

INHALTSÜBERSICHT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	8
	3.1. VORLESUNGEN	8
	3.2. PRAKTIKA.....	11
	3.3. EXKURSIONEN	12
	3.4. STUDIEN- UND DIPLOM- BZW. MASTERARBEITEN	13
4.	PROMOTIONEN.....	18
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	40
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	110
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	114
8.	EREIGNISSE UND KONTAKTE	116
9.	PRÜF- UND MESSEINRICHTUNGEN.....	117
10.	LAGEPLAN	118
11.	NOTIZEN	120

1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

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

Die Planungen zur Einführung des Bachelor-Studienganges "Elektrotechnik und Informationstechnik" an der Universität Stuttgart sind nach langen Diskussionen abgeschlossen worden, und wir planen die Einführung für das Wintersemester 2008/09. Problematisch ist sicherlich, dass gemäß den Forderungen der Politik innerhalb von 6 Semestern Studiendauer ein berufsqualifizierender Abschluss erreicht werden soll. Ziel der universitären Ausbildung ist aber ein systemübergreifend denkender Master, der wiederum eine breit angelegte Grundlagenausbildung verlangt. Die fachlich spezialisierende Ausbildung im Bachelor muss daher zugunsten der breiten Grundlagenausbildung zurücktreten. So werden konsequenterweise auch im zukünftigen Bachelor-Studiengang an der Universität Stuttgart die von uns vertretenen Grundlagen der elektrischen Energieerzeugung und -übertragung ein Pflichtmodul für alle Studierenden sein. Dadurch besteht auch weiter die Möglichkeit, einer Vielzahl von Studierenden die Aktualität und Relevanz energietechnischer Themenstellungen nahe zu bringen.

Der weiter anwachsende und aktuell bei weitem nicht gedeckte Bedarf an Absolventen der elektrischen Energietechnik hat uns veranlasst, die Aktion „Industry meets University“ ins Leben zu rufen. Dabei stellen Vertreter aus der Industrie den Studierenden unseres Institutes ihr Unternehmen, Produkte und Einstiegsmöglichkeiten vor. So wird zum einen den Studierenden eindrucksvoll der große Bedarf dieser Branche dokumentiert. Zum anderen haben so aber auch Studierende und Industrievertreter die Möglichkeit der direkten persönlichen Kontaktaufnahme. Erfreulicherweise hat das Interesse der Studierenden an den Themenstellungen der Energieübertragung und Hochspannungstechnik weiter zugenommen. Wir sind stolz, mit 52 abgeschlossenen Studien- und Diplomarbeiten die letztjährige Zahl nochmals deutlich gesteigert zu haben und damit auch eine Spitzenstellung innerhalb unserer Fakultät einzunehmen.

Aus wissenschaftlicher Sicht können wir auf ein erfolgreiches Jahr zurückblicken. Drei Dissertationen (Dr.-Ing. Jozsef Osztermayer, Dr.-Ing. Enzo Cardillo und Dr.-Ing. Martin Kull) sowie 30 Veröffentlichungen und eine Vielzahl von Vorträgen dokumentieren unsere vielfältigen Forschungsaktivitäten und das Interesse, das unseren Arbeiten entgegengebracht wird. Allein mit zehn Beiträgen waren wir beim 15. Internationalen Symposium on High Voltage Engineering (ISH) vertreten, das diesmal in Ljubljana / Slowenien stattfand. Auf Grund der zahlreichen Anregungen aus der Industrie konnten wir in diesem Jahr drei Mitarbeiter einstellen, die sich neuer Frage-

stellungen annehmen werden. Dabei steht der Leistungstransformator im Mittelpunkt zweier Arbeiten. Dipl.-Ing. Dejan Vukovic wird die dielektrische Festigkeit von Isolationsystemen auf Basis von Mineralöl und natürlichem Ester untersuchen. Das Ziel der Arbeit von Dipl.-Ing. Maximilian Heindl ist die Entwicklung von Algorithmen zur objektiven Beurteilung von Transferfunktionsmessungen. Dipl.-Ing. Peter Müller wird sich mit der Detektion von Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen befassen.

Im kommenden Jahr wird das Institut wieder Gastgeber einiger wichtiger Veranstaltungen sein, auf die ich an dieser Stelle gerne hinweisen möchte. Das traditionsreiche Stuttgarter Hochspannungssymposium werden wir turnusgemäß vom 5.-6.3.2008 im bekannten Rahmen in der Filderhalle in Leinfelden durchführen. Als Titel der Veranstaltung haben wir „Modernes Design und zuverlässiger Betrieb von Komponenten des elektrischen Netzes“ gewählt. Dankenswerterweise wird diese Veranstaltung von mehreren Industriepartnern unterstützt, so dass der unabhängige und vor allem sehr praxisnahe Charakter dieser Veranstaltung gewahrt bleiben wird. Auf Grund zahlreicher Anfragen werden wir dieses Jahr zusätzlich eine Ausstellung organisieren. 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.

Am 11./12.3.2008 wird in Zusammenarbeit mit dem VDE wieder ein Seminar zum Thema „Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren“ stattfinden. Nach einer theoretischen Einführung in die Diagnose von Leistungstransformatoren erlernen die Teilnehmer in diesem Seminar anhand von praktischen Versuchen in unseren Labors die Handhabung und Interpretation von Teilentladungsmessung, Übertragungsfunktionsbestimmung und dielektrischer Diagnostik. Am 13.3.2008 werden wir zusammen mit dem Fachbereich Q2 „Werkstoffe, Isoliersysteme und Diagnostik“ der ETG Gastgeber des Workshops „Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften“ sein. Weitere Informationen zu diesen Veranstaltungen können Sie auf unserer Homepage oder unter www.vde.com/seminare im Internet finden.

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

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

Stuttgart, im Dezember 2007

Prof. Stefan Tenbohlen

PREFACE

Dear Friends!

With our annual report 2007 we would like to give you some impressions of our work and point out new developments and results.

After long discussions the plans to introduce the bachelors study course in Electrical Engineering have been completed and we intend to introduce it during the next winter term. According to the political demands a Bachelors degree achieved within six terms should result in vocational qualifications which certainly are problematic. The goal of education at a university is a Masters degree with comprehensive system knowledge requiring broad basic education. This is why the specialised education in the Bachelors courses needs to step back in favour of a wide-ranging basic education system. Consequently, our basics of electric power generation and transmission will be a compulsory module for all students of the future bachelors study course at our university. We will thus have the opportunity to show all bachelors students that the research of electric power systems is up-to-date, important and interesting.

The steadily growing demand in graduates inspired us to launch the activity “Industry meets University” whereby representatives of the industry present their company, products and possibilities of starting a professional career to the students of our institute. This will allow students to see the high demand of this sector and at the same time it will create a great networking platform between students and industry representatives. Fortunately, the interest of the students studying electrical power transmission and high voltage engineering are continuing to grow. We are proud of having increased last year’s number of study and diploma thesis projects up to 52 and that we have taken a top position in our faculty.

Also from a scientific point of view we are able to look back on a successful year:

Three dissertations (Dr.-Ing. Jozsef Osztermayer, Dr.-Ing. Enzo Cardillo and Dr.-Ing. Martin Kull) as well as 30 publications and a large number of presentations document our manifold research activities and the interest shown in our work. At the 15th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Ljubljana / Slovenia for example we gave ten presentations. This year, due to several encouragements from the industry, we were able to hire three scientific assistants who will adopt new questions. Two of them will focus on power transformers. Dipl.-Ing. Dejan Vukovic will examine the dielectric strength of insulation systems on the base of mineral oil and natural ester. The goal of Dipl.-Ing. Maximilian Heindl’s research is to develop algorithms for an objective assessment of transfer function measurements. Dipl.-Ing.

Peter Müller will deal with the detection of arc fault currents in low voltage switchgears.

In 2008 our institute will again host the following important and interesting events:

On March 5 and 6 we will organize the traditional “High Voltage Symposium Stuttgart” in the Filderhalle in Leinfelden. Its theme will be “Modern Design and Reliable Operation of Components for the Electric Power Network”. This event will kindly be supported by several industrial partners, so the independent and very practical character of the event will be preserved. Due to many requests we will organize an additional exhibition. The detailed program and further information can be found on our homepage www.ieh.uni-stuttgart.de/symposium. We look forward to the presentation of new developments and results and to interesting discussions.

On March 11 and 12, 2008, the seminar “Modern Diagnostics of Power Transformers” in collaboration with VDE will take place again. After a theoretical introduction into the diagnostics of power transformers the participants will learn the handling and interpretation of PD, transfer function and dielectric diagnostic methods by means of practical exercises in our laboratories. On March 13, 2008, we will host together with VDE-ETG the workshop “Materials with Nonlinear Dielectric Properties”. Please find further information on our homepage or on www.vde.com/seminare.

We would like to send our sincere thanks to all our friends and partners, who have contributed in many ways to our success. Especially we would like to thank all organisations and industry partners supporting us by orders and donations. One aim of this annual report is to improve our good relationship with our friends and also to contact new partners.

Our best wishes accompany you in the next year.

Stuttgart, December 2007

Prof. Stefan Tenbohlen

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

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

Institutsleiter / Head of 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>	

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

Wissenschaftliche Mitarbeiter /

Scientific Staff:	M. Sc. Jaquelyn ARAGÓN PATIL	-685-69196
	Dipl.-Ing. Sebastian COENEN	-685-67869
	M. Sc. Denis DENISSOV	-341 2075
	Dipl.-Ing. Markus FISCHER	-685-69197
	Dr.-Ing. Tammam HAYDER (bis 10.4.2007)	
	Dipl.-Ing. Maximilian HEINDL (ab 1.12.2007)	-685-67857
	Dipl.-Ing. Stefan HOEK	-685-67858
	Dipl.-Ing. Maik KOCH (bis 31.10.2007)	
	Dipl.-Ing. Peter MÜLLER (ab 1.4.2007)	-341 2075
	Dipl.-Ing. Heinz REBHOLZ	-685-69194
	Dipl.-Ing. Franz STREIBL	-685-67889
	M. Sc. Rummiya VILAITHONG	-685-69193
	Dipl.-Ing. Andreas WEINLÄDER	-685-67838
	Dipl.-Ing. Dejan VUKOVIC (ab 15.6.2007)	-685-69195
	Dipl.-Ing. René WIMMER	-685-67867
	Dipl.-Ing. Michael ZERRER	-341 2075

Sekretariat /

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

Technische Angestellte /

Technical Staff:	Erwin BECK, Zentralwerkstattleiter	-685-67847
	Marija BERGLEZ, Raumpflegerin	-341 2075
	Metin DEMIRHAN, Mechaniker (ab 1.11.2007)	-685-67847
	Michael HERDTLE, Mechaniker	-341 2075
	Herbert KAUSSEN, Elektrotechniker	-341 2075
	Dieter MAJEWSKI, Mechaniker	-685-67847
	Hartmut RÖNISCH, Elektrotechniker	-685-67856
	Joachim SCHAAF, Elektrotechniker	-685-67863
	Kurt SCHILL, Zentralwerkstattleiter (bis 31.10.2007)	
	Karl SOBING, Elektromeister	-341 2075

Gastwissenschaftler /

Visiting scientists:	Dr. Hengzhen DAI, Dalian/China (1. März bis 31. August 2007)	
	Dr.-Ing. Ebrahim RAHIMPOUR, Iran	-685-68061
	Georg-Forster-Stipendiat (AvH) ab 1.7.2007	

3. LEHRE

3.1. VORLESUNGEN

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Einführung in die Energietechnik II

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

- *Aufgabe und Bedeutung der elektrischen Energieversorgung*
- *Energieumwandlung in Kraftwerken*
- *Aufbau von Übertragungs- und Verteilnetzen*
- *Betriebsverhalten elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme und Kurzschlussstrombegrenzung*
- *Überspannungen und Isolationskoordination*
- *Sicherheitsfragen*

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik I

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

- *Auftreten und Anwendung hoher Spannungen bzw. Ströme*
- *Einführung in die Hochspannungsversuchstechnik*
- *Berechnung elektrischer Felder*
- *Isolierstoffe*
- *Isolierstoffsysteme in Hochspannungsgeräten*

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik II

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

- *Schaltvorgänge und Schaltgeräte*
- *Die Blitzentladung*
- *Repräsentative Spannungsbeanspruchungen*
- *Darstellung von Wanderwellenvorgängen*
- *Begrenzung von Überspannungen*
- *Isolationsbemessung und Isolationskoordination*

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Elektrische Energienetze I

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

- *Aufgaben des elektrischen Energienetzes*
- *Einpolige Ersatzschaltungen der Betriebselemente für symmetrische Betriebsweise*
- *Berechnung von Energieübertragungsanlagen und -netzen*
- *Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze*
- *Kurzschlussströme bei symmetrischem Kurzschluss*
- *Symmetrische Komponenten*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Dr.-Ing. U. SCHÄRLI

Elektrische Energienetze II

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

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

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Dr.-Ing. W. KÖHLER

Hochspannungsprüf- und -messtechnik

Wintersemester, 2 V, für 7. Semester

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

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Dr.-Ing. W. KÖHLER

Elektromagnetische Verträglichkeit

Sommersemester, 2 V, für 8. Semester

- *Einführung, Begriffsbestimmung*
- *EMV-Gesetz*
- *EMV-Umgebung*
- *Allgemeine Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV*
- *Aktive Schutzmaßnahmen*
- *Nachweis der EMV*
- *Einwirkung auf biologische Systeme*
- *EMV im Automobilbereich*

Dipl.-Ing. U. SCHERER

Energiewirtschaft in Verbundsystemen

Sommersemester, 2 V, für 8. Semester

- *Verbundbetrieb großer Netze*
- *Besonderheiten bei der Kupplung von Netzen*
- *Netzführung, Energie-Dispatching und Netzleittechnik*
- *Netzregelung in Verbundsystemen*
- *Elektrizitätswirtschaftliche Verfahren und Kostenfragen*
- *Stromhandel und Marktliberalisierung*
- *Energiewirtschaft bei Erdgas*

