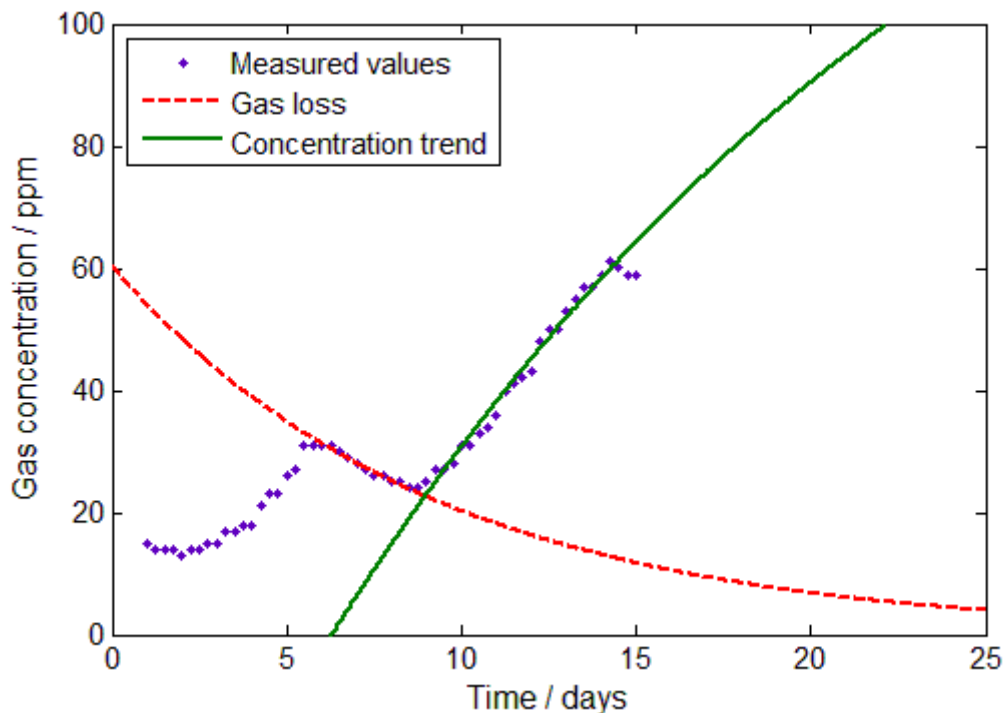


Fig. 4: Fitting der Messwerte durch Verlaufskurven
Fitting of measured values by trend curves

Using this calculation, it is possible to estimate the maximum gas concentration in the transformer oil. By a limit consideration a stationary gas level of 180 ppm is expected, i.e. gas generation equals gas loss. However, this was not observed in reality, because the transformer was not available for a long term measurement.

An improvement of this model can be achieved by taking into account the transformer's heating due to electrical losses, as well as further boundary effects.

■ **Detektion stromschwacher Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen**

Dipl.-Ing. Peter Müller

Störlichtbögen sind unabhängig von der Spannungsebene eine der größten Gefahren für Schaltanlagen. Nicht nur dass dadurch die Stromversorgung unterbrochen wird, auch die Personengefährdung durch die heißen Gase und die giftigen Dämpfe ist enorm. Zudem können Schaltanlagen, in denen ein Störlichtbogen aufgetreten ist, nicht ohne Weiteres sofort wieder in Betrieb genommen werden. Je nach Stromstärke und Brenndauer des Lichtbogens können nur einzelne Felder betroffen sein oder auch die ganze Schaltanlage. Dabei kann es vorkommen, dass durch die starke Hitze die komplette Schaltanlage irreparabel zerstört ist und komplett ersetzt werden muss. Es fallen dann nicht nur die Kosten für den Austausch der Schaltanlage ins Gewicht, sondern vor allem der Ausfall der Stromversorgung kann beträchtliche Kosten nach sich ziehen. Insbesondere durch die gesteigerte Nachfrage nach Versorgungssicherheit im Niederspannungsbereich sind neue Anstrengungen zur Verbesserung der Störlichtbogenerkennung nötig.

In den letzten Jahren wurde durch kürzere Abschaltzeiten und neue Ansätze zur Kurzschlusserkennung die Sicherheit gegenüber stromstarken Fehlern, wie beispielsweise Kurzschlüssen, weiter verbessert. Ein Feld, das derzeit jedoch nur selten Beachtung findet, ist die Lichtbogenfrüherkennung und insbesondere hier die Detektion stromschwacher Störlichtbögen. Um größere Ausfälle zu vermeiden ist es notwendig, diese anfänglich stromschwachen Störlichtbögen zuverlässig zu erkennen.

Da es für Niederspannungsschaltanlagen nur Fehlerstatistiken für Unfälle mit Personenschaden gibt, ist es nicht möglich, die genaue Zahl von Störlichtbögen in Schaltanlagen mit ausschließlicher Beschädigung der Schaltanlage zu beziffern. Es ist daher nicht möglich zu sagen, ob nicht auch stromstarke Störlichtbögen wie Kurzschlüsse als stromschwache Störlichtbögen ihren Anfang genommen haben. Es ist jedoch allgemein akzeptiert, dass stromschwache Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen vorkommen können. Mögliche Ursachen können lose Schraubverbindungen oder verschmutzte Isolierungen sein. Als stromschwach werden Lichtbögen bezeichnet, deren Lichtbogenstrom im Bereich des Nennstromes I_N der Schaltanlage liegt. Da herkömmliche Sicherungen, sowohl Leitungsschalter als auch Schmelzsicherungen, naturgemäß den Nennstrom der Anlage tragen können, werden derartige Fehler von ihnen nicht erkannt.

Um einen effektiven Störlichtbogenschutz entwickeln zu können ist es zunächst nötig, die relevanten Eigenschaften eines Lichtbogens zu beschreiben. Für stromstarke, kurzschlussähnliche Lichtbögen gibt es dazu umfangreiche Messdaten. Ebenso sind Lichtbögen bei höheren Spannungen sehr gut untersucht. Auf Lichtbögen bei Niederspannung und mit begrenztem Lichtbogenstrom trifft dies nicht zu.

■ **Detection of Low Current Arc Fault in Low Voltage Switchgear**

Dipl.-Ing. Peter Müller

Arc faults can be one of the most hazardous events for a switchgear, no matter if low voltage, medium voltage or high voltage level. Not only the power supply can be interrupted; also the hot gases and toxic fumes can endanger operating personal. Moreover, a switchgear where an arc fault has occurred cannot be put into service offhand. Depending on the strength and duration of the arc a single field or the entire substation may be affected. It may also happen, that because of the strong heat the entire substation is irreparably damaged and has to be replaced completely. It is thus not only the cost for the replacement of the switchgear, but especially the failure of the power supply can cause significant costs. In particular, because of the increased demand for security of supply in low voltage range, new efforts to improve the detection of arc faults are required.

In recent years, because of shorter opening times of switches and new approaches to detect short circuit, safety against high current failures could be improved further. However, a field which is currently rarely dealt with is the early detection of arcing and especially the detection of low current arc faults. To prevent major fault events it is essential to detect these initial low current fault events reliably to avoid possible further damage to the switchgear.

Since failure statistics only show arc accidents in switchgear with injury to persons, it is not known how many arc fault events occur with damage only to the switchgear. It is not possible to clarify, whether some high current arcs, such as short circuit arc faults, have started as a low current arc fault. However it is mostly accepted that low current arc faults can exist in switchgear due to contact interruption in the busbar or due to contamination of insulation material. Low current arc faults are arcs with arc current in the range of rated current I_N of the switchgear. Since traditional protection devices such as fuses and circuit-breakers are able to carry rated current by nature, they will not detect such faults.

In order to develop effective arc fault protection devices it is necessary to know all relevant characteristics of low current arc faults. For high current arcs, similar to short circuits, there are several measurement data available. Also arcs at higher voltages are quite well examined. This is not the case for low current, low voltage arc faults.

Several measurement setups were developed to generate serial and parallel arc faults. Parallel arc faults should show faults between two or three phases. Therefore an arc is ignited between two phases with a voltage of 400 V (see Fig. 1). Serial arc faults were reproduced by loose screw rivet connections. Because the contact area between the two busbars had a very low resistivity, it was oxidized in an oven.

Es wurden mit mehreren Messaufbauten sowohl serielle als auch parallele Lichtbögen erzeugt. Mit parallelen Störlichtbögen sollen Fehler zwischen zwei oder drei Phasen nachgebildet werden. Es wird deshalb der Lichtbogen zwischen 2 Phasen und somit mit 400 V gezündet (siehe Fig. 1). Zur Nachbildung von seriellen Fehlern wurden lockere Sammelschienenverschraubungen zur Lichtbogenerzeugung verwendet. Da jedoch der Übergangswiderstand bei neuen Sammelschienen mit blankem Kupfer zu gering ist, wurden die Kontaktstellen der Sammelschienen zuvor im Ofen oxidiert. Dies bildet einen über mehrere Jahre bestehenden Heißpunkt nach (siehe Fig. 2).

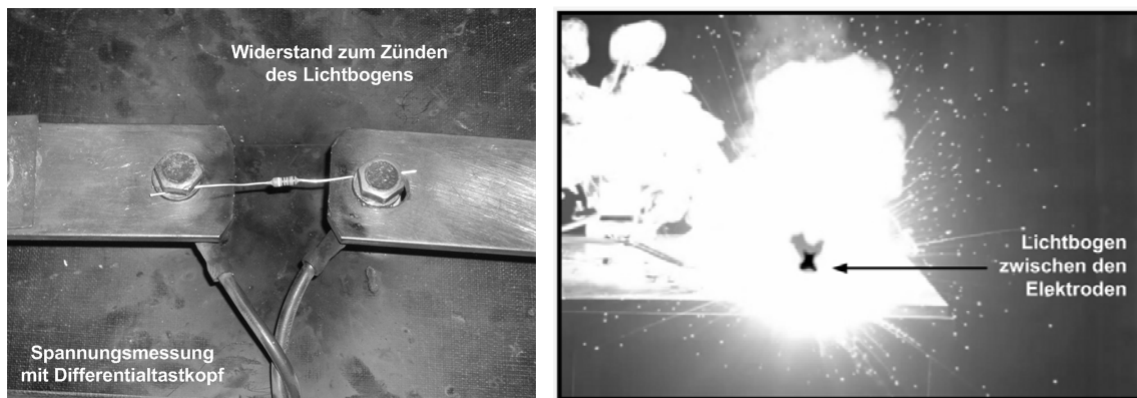


Fig. 1: Nachbildung eines parallelen Lichtbogens mit durch Vorwiderstand begrenztem Strom. Mit einem Metallfilmwiderstand zwischen den Kupferelektroden (Abstand 20 mm) wird der Lichtbogen gezündet.

Reproduction of a parallel arc fault with current limited by serial resistors. Arc is ignited by a metal film resistor between the electrodes (distance 20 mm).

Bei diesen Versuchen wurden Strom und Spannung aufgezeichnet. Die gewonnenen Messergebnisse werden im Zeit- und Frequenzbereich auf charakteristische Lichtbogenmerkmale hin untersucht. Insbesondere im Frequenzbereich treten dabei hohe Ähnlichkeiten auf. Im Zeitbereich zeigt sich, dass serielle Lichtbögen starke Schwankungen bei der Zündhäufigkeit haben.

In nächster Zeit wird der Einfluss von induktiven Verbrauchern auf die Lichtbogencharakteristiken untersucht.

This increased the resistivity of the surface and should simulate a hotspot lasting for several years (see Fig. 2).



Fig. 2: Nachbildung eines seriellen Lichtbogens durch sich lösende Verschraubungen der Sammelschienen. Der Kontakt zwischen den Sammelschienen wurde oxidiert und besitzt so einen erhöhten Widerstand, was zu einem Lichtbogen führt.

Reproduction of a serial arc fault due to loosening screw rivet connection of busbar. The contact area between the busbars got oxidized and has a higher resistivity, which causes an arc.

During this test current and voltage were recorded. The gains measurement files were evaluated in time and frequency domain for specific arc fault characteristic. Especially in frequency domain measurements showed significant similarities between serial and parallel arc faults. In time domain, serial arcs showed higher variations in ignition frequency.

In the near future, tests will be done to evaluate the influence of inductive loads on characteristic arc attributes.

■ **Mehrstellen-Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Diagnose von Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer

Die Zuverlässigkeit elektrischer Energienetze hängt von der Qualität und der Verfügbarkeit elektrischer Betriebsmittel ab, wie z. B. Transformatoren. Defekte in der Isolierung können Teilentladungen (TE) hervorrufen, die das Isoliermaterial beschädigen und zu einem elektrischen Durchschlag führen können. Deshalb ist eine frühe Detektion von Teilentladungen wichtig. TE-Messungen können Information über den Zustand des Transformators geben und einen Rückschluss auf die Lebensdauer des Betriebsmittels ermöglichen. Der TE-Messkreis nach IEC 60270 wird in Hochspannungslabors verwendet, und ein phasenaufgelöstes Muster (PRPD Pattern) der elektrischen Messungen kann verwendet werden, um Fehlertyp und Ort der TE zu identifizieren. Wegen der Kopplung aller drei Phasen eines Transformators können TE-Impulse auch auf den beiden anderen Phasen als Spannungssignal gemessen werden. Diese TE-Überkopplungen erschweren die Identifikation eines TE-Fehlers. Die Mehrstellen-TE-Messung, siehe Fig. 1, schafft eine gute Möglichkeit, um externe Störungen im PRPD-Muster zu entfernen und um zusätzlich zwischen mehreren TE-Fehlern zu unterscheiden. Die Ergebnisse der Mehrstellen-TE-Messung werden dazu in einem STAR-Diagramm dargestellt.

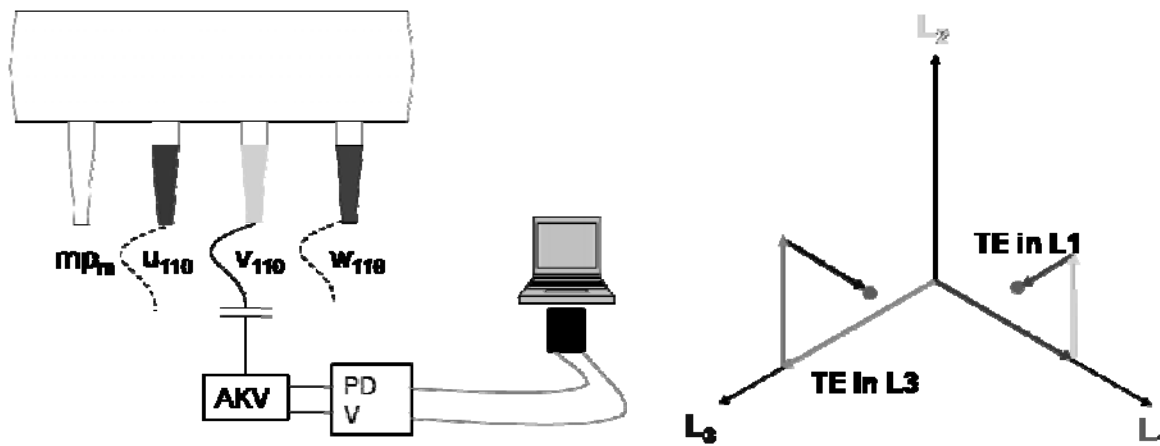


Fig. 1: Mehrstellen-TE-Messung für Vor-Ort-Messungen und STAR-Diagramm
Multi-Terminal PD measurement set-up and STAR Diagram

Eine mehrstellige Teilentladungsmessung wurde an einem 110/10 kV, 120 MVA-Maschinentransformator durchgeführt, siehe Fig. 2. Sie wurde offline durchgeführt. Der Transformator wurde mit einem externen TE-freien Maschinensatz (110 kVA) an der 10 kV-Seite erregt, um den Einfluss externer Störer zu minimieren. Zur Kalibrierung wurde hier bei den einzelnen Phasen des Messaufbaus ein Impuls definierter scheinbarer Ladung eingespeist.

Multi-Terminal on-site PD Measurements on Power Transformers

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer

The reliability of electrical energy networks depends on the quality and availability of electrical equipment like power transformers. Defects in transformer insulation cause partial discharges (PD), which can progressively degrade the insulating material and can possibly lead to electrical breakdown. Therefore, 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. The basic PD measurement circuit is in common use in high voltage labs according to IEC 60270 and specific phase-related representations (PRPD pattern) of the electrical measurements can assist to identify the fault type and a more precise localization of the fault. Due to the existing 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. So PD cross-talk makes identification difficult. Evaluation of multi-terminal PD measurements, see Fig. 1, establishes a straight forward approach to remove external disturbances and, furthermore, to clearly distinguish between multiple PD sources. The PD pattern of a multi-terminal measurement is illustrated in a STAR diagram.

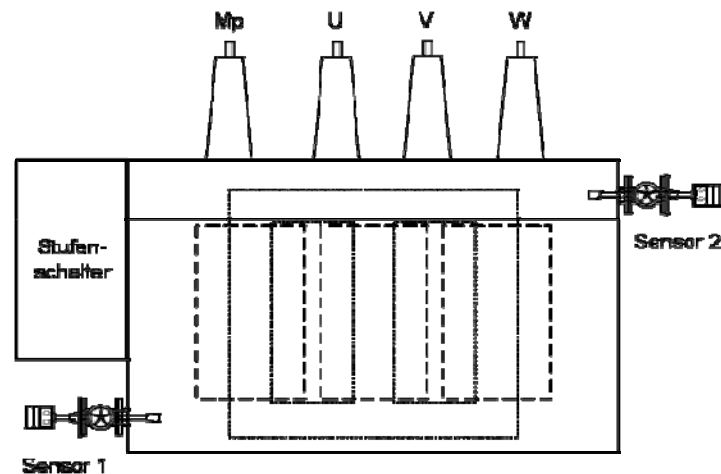


Fig. 2: Maschinentransformator 120 MVA
120 MVA Generator Step-up Transformer

The multi-terminal PD measurements were made on a generator step-up transformer 110/10 kV, 120 MVA, see Fig. 2. Again the onsite measurements were performed offline and an external PD free generator unit (110 kVA) was used to minimize the influence of the external disturbances. The 10 kV windings were used for the excitation of the transformer. The measurement set-up calibration in terms of apparent charge was also done separately for all three measurement devices with a defined calibrator impulse.

Die Ergebnisse der Messung an der 110-kV-Ebene sind in Fig. 3 zu sehen. Eine TE-Quelle konnte in Phase V, eine weitere in Phase W und zwei bei Phase U detektiert werden. Die TE an Phase U ($Q_{\max} = 1000$ pC) koppelt auf die anderen beiden Phasen über und erschwert die Interpretation der TE Muster, insbesondere der Phase V. Um die einzelnen TE-Muster zu erhalten, verwendet man das STAR-Diagramm. Mit dem STAR-Diagramm erhält man vier Cluster, die jeweils eine TE-Quelle repräsentieren, siehe Fig. 3.

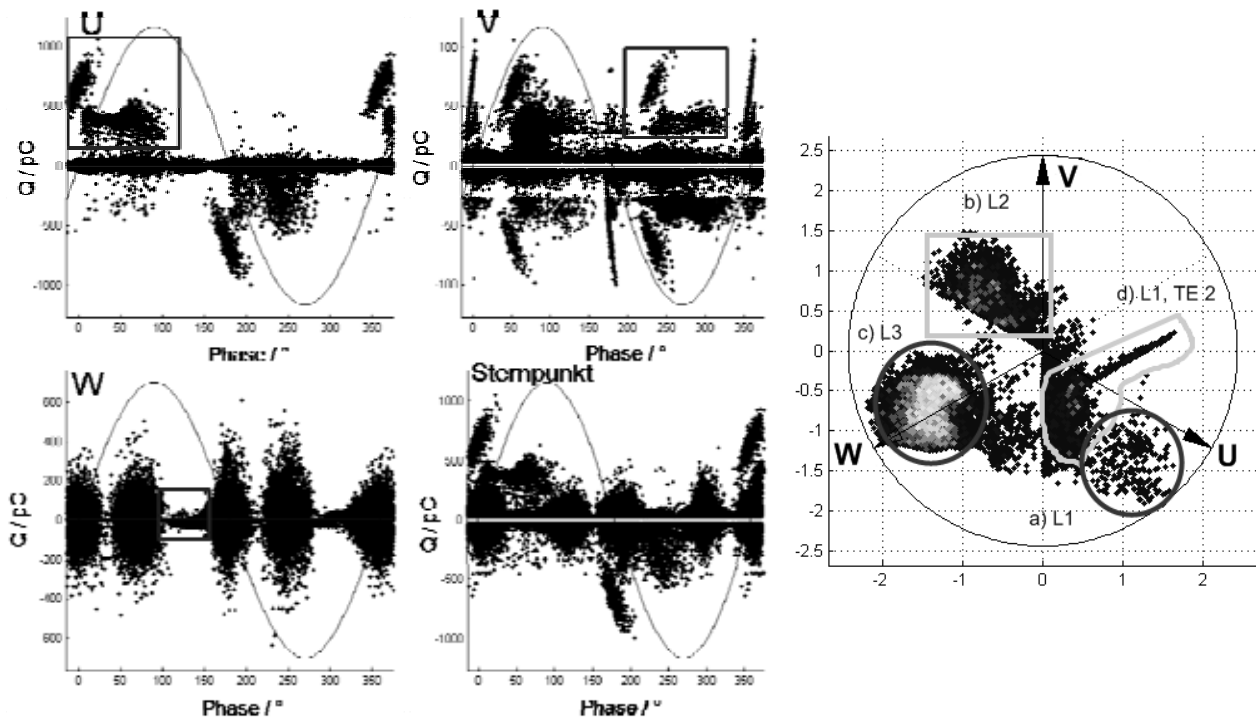


Fig. 3: PRPD-Muster und STAR-Diagramm des Maschinentransformators
PRPD pattern and STAR diagram of the generator step-up transformer

Die Rücktransformation jedes Clusters bestätigt das Ergebnis der vier TE-Quellen. In Fig. 4 sind die vier PRPD-Muster der jeweiligen Cluster zu sehen, die zwei Fehler der Phase U (a, d), V (b) und W (c). Das Muster der TE-Quelle bei Phase V wird durch die Rücktransformation ersichtlich und könnte auf einen Lufteinschluss in Öl deuten. Die TE-Quelle bei U mit dem Maximalwert von 1000 pC war der höchste gemessene Pegel. Diese TE-Aktivität erschien erst nach ein paar Minuten laufenden Betriebs bei Nennspannung und konnte nur einige Minuten gemessen werden. Dieser Effekt wiederholte sich auch bei weiteren Messungen an diesem Transformator. Die TE-Quelle der Phase W war das erste messbare Signal und trat schon bei 40 kV auf. Der Pegel der TE erhöhte sich bei steigendem Spannungspegel.

Die mehrstellige TE-Messung mit STAR-Diagramm bewährte sich als gutes Hilfsmittel zur Differenzierung verschiedener innerer TE-Quellen.

Results of the measurements at the 110 kV side are shown in Fig. 3. On the left side the PRPD pattern of phase U and W are shown, on the right side the pattern of V and from the neutral point. The PD activity in phase U ($Q_{\max} = 1000$ PC) can be seen in the PRPD pattern of the other two phases. This cross-talk effect complicates the interpretation of PRPD patterns, particularly the one in phase V. To get the single PD sources the STAR diagram is used. The STAR diagram, see Fig. 3, shows four different clusters and each cluster contains information about a single PD source.

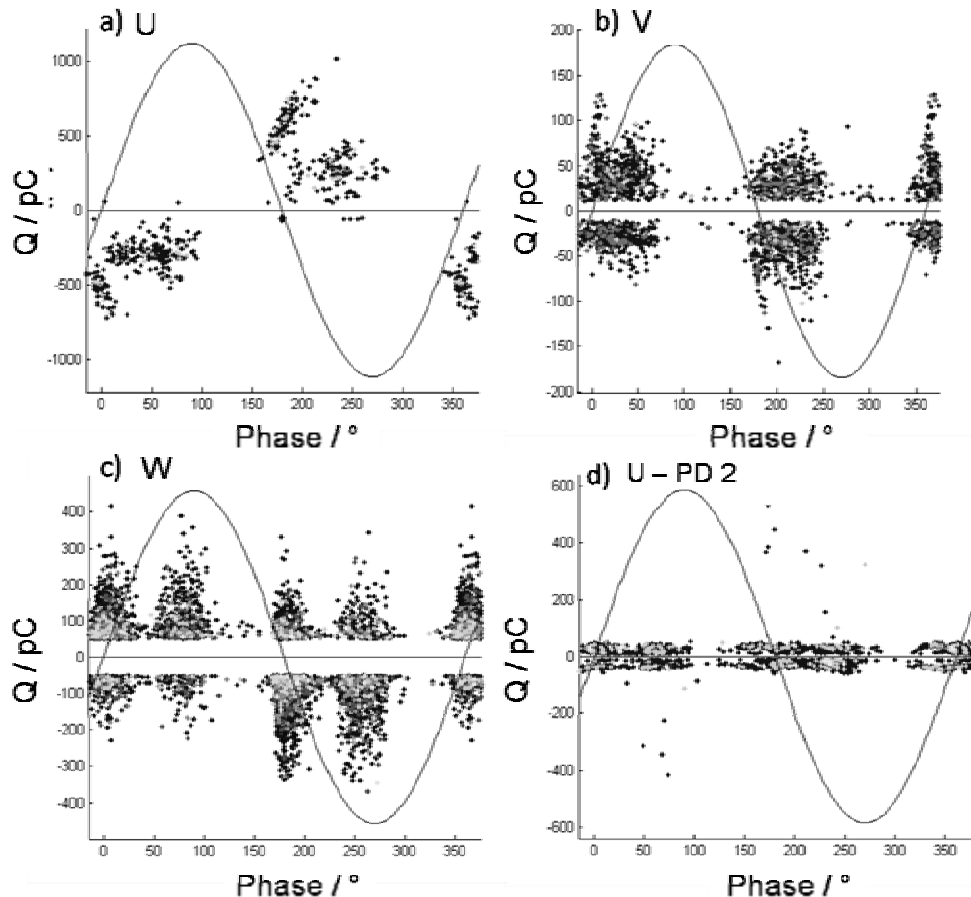


Fig. 4: PRPD-Muster des Maschinentransformators nach der Rücktransformation der Cluster U, V, W und U - PD2 des STAR-Diagramms
PRPD pattern of the unit generator transformer after retransformation of the cluster U, V, W and U - PD2 in the STAR-diagram

The retransformations of each cluster confirm the four PD sources. The pictures in Fig. 4 are the PD sources in U (a, d), V (b) and W (c). The pattern of phase V could be a void in oil. The PD source of U with the maximum of 1000 pC was the highest detectable value and occurred after some minutes during the measurement. The PD source in W was the first occurring signal at 40 kV. The level of the PD increased with higher voltage.

The multi-terminal PD measurement is illustrated within STAR diagrams for clear discrimination between external noise clusters and internal PD sources.

Dielektrische Festigkeit von Öl-Papier-Isolierung für Verwendung an Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Designkriterien führt zu langlebigen und zuverlässigen Leistungstransformatoren. Seit den Anfängen gilt die Kombination aus Öl und Papier als das Mittel der Wahl für viele Isolationsanwendungen der Hochspannungstechnik, besonders bei großen Leistungstransformatoren. Die Kriterien beschreiben die dielektrischen, thermischen und mechanischen Isolations-eigenschaften.

	Mineral Oil	Natural Ester
Relative Permittivity	2.2 (20°C)	3.2 (25°C)
Dissipation Factor	0.002 (90°C)	0.003 (100°C)
Density	0.87 g/ml (20°C)	0.92 g/ml (25°C)
Acid Number	0.03 mg KOH/g	0.04 mg KOH/g
Kinematic Viscosity	9.2 mm ² /s (40°C)	34 mm ² /s (40°C)
	2.3 mm ² /s (100°C)	8 mm ² /s (100°C)
Flash Point	147 °C	330 °C
Fire point	165 °C	360 °C
Pour point	-50 °C	-21 °C
Thermal Conductivity	0.126 W/(m K) (20°C)	0.0968 W/(m K) (25°C)
Coefficient of Expansion	7.5×10 ⁻⁴ °C ⁻¹ (25°C)	7.4×10 ⁻⁴ °C ⁻¹ (25°C)
Heat Capacity	1.97 J/g/°C	2.10 J/g/°C (50°C)
Specific Heat	1860 J/(kg K)	1884 J/(kg K)
Biodegradation Rate	25.2 %	> 99.0 %

Tab.1 Eigenschaften von Mineralöl und natürlichen Estern
Properties of mineral oil and natural ester

Seit einem Jahrhundert wird Mineralöl in Leistungstransformatoren zur Wärmeleitung und Isolierung verwendet. In der heutigen Zeit werden vermehrt Anstrengungen unternommen, um das petroleumbasierte Mineralöl durch ein umweltfreundlicheres Produkt zu ersetzen. Natürliche Ester (Pflanzenöle), die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden, stellen eine mögliche Lösung dar. Sie sind nicht toxisch, biologisch sehr gut abbaubar und haben einen höheren Flammpunkt als das Mineralöl.

Obwohl natürliche Ester seit mehr als zehn Jahren in Verteiltransformatoren Verwendung finden, müssen noch detaillierte Untersuchungen ihrer Eigenschaften gemacht werden, bevor man sie in Leistungstransformatoren nutzen kann. Die dielektrische Festigkeit ist die wichtigste Eigenschaft eines Isolieröls. Der Einfluss von Feuchte und Partikeln, Alterung sowie von elektrischem und thermischem Stress auf die dielektrische Festigkeit wurde intensiv untersucht. Die Durchschlagsspannungen beider Isolationsflüssigkeiten im homogenen elektrischen Feld zeigt Fig. 1.