Prof. Dr.-Ing. S. TENBOHLEN

Dipl.-Ing. T. RUDOLPH

Schutz- und Leittechnik für Hochspannungsnetze

Wintersemester, 2 V, für 7. Semester

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

3.2. PRAKTIKA

Dr.-Ing. U. SCHÄRLI

Elektrotechnisches Grundlagenpraktikum

Dieses Praktikum ist Pflicht für die Studierenden des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik im 1., 2. und 4. Semester. Auch Studierende der Informatik mit Nebenfach Elektrotechnik nehmen teil. Die insgesamt ca. 60 Versuche wurden von den elektrotechnischen Instituten der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik speziell für dieses Grundlagenpraktikum entwickelt und eingerichtet. Herr Dr. Schärli hat im Auftrag der Fakultät die Gesamtorganisation des Grundlagenpraktikums inne.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

- *Sicherheitsseminar*
- *Schutzmaßnahmen I (Personen- und Sachschutz) nach DIN VDE 0100*
- *Schutzmaßnahmen II*
- *Entladungen bei hohen Spannungen*
- *Erzeugung und Messung von Stoßspannungen*

Dr.-Ing. W. KÖHLER

Fachpraktikum Hochspannungstechnik

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

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

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

3.3. EXKURSIONEN

23. Mai 2007, ganztägig

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

29. Mai – 1. Juni 2007: Besuch mit 30 Hörern der Fachvorlesungen bei

- Vattenfall Europe: Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal
- AMD Dresden: Halbleiterfertigung
- LDIC GmbH, Volkersdorf: Hochspannungs-Messtechnik
- Highvolt AG, Dresden: Hochspannungs-Prüftechnik
- Siemens AG, Nürnberg: Leistungstransformatoren

18. Juni 2007, ganztägig

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

22. Juni 2007, halbtags (im Rahmen des Mentorenprogramms)

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

3.4. STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten vom 1.11.2006 bis 31.10.2007:

Name	Thema
Amissah, Emmanuella Tehia	Entwicklung einer Software zur Anwendung DGA-basierter Interpretationsschemata Development of a Software to apply DGA-based Interpretation Schemes
Díaz Conejero, Iván	Anwendungssoftware für das Hochspannungssystem und den Fehlergasversuchsaufbau Managing Software for the High Voltage System and Fault-gas Experimental Setup
Eidenmüller, Andreas	System zur Lokalisierung von TE durch Laufzeiten in GIS System for Localization of PD by Time Delay in GIS
Förster, Katja	Optimierung eines Systems zur hochgenauen Messung von Zeitdifferenzen im ns-Bereich Optimization of a System for the Highly Exact Measurement of Time Differences
Grimm, Oliver	Vergleich verschiedener Transferfunktionen an Kraftfahrzeugen Comparison of Different Transfer Functions in Motor Vehicles
Hörmann, Daniel	Die innerdeutsche Umsetzung des europäischen Transitausgleichmodells Proposals for a national Inter TSO Compensation in Germany
Hohloch, Jens	Eindimensionale E-Feldsonde mit optimierter Sensorgeometrie One-dimensinal Electric Field Probe with a Geometrically Optimized Sensor Electrode
Hu, Bin	Untersuchung der Fehlergasentstehung in Mineralöl bei Teilentladungen Investigation of Fault Gases in Mineral Transformer Oil Generated by Partial Discharge Application
Jiang, Yuan	Entwicklung eines Umschalters für die sequenzielle Verwendung zweier Platinen und einer Ansteuerstrecke Development of a Switch for the Sequential Use of two Printed Circuits and one Control Line
Kuhn, Hannes	Einfluss der Messverfahren und der Probeentnahme auf die Ergebnisse der Gas-in-Öl Analyse an Leistungstransformatoren Study of the Factors that Influence Oil Sampling and Storage Procedures on the Gas-in-Oil Analysis of Power Transformers

Li, Qiujuan	Kontamination mit Feuchtigkeit in atmenden Transformatoren Contamination with Moisture in Free Breathing Transformers
Ma, Jie	Analyse elektrostatischer Entladungen in gedruckten Schaltungen Analysis of ESD in Printed Circuits
Maakil, Youness	System zur Ermittlung der Signalenergie von TE-Impulsen System for the Determination of the Signal Energy of PD Pulses
Ngamskulrungrroj, Pongstorn	Antennenoptimierung für TE-Messungen in Leistungstransformatoren Optimisation of Antennas for PD Measurement on Power Transformers
Ranger, Thomas	Abstrahlungsverhalten einfacher Kabelbaumanordnungen Radiated Emission of Multiconductor Transmission Lines
Seibold, Robert	Pflanzenöl als modernes, umweltfreundliches Dielektrikum in Leistungstransformatoren Vegetable Oil as New, Environment-friendly Dielectric in Power Transformers
Shen, Qianping	Bestimmung der Eingangsimpedanz beliebiger Schaltungen Characterisation of the Input Impedance of Arbitrary Ciruits
Späth, Christian	Eindimensionale H-Feldsonde mit VCSEL One-Dimensional Magnetic Field Probe with VCSEL
Velasco, Antonio	Weiterentwicklung einer vorhandenen Vektor-Fitting-Software zur EMV-Simulation Improvement of Existing Vector Fitting Software with State of the Art Analysis for EMC-Simulation
Vural, Ayhan	Entwicklung einer FPGA-basierten RS-232-Schnittstellenkarte und einer geeigneten Kontroll- und Steuersoftware zum Einlesen digital-optischer Daten Development of a FPGA Based RS-232 Interface Card to Import Digital-optical Data and an Applicable Check- and Control-Software
Wegst, Wolfgang	Entwicklung und EMV-Simulation gepulster Leistungsregler im Kraftfahrzeug Development and EMC-Simulation of Switching Power Supplies
Yun, Wang	Überwachung des Stufenschalters mit vibroakustischen Messverfahren Vibration Monitoring of Tap Changer
Zhu, Qi	Feuchtigkeitsberechnung in Leistungstransformatoren durch Gleichgewichtsdiagramme und dielektrische Messungen Moisture Calculation in Power Transformers by Equilibrium Diagrams and Dielectric Measurements

Abgeschlossene Studien- und Bachelorarbeiten vom 1.11.2006 bis 31.10.2007:

Name	Thema
Charaf-Eddine, Hasna	Fehler-Simulation an Stufenschaltern Fault Simulation on Tap Changer
Dais, Ansgar	Konzeptstudie: Säuresensor und Wasser-Tagebuch für Leistungstransformatoren Feasibility Study for an Acidity Probe and a Moisture Log Book for Power Transformers
Dinev, Ivan	Simulation der UHF-Wellenausbreitung in Kabelendmuffen zur Optimierung der Teilentladungserfassung Simulation of UHF Wave Propagation inside Cable Terminations for Optimal Partial Discharge Detection
Fischer, Markus	Entwicklung eines Halbleiter Stepgenerators Development of a Semiconductor Stepgenerator
Geyer, Florian	Initialisierung künstlicher neuronaler Netze mit Hilfe der Fuzzy Logik Initialization of Artificial Neural Networks by Means of Fuzzy Logic
Graner, Joachim	Simulation und Messung von Filtern für Hybridfahrzeuge Simulation and Measurement of Line Filters for Automotive Applications
Han, Yibing	Messung der Übertragungseigenschaften von Mehrleiterkabelbäumen Measurement of the Transmission of Multiconductor Cable Harnesses
Heindl, Maximilian	Aufbau und Inbetriebnahme einer digital-optischen Übertragungsstrecke mit neuen Chipsätzen Design and Commissioning of Digital-optical Transmission line with New Chip-Set
Hörmann, Daniel	Entwicklung von Simulationsmodellen in CST Microwave-Studio Development of Simulation Models in CST Microwave-Studio
Hu, Xia	Umrechnung von dielektrischen Messungen im Zeit- und Frequenzbereich Transformation of Dielectric Measurements from Time to Frequency Domain
Kurz, Philipp	Lastflussberechnung mit PowerFactory beim Einsatz von Regeltransformatoren Load Flow Simulation of Electrical Power Networks using PowerFactory
Li, Xue	Aufbau einer Hochspannungsanlage mit einem Baukastensystem Construction of a High Voltage Generation Unit with a Construction Kit

Liao, Jianfeng	Durchschlagsspannung bei Öldruck von 0,1-1,5 bar Pressure Dependence of Breakdown Voltage in Insulation Oil
Misic, Boris	Aufbau einer analogen optischen Übertragungsstrecke Analogue to Optical Transmission
Müller, Peter	Untersuchung der Leistungsdetektoren zur Ortung an GIS Investigation of Power Detectors for PD Localization in GIS
Müller, Peter	Untersuchung von stromschwachen Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen Investigation of Low Current Arc Fault Currents in Low Voltage Switchgear
Ngamskulrungrroj, Pongstorn	Rekurrente Fuzzy-Inferenz-Systeme zur Detektion "raum-zeitlicher" Fehlermuster Recurrent Fuzzy-Inference-Systems to Detect „Spatiotemporal“ Fault Patterns
Pikulski, Dieter	Untersuchung und Aufbau von PwD's zur TE-Online-Lokalisierung an GIS Investigation and Setup of Power Detectors for Signal Processing
Saridis, Anastasios	Aufbau und Vermessung von Targets zur Erfassung steilflankiger ESD-Impulse Construction of Targets for the Measurement of Fast ESD Impulses
Siegel, Henrik	Untersuchung der häufigsten Montagefehler bei Hochspannungsgarnituren Analysis of the Most Frequent Assembly Errors in High Voltage Cable Accessories
Situ, Cuiwen	Verlustfaktormessung bei 0,1 Hz Dissipation Factor Measurement at 0,1 Hz
Wajant, Patrick	Untersuchung der Durchschlagfestigkeit von Transformatorenöl in Abhängigkeit des Drucks (1-100 bar) The Breakdown Voltage of Transformer Oil in Dependence on Pressure
Werner, Dirk	Wasser-Tagebuch für Leistungstransformatoren Moisture Log Book for Power Transformers
Werner, Falk	Entwicklung eines Messgerätes zur Analyse von Phasenverschiebungen Design and Implementation of a Phase Shift Detector
Wölk, Alexander	Untersuchung der Möglichkeit zur Dämpfung der VFTO's in GIS Investigation of the Possibility for Damping VFTO's in GIS
Xu, Kan	Die Dielektrische Antwort von Pressboard unter dem Einfluss der Imprägnierung und des Pressboardtyps The Dielectric Response of Pressboard under the Influences of Impregnation and Pressboard Type
Yu, Huafei	Neuronale Netze für die Prognose der Deckelöltemperatur bei Transformatoren Neural Network for Transformer Top-Oil Temperature Prediction

Zell, Mathias	Entwicklung eines Systems zur Analyse von UHF-TE-Signalen Development of an Analysing System for UHF PD Signals
Zhu, Qi	Die dielektrische Antwort von Pressboard bei unterschiedlicher Temperatur The Dielectric Response of Pressboard at Various Temperatures

4. PROMOTIONEN

■ Zustandsabhängiges, riskobasiertes Asset-Management in der Energieversorgung

Dipl.-Ing. Jozsef Osztermayer

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser
1. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. G. Balzer, TU Darmstadt
2. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung:	05.02.2007

Für die vorliegende Arbeit versteht man unter Risikobasiertem und Funktionsübergreifendem Asset-Management (RB&FÜAM) die risikobewusste Verwaltung von technischen Anlagen während ihrer gesamten Lebensdauer. Die konkrete Aufgabe ist dabei, die betriebsmittelrelevanten Aktivitäten zeitlich und inhaltlich funktionsübergreifend so zu koordinieren, dass die strategischen Unternehmensziele bei minimalen Anlagenkosten erreicht werden können. In der Tat geht es um die optimale Geldmittelallokation unter den Kernprozessen des Unternehmens, welche die Vernetzung von aktuellen risikorelevanten Informationen über das gesamte Anlagenportfolio voraussetzt.

Die wesentlichen Nachteile der traditionellen Asset-Management Ansätze lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ursache-Wirkungskette zwischen den risikorelevanten Anlagendaten und der zugehörigen prozesscharakterisierenden Zielkennzahl (z.B. *Instandhaltungsbudget*) ist für Entscheidungsträger nicht transparent. Der Koordinationsaufwand und die Prozessdurchlaufzeit für die Entscheidungsunterstützung ist unverhältnismäßig groß.
- Die rechnergestützte Überwachung von betriebswirtschaftlichen Prozessindikatoren, die ihrerseits vom Anlagenzustand abhängig sind, ist wegen mangelnder Methodenkompetenz für die Informationsverzahnung nicht möglich.

Um diese Unzulänglichkeiten zu eliminieren, wurde der vorliegende Ansatz entwickelt. Hierbei wird der Anlagenzustand mittels Fuzzy-Logik anhand von aktuellen zustandsrelevanten Messgrößen der fehleranfälligen Anlagenkomponenten online geschätzt und die monetären Konsequenzen des Anlagenzustandes in Form eines Katalogs für Instandhaltungsszenarien formalisiert. Das von den fehlerbehafteten Anlagenkomponenten bzw. der Anlage ausgehende Risiko wird dabei durch den monetären Erwartungswert für die Durchführung eines dem aktuellen Zustand angemessenen Instandhaltungsszenarios berechnet. Als Alternative zur erwähnten Beschreibung des Risikos mit Erwartungswert kann auch die vektorbasierte Methode einge-

setzt werden. In diesem Fall wird das Risiko durch die lineare Kombination des Zustandes und der Wichtigkeit der jeweiligen Betrachtungseinheit abgebildet.

Mit der Erarbeitung einer Überwachungsphilosophie wollte man ein allgemeingültiges Muster bereitstellen, das durch Zuschneiden an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden kann. Dieses Muster ermöglicht die Anlagenüberwachung für zwei Alterungstypen (*Natürliche Alterung und Fehlerbedingte Alterung*) in zwei Überwachungsdimensionen (*Zustandsfortschritt und Alarm*) auszuführen. Mit der Einführung des natürlichen Alterungstypus unterstützt man die lückenlose Anlagenüberwachung für den Fall, dass noch kein fehlerbedingtes Alterungsphänomen zu erkennen ist. Für Leistungstransformatoren mit einer natürlich alternden organischen Komponente wie die Öl-Papierisolierung ist diese Art der Überwachung von großer Bedeutung.