■ Dielectric Strength of Oil-Paper Insulation for Application in Power Transformers

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

Long-term operation of power transformers is achieved by constantly developing the design criteria. Since the first power transformers, the oil-cellulose insulation system is considered as the unsurpassed standard insulation system in the high voltage technique for transformers, in particular for the high power range. The design criteria for insulation refer to dielectric, thermal and mechanical properties.

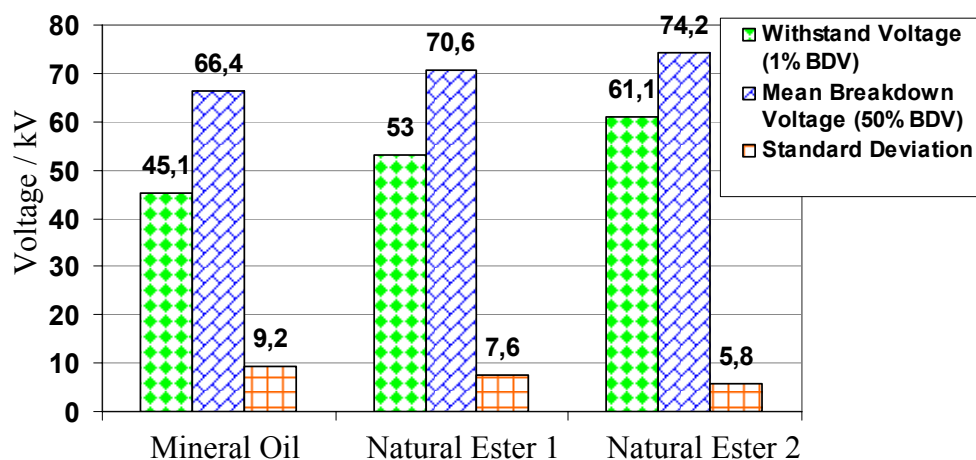


Fig. 1: Festigkeit von Mineralöl und natürlichen Estern im homogenen elektrischen Feld für 2 mm Abstand
Breakdown voltage values for mineral oil and natural esters in uniform AC electrical field for 2 mm gap

Since more than one century power transformers are filled with mineral oil serving as a heat transfer and insulating medium. Nowadays significant efforts are made to replace the petroleum-based product by an environmentally friendlier fluid. Natural esters (vegetable oils) refined from plant materials are introduced as a solution. They are non-toxic, more biodegradable and less flammable than a mineral oil (Tab. 1).

Although the natural esters are used in distribution transformers since more than ten years still significant tests have to be done before they could be introduced in power transformers. The main characteristic of the fluids is the dielectric strength. This is intensively investigated considering the influence of different parameters like moisture and particle content, aging, electrical and thermal stresses. The breakdown values for both fluids in a uniform electrical field (IEC 60156) are given in Fig. 1. These data confirm the suitability of natural ester for application in distribution transformers where the distances and stresses are lower. Also, it can be seen that natural esters have a lower standard deviation. This means that natural esters can have a lower withstand voltage than mineral oil even if they have similar mean breakdown values.

Diese Werte bestätigen die Eignung der natürlichen Ester als Isolationsflüssigkeit in Verteiltransformatoren mit ihren kleineren Abständen und niedrigerem Stress. Ebenfalls sieht man, dass die natürlichen Ester eine niedrigere Standardabweichung haben. Die berechnete Stehspannung hängt auch von der benutzten Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion ab. Die Weibull-Verteilung führt zu einer niedrigeren Stehspannung als die Normal-Verteilung (Fig. 2).

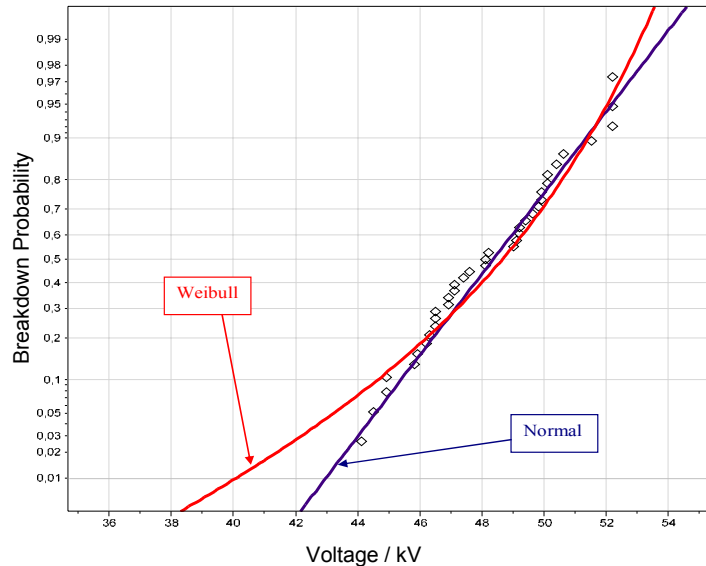


Fig. 2: Weibull und Normal-Durchschlagswahrscheinlichkeit

Funktionen mit 95 % Konfidenzintervall bei natürlichem Ester im inhomogenen elektrischen Feld

Weibull and Normal breakdown probability functions with 95 % confidence limits for natural ester in AC non-uniform gap

Für die Anwendung in Leistungstransformatoren sind die längeren Ölrecken und höheren elektrischen Belastungen relevant. Es wurde beobachtet, dass natürliche Ester eine niedrigere dielektrische Festigkeit für längere Ölrecken aufweisen, besonders im inhomogenen elektrischen Feld bei Blitzstoß. Diese Eigenschaft kann man erklären, indem man Teilentladungen (TE) und Streamer vor dem Durchschlag untersucht. Die TE-Einsatzspannung ist bei natürlichen Estern niedriger als bei Mineralöl. Auch propagieren die Streamer schneller in natürlichen Estern als in Mineralöl (Fig. 3). Der schnelle Modus 3 wird in natürlichen Estern schon bei einer deutlich niedrigeren Spannung als bei Mineralöl erreicht. Das könnte bedeuten, dass beim Einsatz von natürlichen Estern längere Ölrecken in Leistungstransformatoren leichter überbrückt werden. Da Ester eine höhere Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_r = 3.2$) als Mineralöle ($\epsilon_r = 2.2$) haben, verteilt sich auch die elektrische Beanspruchung anders. Gleitentladungen über imprägniertes Pressboard ($\epsilon_r \geq 4.2$) könnten reduziert werden. All diese Unterschiede im dielektrischen Verhalten verlangen nach weiteren Verbesserungen des Isolationsdesigns von Leistungstransformatoren.

The calculated withstand voltage also depends on the probability distribution function. The Weibull distribution gives a lower fluids withstand voltage than a normal distribution (Fig. 2).

For power transformers longer oil gaps under higher electrical stress have to be considered. Natural esters showed lower dielectric strength in longer oil gaps, especially for non-uniform electrical field generated by lightning impulse. This characteristic can be explained by investigating pre-breakdown phenomena like partial discharges and streamers. It is found that partial discharge inception voltage is lower in natural ester than in mineral oil. Also, streamers propagate faster in natural ester than in mineral oil (Figure 3). The lightning impulse streamer reaches fast Mode 3 in natural ester at much lower voltages than in mineral oil. This can mean that in power transformer longer oil gaps can be bridged and broken easier in natural ester than in mineral oil.

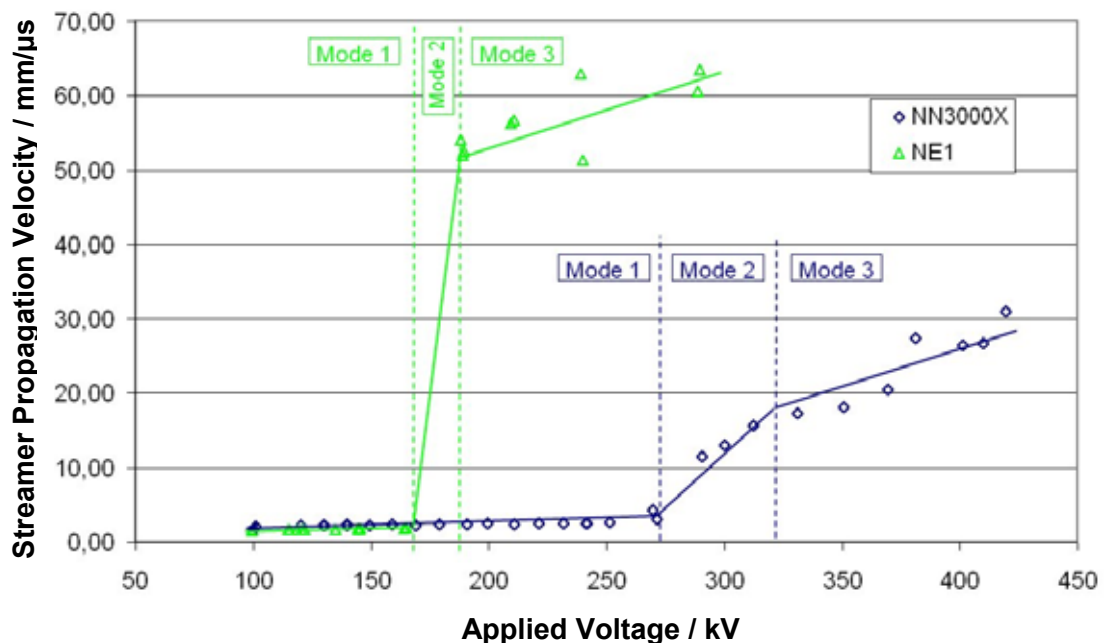


Fig. 3: Streamer Fortpflanzungsgeschwindigkeit (40 mm Spitze-Platte) bei einem Blitzstoßimpuls
Streamer propagation velocity over 40 mm point-plate gap under lightning impulse

Because of the natural ester higher relative permittivity ($\epsilon_r = 3.2$) the distribution of electrical field stress will be different from mineral oil ($\epsilon_r = 3.2$). The creep electrical stress over impregnated pressboard ($\epsilon_r \geq 4.2$) can be reduced. All the differences in dielectric behavior of both fluids call for a further optimization of power transformer insulation design.

■ **Strömungsverteilung in zickzack-förmigen Ölkänen mit dichten und undichten Barrieren**

Dipl.-Ing. Andreas Weinläder

Die Temperaturverteilung in ölgekühlten Transformatorwicklungen wird bei der Auslegung eines Transformators meist durch die Verwendung von empirischen Daten - gewonnen aus einer Vielzahl von Messungen an gefertigten Transformatoren - ermittelt. Da hierbei der Einfluss größerer Abweichungen von den gewohnten Auslegungsmerkmalen nur unzuverlässig abgeschätzt werden kann, ist ein Erkennen und Ausschöpfen von vorhandenen Optimierungspotentialen kaum möglich. Zusätzlich müssen beim konventionellen Entwurf die Sicherheitsreserven so bemessen werden, 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 möglich, die ansonsten nur grob abschätzbare Wärmeübergangszahl zwischen Öl- und Paperisolation zu bestimmen. In einer darauf aufbauenden Lösung der Wärmeleitungsgleichungen wird anschließend das Temperaturfeld in der gesamten Wicklung bestimmt, wobei hauptsächlich die Stelle mit der höchsten Temperatur, der sog. „Heißpunkt“, interessiert. Für diese Simulationen wird am Institut das kommerzielle CFD-Softwarepaket „CFX“ verwendet, welches auf Basis der Finite-Volumen-Methode arbeitet.

Als Beispiel einer Anwendung soll die Untersuchung der Strömungsverteilung innerhalb einer zickzack-förmigen Ölkänelgeometrie dienen, wie sie häufig in Transformatoren höherer Leistung vorkommt. In Fig. 1 ist das Ölkänelchema einer solchen Geometrie dargestellt. Das Öl fließt hierbei in den inneren bzw. äußeren vertikalen Ölkänel und verteilt sich auf die horizontalen Ölkänel zwischen den Wicklungsscheiben. Von dort fließt es in den gegenüberliegenden Vertikalkänel, von wo es in die nächste Passage übertritt.

Bei einer solchen Geometrie ist es nun von Interesse, wie gleichmäßig sich das Öl auf die unterschiedlichen Horizontalkänel verteilt, was insbesondere für die Kühlung der Wicklung von Bedeutung ist. Ein weiterer Punkt ist der Einfluss von Leckagen in den Barrieren, die wegen Fertigungstoleranzen oder technologischer Unzulänglichkeiten sehr häufig vorkommen.

Hierzu wurde ein CFD-Modell mit ca. 1 Mio. Zellen erstellt und mehrere stationäre Simulationen durchgeführt. Die Diskretisierung ist in den Vergrößerungen in Fig. 1 zu erkennen. Die Geometrien der Barrieren mit und ohne Leckage sind dort ebenfalls dargestellt.

■ **Flow Distribution in zigzag-formed Oil Channels with tight and leaky Washers**

Dipl.-Ing. Andreas Weinläder

The distribution of temperature in oil cooled transformer windings is evaluated in the project of a transformer by means of empirical data, which are won from a large amount of measurements at formerly built transformers. Since the influence of larger deviations from 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, the spares for security have to be dimensioned so far, that an exceedance of temperature limits is surely avoided, even in the case of the rather inaccurate methods for calculation. This leads in practice to a more or less overdimensioned transformer.

With the approach followed here, at first the oil flow within 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, in which the field of temperature in the whole winding is obtained. In particular mainly the point of the highest temperature, the so called “hot spot”, is of interest. For these simulations, at institute the commercial CFD-software package “CFX” is used, which works on the base of the Finite-Volume method.

As an example for an application an investigation of the flow distribution within a zigzag-formed oil channel geometry is taken into account. Such a geometry is often applied within larger transformers. In Fig. 1 the outline of such a geometry is shown. Within such a geometry, the oil flows into the inner respectively the outer vertical oil duct and distributes onto the horizontal oil ducts between the winding discs. From there it flows into the opposed vertical channel, which feeds the next winding pass.

For such a geometry, it is of interest how equal the oil distributes on the particular horizontal ducts, what has especially influence on the cooling of the winding. A further point is the influence of leakages in the washers, which occur very frequently caused by tolerances in manufacturing or deficits in technology.

For this purpose a CFD-model with about 1 mio. cells was built and a number of steady state simulations were performed. The discretization is visible in the zoom in Fig. 1. The geometry of the washers with and without leakage is also displayed there.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Fig. 2 und 3 dargestellt. In Fig. 2 ist deutlich ein Nebenstrom durch die undichte Barriere zu erkennen. Eine quantitative Beurteilung der Verhältnisse erlaubt Fig. 3. Dort ist die Geschwindigkeitsverteilung auf die einzelnen Horizontalkanäle dargestellt für eine Durchflussrate von 10 l/min (bezogen auf eine Teilung zwischen zwei Distanzstücken), wie sie für OD-Kühlung (mit Pumpe getriebene Ölströmung) typisch ist. Es ist zu erkennen, dass selbst bei dichter Barriere insbesondere die mittleren Wicklungsscheiben vergleichsweise schwach vom Öl umströmt werden. Dies verschlechtert sich noch erheblich bei Leckagen in der Barriere, was zu einer Überhitzung der jeweiligen Wicklungsscheiben führen kann.

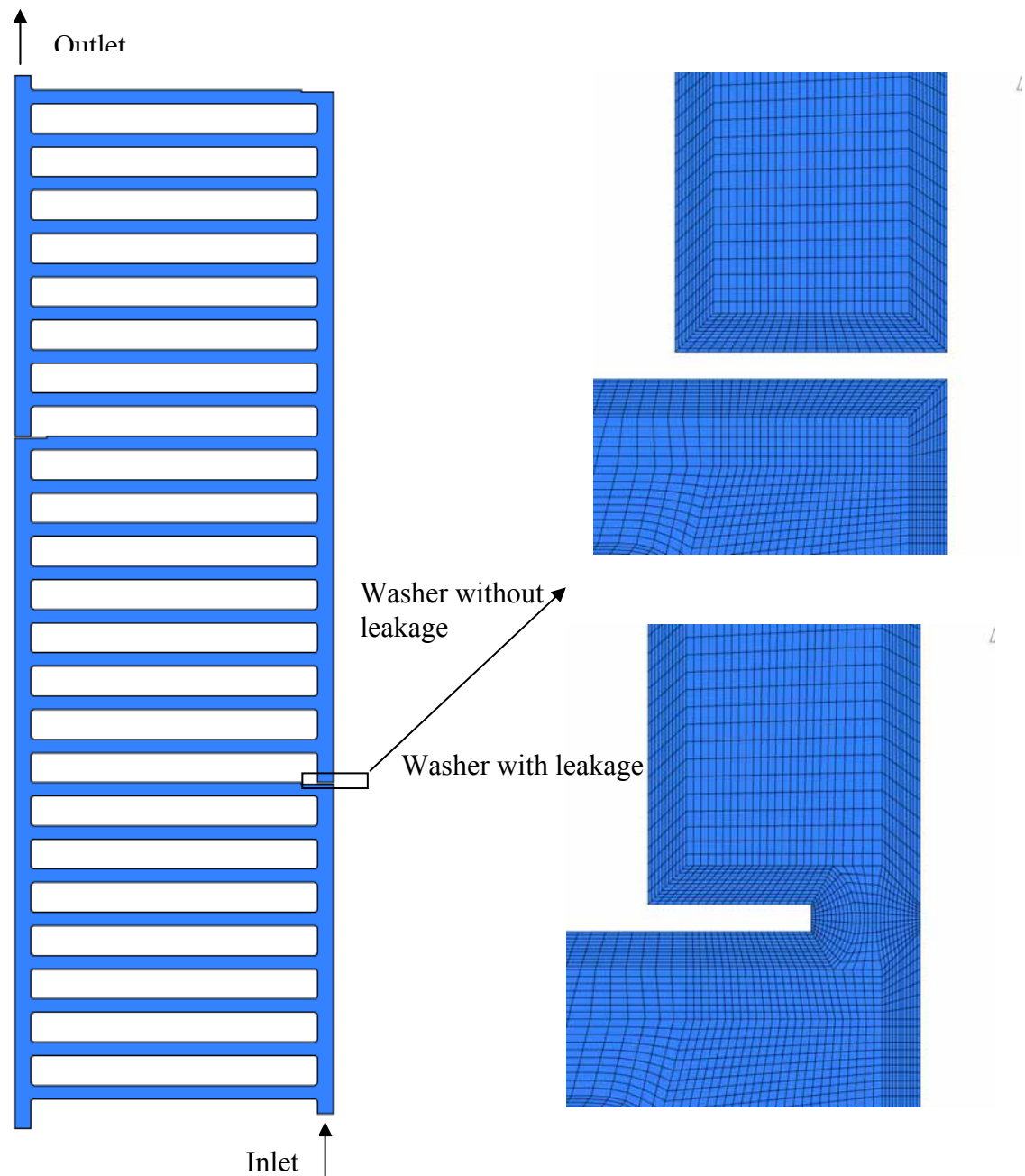


Fig. 1: Schema der modellierten Geometrie und Details der Diskretisierung
Outline of the modelled flow path and details of the discretization

The results of the simulation are displayed in Fig. 2 and 3. Fig. 2 shows that a bypass flow goes through the leaky washer. A more quantitative judgement of the relation is allowed by Fig. 3. There the flow distribution over the particular horizontal channels is displayed for a flowrate of 10 l/min (referenced to a division between two spacers). Such a flowrate is typical for a transformer with OD-cooling (with pump driven oil flow). It can be realized that even in the case of a tight washer especially the winding discs in the middle are only less circulated by the oil. This becomes even worse for the case of leaky washers and can lead to an overheating of the concerned winding disc.

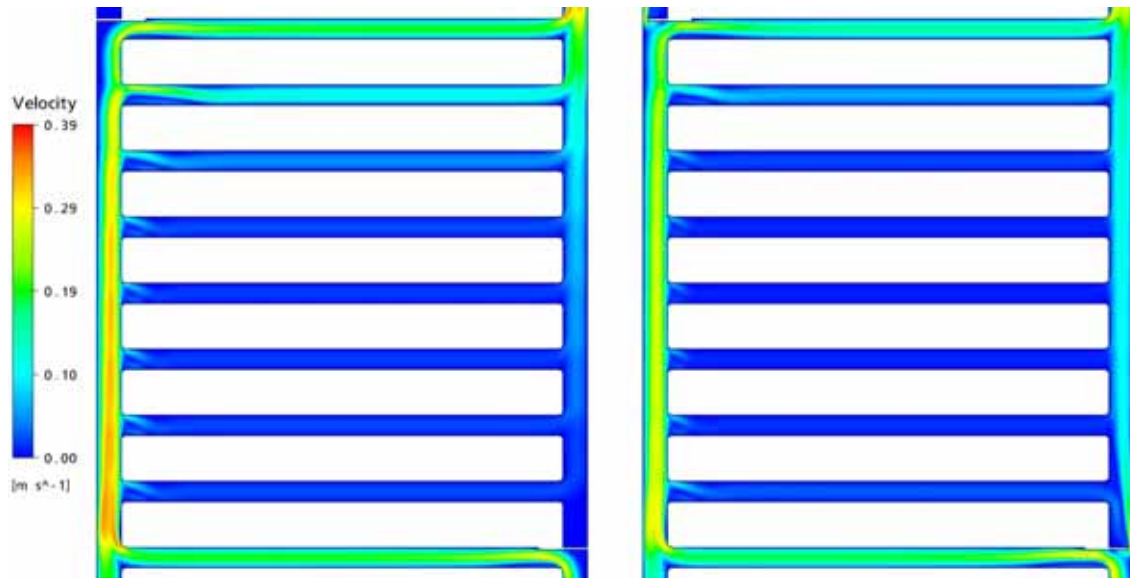


Fig. 2: Konturplot der Geschwindigkeit ohne Leakage (links) und mit Leakage (rechts)
Contour plot of velocity without leakage (left) and with leakage gap of 1mm (right)

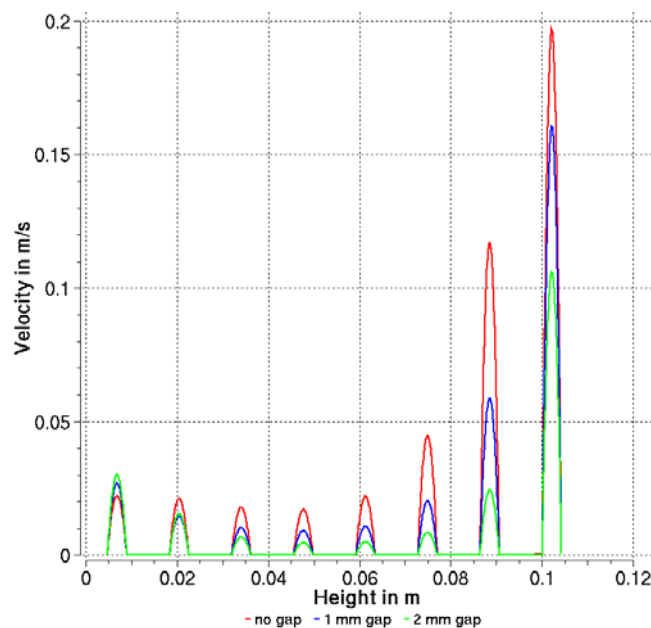


Fig. 3: Geschwindigkeitsverteilung über die horizontalen Kanäle bei 10 l/min
Velocity distribution over the horizontal ducts for a flowrate of 10 l/min

5.2 ENERGIEÜBERTRAGUNG

■ Modellierung dezentraler Einspeiser

Dipl.-Ing. Patrick Wajant

Aufgrund der steigenden Energiepreise, der globalen Erwärmung infolge des CO₂-Ausstoßes und gesetzlicher Vorgaben (z.B. "EEG" und "KWKG") wird die dezentrale Erzeugung elektrischer Energie zunehmend attraktiver.

Dies hat natürlich in vielerlei Hinsicht Auswirkungen auf die Energieversorgungsnetze. Der Energiefluss, bisher von zentralen Großkraftwerken zu den Verbrauchern, fluktuiert wesentlich stärker und kann sich im Extremfall sogar umkehren. In Fig. 1 wird ein mögliches Netz mit einem hohen Anteil dezentraler Einspeiser gezeigt.

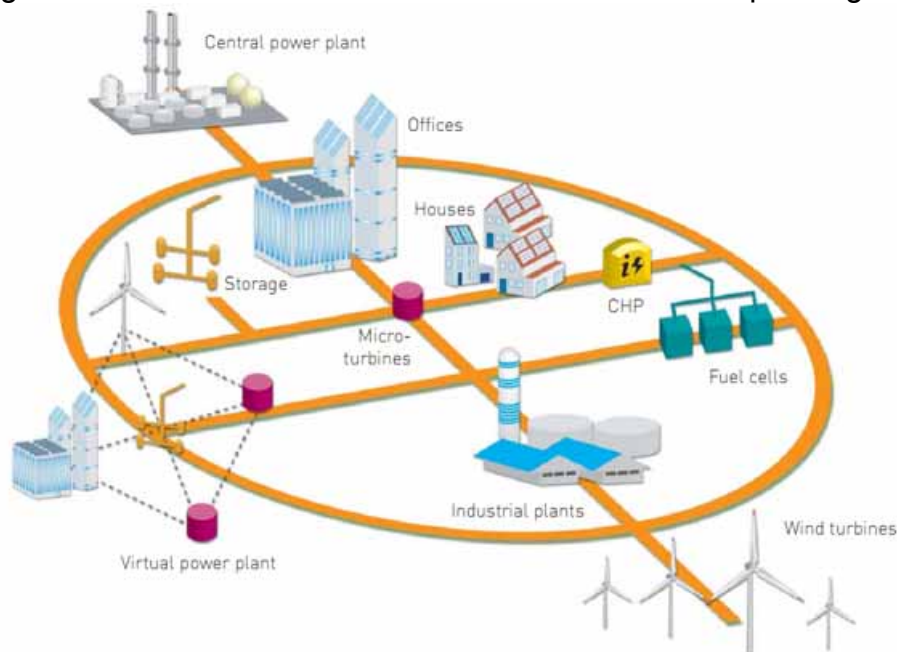


Fig. 1: Energienetz mit dezentralen Einspeisern (Quelle: European SmartGrids Technology Platform)
Grid with distributed resources (source: European SmartGrids Technology Platform)

Um den Einfluss eines wachsenden Anteils dezentraler Einspeiser untersuchen zu können, werden Modelle für Simulationen benötigt. Für konventionelle Kraftwerke existieren meist Modelle, die seit Jahren eingesetzt, durch Messungen an realen Anlagen validiert und damit praktisch zum Standard wurden. Bei den dezentralen Einspeisern sieht die Situation anders aus. Es gibt zwar eine Reihe verschiedener Modelle, nur wenige sind aber für die gewünschten Simulationszwecke geeignet. Diese unbefriedigende Situation soll sich durch die Arbeit am IEH in den kommenden Jahren ändern.

■ Modelling of Distributed Energy Resources (DER)

Dipl.-Ing. Patrick Wajant

Due to rising energy prices, global warming as a result of CO₂ emissions and government regulations (for example, "EEG" and "KWKG"), the decentralized generation of electrical energy is becoming increasingly attractive.

This affects the energy supply networks in many ways. The flow of energy, formerly from central power stations to consumers, fluctuates stronger and can in some cases even be reversed. Fig. 1 shows a possible network with a high amount of DER.

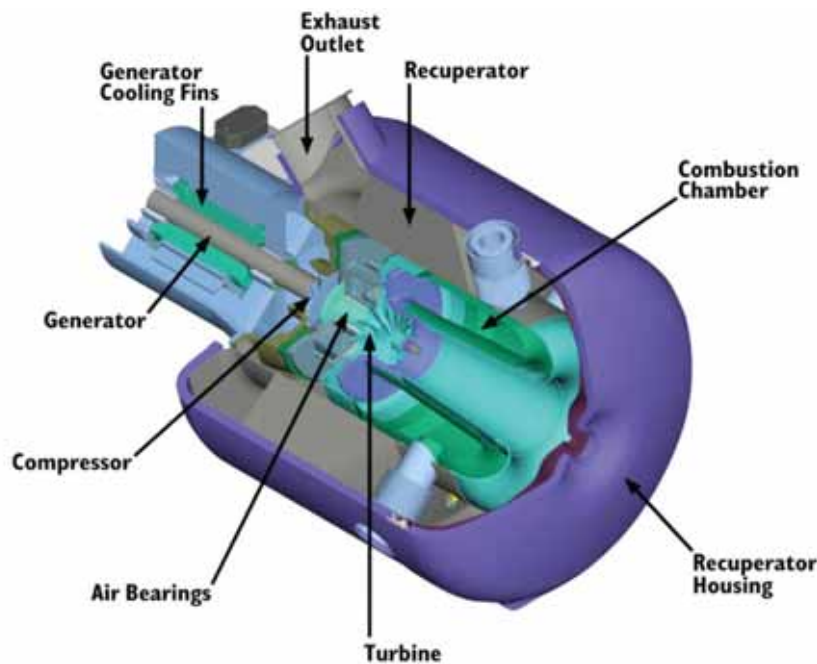


Fig. 2: Capstone C30 Mikrogasturbine - ein möglicher dezentraler Einspeiser (Quelle: Capstone)

Capstone C30 Microgasturbine - one possible DER unit (source: Capstone)

To investigate the influence of an increasing amount of distributed energy resources, models for simulations are needed. For conventional power plants models exist which have been used for years, validated by measurements on real systems and thus virtually became the standard. With DER-models the situation is different. While there are often a number of different models, only a few are suited for the desired simulation purposes. This unsatisfactory situation shall change with the work at the IEH in the coming years.