Nachdem der neue Ansatz durch die theoretische Behandlung der relevanten Basisdisziplinen fundiert wurde, wird die Anwendung der erarbeiteten Methode an zwei Fallbeispielen demonstriert. Während im Beispiel bezüglich einer Gruppe von Leistungstransformatoren die vektorbasierte Risikoanalyse eine Anwendung findet, wird das zustandsbedingte Risiko in der Analyse für ein Leistungsschalterportfolio mittels Bildung von entsprechenden Erwartungswerten abgebildet.

Gemäß den Forderungen in der Praxis wurde die verursachungsgerechte Zusammenführung der Zustandsverschlechterung von Betriebsmittelkomponenten durch einen adäquaten Algorithmus, basierend auf der Theorie der Zielkostenrechnung, gelöst. Die Berechnungsvorschrift ermöglicht den Zustandsverschlechterungsgrad jeder Komponente einer zweckmäßig aufgebauten Anlagenhierarchie zu berechnen und damit die Überwachung des Zustandsfortschrittes jeweils auf die zeitliche Verfolgung einer einzigen Zustandskennzahl zu reduzieren. Diese Möglichkeit gewinnt an Bedeutung beim Aufsteigen in der Systemhierarchie. Weil die Kennzahlabbildung durchgängig formalisiert ist, bietet der Ansatz umfassende Möglichkeiten auch für die Ursachenforschung.

Da die weiteren Algorithmen für die anlagencharakterisierenden Indikatoren wie

- Anlagenpriorität für Ersatzinvestition
- Ausfallwahrscheinlichkeit einer Betriebsmittelkomponente
- Finanzielles Risiko für Ersatz bzw. Instandhaltung
- Priorität für Instandhaltung

auf dem relevanten Wahrscheinlichkeitswert für Ersatz, Ausfall und Durchführung des aktuellen Instandhaltungsszenarios basieren, wird der Übergang vom aktuellen Zustandsverschlechterungsgrad zu den erwähnten Wahrscheinlichkeiten diskutiert.

Mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes, dessen Umsetzung durch ein modular aufgebautes Simulink-Modell getestet wurde, kann man eine fundierte Entscheidungsunterstützung für die folgenden Kernprozesse online zur Verfügung stellen:

- Budgetierung von Instandhaltungskosten

- Budgetierung von Kosten für Ersatzinvestitionen
- Zustandsbasierte Schätzung der Restlebensdauer einer Anlage

Die nachstehenden Analysemöglichkeiten ergeben sich durch das AM-Modell:

- Kontinuierliche Risikostrukturanalyse im selektierten Anlagenportfolio
- Simulation der Auswirkungen von geplanten risikominimierenden Maßnahmen auf unterschiedlicher Ebene der Anlagenhierarchie
- Trendbasierte Prognose für die Kennzahlen anhand historischer Daten
- Komponentenbezogene Archivierung von Wissen über die noch nicht vollständig erforschten Fehlermechanismen in Form von Beurteilungsregeln

Um die Praxistauglichkeit des vorgestellten Konzeptes zu demonstrieren, wurden die wichtigsten Anlagengruppen eines jeden Energieversorgungsunternehmens (die Leistungstransformatoren und die Leistungsschalter) jeweils einer Beispielanalyse zu Grunde gelegt. In diesem praktischen Teil der Abhandlung wurde großer Wert auf die Schritt für Schritt Darstellung der Applikation der Fuzzy-Folgerungstechnik und auf die Visualisierung der Analyseergebnisse gelegt. Diese sollen die Akzeptanz des Ansatzes sowohl bei den Entscheidungsträgern als auch beim technischen Servicepersonal sicherstellen.

▪ **Risk Based and Cross Functional Asset-Management**

Dipl.-Ing. Jozsef Osztermayer

Despite the substantial effort made by utilities, in course of implementing the reliability centered maintenance paradigm, the goal to maximize the Return on Assets (ROA) is not yet achieved. The reasons are insufficient modelling of the equipment aging phenomena and the lack of demand oriented condition reporting to different functions in the organization. Asset management models applied until now fail to deal with the stochastic character of equipment condition development, because they neither involve the condition relevant monitoring data on online basis nor are able to process equipment related expert knowledge for condition assessment in a systematic, transparent and simple way. As a result, the process cycle time for data collection usually exceeds the developmental period of business critical failures caused by degradation of assets. The described situation is in particular crucial for management of expensive physical assets as power transformers, whose failure modes may have a development time in a range of a week or even a couple of days. If an event starts to develop it should trigger the planning of several processes (maintenance, procurement, funding etc.) in order to initiate a comprehensive optimization process on the highest system level. The overall objective of the condition based online estimation of asset related risk is the real time cost and risk control of condition sensitive core processes (e.g. maintenance, replacement, financing and depreciation), having

substantial influence on the ROA and consequently on the business profitability as a whole.

The main objective of this thesis is to set up a computer based hierarchical simulation model, which is able to estimate the condition deterioration of equipment components which are prone to fail, in order to determine the system condition on its various hierarchy level and to give proposal for key decision situations. Having assessed the condition deterioration through fuzzy-logic in percentage, then one can derive the assets depreciation in monetary terms, which provides a solid basis for predicting the maintenance and replacement budget. Forecasting the remaining life time of equipments is also supported. In financial records used for strategic planning, fixed assets are usually expressed as the cost of asset minus depreciation, this aspect underlines as well the importance of the precise condition based calculation of asset depreciation.

Accounting for depreciation of fixed assets

Depending on objectives there are two kinds of depreciation approaches regarding the fixed assets. The financial depreciation is a process of assets amortization to spread the cost of acquiring long-term assets over their estimated useful life in order to make sure the nominal maintenance of capital. It will be carried out according to financial policies regardless of the actual assets condition and it serves for assets evaluation e.g. for balance sheet. Contrary to this, the imputed depreciation aims at the substantial maintenance of capital. It should account for actual equipment wear and provide the internal cost accounting with reports on costs induced by assets impairment. The purpose of the latter is to make the financial means available to annual assets maintenance on the most efficient way and to assist the operation management in forecasting the general performance of equipments.

As regards the ability of financial depreciation to assist the comprehensive asset management, disadvantages overwhelm the only advantage characterized by its simplicity. Therefore, assets managers are looking for an imputed depreciation model, which is in opposite to financial depreciation able to map the condition deterioration as a function of condition relevant measurements data delivered by online monitoring devices.

A key figure for actual market value of the equipment in concern have been developed in order to be able to assess the actual equipment performance. It can also help to take decision regarding the question: maintain or replace ?

For estimating the remaining life time the financial depreciation will be compared with the imputed depreciation. The calculation of the imputed depreciation will be carried out by it for two aging types the natural aging and the failure-based aging concurrently. The most dominating of the mentioned types must be taken into consideration by conducting the mentioned comparison, which provides a solid basis to make prognosis for further development regarding the consumption of remaining life time.

Risk management to control uncertainties

The basic indicator characterising the condition of power system and underlying the computation of further control and performance key figures is the condition deterioration in percentage (*assessed by fuzzy-logic*). Parameters for probability of events, like implementing of maintenance scenarios or breakdown of system components, are calculated by experience oriented assumptions based on the current value of assets condition deterioration.

In regard to the quantification of risk, there are two different approaches used in this thesis. The first one is a method based on mapping the risk through assets importance and assets condition deterioration in a Cartesian coordinate system. The second one operates with expected values of damage for anticipated risky events. The choice of the most recommended method for modelling the risk depends on the task to be solved and on the available database at disposal. Examples for the practical deployment of the above mentioned methods will be provided.

Feasibility study: Portfolio analysis for 15 circuit breakers.

The choice for conducting a portfolio analysis of circuit breakers using the risk mapping through expected values lies on the available database making possible to calculate the monetary consequences of equipment breakdown on the basis of not delivered energy.

This study demonstrates the considerable advantage of multidimensional decision support by means of fuzzy-logic. It shows, that relying on the financial risk analysis by the definition of replacement priority exclusively would lead to a sub optimal decision. Although the financial risk indicator allows for a rough assessment of replacement priority a precise priority calculation needs a multidimensional fuzzy algorithm. The deployment of such an algorithm will be given in all details.

In addition, it is of vital importance to support the decision making process by setting up replacement priority for assets as well as the proposal regarding the ranking of previously selected maintenance activities.

Supposing that a catalogue of maintenance activities at disposal and the costs of these measures are known, an example for the fastest financial risk reduction by means of optimal scheduling of those maintenance activities will be demonstrated. The applied method is based on the recurrent calculation of financial risk in assets portfolio characterised by expected value of monetary consequences of equipment breakdown. The ranking procedure is done as following: First the most deteriorated controlled unit of the equipment with the highest risk potential must be repaired. Once this unit has been repaired, the breakdown probability of the related equipment, the priority list in the assets portfolio and the budget at disposal must be updated. The subsequent loops should be carried out until the remaining budget is zero. The visualisation of subsequent steps of the above described procedure will be given exemplarily.

■ **Thermischer Entwurf und Belastbarkeit von Leistungstransformatoren mit natürlicher Ölkühlung**

Dipl.-Ing. Enzo Cardillo

Hauptberichter:

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

1. Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. J. Roth-Stielow

2. Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:

14.02.2007

In elektrischen Energieübertragungssystemen gehören die Leistungstransformatoren zu den wichtigsten und teuersten Betriebsmitteln. Hinsichtlich ihrer Nutzungsdauer (Lebensdauer) werden daher von Seiten der Betreiber hohe Anforderungen gestellt. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, müssen die Hersteller beim Entwurf und der Konstruktion des Transformators die auf die Lebensdauer am meisten Einfluss nehmenden Aspekte besonders berücksichtigen. Hierzu gehören die thermischen Verhältnisse im Transformator, da die Wicklungsleiter nach wie vor mit einer Öl-Papier-Isolation, deren Alterung sehr stark von der Temperatur abhängig ist, der elektrischen Festigkeit Rechnung tragen. An der Stelle der maximalen Temperatur (Heißpunkt) wird die Isolation am meisten beansprucht und altert daher am schnellsten. Die am Heißpunkt auftretende Temperatur wird als Heißpunkttemperatur bezeichnet. Sie bestimmt im Wesentlichen die Nutzungsdauer des Betriebsmittels und ist daher von vorrangigem Interesse, sowohl bei der Auslegung als auch im realen Betrieb des Transformators. Um die Heißpunkttemperatur zu erhalten, gibt es zwei Möglichkeiten: Die direkte Messung mittels optischer Sensoren und die Berechnung anhand eines thermischen Transformatormodells.

In der vorliegenden Arbeit wird die natürliche konvektive Kühlung (Kühlart ON) betrachtet. Zunächst werden einige dem Stand der Technik entsprechende Berechnungsmodelle vorgestellt. Eine herausragende Rolle spielt das auf physikalischen Grundlagen basierende thermische Mehrkörperersatzschaltbild des Transformators, dessen Modellparameter anhand einfacher Messungen in Erwärmungsversuchen bestimmt werden können.

In einem weiteren Kapitel wird auf die unterschiedlichen Wärmeübertragungsmechanismen eingegangen. Dabei stehen die für die praktische Anwendbarkeit wichtigen Formen im Vordergrund. Der Zusammenhang zwischen der Konstruktion des Transformators und den Wärmeübertragungsmechanismen wird beleuchtet.

Die im Transformator am meisten durch Stromwärme beanspruchten Komponenten werden anhand von Versuchsmodellen in Erwärmungsversuchen genauer untersucht. Neben den Wicklungen ist der Verbindungsleiter zwischen Wicklung und Durchführung von Interesse, da er stückweise unterschiedliche Isolationsstärken aufweist. Anhand der Messungen wird ein zweidimensionales Modell zur Berechnung der Temperaturverteilung aufgestellt. Der konvektive Wärmeübergang wird dabei auf unterschiedliche Weisen berücksichtigt. Ein Vergleich zwischen der bishe-

rigen Berechnungsmethode und der hier vorgestellten Methode zeigt das Einsparpotential bei der Bemessung des erforderlichen Leiterquerschnitts.

Der Vergleich der an einer Lagenwicklung anhand von Erwärmungsversuchen gewonnenen Ergebnisse mit einigen thermischen Modellen zeigt, dass die Modellparameter vielfach nicht beliebig universell verwendet werden können ohne dabei an Genauigkeit der Heißpunkttemperaturberechnung einzubüßen.

Am Modell einer Scheibenwicklung werden konstruktive und stoffspezifische Einflussfaktoren auf die thermischen Verhältnisse in der Wicklung untersucht. Dabei wird sowohl der konvektive Wärmeübergangskoeffizient als auch die vertikale Öltemperaturerhöhung in der Wicklung betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl konstruktive Maßnahmen als auch Isolieröle mit unterschiedlichen Stoffwerten beide Auslegungsgrößen beeinflussen.

Ein Vergleich zwischen Erwärmungsmessungen an der Scheibenwicklung und einer thermischen FEM-Berechnung zeigt Erfolg versprechende Ergebnisse. Die Anwendung von numerischen Simulationen zur thermischen Berechnung von Teilkomponenten des Transformators sind von praktischer Bedeutung.

Abschließend werden wichtige Aspekte hinsichtlich der Heißpunkttemperaturberechnung und der Beeinflussung von Leistungstransformatoren im Betrieb erörtert.

■ **Thermal Design and Loading Capacity of Large Power Transformers with Natural Oil-Cooling**

Dipl.-Ing. Enzo Cardillo

Introduction

Large power transformers belong to the most important and valuable assets in power systems. With the liberalisation of the energy market utilities are constrained to adopt the exploitation and the life time of such operating resources close to the requirements of the modified energy market situation. Compared to the situation of recent years operation, the changes in electrical power flow can lead to increased load conditions and transformer loading beyond nameplate rating. It appears worthwhile to pay special attention to this key component to ensure stability and reliability of electrical power supply. Both - network operators and transformer manufacturers - are asked to predict the expected life time of the transformer under the “new” loading conditions. Due to the stressed situation on the world market the manufacturers are forced to increase the maximum utilisation of the transformer without any additional cost increase but at the same level of the transformer’s reliability.

The life time of the transformer mainly depends on the life time of its insulation. In most power transformers cellulose insulation is used until yet. Since the temperature is the dominant factor for the ageing rate of the cellulose molecules there is a strong

interest in the solid oil-paper-insulation temperature determination. Due to the fact that the highest ageing rate appears at the point of maximum temperature there is a particular interest to determine the winding's hottest spot temperature. This temperature is not only important for long term ageing but it is also a limiting factor in real transformer operation. The hot-spot-temperature depends on the instantaneous load of the transformer, the loading prehistory (the dominant thermal time constant of a transformer amounts to few hours), the temperature of the external cooling medium, the winding design and the cooling mode. In general there are two possibilities for the hot-spot-temperature determination. The first possibility is to measure the temperature directly, the alternative one is to calculate it using a thermal model of the transformer.

For transformer manufacturers the calculation of the hot-spot temperature is important for the designing process, since in a short circuit heating experiment, carried out as a transformer type test, the manufacturer has to guarantee, that the allowed temperature limits are not exceeded.

In the present study the natural convection cooling mode is analysed. The main focus is the investigation of the factors taking affect on the internal heat transfer, e.g. the heat transfer from the winding to the surrounding transformer oil. The analysis is based on extensive experimental research on test arrangements. Since the interpretation of the results is based on the physical fundamentals a broad application to similar heat transfer problems, e.g. windings, is given.

Thermal modelling

The common practical solution of hot-spot-temperature determination is the calculation through a thermal transformer model. The input data for such a model is the transformer load and the external cooling medium temperature.

A number of papers have been published proposing improvements of the thermal model from the valid IEC standard [IEC, 1991]. The standard approach for hot-spot-temperature calculation is through using characteristic points temperatures. Such models have been published often. The model from Pierce (1992) is of special interest since it is given in the latest IEEE guide from 1995 as an alternative temperature calculation method.

The main problem is not only to establish the thermal model rather than to define its parameters. They can be defined from general heat transfer theory, from especially provided measurements on a test model or from easy measurements made as a transformer type test.

Since the heat transfer phenomena inside transformer windings are complex there is no universal thermal winding and transformer model available at present. Changing boundary conditions and manufacturing tolerances influence analytic and numerical heat transfer calculations strongly. Many winding types, each with different cooling duct designs, are in use to meet customer requirements and to reach competitive design solutions. Deviations of the oil streaming conditions in a real transformer and

in a setting under which the formulas are established in heat transfer theory also lead to inaccuracies in temperature calculations. Almost each cooling mode requires its unique model. Especially the treatment of natural convection heat transfer phenomena is difficult.

Comparisons between measurements made on real transformers and results obtained from measurements made on test winding arrangements have shown, that thermal model parameters usually can not be applied for other arrangements without deterioration of calculation accuracy.

In order to guarantee a wide range of thermal model applicability the main aspects in the process of establishing the model should be the choice of easy measurable quantities for model parameter determination and the construction of a model which is based as close as possible on the physical heat transfer mechanisms.

Fundamentals of heat transfer and transformer construction

Temperature gradients inside a transformer are the consequence of power losses. In the state of thermal equilibrium in every moment the produced heat, e.g. power losses, has to be transferred from the active parts of the transformer (internal cooling) to the surrounding cooling medium (external cooling). On this way the heat flux has to pass miscellaneous materials and different heat transfer mechanisms occur: heat transfer through conduction (in the solid parts), heat transfer through convection (heat transfer between a solid surface and a liquid in motion and vice versa) and heat transfer through radiation. In most cases of power transformers the heat transfer through radiation is negligible (because of low surface temperatures and small surface area available for radiation compared to the surface area responsible for convection). Whereas the treatment of heat transfer through conduction is easy the case for convection heat transfer is the most complicated one, especially when the fluid motion is caused only by buoyancy forces. This occurs for all cooling modes denoted with ON and AN. Fundamental differences can be found between natural and forced convection heat transfer. A general theory dealing with the determination of natural convection heat transfer coefficients (HTC) α between surface and fluid is given in the boundary layer similarity theory. The fundamental approach is the correlation between dimensionless numbers and the HTC α . To describe the natural convection mechanism two dimensionless numbers are relevant: the Rayleigh number (Ra) and the Nusselt number (Nu). Finally from the Nusselt number the HTC α can be calculated. The advantage of the dimensionless numbers is the applicability of the results to other similar thermal heat transfer problems. The solution of a special natural convection heat transfer problem is given if the functional dependence between the Nusselt number Nu and the Rayleigh number Ra is known. In order to obtain the functional dependency measurements (heat run tests) on appropriate test facilities are necessary.

Since the temperature gradients depend on geometrical data the construction of the transformer is a significant factor taking influence on the HTC α . The thickness of solid insulation, the condition of the heat transferring surfaces, cooling duct arrange-

ments and additional insulation assembly are responsible for the temperature gradients quantity. Hydraulic resistances in the oil circulation loop are slowing down the oil motion and thus reduces the HTC a . Since the physical properties of the liquid cooling medium are involved in the calculation of the dimensionless numbers their influence on the thermal behaviour of the transformer is obvious.

From a simplified analytical examination of an oil circulating loop (through the winding, transformer tank and the radiator) two expressions are derived showing the dependencies of the HTC a and the vertical oil temperature gradient inside the winding ($J_{oil,top} - J_{oil,bottom}$). Based on this results the main influence factors are experimentally analysed with heat run tests on a test winding.

Investigations on a single conductor with different insulation thickness

Conductors used for transformer winding bushing interconnections usually need higher insulation levels compared with the insulation inside the windings. In practice the insulation on short segments of the connecting conductor is several times thicker than the insulation inside the windings. This leads to increased conductor temperature rises. To avoid unacceptable high temperatures, conductors with an increased cross section are used to decrease power losses inside parts with additional insulation.

The normally used design rules assume an infinity length of the additionally insulated conductor. In a number of cases the conductor length equipped with an additional insulation is less than half a meter. In such short conductor segments the heat flow along the conductor is not negligible compared with the heat flow through the conductor insulation. With a two-dimensional thermal model the temperature can be calculated precisely. In such a way, it is possible to determine the minimum cross section leading to acceptable values of local hottest insulation temperature. Due to the convection heat transfer from the surface of the conductor to the surrounding oil the thermal model is non-linear.

The thermal model established is verified in laboratory experiments on a conductor with a cross section of 263 mm^2 and loaded with currents up to 1450 A. Based on the measurements it is possible to improve the formula for the convection HTC a calculation. For the higher insulated part of the conductor the thermal resistance of the additional manually wrapped paper layer has to be increased due to thermal contact resistances and oil layers inside the paper by adoption to the measuring results by introducing an insulation thickness correction factor greater than 1.

A comparison between the results obtained from the one-dimensional and the two-dimensional thermal model of the conductor shows that the simplified calculation is too vague and leads to large cross sections. With the more sophisticated model the required cross section is much smaller. For an adopted conductor hot-spot minus average oil temperature of 23 K according to IEC (1991) a reduced cross-section of the interconnections to 72 % (of the cross-section calculated with the one-dimensional model) is sufficient.

The provided calculation method represents an improvement in design practice and leads to an economical optimal construction of the interconnections.

Measurement technique and calculation of the HTC α of transformer windings

To investigate the thermal behaviour of transformer windings it is necessary to know the average winding copper temperature. The determination of the average copper temperature by measuring local temperatures requires a high amount of sensors installed inside the winding. In order to avoid an expensive installation of a large number of local temperature measuring sensors inside the winding the continuous average copper temperature on-load measurement method for a mono phase winding is applied. In the literature this method was originally developed for measurements on real transformers during the short-circuit heating test.

The method is based on a superimposed direct measuring current to an alternating load current. The winding is loaded with the alternating load current in the main circuit. The measuring direct current is provided from a DC current source. The DC circuit is coupled to the main circuit by a coupling resistance which is continuously loaded by the required alternating load current and the direct current component. Reactive power compensation has to be applied in order to reduce the load of the alternating power supply and the load of the coupling resistance.

The winding's resistance is equal to the ratio of DC voltage drop and DC current through the winding. It is measured using a power-analyser. Consequently the actual copper temperature of the winding is computable from the initially measured winding resistance in the cold state before starting the heating experiment and the actual winding resistance. The average HTC α of the winding depends on the temperature difference between the winding surface (paper-insulation surface) and the average oil temperature in the winding and the heat flux density. The temperature on the winding surface is equal to the average copper temperature reduced by the amount of temperature drop through the paper-insulation due to thermal heat conduction.

The measurement of local temperatures on the winding and in the oil close to the winding and inside the tank is easy to perform with resistance temperature detectors (RTD's) because the experiments are carried out with voltages less than 500 V.

Investigations on a test winding

The thermal behaviour of natural convection oil cooled transformer windings is investigated on a test winding arrangement. Investigated is a layer winding and a disc type winding. With a number of heat run tests the following results have been obtained:

Layer winding

The heat run tests made with the layer winding are used for two analyses. The evaluation of the HTC α shows the dependency of the heat flux density – with increasing heat flux the average HTC α increases. For the maximum heat flux density of 220 W/m² the HTC α amounts to $\alpha = 27 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Since this winding design is comparable with the investigated types discussed in literature, the thermal model parameters can be analysed and compared. From local characteristic temperature measurements at dedicated points on the winding surface and inside the vertical cooling ducts the individual model parameters are calculated. The comparison of the results obtained from the measurements and those calculated with the parameters shows, that it is not possible to define a unique set of parameters which delivers a high precision of temperature gradient calculation. An other influence is caused by different oil streaming conditions between windings inside a real transformer and test windings positioned autonomously in a tank.

Disc winding

Extensive measurements on a disc winding type are performed to investigate the influence of the following factors to the average windings HTC a and the vertical oil temperature gradient ($J_{oil,top} - J_{oil,bottom}$) inside the winding:

- the heat flux density
- hydraulic resistances in the oil circulating loop
- physical properties of the transformer oil
- vertical radiator position

With increasing heat flux densities also the average HTC a increases. This result is based on the temperature dependency of the oil driving force responsible for the convective heat transfer expressed by the Rayleigh number. The general applicable result is given by the relation between the Rayleigh number and the Nusselt number wherewith the HTC a is calculable for other similar windings.

It is known from design and manufacturing practice that the thermal behaviour of similar windings installed in different transformers may be different. This phenomenon especially appears in natural oil cooled (ON) windings of high voltage transformers. One reason is the difference in the windings insulation level and thus consequently higher hydraulic resistances in the oil circulating paths. It is obvious that for the same heat flux density but increased hydraulic resistance the HTC a is reduced. This result is caused by a minor oil velocity in the cooling ducts due to an increased hydraulic resistance leading to reduced oil mass and heat transfer through the entire winding. Since the oil retention time in the winding is increased with higher hydraulic resistances also the vertical oil temperature gradient ($J_{oil,top} - J_{oil,bottom}$) increases. A comparison of the vertical temperature gradient between the results obtained from different top oil temperature determination are obvious since the directly measured one represents a mixed temperature of the hot oil streaming out of the winding and the surrounding top tank oil of lower temperature.

The impact of different transformer oil parameters on the windings heat transfer capability is analysed with two transformer oil types having significantly different oil viscosity. As the values representative for the thermal phenomena in transformers, the following characteristic temperature differences are analysed: average winding minus average oil temperature difference (Δq_{wo}), the vertical oil temperature gradi-

ent (Joil,top - Joil,bottom) and the oil in the radiator logarithmic mean temperature difference (LMTD). The clearest differences appear in the vertical oil temperature gradient whereas only slight differences appear in the temperature rise of the radiator logarithmic mean temperature difference. Comparing the temperature gradients of the oil inside the winding and the oil inside the radiators it can be seen that the increasing difference (with increasing heat flux density) is the consequence of an increasing oil by-pass – the cold oil exiting from the radiator flows near the winding directly to the top of the tank.

Thermal calculations using finite element method based software

The thermal behaviour of the natural oil cooled transformer disc type winding is investigated by means of the finite element method (FEM) software ANSYS. In order to avoid unrealistic boundary conditions the simulations describe the experimental set-up as close as possible. For that purpose it is necessary to model the test winding and the complete test set-up (tank with radiators). The external heat transfer from the oil to the ambient air through the heat exchangers is simplified modelled by a uniform heat transfer coefficient on the radiator surface. In order to hold the size of the simulation model in a manageable range some simplifications are introduced: two-dimensional axisymmetric coordinate system, the winding disks are modelled as a solid body, all spacers and the steel walls of the tank and the radiators are omitted.

The applied heat flux density (load) of the winding is assumed to be homogeneous. The simulations are carried out with two different heat flux densities according to the correspondent experiments. The evaluation of the simulations are made by a comparison of calculated and measured temperature values, such as top oil and bottom oil temperature in the tank, the vertical oil temperature gradient in the winding and the average winding copper temperature. The deviations in almost all of the calculated and measured temperatures are in the range of less than 3 K, only for the case of higher applied heat flux density the deviation in the bottom oil temperature amounts 5 K. The pragmatic procedure of total arrangement modelling shows that in respect of the computational time nowadays the applicability for total transformer modelling is not reasonable. To establish designing rules for small parts of transformer assembly like winding cooling duct arrangements and heat exchangers the method is of trend-setting interest.

Hot-spot-temperature calculation under real transformer operation

During real transformer operation with variable load and variable cooling medium temperature it is very rare that the transformer resides in thermal steady state. Since for the transient hot-spot-temperature calculation there also exists no exact thermal model the attempt to calculate it by simplified assumptions is commonly made. In [IEC, 1991] the calculation is treated by approximating any load diagram by step functions. Another attempt is made in the new IEC 60076-7 committee draft 14/403/CD, where the transient temperature calculation is based on an introduced time dependent function which is assumed to be constant for a certain transformer construction, e.g. transformer type. Since the character of heat transfer is non-linear

it is obvious that this function is not constant. With the model from Radakovic (1997) it is possible to calculate the temperature in discrete time steps. For that purpose it is necessary to know the initial temperature value.

Transformer long-term operation strategies

To take influence on the operation of a transformer under real conditions the only possibility is through the external heat exchangers operation mode. Through an intelligent fan control system the heat exchangers heat transfer capability can be controlled in such a way that actual temperature values, especially the top oil temperature, are kept constant. Additionally other criteria like overload capability and long-term ageing can be considered in order to guarantee an economical operation of the transformer. A FUZZY-Logic based control algorithm is convenient to fulfil this requirements.