■ Chancen und Herausforderungen der Elektromobilität

Dipl.-Ing. Alexander Probst

Die Speicherung von elektrischer Energie ist eine Aufgabe so alt wie die Existenz von Stromnetzen. Da die Speicherung sehr aufwendig und teuer ist, wird sie so weit wie möglich vermieden. Daher wird die Energieerzeugung sehr genau dem Energieverbrauch nachgeführt, so dass hier stets ein Gleichgewicht vorgehalten wird. Jedoch ändert sich die Nachfrage nach Strom über den Tag hinweg ständig, so dass Kraftwerke teuren Spitzenlaststrom bereitstellen müssen.

Betrachtet man die aktuelle Entwicklung, dass Elektrofahrzeuge (EF) zunehmend an Bedeutung gewinnen, mag sich die Frage stellen, ob sich ein zusätzlicher Nutzen der elektrischen Speicher auf den Parkplätzen ergibt. Fahrzeuge werden über den Tag hinweg oft nicht länger als eine Stunde gebraucht und stehen die meiste Zeit ungenutzt auf einem Firmen- oder Privatparkplatz. Beispielsweise könnten die elektrischen Speicher dieser Fahrzeuge im Verbund Pumpspeicherkraftwerke unterstützen, die bei Überangebot Strom aufnehmen und bei Lastspitzen diesen wieder zurück ins Netz speisen können. Insbesondere im Hinblick auf das erklärte Ziel der Bundesregierung, bis 2020 einen Anteil von 40 % an erneuerbaren Energien zu erreichen, ist es wichtig ausreichend Speicherkapazitäten bereitzustellen, da Wind- und Solarkraftwerke nur sehr unregelmäßig Strom liefern, jedoch die Versorgung auch bei bewölkten und windstillen Tagen sichergestellt sein muss.

Auf der anderen Seite haben EF auch einige Nachteile, wie die erhöhten Anschaffungskosten, lange Ladezeiten und geringe Reichweite, die alle mit dem Speicher, der Batterie, zu tun haben. Hier besteht die berechtigte Hoffnung, dass sich die Batterietechnik in den nächsten Jahren maßgeblich verbessern wird.

Die Verbreitung von EF stellt aber auch das Netz vor neue Herausforderungen. Nach der Arbeit, wenn viele Berufstätige nach Hause fahren, wird das Auto zum Laden an die Steckdose angeschlossen. Zu dieser Zeit würde die Stromnachfrage rapide steigen. Um dies zu vermeiden, ist ein Lastmanagement notwendig, welches die einzelnen Ladevorgänge koordiniert und auf Zeiten eines Stromüberangebots wartet. Bei Stromknappheit können beispielsweise auch Entladevorgänge initiiert werden, um das Netz zu entlasten. Dieses Konzept wird gemeinhin auch „vehicle to grid“ genannt. Am IEH wird derzeit der Frage nachgegangen, inwieweit vehicle to grid geeignet ist, zusätzliche Regelleistung für die EVUs bereitzustellen und wie sich das Lastprofil bei einer erhöhten Verbreitung von EF verändert. Zu diesem Zweck werden Simulationen mit der Software Power Factory und MATLAB durchgeführt. Dabei sollen verschiedene Regelstrategien in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie des Verhaltens des Fahrzeughalters, der Vergütung der Rückspeisung und einer eventuellen Mindestkilometerreserve für spontane Fahrten erprobt werden. Auch wirtschaftliche Aspekte, die ausschlaggebend für einen flächendeckenden Einsatz sind, werden nicht unberücksichtigt bleiben.

■ **Prospects and Challenges of e-mobility**

Dipl.-Ing. Alexander Probst

The storage of electrical energy is a problem as old as the existence of electricity grids. Since the storage of energy is very complex and expensive it is avoided if possible. Therefore, the produced energy tracks the energy consumption very closely. However, the demand for electricity is changing continuously throughout the day so that power plants need to provide expensive peak load.

The current trends that electric cars are gaining more significance on the market might raise the question whether there is an additional benefit of electric storage available on parking lots. Vehicles are needed throughout the day usually no longer than one hour and are available most of the time on a corporate or private parking lot. For example, the electrical storage of these vehicles could assist a central pump storage hydro power plant that can store excess supply electricity and feed energy back to the grid during peak loads. Particularly in view of achieving the stated goal of the federal government in 2020 to produce 40% of the energy consumption with renewable energies, it is important to provide sufficient storage capacity, as wind and solar power stations provide only a very irregular flow and the supply has to be guaranteed also for cloudy and windless days.

However, electric cars also have some disadvantages, such as the increased initial costs, long charging times and the short range, all caused by the storage, the chemical battery. But the battery technology will probably improve significantly in the coming years.

The proliferation of electric vehicles challenges the electrical grid with new problems, as well. After work, when many people go back home, the car is connected to a power socket for charging. At that time the electricity demand would grow rapidly. To avoid this, a load management is necessary which coordinates the various loading procedures and waits for excess energy to charge the vehicles. On the other hand when there is a shortage of electricity, battery discharge is initiated to stabilize the grid. This concept is commonly referred to as "vehicle to grid". The IEH currently examines the question of to what extent vehicle to grid is appropriate to provide additional regulation power for the utility companies generally. Besides, changes in the load profile due to the increased proliferation of electric vehicles are analyzed. To this end, simulations with the software Power Factory and MATLAB are performed. Various control strategies will be tested as a function of various parameters such as the behavior of the vehicle owner, compensation paid for feeding back energy and a minimum km reserve for spontaneous trips. Furthermore, economic aspects that are crucial for a widespread use will not be disregarded.

■ **Kommunikationsanforderungen von SmartGrids**

Dipl.-Ing. Thomas Schmid

Das Rückgrat eines intelligenten Energieversorgungsnetzes (SmartGrid) bildet ein effizientes Kommunikationsnetz. Die Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur variieren jedoch von SmartGrid zu SmartGrid sehr stark, da sie von den bereitgestellten Funktionalitäten abhängen. So bietet beispielsweise ein intelligenter Stromzähler eine Vielzahl von Funktionalitäten, einerseits übermittelt er Verbrauchsdaten, kann aber auch die PowerQuality überwachen. Welche Funktionalitäten genutzt werden, hängt vom Betreiber und von den Kundenanforderungen ab. Daher existieren aufgrund der vielen Freiheitsgrade nur wenige Erkenntnisse, Erfahrungen und Richtgrößen für die Auslegung einer solchen Kommunikationsinfrastruktur.

Zur näheren Betrachtung wird eine Systemanalyse nach dem Top-Down-Prinzip gewählt. Mittels konkreter Anwendungsfälle eines Netzbetreibers werden zuerst alle elementaren Kommunikationsendpunkte identifiziert. Dabei werden nur die zwischen den Endpunkten ausgetauschten Nutzdaten betrachtet und mittels Datenflussdiagrammen dargestellt. Jedes dieser Diagramme stellt somit einen atomaren Kommunikationsvorgang dar. Jede Funktionalität lässt sich durch einen oder mehrere Datenflüsse modellieren. Neben diesen Datenflüssen werden für jede Funktionalität die Übertragungshäufigkeit, Anforderungen an Redundanz und Übertragungssicherheit erfasst.

Die Betrachtung erfolgt unabhängig vom Übertragungsprotokoll, einzig die zu übertragenden Nutzdaten sind bei dieser Abstraktion relevant. Hierdurch werden direkte und indirekte Abhängigkeiten von Funktionalitäten erkennbar. Somit lässt sich beispielsweise für ein vorhandenes Netz eine Aussage treffen, für welche Funktionalitäten eine ausreichende Infrastruktur existiert und ob Synergien bei der Kommunikationsinfrastruktur genutzt werden können.

Ferner ist es möglich, anhand der gewünschten Funktionalitäten ein zukünftiges SmartGrid zu planen und die Minimalanforderungen an die Bandbreiten zwischen Endpunkten abzuschätzen. Die Bandbreiten der Nutzdaten ergeben sich aus der Überlagerung der einzelnen Datenflüsse zwischen den Endpunkten.

Da moderne Kommunikationssysteme paketorientiert arbeiten, lässt sich von den Nutzdaten auf die tatsächlich benötigten Bandbreiten schließen. Hierzu muss auf die Nutzdaten eines Kommunikationskanals der zusätzliche Overhead multipliziert werden. Dieser Overhead ist von der Netzinfrastruktur, den Anforderungen an Redundanz und Zuverlässigkeit sowie den eingesetzten Protokollen abhängig.

Für weitergehende Betrachtungen wird es notwendig, die Datenflüsse weiter zu verfeinern und erste Faktoren für den Protokoll-Overhead zu bestimmen und mit Messwerten aus realen Kommunikationsnetzen zu validieren.

■ **Requirements for an Efficient Communication Network in SmartGrids**

Dipl.-Ing. Thomas Schmid

Every intelligent power grid (SmartGrid) relies on an efficient communication network. But requirements vary heavily from SmartGrid to Smart Grid as they depend on services offered by the SmartGrid. A simple SmartMeter provides for example a wide band of services. It is usually utilized for transmitting billing data, but it could also collect information on PowerQuality. Which of these services are actually used, depends on the utility's requirements and customer's need. This makes planning a Smart Grid's communication infrastructure difficult. Especially as only vague recommendations exist how to layout a smart grid.

Thus a system analysis was chosen to take a closer look on a SmartGrids' requirements. Real life use cases of an utility were analyzed using a top down approach. At first elementary communication endpoints were identified, then the communication streams between these endpoints were modeled in a dataflow diagram. So far only the stream's payload is considered. Furthermore each of these dataflow diagrams represent an atomic communication process. So it's possible to model any service offered in a SmartGrid by simply using one or more of these dataflows. Also the requirements on reliability and redundancy as well as the rate of data exchange are gathered.

This approach reduces a complex communication network on a set of data streams and endpoints. Data streams are considered protocol independent, as they only represent the payloads. This reveals a service's direct and indirect dependencies. Furthermore it is possible to tell if an existing communication infrastructure is sufficient for a new service, and if there are any unused synergies within the communication networks.

Based on the knowledge on required services, it is possible to define the communication structure's requirement for a future SmartGrid. This allows to estimate for every service the minimal bandwidth necessary between endpoints. The total amount of payload data between endpoints can be calculated by simply combining all data flows between the endpoints.

As modern communication systems work packet oriented it is possible to conclude the physical load of a communication channel from the payload. The payload is multiplied by a factor containing the overhead caused by the network infrastructure and protocols.

These factors have to be determined and tested for correctness in further studies. Furthermore dataflow diagrams and use cases have to be refined.

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

■ Messverfahren zur Beurteilung der Schirmwirkung von Kabeln für KFZ-Hochvoltbordnetze

Dipl.-Ing. Jens Hohloch

Aufgrund der hohen Zahl von elektrischen und elektronischen Baugruppen und Komponenten auf engstem Raum hat die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) in Kraftfahrzeugen eine große Bedeutung. In modernen Elektro- und Hybridfahrzeugen müssen für die elektrischen Fahrtriebe sehr hohe Leistungen über das Fahrzeugbordnetz übertragen werden. Im Vergleich zu herkömmlichen KFZ-Bordnetzen werden für elektrisch angetriebene Fahrzeuge höhere Bordnetzspannungen im Bereich von 120 bis 1100 V verwendet.

Das elektromagnetische Störpotential wird durch die auftretenden Strom- und Spannungsänderungen, die durch taktende Leistungshalbleiter verursacht werden, wesentlich gesteigert. Um eine Beeinflussung anderer Fahrzeugkomponenten zu verhindern, müssen diverse Entstörmaßnahmen ergriffen werden. Die Ausbreitung von elektromagnetischen Störungen erfolgt unter anderem über die im Fahrzeug verlegten Hochvolt-Leitungen und deren Steckverbinder, die aufgrund der hohen EMV-Anforderungen häufig geschirmt ausgeführt werden müssen.

Zur Qualifizierung der Schirmwirkung und zur Charakterisierung des elektromagnetischen Verhaltens dieser HV-Leitungen werden geeignete Messverfahren benötigt, von denen das Triaxialmessverfahren sowie das Speisedrahtverfahren näher auf ihre Eignung für HV-Kabel untersucht wurden. Die beiden betrachteten Messverfahren sind für die Kommunikationstechnik bereits genormt und werden dort angewendet.

Bei beiden Messanordnungen wird an der zu untersuchenden Leitung ein äußeres Mess- bzw. Speisesystem aufgebaut. Die Beurteilung der Schirmwirkung erfolgt über die Messung des frequenzabhängigen Kopplungsverhaltens der beiden Systeme, die aus den Kabelinnenleitern, einem äußeren Leiter der Messvorrichtung und dem Kabelschirm als gemeinsame Impedanz gebildet werden.



Fig. 1: Triaxialer Messaufbau
Triaxial measurement setup

■ **Measurement of the Shielding Effectiveness of Automotive High Voltage Power Cables**

Dipl.-Ing. Jens Hohloch

Due to the high number of electrical and electronic devices and components in a limited space, the electromagnetic compatibility in motor vehicles is an important issue. In modern electrically powered cars very high power has to be transmitted over the vehicle's electrical power system. Compared to conventional automotive electrical systems, there are used higher voltages in the range of 120 to 1100 V for electrically powered vehicles. Steep voltage and current edges caused by switched power semiconductors are a major source of disturbances which results in an increase of electromagnetic interference. Several measures must be taken to avoid those interferences between different devices of the electrical system. Among other things the propagation of electromagnetic disturbances is mainly caused by high-voltage cables and their connectors. For this reason HV-cables and connector assemblies are usually shielded.

For the qualification of the screening effectiveness and the the characterization of the electromagnetic behavior of HV-cables suitable measurement methods are needed. The triaxial measuring setup and the line injection measuring setup are further investigated. The applicability of these measurement test setups for high-voltage energy cables is examined in consideration of the standards valid for communication cables. For both measurement methods an external system is built-up around the cable under test (CUT) which is used as feeding respectively measuring circuit.

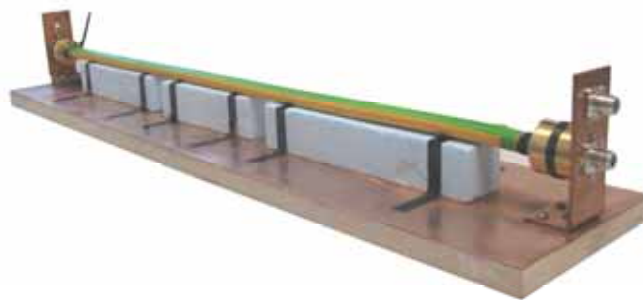


Fig. 2: Speisedrahtverfahren
Line injection measurement method

The evaluation of the screening effectiveness is done by measuring the frequency dependent coupling transfer function between the two systems. These systems are formed by the inner conductors of the HV-cable, the cable screen and the external conductor of the measuring device. The cable screen of the CUT acts as common impedance.