Conclusions

Based on extensive measurements on arrangements examined in laboratory heat run tests the thermal behaviour of thermally high stressed assembly in large power transformers was detailed analysed for the natural oil cooling mode. For a common problem of the winding bushing interconnection design a two-dimensional thermal model for the connecting conductor was established. The model allows to determine the techno-economical optimal conductor cross section so that the temperature limit in the critical parts of higher insulation level will not be exceeded. Considerable measurements have been performed on a test winding facility. For the layer winding the measurements have been used twofold. With a number of local measured copper and oil temperatures the results have been compared with two state-of-the-art thermal models. As a main result it can be concluded that the model parameters can not be universally used without deterioration of temperature calculation precision. Another evaluation of the results deliver the average heat transfer coefficient of the winding, using the fundamental correlation of heat transfer theory expressed by the Nusselt number. For the disc winding numerous factors influencing the heat transfer capability of the winding are analysed successively. The results show the impact of each of the factor to the average heat transfer coefficient and the vertical oil temperature gradient. The comparison of results obtained from heat run tests and the appropriate numerical simulations demonstrate the advantage using such calculation methods. The main advantage is given for certain transformer parts simulation, e.g. winding parts and cooling duct arrangements. The use for practical industrial transformer winding construction procedure is not of high relevance so far since the simulation time of total complex arrangements is still too high. Finally important aspects for a real transformer operation have been analysed: online calculation of the hot-spot-temperature, limitations during a transformer operation and long-term operation strategies. Associated with long-term operation strategies a multi-criteria Fuzzy-logic based heat exchanger fan control algorithm was presented.

■ **Entstehung und Ausbreitung leitungsgeführter Störsignale im Kraftfahrzeug**

Dipl.-Ing. Martin Kull

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser
1. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. F. Landstorfer
2. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen
Tag der mündlichen Prüfung:	08.11.2007

Moderne Fahrzeuge besitzen eine große Zahl von elektrischen und elektronischen Verbrauchern, die in sämtlichen Bereichen des Fahrzeugs zum Einsatz kommen. Elektronik findet man bei Komfortfunktionen (Sitzverstellung, Fensterheber, Klimaanlage,...), bei der Antriebssteuerung (Motor- und Getriebesteuerung,...), im Telematik- und Multimediabereich (Mobilfunk, Radio, Fernsehen, Navigation,...) sowie bei Sicherheitseinrichtungen (Anti-Blockier-System ABS, Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP, Airbag,...). Der Wandel in den letzten fünfzehn Jahren von einfachen, über Schalter und Relais gesteuerten Einzelverbrauchern zum vernetzten Fahrzeug, bei dem die Verbraucher untereinander kommunizieren können, brachte viele Vorteile für den Endverbraucher, also den Fahrer, der den Alltag dadurch komfortabler, sparsamer, umweltverträglicher und sicherer bewältigen kann.

Allerdings erfordert die steigende Zahl der elektrischen und elektronischen (e/e) Systeme auch immer aufwändigere Prüfungen und Untersuchungen, um einen fehlerfreien Betrieb gewährleisten zu können. Seit einigen Jahren lassen Meldungen in sämtlichen Medien den Eindruck aufkommen, dass die komplexe Elektronik der Fahrzeuge durch die Hersteller nicht mehr ausreichend beherrscht wird – und das, obwohl gleichzeitig Statistiken heutigen Fahrzeugen eine höhere Zuverlässigkeit bescheinigen.

Typischerweise werden die Systeme im EMV-Bereich (Elektromagnetische Verträglichkeit) zahlreichen Prüfungen unterzogen. Ein wesentlicher Teil dieser Tests beurteilt feldgebundene Störgrößen. Die elektrische Feldstärke dient als Maß bei der Untersuchung der Störfestigkeit und der Störaussendung eines Gerätes. Ebenso kommt die Funkstörspannung, gemessen am Anschluss einer Antenne oder an Netznachbildungen, zum Einsatz. Störspannungen oder -ströme auf Leitungen werden mit Koppelzangen gemessen, oder es wird die Störfestigkeit durch Einkopplung auf die Anschlussleitungen untersucht. All diese Prüfungen werden normalerweise im Frequenzbereich durchgeführt.

Der größte Teil der Untersuchungen, der sich mit der Störaussendung eines Fahrzeugs im Frequenzbereich befasst, betrifft die Störung von Funkdiensten, die im Fahrzeug und in seiner Umgebung genutzt werden. Denkbare Störungen sind Pfeifen und Knacken im Radio oder Sprechfunk oder Bildstörungen im Fernsehen.

Bei Störfestigkeitsprüfungen im Frequenzbereich ist der umgekehrte Weg von Bedeutung. Hier werden Störungen durch externe Sender von Rundfunk, Fernsehen,

Sprechfunk, Mobilfunk und anderen Sendern nachgebildet, indem ein möglichst großer Frequenzbereich in kleinen Schritten von wenigen Kilohertz bis zu einigen Megahertz überstrichen wird, wobei bei jeder Prüffrequenz eine gewisse Zeit eingestrahlt wird.

Im Gegensatz dazu beschäftigen sich Prüfungen mit Impulsen auf den Zuleitungen der Verbraucher hauptsächlich mit dem sicheren und zuverlässigen Betrieb des Fahrzeugs unter dem Einfluss der vom Fahrzeug selbst generierten Störungen. Die Prüfpulse sollen möglichst alle im Fahrzeug auf dem Kabelbaum auftretenden Störungen nachbilden, die zum Beispiel beim Schalten von Relais, durch den Betrieb von Elektromotoren oder durch bestimmte Fehler im Bordnetz entstehen und aufgrund ihrer Charakteristik zu Störungen der Bordelektronik führen können. Die entscheidende Einschränkung dieser Prüfungen ist die ausschließliche Ausbreitung der Impulse auf den Leitungen.

Durch die stetige Weiterentwicklung sind in den letzten Jahren Verbraucher mit zusätzlichen Störpotentialen hinzu gekommen, die es zum Zeitpunkt der Festlegung der bisherigen Prüfpulse in der heutigen Form nach DIN 40839 oder ISO 7637 im Jahre 1990 noch nicht gab. Die Prüfpulse und -aufbauten dieser oder ähnlicher Herstellernormen werden demnach seit dieser Zeit praktisch unverändert für die Prüfungen eingesetzt.

Heute findet man zwei bedeutende neue Kategorien von Störern in Fahrzeugen. Die erste Gruppe beinhaltet zahlreiche PWM-Signale (Puls-Weiten-Modulation) zur Leistungsregelung von Antrieben (Lüfter, Fensterheber, usw.) oder zur Steuerung der Heizleistung bei Sitz- oder Scheibenheizungen. Diese Signale verursachen zwar meist Störungen mit geringen Amplituden auf den Leitungen des Bordnetzes, aber durch ihre Regelmäßigkeit ist ebenfalls ein gewisses Störpotential gegeben.

Xenon-Scheinwerfer gehören zur zweiten Gruppe „neuer Störer“, obwohl sie bereits seit einigen Jahren verwendet werden. Die Hupe hat eine ähnliche Charakteristik, was die ausgesendeten Störungen betrifft und wird deshalb ebenso dieser Gruppe zugeteilt. Das Störpotential dieser „neuen“ Störer liegt nicht unbedingt in der Impulsform begründet, da diese den Burst-Impulsen nach ISO 7637 sehr ähnlich ist. Es ist vielmehr die Neuartigkeit der Verbraucher, die immer mehr aus einer Kombination aus empfindlichen Kontroll- und Kommunikationsschaltkreisen und Leistungselektronik-Baugruppen besteht, die auf der gleichen Platine - oder zumindest im gleichen Gehäuse - untergebracht sind. Teilweise sind diese Baugruppen auch durch Leitungen voneinander getrennt, was eine Abstrahlung oder Einkopplung von Störsignalen auf ganze Systeme ermöglicht, was durch keine der bisherigen Prüfungen abgedeckt wird.

Die vorliegende Arbeit erfasst einen großen Teil der in heutigen Fahrzeugen verbauten Verbraucher und kategorisiert diese bezüglich verschiedener Kriterien wie Zugehörigkeit zu Standardprüfpulsen oder zu Gruppen neuer Störer. Zahlreiche Messungen an mehreren unterschiedlichen modernen Fahrzeugen, unter anderem auch an 42 V-Bordnetzkomponenten zukünftiger Fahrzeuggenerationen, dienen als

Grundlage dieser Einteilung. Der „Impulskatalog“ soll dem Fahrzeughersteller einen umfassenden Überblick über die Störquellen geben und als Grundlage bei der Entwicklung dienen. Zusätzlich werden auch Erkenntnisse über die Ausbreitung der Impulse auf dem Kabelbaum beschrieben, die bei Neuentwicklungen zur Vorhersage des Störpotentials genutzt werden können. Berechnungen dazu können mit einfachen Spice-Simulationsmodellen durchgeführt werden. Zwei dieser Modelle für aktuelle Fahrzeuge werden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt, wobei die Ergebnisse auch ohne großen Aufwand auf Neuentwicklungen übertragen werden können, da hier nicht der genaue Störpegel gesucht wird, sondern die grundsätzliche Ausbreitungsfähigkeit einer Störung geklärt werden soll.

Da die bisherigen Prüfimpulse nach ISO 7637 auf grundlegenden Erscheinungen beruhen, decken diese noch den größten Teil der bei den Messungen aufgetretenen Impulse ab. Neu hinzugekommene Störer (Xenon-Licht, PWM-Signale), neue Ausbreitungswege und neue Kopplungsmechanismen sollten jedoch in Zukunft bei diesen Prüfungen berücksichtigt werden. Wichtige Merkmale dieser Erscheinungen werden deshalb in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Ergänzt werden diese Daten mit Vorschlägen für Prüfaufbauten und die Erzeugung dieser neuen Prüfimpulse und allgemeinen Regeln, die bei Messungen – speziell im Kfz-Bereich – beachtet werden müssen, um zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Basierend auf den bei den Messungen gewonnenen Erfahrungen wird die Entwicklung und der Aufbau eines für den Kfz-Bereich optimierten Messsystems beschrieben, welches den Ablauf von EMV-Untersuchungen vereinfachen und beschleunigen kann. Durch die potentialfreie und störteste Messwerterfassung und -übertragung werden mögliche Fehlerquellen beim Messaufbau reduziert. Die größere Zahl an Eingangskanälen reduziert die Messzeit im Vergleich zu Messungen mit üblichen Digitalspeicheroszilloskopen und die teilweise automatische Auswertung sowie die einfache Datenübergabe an andere Computer verringern ebenfalls den Aufwand bei der Entwicklung und Überprüfung der Fahrzeugelektronik.

■ **Generation and Propagation of Conducted Disturbances in Motor Vehicles**

Dipl.-Ing. Martin Kull

Modern passenger cars are equipped with a lot of electric and electronic devices which are used for many different purposes. There are comfort functions like power windows, power seats, air condition, power train systems (engine and gearbox control), telematics, multimedia and safety systems like Radio, TV, Navigation, Anti-Blocking System ABS, Electronic Stability Program ESP or Airbags. Many formerly mechanical functions are replaced by electric systems with high power demands.

The last 10 to 20 years brought an enormous progress from simple electric drives, heatings or lights which were operated by mechanical relays and switches to modern electronic systems connected by networks. This process made the handling of vehicles easier, safer and far more comfortable. As a result of this development a lot of new problems emerged however which should be eliminated before production is initiated. Customers generally do not accept bugs in the electronic systems.

Many reports in the media showed that not all faults have been found early enough, whereas studies discovered that today's cars are more reliable.

All electric and electronic systems are tested in EMC labs before they are built into a car. Many tests are applied in the frequency domain. They ensure that a device does not disturb external or internal receivers for TV or radio or other broadcasting systems. Additionally, the devices must withstand high external electromagnetic fields, generated by radio or TV stations or mobile phones and their base stations. Most of these tests cover the undisturbed function of transmission of signals through the air.

Another important part of the tests are the test pulses for automotive devices described in [ISO7637] or comparable standards of automotive manufacturers. The devices must not create pulses higher than those specified in these standards and the devices have to work without failure during the application of the test pulses. The main difference to the tests in the frequency domain is that the pulses are generated in a car and only disturb the systems of the same car. There is no interaction with other vehicles or other electric or electronic systems.

Technological progress brought a lot of new devices with a totally different behavior into cars. The tests in the frequency domain are still valid for these devices, because a TV or radio station still sends in the same manner as it did 20 years ago. New external sources of disturbances like cellphones or digital broadcasting systems lead to new tests with pulse modulated signals, but disturbing pulses created by the car itself were not investigated that intensively in the last few years.

These changes led to the main question: Are there any new phenomena which are not covered by the more than fifteen year old test pulses?

Measurement of fast transients

The first step in the present study is the measurement of all transient signals generated by electric and electronic devices in four different cars. Three of them are of the same type but with different configurations (different engines, different years of construction, one car with 12 V and 42 V supply system). The fourth car has a two-battery supply system with two independent 12 V batteries.

The measurements show that the amplitudes of the pulses of the devices at their connectors to the wiring harness are clearly lower than allowed by the standards of the automotive manufacturers. Higher levels occur only in the 42 V prototype, but the development of this device is not yet completed. This means there is a sufficient safety margin between the test pulses and the real disturbances. Exceptions are

battery faults and the moment the engine is started. Real pulses of these two types of signals look almost the same in the whole car and have the same levels as the test pulses. These are very slow actions and no damping occurs on the lines of the wiring harness. The amplitudes of faster transients are reduced by the impedance of the lines and by capacitors connected to the supply lines. Most of the measured pulses are covered by the ISO-test-pulses if amplitudes and rise times are considered.

Two new groups of signals were found. First there are a lot of pulse width modulated signals (PWM) in today's cars. They are used for heatings, power supplies and power control of electric drives. The amplitudes and frequencies of these signals are in the range of the ripple on the supply lines caused by the generator. Some signals have a wider frequency spectrum because of the rectangular or trapezoidal shape of the pulses compared to the rectified sinusoidal shape of the output signal of the generator. The second group of new signals includes the horns and Xenon-lights. They generate very fast transients with the shape of damped sinus signals. The frequencies or rise times are similar to the burst signals of ISO 7637 and are influenced by the length of the supply lines and the impedances connected to the lines. These pulses cannot be handled as an exception any more, as it was once done with the horns, as they cause some problems in spite of their similarity to the burst signals.