Das innere System ergibt sich in beiden Fällen aus den parallelgeschalteten Kabelinnenleitern und dem Kabelschirm, wobei der Prüfling als quasikoaxial betrachtet und mit seiner Wellenimpedanz abgeschlossen ist.

Beim triaxialen Verfahren (Fig. 1) besteht das äußere System aus Kabelschirm und einem Metallrohr, in welches der Prüfling zentriert eingebracht ist. Das vereinfachte Paralleldrahtverfahren (Fig. 2) zeichnet sich dadurch aus, dass als äußerer Leiter anstatt des Rohres ein Speisedraht am Prüfling angebracht wird, der bei entsprechender Geometrie zusammen mit dem Kabelschirm eine definierte Wellenimpedanz ergibt.

Die Übertragungsfunktion ist in Fig. 3 dargestellt. Bei niedrigen Frequenzen verläuft die Kurve annähernd konstant, im Bereich von 1 MHz bis 20 MHz tritt ein linearer Anstieg von 15 dB pro Dekade auf. Bei hohen Frequenzen sind Resonanzen vom Prüfling bzw. Messaufbau sichtbar.

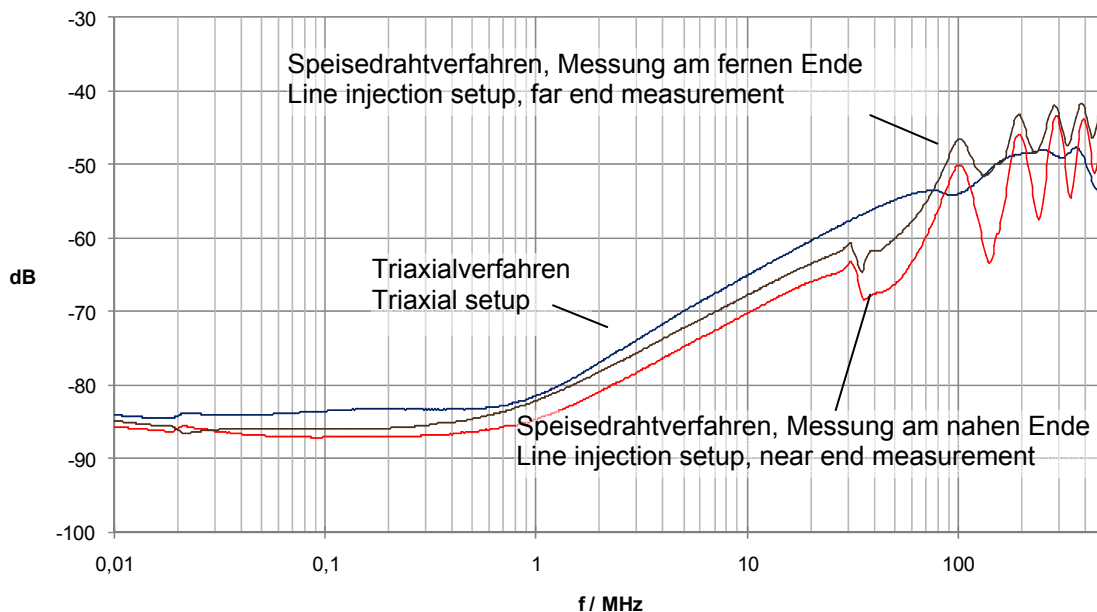


Fig. 3: Kopplungsverhalten von innerem und äußerem System für Speisedraht- und Triaxialmessverfahren
Coupling behaviour of inner and external system for Line injection and Triaxial measurement setup

The inner system consists of the parallel connected inner conductors and the cable screen. The test sample is considered as a quasi coaxial transmission line which is terminated with its characteristic wave impedance.

The external system consists of the DUT screen and an outer metal tube inside of which the cable under test is assembled centered when applying the triaxial setup (Fig. 1).

When using the simplified line injection measuring method (Fig. 2), a wire is installed at the CUT. By geometrical optimization a well defined characteristic wave impedance relating to the screen can be achieved.

The coupling transfer function is shown in Fig. 3. Especially at lower frequencies the curve proceeds constantly, in the range between 1 MHz and 20 MHz there is a linear rise of 15 dB per decade. The lowest screening effectiveness occurs at high frequencies when resonances of the measuring test setup and the CUT appear.

Einfluss von Fahrzeugkabelbäumen auf leitungsgebundene Störgrößen im Vergleich zur Komponentenmessung

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Bevor eine Komponente im Fahrzeug zum Einsatz kommt, werden die leitungsgebundenen Störgrößen in einer Komponentenmessung im Labor bewertet und entsprechend den Anforderungen im Frequenzbereich von 0,15 – 108 MHz angepasst. Für reproduzierbare Ergebnisse wird die Komponente über eine genormte Netznachbildung an die Spannungsversorgung angeschlossen und die Störströme zu einem Messgerät (Messempfänger, Spektrumanalysator) ausgekoppelt. Fig. 1 zeigt den Aufbau im Labor, bei dem die Komponente (engl. Device Under Test, DUT) auf einer leitfähigen Tischfläche aufgebaut ist und über die Netznachbildungen versorgt wird.

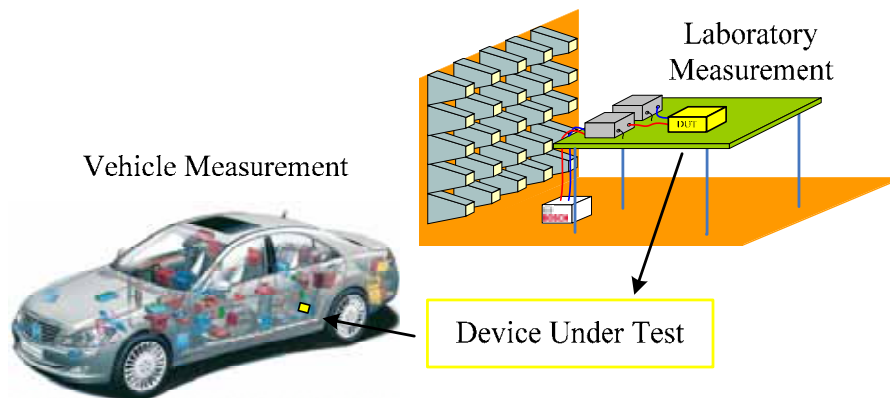


Fig. 1: Von der Komponentenmessung im Labor zur Fahrzeugmessung
Transition from the laboratory into the vehicle

Nach erfolgreicher Komponentenmessung erfolgt die Bewertung der von der Komponente ausgehenden Störgrößen im Fahrzeug. Im Vordergrund stehen dabei jedoch nicht die absolut von der Komponente ausgehenden Störströme, sondern die im Fahrzeug an den Empfangseinrichtungen (Antennen, Antennenverstärker) messbaren Störspannungen.

Beim Übergang von der Komponentenmessung im Labor zur Fahrzeugmessung ändern sich die Randbedingungen, denen die Komponente ausgesetzt wird. Im Labor erfolgt durch die Netznachbildungen ein definierter Übergang in die 50 Ω Messumgebung. Im Fahrzeug hingegen wird die Komponente an ein resonantes System aus unterschiedlichen Kabelbaumkonfigurationen angeschlossen. Fig. 2a) zeigt die Eingangsimpedanz einer Netznachbildung bei kurzgeschlossenen Eingangsklemmen. Vergleicht man die Eingangsimpedanz einer 3 m Leitung im Fahrzeug in Fig. 2b), erkennt man das resonante Verhalten der Leiterstruktur. Zur Bestimmung der Eingangsimpedanz ist die Leitung am Ende geerdet.

■ Influence of Vehicle Harnesses on Conducted Emissions

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Given limit values for conducted emissions make sure, that every component within a vehicle can operate at the desired function and is not disturbed by external high frequency noise sources. Thus, the noise generated by a device under test is measured in the laboratory within the frequency range from 0.15–108 MHz. To receive reproducible results, the component is powered up with the help of stabilisation networks, whereas the noise current is decoupled and measured with a measurement receiver or spectrum analyser. Fig. 1 shows the general laboratory setup as well as the transition to the final position of the component within the vehicle.

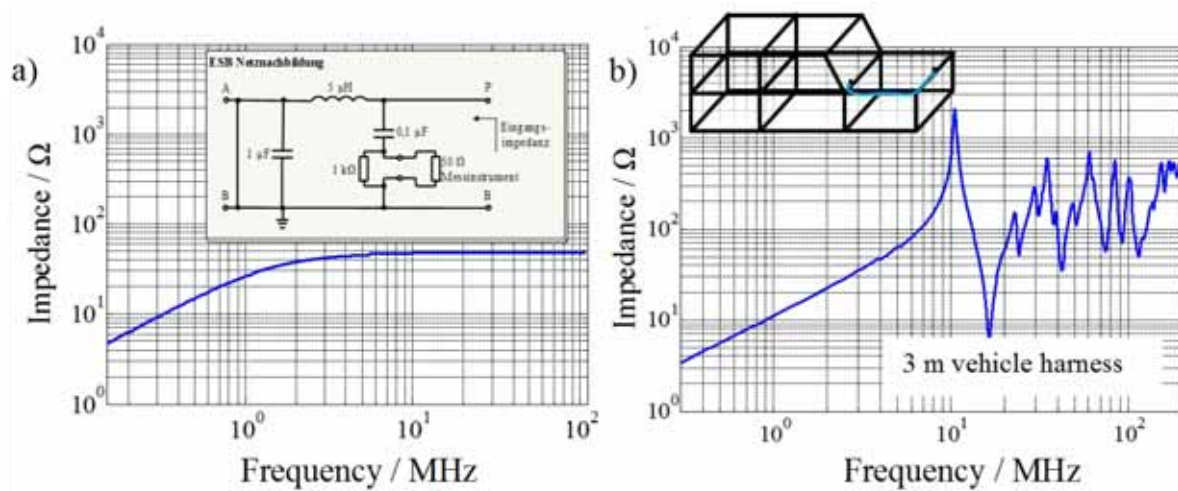


Fig. 2: a) Eingangsimpedanz der Netznachbildung, b) Eingangsimpedanz einer 3 m Leitung im Fahrzeug

a) Input impedance of the line impedance stabilisation network, b) Input impedance of a 3 m vehicle harness

After successful component tests within the laboratory the DUT is employed within the vehicle and the occurring high frequency noise is rated again. The DUT is now connected to the vehicle's power supply system. Automotive harnesses are designed to distribute DC power to every component within the vehicle or to connect communication systems. Anyway, the harness is not desired to transmit or reject high frequency noise currents. Due to the resonant behaviour of the harness, the noise currents emitted by the DUT are influenced by the harness. Fig. 2a) shows the input impedance of the used stabilisation networks within the laboratory. Compared to the input impedance of an arbitrary harness system in Fig. 2b) the resonant behaviour of the harness is obvious.

Zur Nachbildung der Fahrzeugumgebung im Labor wird eine Black-Box aufgebaut, die es ermöglicht, das reale Fahrzeugverhalten im Labor abzubilden. Dazu muss die Black-Box eine resonante Impedanzstruktur mit hoher Resonanzgüte zur Verfügung stellen, entsprechend Fig. 2b).

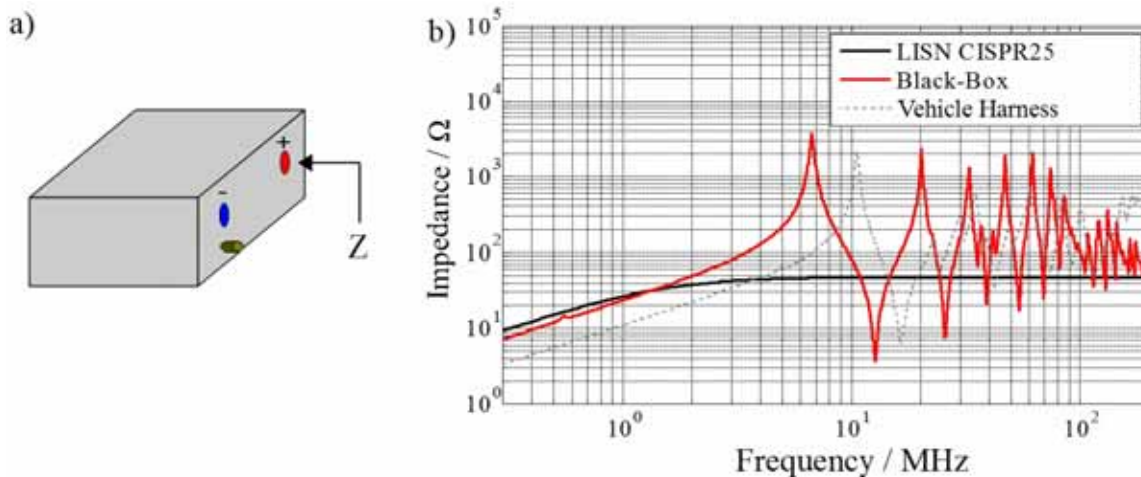


Fig. 3: a) Black-Box für den Komponententest im Labor, b) Eingangsimpedanz der Black-Box im Vergleich zur herkömmlichen Netznachbildung und einer resonanten Leiterstruktur

a) Black-Box, b) Input impedance of the Black-Box compared to the stabilisation network and a resonant vehicle harness

Fig. 3 zeigt das Prinzip der Black-Box sowie die bereitgestellte Eingangsimpedanz im Vergleich zur herkömmlichen Netznachbildung. Die neue Netznachbildung wird entsprechend der herkömmlichen Messung verwendet, mit dem Unterschied, dass die Störströme nicht kapazitiv ausgekoppelt werden. Die Bewertung der Störgrößen erfolgt direkt über den Störstrom mit Hilfe einer Stromzange.

Als Beispiel werden die Störströme eines Leistungsreglers bewertet. Eine Pulsweitenmodulation regelt dabei den Lastfluss. Wird die Stromzange um beide Versorgungsleitungen gelegt, kann direkt der Summenstrom oder Gleichtaktstörstrom gemessen werden. Erfolgt die Messung an einer Versorgungsleitung, erhält man die Gegentaktstörungen. Fig. 4 zeigt die gemessenen Störströme über dem betrachteten Frequenzbereich, getrennt nach Gleich- und Gegentaktstörgrößen. Dabei wird unterschieden zwischen dem Anschluss an der herkömmlichen Netznachbildung, an der Black-Box und an dem in Fig. 2 vorgestellten realen Fahrzeugkabelbaum. Deutlich zu sehen ist die resonante Ausprägung bzw. Überhöhung der Störgrößen. Im Vergleich zur Messung an den herkömmlichen Netznachbildungen ergibt sich eine Überhöhung der Störströme von über 20 dB. Für das gezeigte Beispiel werden in der Komponentenmessung die Störgrößen somit deutlich zu gering bewertet.