All "old" and "new" pulses can be generated with today's arbitrary generators and pulse amplifiers, which are already in use in most EMC labs. Only some software modifications are necessary to get the new pulses.

However, as the measurements show that none of the "new" pulses differ too much from the known test pulses, there must be another effect that leads to malfunctions in successfully tested devices. The main problem while testing new devices with old tests is the missing of an adequate environment to the device under test. Only parts of the wiring harness are used. The impedance of the lines and the power source differ from the real situation in a car although it is in accordance with the standard. In addition, the communication on the network connections is not comparable to a real car in operation with its uncountable amount of different states. All these limitations lead to an insufficient test of the devices during development.

Impedances and simulation of the wiring harness

The second part of this work is the investigation of the impedances and capacitances at the supply lines to get an overview of the properties of the wiring harness and to get data for a simple simulation circuit of this part of the electric system of a car.

The high capacitances at the supply lines of 20 to 50 mF in a modern car of the upper class help to reduce the propagation of fast transients compared to former vehicles. The high values result mainly from the high number of electric and electronic devices and their input filter networks. The advantage of the high capacitances is relativised a little bit by the shorter distances between the devices and their great number. The battery also helps to reduce the voltage ripple on the supply lines by a factor of about two compared to the disconnected battery when the

system is powered by the generator only. The influence of the battery is mainly in the lower frequency range up to 100 kHz where the ripple voltage caused by the generator and pulse modulated signals form the main part of the disturbances.

For the measurements and calculations the supply system of each car is divided into five to seven subnetworks which can be separated in the real car by disconnecting some main lines or fuses. The parameters of these subnetworks are measured and calculated by the use of alternative values, if necessary. Capacitances, for example, cannot be measured directly, but they can be calculated from measured current and voltage signals when switching on the supply voltage. Simulation circuits for both types of cars investigated in this work are developed. These models can be used for the calculation of inrush currents and pulse propagation on the main supply lines. The knowledge of the inrush currents becomes important as today's cars get more and more power switches for parts of the harness in order to shut down the supply voltage of unused devices when the car is parked. These switches have to handle currents up to 500 A and it is necessary to have an indication for this value at an early design stage. The simulation models are easy to handle and can be adapted to new developments without effort because they represent only the main lines in detail. All other lines and devices are combined to a lower number of capacitors and the appropriate lines.

The simple simulation circuits are tested by a comparison of their results with the measurement results. Especially at lower frequencies up to 1 MHz or rise times of 1 μ s or slower the calculated results were acceptably good and the propagation of transients on the main lines of the wiring harness can be predicted sufficiently accurate. Faster pulses show a higher attenuation at the calculations than at measurements in a car. This comes from the missing capacitive and inductive coupling between the lines and from the missing direct coupling of fast transients to the measuring cables in the simulation circuit.

New potential free multi-channel measuring system with high immunity level

In addition to these investigations a third part of this work deals with the development and production of a new measuring system, optimized for automotive EMC tests.

Most of the signals and pulses that occur in a modern passenger car are in the range of millivolts up to some hundreds of volts at rise times and durations of nanoseconds up to seconds or minutes. Furthermore, there are currents of milliamps up to hundreds of amps. All of these signals can be measured with standard digital storage oscilloscopes (DSOs). Current probes or shunt resistors have to be used for the measurement of currents. Some limitations of DSOs impede their unrestricted use during EMC tests. First, none of the commercial devices can handle field strengths of some hundreds of volts per meter without failures or damages. Secondly, the number of input channels is in most cases limited to four and all of the inputs use a common ground potential – this generally prevents the use of shunt resistors. The third limitation is based on the fact that only one channel can be used as a trigger source. This means that a signal is only captured properly if the user has chosen the correct

trigger source before the measurement started. This is almost impossible if an unknown source of interference should be found.

All of these restrictions can be neglected by the newly developed measuring system. There are eight input channels in the standard configuration. All of them can be used as a trigger source at the same time. The system consists of four transmitters with two inputs and one digital or four analog receivers. The two inputs of each transmitter use the same ground potential, but the transmitters and the receiver(s) are potential free among each other. The battery powered transmitters digitize analog signals in the range of DC to about 10 MHz, which is sufficient for many applications. Then the signal is serialized and transmitted to the receiver by an optical fiber. The upper frequency limit is given by the fastest digital I/O-board for standard personal computers available at the moment, which can handle data rates up to 65 MS/s for each of the eight input channels. The digital receiver is based on a small PC with a built-in digital I/O board for the storage and analysis of the data. An internal hard disk enables the storage of thousands of measurements. Serial, USB, network and Firewire interfaces make it easy to share the data with colleagues. The 12V power supply allows an easy mobile use of the system, even during test drives. If eight input channels are not enough, the system can be extended to 16 or more channels by using two or more digital I/O-boards and the appropriate number of transmitters.

Analog receivers can be used to retrieve the signal of the transmitter input for further use outside the EMC test chamber. A system of transmitter and analog receiver (optical link) can achieve analog bandwidths of up to 50 MHz with today's technologies at reasonable costs and according to the demands on mobile use. All of the new devices are built into shielded housings and can be used at high field strengths almost without any limitations. An important feature of the transmitters to achieve this, is the use of internal and external low pass filters at the inputs. These filters are necessary as anti-aliasing filters for the analog to digital conversion and to prevent the inputs from being damaged by the extremely high voltages on the lines that occur during EMC tests. A wide range of filters between 100 kHz and 50 MHz with low reaction to the device under test has been developed to get the best adaption to all measurement situations.

Comparisons between measurements with DSOs, the new test system and the faster optical links show that the new potential free measuring systems can help to reduce measuring errors caused by the setup. The influence of the measuring system on the device under test is much lower due to the shorter measuring cables and the potential free optical transmission. The coupling of fast transients into the cables is reduced and as a result of the missing common ground there are no equalizing currents on the shielding of the measuring cables caused by the voltage drop on the body of the car. Due to the potential free optical link, shunt resistors for the measurement of currents can be used very easily as well.

Conclusion

The measurements show that all pulses and signals that occur in modern passenger cars do not differ significantly from the well-known test pulses of [ISO7637] or other standards of the automotive industry. Modern test pulse generators can be adapted easily to all shapes of pulses discovered during the measurements. The bigger problem is the definition of an adequate test setup that provides a “real world” environment for the device under test with the same impedances and the same data traffic as the device is faced with in a real car.

Additional investigations and an exchange of experiences between different companies are necessary to gather enough data for a new definition of the test parameters. Some parameters like inrush currents or the propagation of “new” pulses can be calculated by the use of simple simulation circuits. This can be done at an early design stage and helps to pre-estimate the influence of new devices on the electric system of a car.

Furthermore, the newly developed multi-channel measuring system and optical links simplify measurements during EMC tests. They are used to reduce measuring errors and allow measurements at high disturbance levels.

- **Transiente Öldruckmessung zur Diagnose der Wicklungseinspannkkräfte von Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Alexander Kraetge

Promotion an der TU Berlin

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Kalkner

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:

09.11.2007

- **Der Einsatz von Metalloxid-Überspannungsableitern als Sternpunktschnellerder**

Dipl.-Ing. Manfred Hudasch

Promotion an der TU Darmstadt

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

Mitberichter:

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

Tag der mündlichen Prüfung:

17.12.2007

5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Zustandsbeurteilung und Schutz von Betriebsmitteln

Der Betrieb der Übertragungsnetze über Bemessungsgrenzen und projizierte Lebensdauer der Betriebsmittel hinaus bedingt eine genauere Überwachung des Betriebszustandes, um die Versorgungssicherheit weiter zu gewährleisten (Life Cycle Management). So werden zum einen die für die einzelnen Betriebsmittel notwendigen Diagnoseverfahren entwickelt und verbessert, um z. B. die Restnutzungsdauer vorhersagen zu können. Zum anderen werden anlagenübergreifende Instandhaltungsstrategien entwickelt (Asset Management).

Weiterhin erfordert der vermehrte Einsatz von Mikrorechnern für den Schutz und die Überwachung von Betriebsmitteln die Entwicklung und Analyse von Algorithmen, die speziell auf die Digitaltechnik zugeschnitten sind. Am Institut wurden in den letzten Jahren adaptive Verfahren für den Schutz von Freileitungen, Kabeln und Transformatoren entwickelt. Momentan werden neuartige Methoden zur Überwachung von Transformatoren und SF₆-Anlagen entwickelt.

Hochspannungsprüf- und -messmethoden

Am Institut werden moderne Messmethoden zur Erfassung hoher Stossspannungen und schnellveränderlicher elektromagnetischer Felder untersucht und weiterentwickelt. Besondere Schwerpunkte sind Untersuchungen zur Genauigkeit von Hochspannungsmessungen und die Erfassung der Messgrößen mittels digitaler Messgeräte mit eingebauter Intelligenz. Zu einem Schwerpunkt hat sich in den letzten Jahren die Teilentladungs-(TE)-Messtechnik entwickelt. Wir beschäftigen uns hier vor allem mit fortschrittlichen Verfahren der Störgrößenunterdrückung, mit der akustischen TE-Messtechnik und mit der UHF-Methode zur Erfassung und Ortung von TE.

Gasförmige Isolierstoffe

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird seit längerem versucht, das reine SF₆ als Isoliermedium in metallgekapselten gasisolierten Schaltanlagen (GIS) durch SF₆-Mischungen und alternative Isoliergase zu ersetzen. Für die Auswahl eines umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Gases sowie für die dielektrische Auslegung der GIS sind Schott- bzw. Stützisolatoren von großer Bedeutung. So wird an Modellanordnungen mit typischen Fehlstellen die elektrische Festigkeit von verschiedenen Gasgemischen untersucht. Weiterhin ist für technische Isolieranordnungen die Kenntnis des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die

RESEARCH ACTIVITIES

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

Monitoring and Protection of H.V. Apparatus

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

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

High-Voltage Test and Measurement Techniques

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

Gaseous Dielectrics

Since some years for ecological and economical reasons it is tried to replace pure SF₆ as insulating gas in gas insulated switchgear (GIS) by SF₆ mixtures or other insulating gases. For the classification of a environment compatible and economical insulating gas and for the dielectric dimensioning of GIS the performance of the support insulators used in GIS is quite essential. For this reason the influence of typical surface defects on the dielectric strength of different gas mixtures has been investigated. Also knowledge of the influence of atmospheric conditions on the dielectric strength of technical insulation design is very important. Using model test

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

Arbeitsgebiet: Elektromagnetische Verträglichkeit

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren einer der wesentlichen Schwerpunkte. Begonnen haben diese Aktivitäten mit der Erzeugung und Messung elektromagnetischer Feldimpulse mit extrem hohen Amplituden und sehr kurzen Anstiegszeiten. Dabei stand die Nachbildung von NEMP, LEMP und die Simulation von Trennerschaltungen in SF₆-Anlagen im Vordergrund. Neuere EMV-Forschungsarbeiten befassten sich mit schnellen Emissionsmessverfahren im Zeitbereich (FEMIT: **F**ast **E**mission **M**easurement **i**n **T**ime Domain) und mit der Modellierung und messtechnischen Untersuchung von elektrostatischen Entladungen von Kunststoffoberflächen.

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

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

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

Electromagnetic Compatibility

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

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

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

■ Untersuchung der Fehlergasentstehung unter elektrischer Beanspruchung in Leistungstransformatoren

Jackelyn Aragón-Patil, M.Sc.

Eine große Anzahl der eingesetzten Leistungstransformatoren hat sich dem Ende ihrer Nutzungsdauer genähert. Im Zusammenspiel mit der Deregulierung der Energiemärkte führt das zu einer höheren Beanspruchung des Isolationssystems dieser teuren Betriebsmitteln. Deshalb wird der Überwachung des Isolationsmaterials, welches aus Transformatoröl und Zellulosepapier besteht, eine Schlüsselrolle bei der Beurteilung des Transformatorzustandes zugesprochen. Eine besondere Bedeutung hat hierbei das Transformatoröl als Informationsträger, denn bereits beginnende elektrische oder thermische Fehler können durch die Anwendung der anerkannten Überwachungsmethode DGA (**D**issolved **G**as **A**nalysis), die auf die Analyse der im Öl gelösten Gase basiert, erkannt werden.

Fehlergaserzeugung durch Teilentladungen

Es ist bekannt, dass bestimmte Fehlergase der Teilentladung zugesprochen werden können. Die Teilentladung ist eine im hohen Maße lokale Entladung, die zu einem elektrischen Durchschlag im Isolationssystem führen kann. Eine experimentelle Untersuchung soll das Verständnis um den Zusammenhang zwischen der Intensität einer TE und der daraus resultierenden Menge an gebildeten Gasen fördern.

Der dazugehörige Versuchsaufbau besteht aus einem frei atmenden und mit Transformatoröl gefüllten Glaskank, einer Elektrodenanordnung und einer Hochspannungsversorgung (vgl. Fig. 1). Mit der Elektrodenanordnung, wie in Fig. 1 dargestellt, wird die TE erzeugt und kontinuierlich durch ein phasenaufgelöstes Teilentladungsdiagramm (**P**hase **R**esolved **P**artial **D**ischarge- PRPD) vom Messsystem MTRONIX PD überwacht.

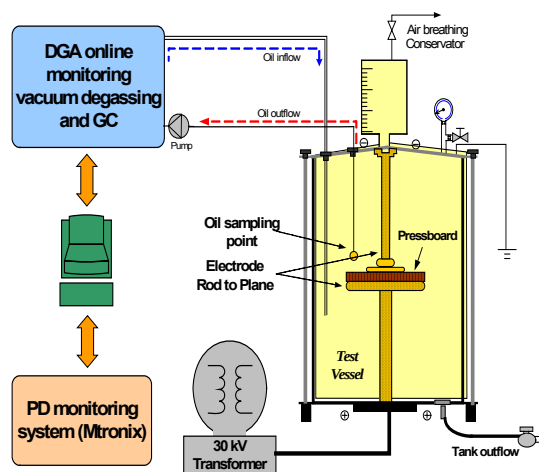


Fig. 1: Versuchsaufbau für Fehlergasentstehung bei TE
Experimental setup for fault gas generation by PD

■ Investigation of Fault Gases Generated by Electrical Stress in Power Transformers

Jackelyn Aragón-Patil, M.Sc.

A large population of installed power transformers is approaching the end of their service life. Ageing of such expensive equipment, along with the deregulation of electrical power markets has increased load on operating conditions of power transformers. Condition assessment of insulating materials, which mostly consist of transformer oil and cellulose paper, has been recognized for its key role for evaluating the right functioning of power transformers. Transformer oil is considered an important information carrier, thus incipient faults generated due to electrical or thermal faults can be recognized by application of the well acknowledged monitoring method based on dissolved gas analysis (DGA).

Gas Generation due to Partial Discharges

Electrically induced ageing processes in power transformers can be the result of **partial discharge** (PD) phenomena. The PD is a highly localized discharge that may be precursor to a breakdown discharge within the insulation system. Experimental investigations are aimed at enhancing the understanding about the relationship between fault intensity and amount of gases generated over a certain test period.

Experimental Investigation have been carried out by means of a test set-up that consist of an open-breather glass tank filled with mineral transformer oil, an electrode, and a high voltage supply system (see Fig. 1). The application of continuous PD was performed with the electrode configuration shown in Fig. 1. Monitoring of PD impulses was achieved by recording **phase resolved partial discharge** (PRPD) patterns generated from the MTRONIX PD measurement system.

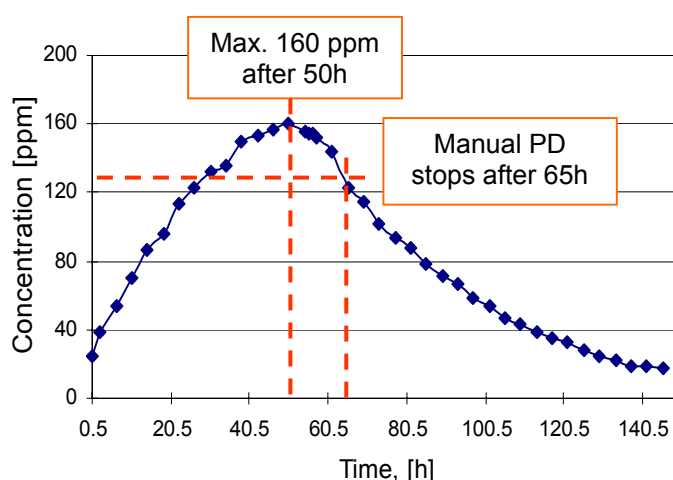


Fig. 2: Generation of H₂ by applied PD at 10 kV
Entwicklung von H₂ bei TE-Erzeugung mit 10 kV

Für die Untersuchungen bei Raumtemperatur und Normaldruck wird luftgesättigtes Öl (Shell Diala DX) verwendet. Die bei diesem Versuch verwendete TE-Quelle kann hierbei eine maximale Teilentladungsintensität von 1000 pC bei einer Spannung von 30 kV aufweisen. Gleichzeitig werden durch die TE entstandene gelöste Gase mittels eines Online-DGA-Messsystems, bestehend aus automatischer Probenentnahme, Gasabscheidung durch Vakuumentgasung und Gaschromatograph, analysiert. Fig. 2 zeigt wie sich die Wasserstoffkonzentration während einer 65-stündigen TE-Aktivität bei 10 kV entwickelt. Nachdem ein Maximum von 160 ppm erreicht worden ist, setzt nach Beendigung der TE-Aktivität ein natürlicher Diffusionsprozess ein, dessen exponentieller Abfall eine Diffusionskonstante von $0,03 \text{ h}^{-1}$ aufweist. Bei dieser Untersuchung sind größerer Mengen Wasserstoff und Methan erzeugt worden, was dem charakteristischen Verhalten der Gasentwicklung bei Teilentladungen entspricht. Weitere Versuche sind mit demselben Versuchsaufbau aber höherer TE-Spannung durchgeführt worden.

Fig. 3 zeigt die Entwicklung der Wasserstoffkonzentration bei 110-stündiger TE-Aktivität bei 18 kV. Aufgrund der höheren Spannung war auch die Intensität der TE höher und führte letztlich zu einem Durchschlag. Bei diesem Versuch sind höhere Gasentwicklungsraten festgestellt worden und somit auch höhere Mengen an Wasserstoff, Methan und Acetylen. Diese Gase sind Schlüsselgase für einen Durchschlag bzw. einer starken TE-Aktivität.

Weitere Versuche sollen mit anderen Elektrodenanordnungen, wie Spitze-Kugel oder Spitze-Platte durchgeführt werden um das Verhalten der Gasbildung besser verstehen zu können. Des Weiteren soll das Diffusionsverhalten im Zeitraum zwischen höchster Gasmengenkonzentration und dem Abschalten der TE-Quelle eingehender untersucht werden.

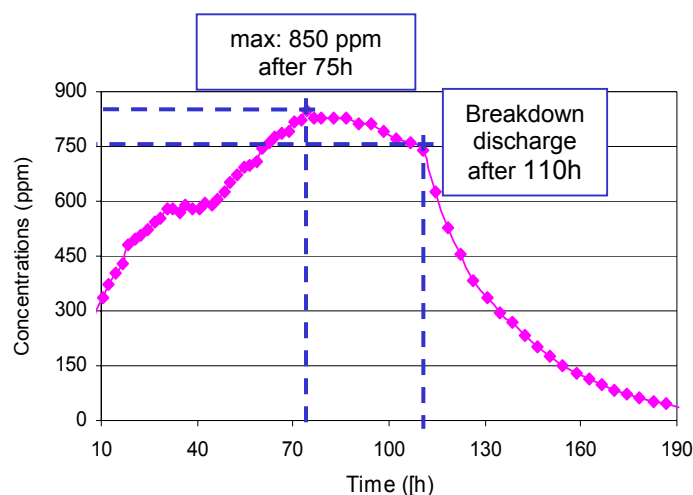


Fig. 3: Generation of H_2 by applied PD at 18 kV
Entwicklung von H_2 bei TE-Erzeugung mit 18 kV

Experiments with maximum PD impulse intensity of 1000 pC at 30kV were carried out over a test period using air-saturated Shell Diala DX oil at room temperature and pressure conditions. Simultaneously, dissolved gases generated during the PD were analyzed by means of an online DGA monitoring system consisting of automatic oil sampling, gas extraction by vacuum degassing and a gas chromatograph.

Fig. 2 shows results of hydrogen generation during 65 hours of PD application at 10 kV. Hydrogen was generated until reaching a maximum of 160 ppm; after that a diffusion process was observed as an exponential decay with a decay diffusion constant of $0,03 \text{ h}^{-1}$. In this case, PD impulses applied with 10kV resulted in the generation of key gases such as hydrogen and methane in larger amounts, which corresponds to the characteristic gassing behavior related to partial discharge stress.

Further experiments were carried out with the same test setup but increased voltage. Fig. 3 shows the development of hydrogen during application of PD at 18 kV over a period of 110 hours. These partial discharges were of higher intensity and ended in a breakdown discharge. In this experiment, gas generation rate was faster which lead to higher amounts of hydrogen, methane, and acetylene, which are the key gases characteristics of intensive PD and breakdown discharge.

Further experimental investigations are being carried out in order to gain more knowledge about the gassing behaviour with other electrode configurations, such as point-sphere and point-plane. Special attention is being given to the study of gas diffusion in the time between reaching maximum concentrations and the end of PD.

- **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-Kegelsensor für die Online Messung mit Schubstange, Gehäuse und Flansch

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

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

Aufgrund einer bisher fehlenden Möglichkeit, die UHF-Methode zu kalibrieren, wird die Methode des Sensitivity Checks eingeführt und erforscht. Ziel ist die Abschätzung einer TE-Quantität mit einer geeigneten Messgröße der UHF-Methode. Diese Abschätzung der TE-Quantität soll vergleichbar mit der scheinbaren Ladung in pico Coulomb (pC) sein, die bisher konventionell nach IEC60270 bestimmt wird.

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

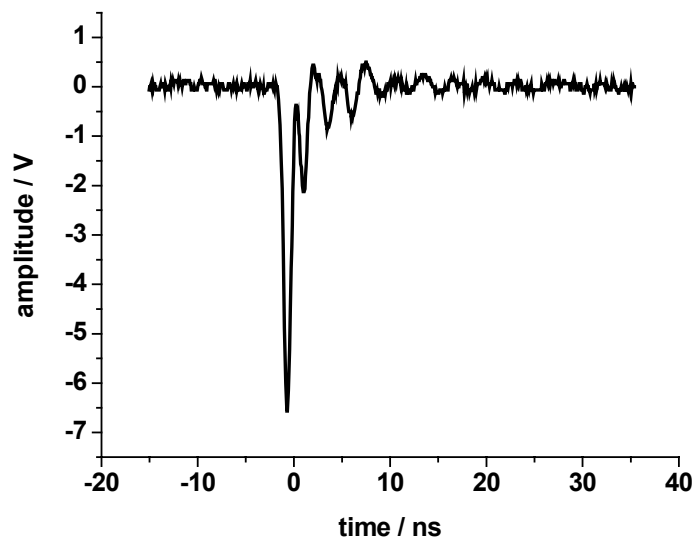


Fig. 2: Zeitsignal eines UHF-Signal-Generators mit variabler Ausgangsspannung bis 60 V

Time signal of an UHF signal generator with variable output power up to 60 V

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

Because of a missing calibration possibility of the UHF measuring method an investigation focussing on the Sensitivity Check of the UHF measuring method is done. An approximation of the measured PD quantity comparable to the quantity of the apparent charge in pico Coulomb (pC), which is determined with the measurement according to IEC60270, should be achieved.

Zuerst wird für diesen Sensitivity Check im Labor eine TE-Quelle mit bekanntem scheinbaren Ladungsumsatz im Inneren eines Transformators aktiviert. Das führt zu einem Verhältnis einer Messgröße der UHF-Methode zur scheinbaren Ladung, z.B. entsprechen 5 mV UHF-Zeitsignalamplitude einer scheinbaren Ladung von 100 pC. In einem zweiten Schritt werden vergleichbare elektromagnetische Effekte durch künstlich eingespeiste UHF-Signale generiert. Sie werden an einem zweiten Sensor eingespeist. Dafür ist ein UHF-Signalgenerator mit einer variablen Ausgangsspannung entwickelt worden, siehe Zeitsignal in Fig. 2. So rufen zum Beispiel 40 V Ausgangsspannung die oben erwähnten UHF-Zeitsignalamplituden von 5 mV hervor. Installiert man nun diesen Aufbau an einem identischen Transformator, so erlaubt die Einspeisung eines künstlichen UHF-Signals mit der Amplitude von 40 V den Sensitivity Check für 100 pC, d. h. die UHF-Methode hat mindestens eine Empfindlichkeit von 100 pC an diesem Transformator (ein lineares Verhältnis zwischen der Messgröße mV und der scheinbaren Ladung pC vorausgesetzt).

Fig. 3 zeigt einen Transformator-kessel im Labor mit zwei installierten UHF-Sensoren. Zur Untersuchung des oben beschriebenen Sensitivity Checks wird in einen Sensor ein künstliches UHF-Signal variabler Amplitude mit dem neu entwickelten UHF-Signalgenerator eingespeist.



Fig. 3: Transformator-kessel mit zwei Ölflanschen und installierten UHF-Sensoren
Test tank with two oil valves and two flange mounted UHF probes

Die quantitativen Frequenzanalysen (FFT) der messbaren Signale sind in Fig. 4 zu sehen. Die Ergebnisse zeigen ein nahezu lineares Verhältnis zwischen der Amplitude des Einspeisesignals und den Frequenzanteilen der empfangenen Signale. Zum Beispiel verdoppelt sich die Amplitude des Frequenzanteils bei 1,75 GHz von 0,7 mVs auf 1,4 mVs bei ebenfalls doppelter Amplitude des Einspeisesignals. Weitere Untersuchungen sollen zeigen, ob die Messgrößen mV oder mVs für den Sensitivity Check geeignet sind, oder andere Größen, wie zum Beispiel die Signalenergie, eine Relation zur scheinbaren Ladung pC herstellen können.

Therefore a well-known real PD has to be placed into a transformer tank in laboratory. This will lead to a ratio, for example 5 mV probe reading quantity relates to a 100 pC PD, measured according to IEC60270. The same probe reading from the measured real PD will be generated in a second step with an UHF signal generator with variable output power, see time signal in Fig. 2. The same reading quantity as before will be caused by injecting artificial UHF impulse in a second transmitting probe at a second oil valve with an excitation voltage of for example 40 V. Installing the same setup at an identical transformer in field with two oil filling valves may then allow a Sensitivity Check for 100 pC with the excitation voltage of 40 V (assuming a linear relation between the used mV and pC quantities).

Fig. 3 shows the test tank in the laboratory with two attached UHF probes. An electromagnetic coupling between the two probes has to be a wave based coupling because of wavelengths smaller than 0.75 m for frequencies higher than 300 MHz. For the investigation of the Sensitivity Check the new UHF signal generator feeds one probe with variable output voltage.