Aufgrund der Vielzahl von in modernen Fahrzeugen verwendeten Leiterstrukturen kann der zusätzliche Test im Labor Aufschluss über eine mögliche Beeinflussung geben, allerdings keine absoluten Störpegel für den Übergang in das Fahrzeug vorhersagen.

To simulate the resonant behaviour of the vehicle harness in the laboratory, a Black-Box is built up, which allows measuring the occurring noise currents like in a real vehicle. The input impedance of the Black-Box has to represent the same behaviour as the impedance of the vehicle harness shown in fig. 2b).

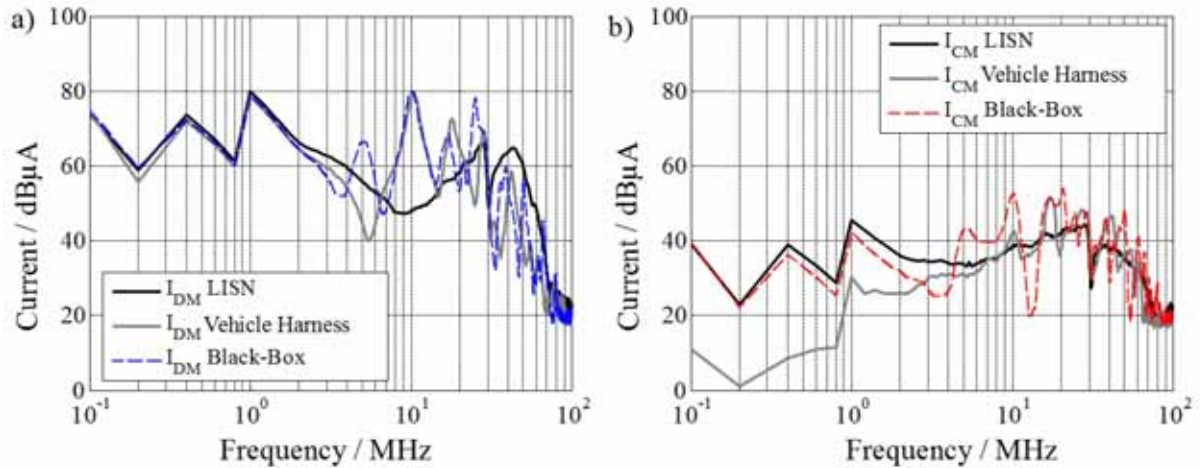


Fig. 4: a) Gegentaktstörstrom b) Gleichtaktstörstrom für den herkömmlichen Messaufbau an der Black-Box und am Fahrzeugkabelbaum
a) Differential-mode b) Common-Mode, measurement at the stabilisation networks, Black-Box and vehicle harness

Fig. 3 shows the Black-Box as well as the measured input impedance of the system. The new stabilization network is used as the one defined in CISPR25. The only difference is that the noise currents are not capacitive decoupled. They have to be measured directly with the help of a current clamp. With the current clamp it is possible to separate the occurring noise into common- and differential-mode currents.

As an example, the noise current of a switched mode power supply circuit is measured with the setup as defined in CISPR, with the new Black-Box setup and connected to a real 3 m vehicle harness as shown in fig. 2. Fig. 4 shows the occurring common- and differential-mode currents at the power supply leads for different measuring conditions. Connected to the vehicle harness and to the Black-Box system, the noise currents show a significant increase due to the resonant behaviour of the system for both common- and differential-mode currents. For this example, the noise currents measured in the common component setup do not comply with the currents gained within the vehicle setup.

Due to the multiple possibilities how to connect a DUT to the vehicles power supply, the suggested additional test with the Black-Box can given an estimation about the influence of the vehicle's harness to the noise currents. However, no absolute amplitude values can be predicted.

■ **Qualifizierung von passiven Bauelementen im Hinblick auf deren ESD-Festigkeit**

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Der Einsatz von passiven Standardbauteilen in elektronischen Baugruppen und Steuergeräten zum Schutz vor elektrostatischen Entladungen (ESD) überwiegt nach wie vor gegenüber dem Einsatz von expliziten ESD-Schutzelementen, wie Varistoren und Dioden. Ein Verzicht auf jedwede Schutzbeschaltung ist durch weiterhin sinkende Strukturgrößen und damit sinkende Ausfallschwellen bei Halbleitern ohne kostenintensive Verlagerung des Schutzes auf das Die nicht zu erwarten.

Durch den Aufbau einer auf die Messung der Auswirkungen von elektrostatischen Entladungen optimierten Prüfanlage aus angepassten Sensoren und einer eigens hierfür entwickelten Testobjektfixierung kann nun eine vergleichende Diagnostik von ESD-Degradationseffekten auf passive Bauelemente angewendet werden. Mit dieser speziell auf die bei elektrostatischen Entladungen zu beachtenden Anforderungen an Spannungsfestigkeit und zeitliche Auflösung der Sensorik abgestimmten Messumgebung wurden Messreihen an passiven Bauelementen durchgeführt und hierdurch die Praxistauglichkeit des Aufbaus bestätigt.

Auf dieser technischen Basis wurden Messverfahren und -abläufe entwickelt und verfeinert, die bereits mit wenigen Messungen stichhaltige Aussagen über das Verhalten von Standardbauteilen unter ESD-Belastung erlauben.

Diese Überlastungsmessungen zeigen, dass sich Standardbauteile verschiedener Hersteller, obwohl sie sich bei Nennbedingungen meist exakt gleich verhalten, unter dem Einfluss starker Ströme und hoher Spannungen deutlich unterscheiden. Konkret wurden oberflächenmontierbare Bauteile im 0603-Gehäuse vermessen, darunter Ferritperlen, Dickschichtwiderstände und Keramikkondensatoren. Aufgrund des einheitlichen Formfaktors wurden die einen Vergleich behindernden Einflüsse aus mechanischen Unterschieden und damit variierenden Streugrößen minimiert.

In einem gesonderten Teil des eingangs genannten Gesamtaufbaus kann auch das transiente Verhalten von Bauteilen während des eigentlichen Überlastungsvorgangs messtechnisch festgehalten werden. Hierdurch wurde es möglich, das dynamische Verhalten von passiven Bauelementen zu bestimmen. Auch in diesem Fall ergaben sich deutlich messbare Unterschiede zwischen nominell gleichwertigen Bauteilen unterschiedlicher Hersteller.

Zusammenfassend kann berichtet werden, dass die am Institut inzwischen vorhandenen Messeinrichtungen und -verfahren ein ESD-Benchmarking von passiven SMD-Bauteilen innerhalb weniger Tage ermöglichen. Solche Ergebnisse bieten bei der Bauteilauswahl im Hinblick auf die ESD-Performance eine sinnvolle Ergänzung zu den im Datenblatt bereits verfügbaren Informationen des Herstellers.

■ **Qualification of the ESD Performance of Passive Components**

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Passive components in electronic control units are far more frequently used for protection against electrostatic discharges (ESD) as compared to explicit ESD protection elements such as varistors or diodes. At the moment it is not expected that protective circuitry can be omitted completely soon due to shrinking semiconductor structures and thereby decreasing failure thresholds – unless, however, cost intensive active protection is realised on the die itself.

By means of an especially built test setup which is optimised for the measuring of effects of electrostatic discharges, and a custom fixture for the device under test, comparative diagnostics of derating effects due to ESD stress can now be applied to passive components. The system was developed from scratch taking into account the high insulation demands and timely resolution necessary for observing ESD events. Various series of measurements on passive components proofed the usability of the setup.

Based on this technical foundation new measuring methods and procedures were developed and refined, through which valuable information about the behaviour of standard components under ESD stress becomes accessible.

These overload measurements show that nominally identical components from different manufacturers become easily distinguishable under the influence of high transient currents and voltages associated with ESD events.

Precisely, surface mountable devices in the 0603-package were analysed, among which were ferrite beads, thick layer resistors and ceramic capacitors.

The common form factor of the devices allows an easier comparison of the results, since mechanical differences and therewith varying stray parameters are minimised this way.

In a part of the beforementioned test setup the transient behaviour of the components during an actual overload event can be measured in real-time. So it became possible to determine the dynamic behaviour of passive components, which, again, yielded noticeable differences between different manufacturers of nominally identical components.

In summary, a measuring setup and associating measuring methods are available at the institute which allow an ESD benchmarking of passive SMT (surface mounted technology) components within a few days. Such measurements provide valuable information during the search for suitable components for a given bill of materials with respect to their ESD performance in addition to the information given in the datasheets of the respective manufacturers.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

H. Rebholz, S. Tenbohlen, W. Köhler

Influence of Automotive Harnesses on Conducted Emissions.

20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, January 12-16, 2009, Proceedings, page 237-240.

F. Streibl, S. Tenbohlen, J. Hartmann, E. Dudenhoeffer

Setup for Measuring the Derating of SMD Components under ESD Stress.

20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, January 12-16, 2009, Proceedings, page 145-147

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

On-Site Condition Assessment of HV Cable Terminations in Service.

20. International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Prague, 8.-11. June 2009, Paper No. 0894

B. Wille-Haussmann, C. Wittwer, S. Tenbohlen

Reduced Models for Operation Management of Distributed Generation.

20. International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Prague, 8.-11. June 2009, Paper No. 0779

M. Heindl, S. Tenbohlen, A. Kraetge, M. Krüger, J.L. Velásquez

Determining of Pole-Zero Representations of FRA Measurement Data for Interpretation of Power Transformer Transfer Function Deviations.

Cigré 6th Southern Africa Regional Conference & Joint A2, A3, B3 Study Committee Colloquium, Somerset West, South Africa, August 17-21, 2009, Proceedings of the Cigré 2009, 6th Southern Africa Regional Conference, paper No. P505

J. Jagers, S. Tenbohlen

Differences Approaches for the Acquisition of Reliability Statistics.

Cigré 6th Southern Africa Regional Conference & Joint Study Committee A2, A3, B3 Colloquium, Somerset West, South Africa, August 17-21, 2009, Proceedings of the Cigré 2009, 6th Southern Africa Regional Conference, paper No. C104

M. Koch, M. Krüger, S. Tenbohlen

Comparing Various Moisture Determination Methods for Power Transformers.

Cigré 6th Southern Africa Regional Conference & Joint Study Committee A2, A3, B3 Colloquium, Somerset West, South Africa, August 17-21, 2009, Proceedings of the Cigré 2009, 6th Southern Africa Regional Conference, paper No. P509

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

Fundamental Characteristics of UHF PD Probes and the Radiation Behavior of PD Sources in Power Transformers.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. C-26, page 666-671

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

Sensitivity Limits of UHF PD Measurements on Power Transformers.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. D-36, page 1034-1039

M. Fischer, S. Tenbohlen

Improved Condition Assessment by Fuzzy-Modelling, Adjustment and Merging of DGA's Interpretation Methods.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. F-16, page 1556-1561

M. Heindl, S. Tenbohlen, A. Kraetge, M. Krüger, J.L. Velásquez

Algorithmic Determination of Pole-Zero Representations of Power Transformers' Transfer Functions for Interpretation of FRA Data.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. D-26, page 980-985

J. Jagers, S. Tenbohlen

Evaluation of Transformer Reliability Data Based on National and Utility Statistics.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. F-3, page 1488-1493

M. Jovalekic, S. Tenbohlen

The influence of carboxylic acids on the dielectric performance of oil-paper insulations.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. D-43, page 1071-1075

A. Kraetge, M. Krüger, J.L. Velásquez, M. Heindl, S. Tenbohlen

Experiences with the practical application of sweep frequency response analysis (SFRA) on power transformers.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. D-45, page 1081-1086

A. Pfeffer, S. Tenbohlen

Analysis of full and chopped Lightning Impulse Voltages from Transformer Tests using the new k-Factor Approach.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. A-10, page 61-66

A. Pfeffer, S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, T. Strehl

Onsite experiences with multi-terminal IEC PD measurements and UHF PD measurements.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. C-51, page 791-796

D. Vukovic, S. Tenbohlen

Comparative evaluation of breakdown strength of natural esters and mineral oil.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. C-14, page 603-608

M. Jovalekic, D. Vukovic, S. Tenbohlen

Dissolved gas analysis of natural ester fluids under electrical and thermal stress.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. C-40, page 738-743

A. Weinläder, S. Tenbohlen

Thermal-hydraulic investigation of transformer windings by CFD-Modelling and measurements.

16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009, Proceedings of the ISH, paper No. D-22, page 958-963

P. Müller, S. Tenbohlen, R. Maier, M. Anheuser

Artificial Low current Arc Faults for Pattern Recognition in Low voltage Switchgear.

55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Vancouver, Canada, September 14-16, 2009, Proceedings of Holm Conference 2009, paper No. 1.3, page 14-20

S. Tenbohlen, D. Vukovic, M. Jovalekic, M. Schäfer, J. Harthun

Dielectric performance and dissolved gas analysis of natural esters for application in power transformers.

CIGRE international colloquium on "Materials and emerging test techniques", Budapest, Hungary, September 20-25, 2009

S. Coenen, M. Heindl, A. Pfeffer, S. Tenbohlen, S. Markalous

On Site Experiences with Multi-Terminal IEC PD Measurements, UHF PD Measurements and mixed UHF and Acoustic PD Localisation

EuroDoble2009, Oktober 19-21, 2009, Berlin, paper No. 3.2

S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous

Detektion und Ortung von Teilentladungen durch die UHF-TE-Messmethode.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.45

M. Fischer, S. Tenbohlen

Unschärfe Modellierung, Anpassung und Verdichtung von DGA-Interpretationsmethoden für eine präzisere Zustandsabschätzung.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.36

M. Heindl, S. Tenbohlen, A. Kraetge, M. Krüger, J.L. Velásquez

Algorithmische Bestimmung der Pol-Nullstellen-Darstellung von Transferfunktionen bei Leistungstransformatoren zur Bewertung von FRA-Messungen.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.29

M. Jovalekic, S. Tenbohlen

Gas-in-Öl-Analyse natürlicher Esterflüssigkeiten unter thermischen und elektrischen Belastungen.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.48, S. 443-448

M. Koch, M. Krüger, S. Tenbohlen

Methoden zur Feuchtebestimmung in Transformatoren im Vergleich.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.32, S. 357-362

A. Kraetge, J.L. Velásquez, M. Krüger, M. Heindl, S. Tenbohlen

Erfahrungen mit dem praktischen Einsatz der Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) zur Messung von Leistungstransformatoren.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.39

P. Müller, S. Tenbohlen, R. Maier, M. Anheuser

Erzeugung von stromschwachen Störlichtbögen zur Diagnose von Fehlern in Niederspannungsschaltanlagen.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.55, Seite 483-488

A. Pfeffer, S. Coenen, S. Tenbohlen

Mehrstellen-Teilentladungs-Messung und UHF-Messmethode zur Vor-Ort-TE-Diagnose von Leistungstransformatoren.

Internationaler ETG-Kongress 2009, Düsseldorf, 27.-28. Oktober 2009, Fachtagung 4: „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, ETG-Fachbericht 119, Paper Nr. 4.03

H. Rebholz, S. Tenbohlen, W. Köhler

Time Domain Characterization of Radio Frequency Sources for the Design of Noise Suppression Filters.

IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 4, November 2009

P. Karimifard, G. B. Gharehpetian, S. Tenbohlen

Localization of Winding Radial Deformation and Determination of Deformation Extent using Vector Fitting-based Estimated Transfer Function.

European Transactions on Electrical Power (ETEP), Vol. 19, Issue 5, July 2009, page 749–762

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

14.01.09	Besprechung von Stuttgarter Elektrotechnikprofessoren bei der DFG in Bonn
03.02.09	Sitzung der CIGRE-Arbeitsgruppe AG D1.01 in Rapperswil/Schweiz, Prof. Tenbohlen
13.02.09	Sitzung beim VDE in Frankfurt zum Thema Ingenieurausbildung, Prof. Tenbohlen
24.-27.2.09	Sitzung der CIGRE-Arbeitsgruppe „ <i>Dielectric Performance Group</i> “ in Västerås/Schweden, Prof. Tenbohlen, D. Vukovic
03.03.09	Sitzung des ETG-Vorstandes in Mannheim, Prof. Tenbohlen
02.-05.03.09	VDE-Seminare „ <i>Klassische</i> “ bzw. „ <i>Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren</i> “ am Institut, Prof. Tenbohlen, S. Coenen, M. Heindl, M. Jovalekic, A. Müller
28.-30.04.09	Sitzung der CIGRE-Komitees TF D1.03.09 „ <i>Risk Assessment of Defects in GIS based on PD Diagnostics</i> “ und WG D1.25 „ <i>Application Guide for PD Detection in GIS using UHF and Acoustic Methods</i> “ in Klaus/Österreich, Prof. Tenbohlen
06.05.09	Teilnahme am Stakeholder Meeting des KIC Sustainable Energy Proposals in der Landesvertretung Baden-Württemberg bei der Europäischen Union in Brüssel, Prof. Tenbohlen
16.05.09	Vorstellung des neuen Studiengangs „ <i>Erneuerbare Energien</i> “ bei der Bildungsmesse in Gelsenkirchen durch Prof. Tenbohlen
28.-29.05.09	Sitzung der VDE-Arbeitsgruppe K 124 „ <i>Hochspannungs-Prüftechnik</i> “ in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
15.06.09	Sitzung des ETG-Vorstands in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
23.-25.06.09	Prof. Tenbohlen nahm als Ehrengast am BDEW-Kongress in Berlin teil.
30.06.09	Sitzung des Komitees für die EMV 2010 in Düsseldorf zur Vorbereitung des Konferenzprogramms, Frankfurt, Prof. Tenbohlen
15.-21.8.09	6th Southern Africa Regional Conference der CIGRE in Kapstadt, Prof. Tenbohlen
24.-28.08.09	16th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Kapstadt, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, S. Coenen, M. Fischer, M. Heindl, M. Jovalekic, A. Pfeffer, D. Vukovic, A. Weinläder
20.-21.9.09	Meeting der CIGRE-Arbeitsgruppe SC D1 „ <i>Materials and Emerging Test Technologies</i> “ in Budapest, Prof. Tenbohlen
24.-25.09.09	FEN-Symposium „ <i>Dezentrale Energiesysteme</i> “, Oldenburg, A. Probst, P. Wajant

- 01.10.09 Hochschultag Energie 2009, Augsburg, A. Probst, P. Wajant
- 7.10.09 75. Sitzung der VDE-Arbeitsgruppe K 321 in Bayreuth,
Prof. Tenbohlen
- 7.10.09 Treffen der CIGRE Task Force D1.01.16 in Nürnberg,
Prof. Tenbohlen
- 19.-21.10.09 EuroDoble 2009, Berlin
„Onsite experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF
and Acoustic PD measurements“, Vortrag S. Coenen, Teilnehmer
M. Heindl
- 21.-22.10.09 GMM-Fachtagung „*Elektromagnetische Verträglichkeit in der KFZ-
Technik*“, München, J. Hohloch
- 27.-28.10.09 Internationaler ETG-Kongress 2009 in Düsseldorf, „*Diagnostik
elektrischer Betriebsmittel*“. Teilnehmer: Prof. Tenbohlen
(Vorstandsmitglied der ETG), Beiträge von S. Coenen, M. Fischer, M.
Jovalekic, P. Müller, A. Pfeffer, T. Schmid
- 17.-20.11.09 DAAD-geförderter Forschungsaustausch mit der Universität
Manchester zum Thema „*Umweltfreundliche Transformatoren*“
Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, M. Beltle, S. Coenen, M.
Jovalekic, A. Müller, D. Vukovic, A. Weinländer
- 24.11.09 1. Sitzung der ITG-Fokusgruppe „*Energieinformationsnetze und –
Systeme*“ in Berlin, Prof. Tenbohlen
- 02.12.09 Sitzung der CIGRE-Arbeitsgruppe WG D1.25 in München,
Prof. Tenbohlen

8. EREIGNISSE UND KONTAKTE

Im September dieses Jahres besuchte uns Herr Dr. habil. Zbigniew Nadolny von der Politechnika Poznańska und diskutierte lebhaft mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern des IEH über ihre Forschungsarbeiten. Außerdem informierte er sich über den Aufbau der Studiengänge an der Universität Stuttgart.

Das Stipendium des DAAD für Frau M. Sc. Su SU WIN aus Birma wurde um ein Jahr verlängert. Sie arbeitet auf dem Gebiet der Teilentladungsmessung bei uns.

Traditionell fanden auf dem Söllerhaus vom 1.-3. April 2009 und vom 30. September bis 2. Oktober 2009 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 Betriebsausflug am 30. Juli 2009 starteten wir früh morgens mit einem Bus nach Nördlingen. Im Rieskratermuseum erwarteten uns Eindrücke aus dem Weltall (inklusive echtem Mondgestein) und die Entstehungsgeschichte des Rieskraters rund um Nördlingen, den schon die amerikanischen Astronauten vor ihrem Flug auf den Mond besucht hatten. Auch ein kurzer Spaziergang durch die historische Altstadt von Nördlingen und die Besteigung des Daniels durften nicht fehlen. Nach einigen leckeren Weißwürsten mit Brezeln und Weizenbier wanderten wir auf den 668 Meter hohen Ipf bei Bopfingen. Für den Aufstieg wurden wir mit einem wunderschönen Blick ins Ries und auf die Schwäbische Alb belohnt. Zum Abschluss gab es in einer ehemaligen Mühle an der Eger noch ein leckeres Bauernvesper und köstlichen Most. Ein Dankeschön an Simon Burow für die perfekte Organisation!

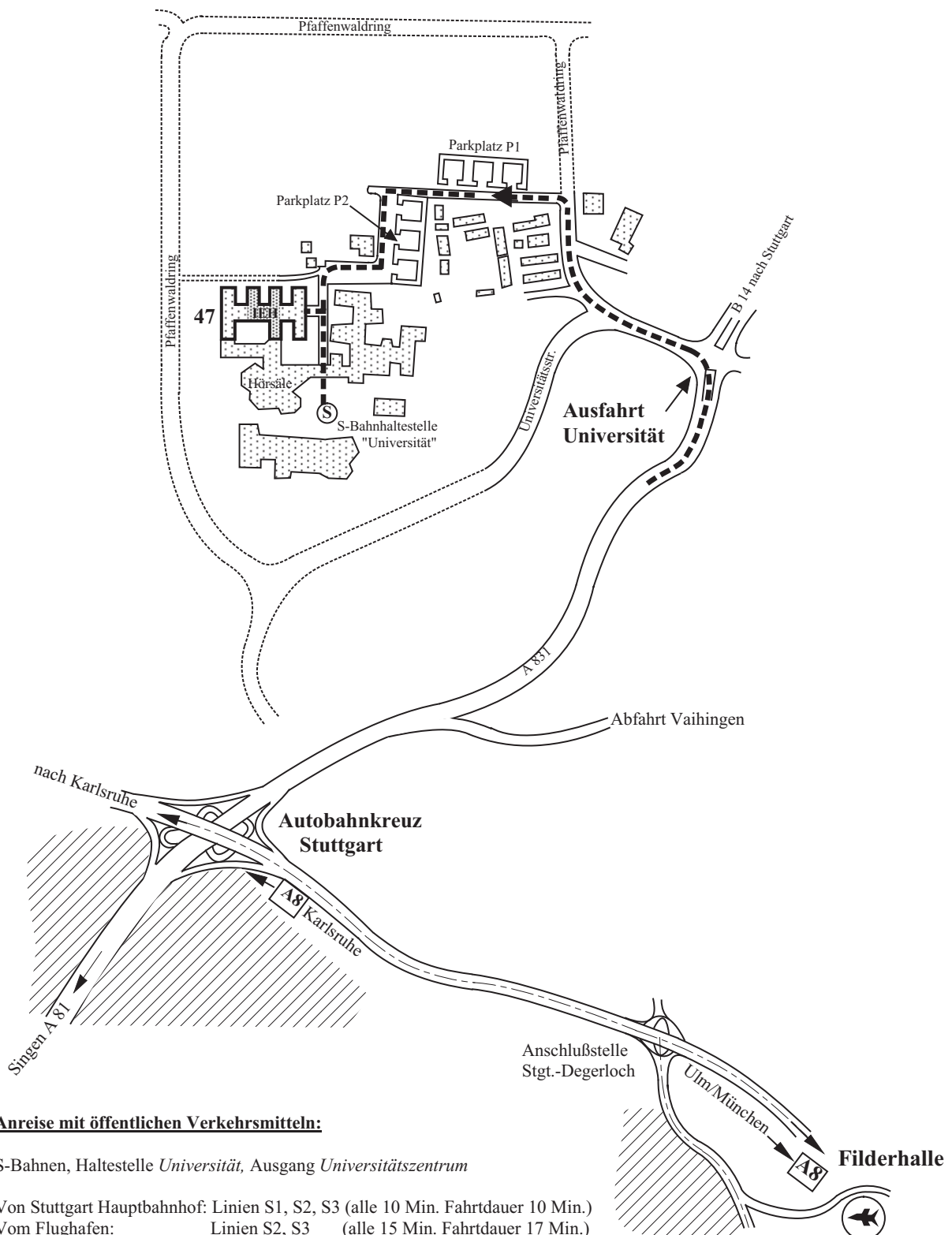


9. PRÜFEINRICHTUNGEN

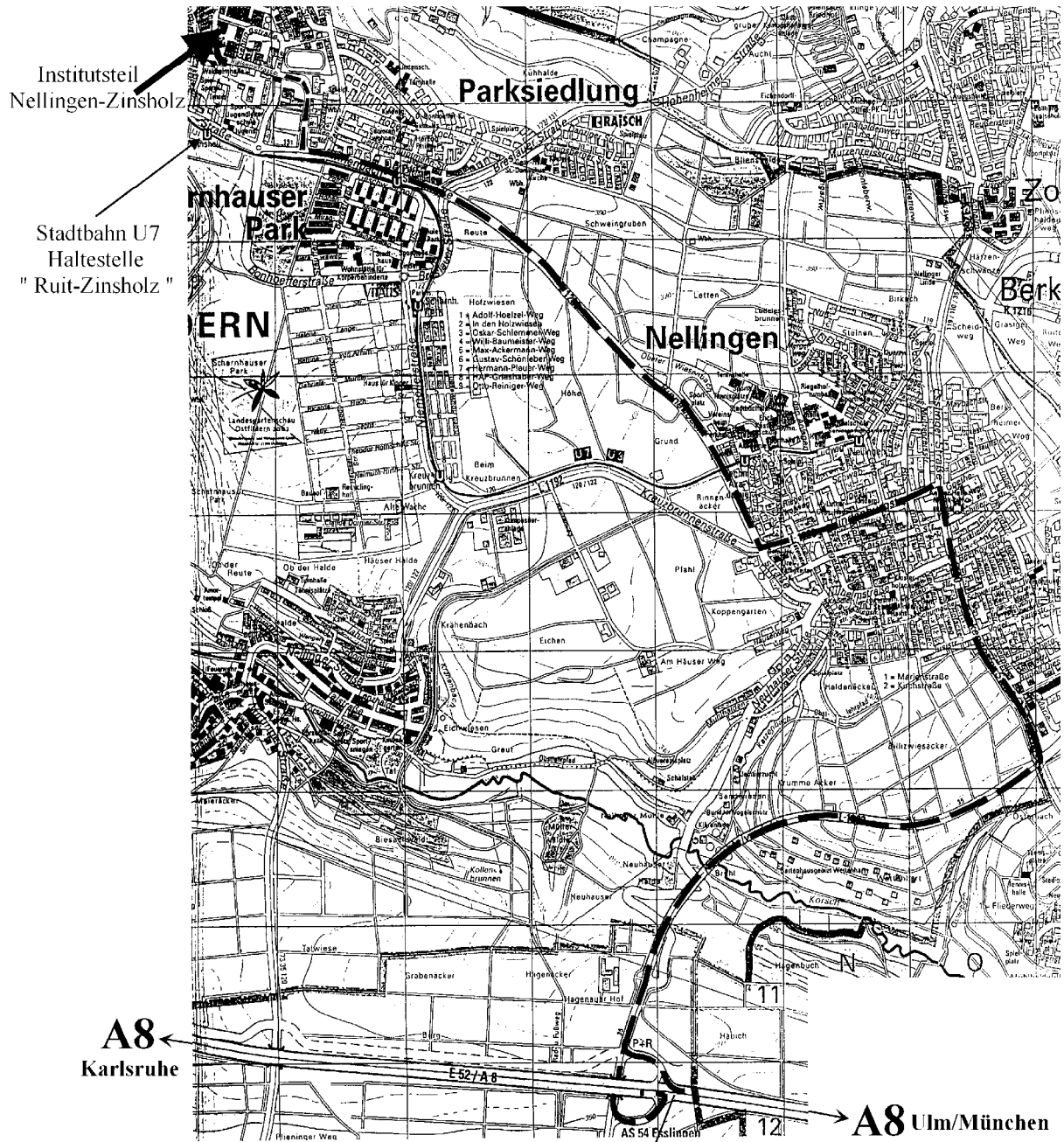
Stoßspannungsanlagen	bis 2000 kV, 100 kJ
Generator für schwingende Schaltstoßspannung	bis 1300 kV
Schwingende Blitzstoßspannung	bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ
Stoßstromanlage	bis zu 6 Impulse wechselnder Polarität, 80 kV, 150 kJ
Wechselspannungskaskade	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 ³ (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 3 GHz, Messempfänger bis 3 GHz, TEM-Messzelle
Klimakammer	3 x 3 x 3 m ³ , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C, rel. Luftfeuchtigkeit von 10 % bis 95 %
Verschmutzungskammer	5 x 5 x 5 m ³ , 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. LAGEPLÄNE

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



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



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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

**Anschlußstelle
54 Esslingen/Ostfildern**