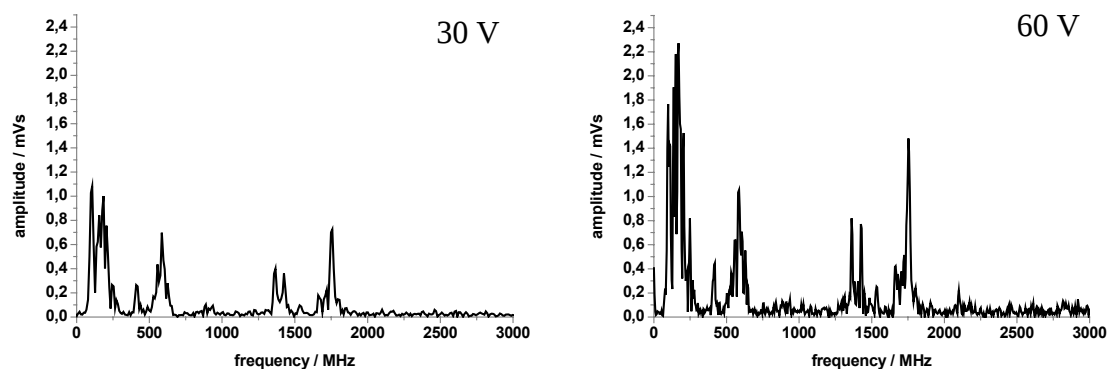


Fig. 4: Sensitivity Check mit variabler Ausgangsspannung: Lineares Verhältnis zwischen Speisespannung und empfangbarem Spektrum
Sensitivity Check with variable output voltage: Linear ratio between voltage of excitation signal and frequency components

The quantitative Fast Fourier Analyses (FFT) of the measured signals from the receiving probe are shown in Fig. 4. The results show a nearly linear ratio between the magnitude of the excitation signal and the frequency components of the received signal. The linear relation seems to be valid over the whole frequency range up to 2 GHz. E.g. the frequency fraction around 1.75 GHz rises from 0.7 mVs up to 1.4 mVs if the feeding signal rises from 30 V to 60 V. Further investigations may show if the reading quantity of mV in a defined frequency range is useful for a Sensitivity Check as mentioned above. Other reading quantities or post processed quantities as e.g. the signal power or energy may be also useful and should be focused in future.

■ Modellierung der UHF-Wellenausbreitung in Kabelendverschlüssen zur Optimierung der Teilentladungserfassung

M.Sc. Denis Denisov

Moderne Kabelendverschlüsse für GIS-Anlagen und Transformatoren werden aus Silikongummi hergestellt. Die Lebensdauer dieses hochpolymeren Materials ist normalerweise wesentlich länger als 40 Jahre. Dies gilt jedoch nur ohne die Berücksichtigung der Teilentladungen. Sie verursachen unvermeidbare Degradationen. Nachgewiesene TE-Aktivität in Steckern ist ein klares Indiz dafür, dass diese ausgetauscht werden müssen. Um solche TE-Aktivitäten unter Vor-Ort-Bedingungen und im Betrieb sicher erkennen zu können, wird die UHF-TE- Diagnostik eingesetzt. Dieses Messverfahren basiert auf dem Empfang von elektromagnetischen Emissionen, die aus der TE-Quelle kommen. Der UHF-Sensor soll möglichst nahe am Prüfling installiert werden und muss effektiv gegen Störungen aus der Umgebung abgeschirmt werden. Impulse, die einige Nanosekunden dauern, werden vom TE-Defekt emittiert und von verschiedenen Sensoren aufgefangen. Diese Impulse werden danach vorverstärkt, gefiltert und mit dem Oszilloskop verarbeitet.

Um die Leistungsfähigkeit dieser Diagnosemethode zu erhöhen, wurden eine Reihe von numerischen Feldsimulationen anhand eines detaillierten 3D-Modells des Kabelendverschlusses, durchgeführt (siehe Fig. 1). Zur Modellierung bzw. Simulation, welche auf der Finite Integration Technique (FIT) basiert, wurde die Software Microwave Studio von CST verwendet.

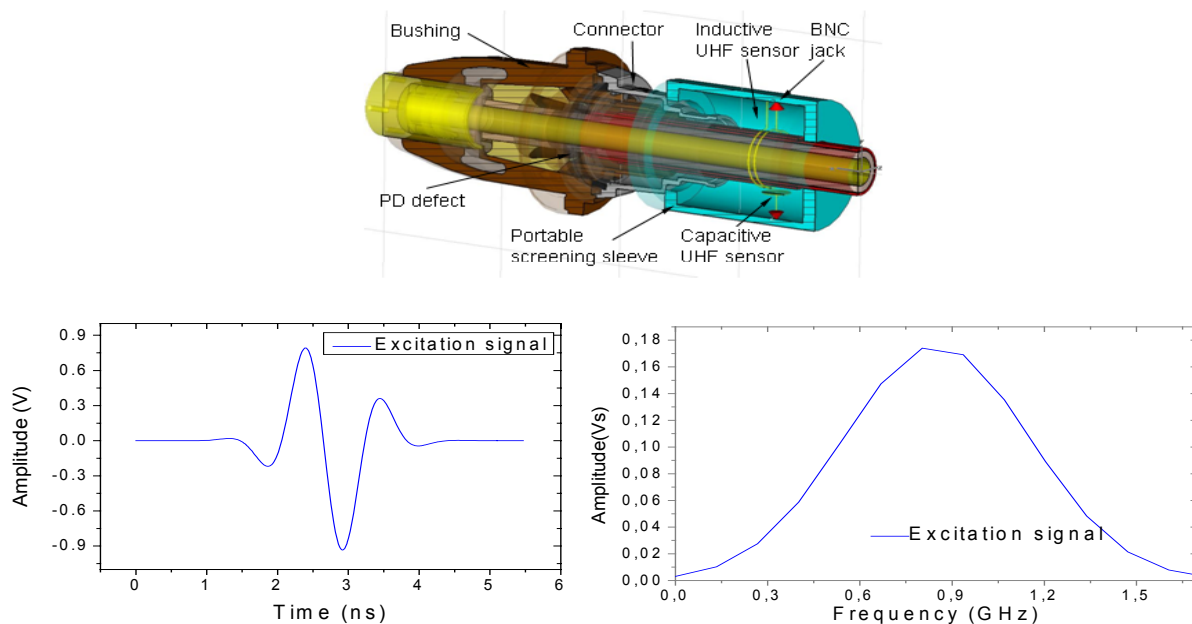


Fig. 1: 3D-Modell des Endverschlusses und Anregungsimpuls
3D model of termination and excitation pulse in time and frequency domains

■ Modelling of UHF Wave Propagation in Cable Termination for Optimal Partial Discharge Detection

M.Sc. Denis Denisov

Modern plug-in cable connectors (terminations) for GIS and transformers are made from silicone rubber. The life span of this high polymeric material normally exceeds 40 years, but only in absence of PD activity that inevitably causes material degradation. To detect such a harmful activity under conditions of on-site on-line testing, UHF PD diagnosis principle can be used. This method is based on sensing the electromagnetic emissions from discharge sites in the insulation. A sensor housing equipped with capacitive or inductive sensors is clamped around the plug-in cable termination, while the cable system is in operation. The aluminium housing shields the UHF sensors against outside interferences, thus, a sensitive PD measurement even in a noisy environment is possible. Nanosecond pulses emitted from the PD fault site and captured with different sensors are consequently pre-amplified, filtered and processed with an oscilloscope.

To enhance the performance of this diagnostic method a series of numerical simulations was conducted on a detailed 3D model of the termination shown in Fig. 1. 3D modelling of the UHF wave propagation based on the Finite Integration Technique (FIT) was performed using the commercial software Microwave Studio from CST.

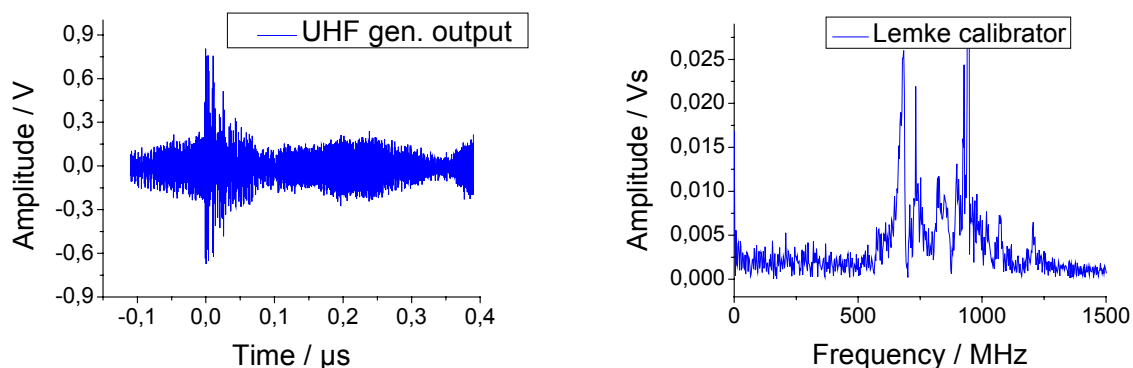
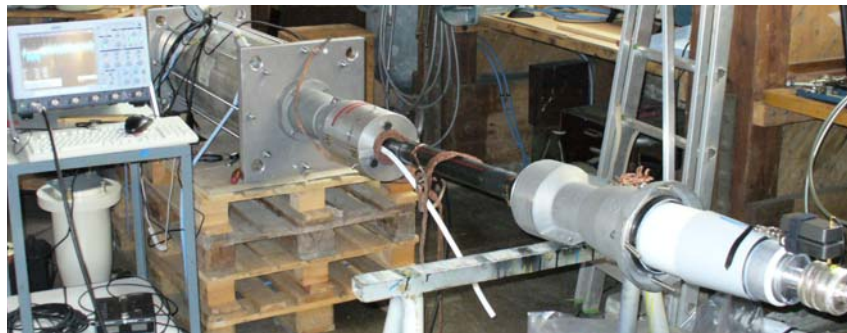


Fig. 2: Versuchsaufbau mit dem UHF Impulsgenerator LDA-5/U als Anregungsquelle
Laboratory setup and excitation signal from LDA-5/U UHF pulse generator in
time and frequency domains (with 40 dB amplification)

Um die Ergebnisse der numerischen Simulation zu bestätigen und zu überprüfen, wurde eine Testmessung durchgeführt. Hierzu wurde ein UHF-Impuls-Generator (LDA-5/U) von Lemke zur Anregung - wie in Fig. 2 verdeutlicht – verwendet.

Die Auswirkungen der Geometrie des verwendeten Materials und der Positionierung des Sensors wurden im Hinblick auf ein optimiertes Signal untersucht. Die Energie der UHF-TE-Impulse stellt das Kriterium für den Vergleich dar. Sie wurde nach folgender Formel berechnet:

$$E = \frac{1}{50\Omega} \int u^2 dt \quad (1)$$

Einige Ergebnisse der Simulation sind in Fig. 3 dargestellt. Beispielsweise durch Parametrisierung der Distanz des Sensors von der Kabeloberfläche (radiale Koordinate) wurde ein klarer Abfall der induzierten Energie mit steigendem Abstand gemessen. Außerdem wurde beim Variieren des Abstandes des Sensors vom Flanschende eine sinusförmige Abhängigkeit der induzierten Energie gefunden. Letzteres kann durch stehende Wellen (Eigenresonanzfrequenz) innerhalb des Abschirmungsgehäuses erklärt werden. Fig. 4 zeigt, dass die einzige mögliche Eigenresonanzfrequenz des Gehäuses bei 1,06 GHz liegt, was einer Wellenlänge von ca. 35 cm (entspricht axialen Abmessungen des Abschirmgehäuses) gleichkommt.

Beim hier dargestellten UHF-TE-Diagnose-Verfahren werden die abgestrahlten Impulse außerhalb der Flanschglocke gemessen. Deshalb ist es von großem Interesse, herauszufinden, welche Eigenresonanzfrequenzen (Eigenmoden) dieses Bauteil hat. Dementsprechend wurden durch (Eigenmoden) Simulation die stärksten Resonanzfrequenzen bestimmt, um diese mit dem Arbeitsbereich der Sensoren abzugleichen. Die Ergebnisse zeigt Fig. 4.

Die aus den Simulationen abgeleiteten Informationen wurden verwendet, um die optimale Form und Position der Sensoren zu bestimmen und damit bestmögliche TE-Signale zur erhalten.

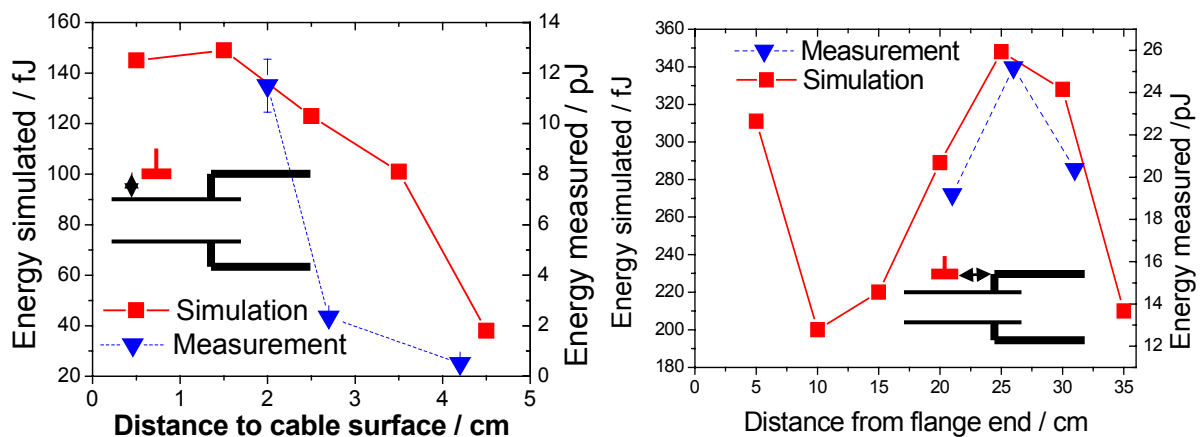


Fig. 3: UHF-Impulsenergie vs. radiale (links) und axiale (rechts) Koordinate des Sensors

UHF pulse energy vs. radial (left) and axial (right) coordinate of sensor

To verify the numerical results, a test setup with an UHF pulse generator LDA-5/U from Lemke used as the excitation pulse of constant amplitude was built in our laboratory as shown in Fig.2.

The impacts of sensor's geometry, material and positioning on the UHF PD signal coupling were studied. The energy of the UHF PD pulse induced in the sensor was used as a criterion for comparison. It was calculated according to the formula:

$$E = \frac{1}{50\Omega} \int u^2 dt. \quad (1)$$

Some numerical results verified on the test setup can be found in Fig. 3. By parameterising the distance from the sensor to the cable surface (sensor's radial coordinate), a clear decline in the induced energy with rising gap was found. By varying the distance from the flange end to the sensor (sensor's axial coordinate), on contrary, the sine-wave dependency of induced energy was established. The later can be explained with an effect of standing wave (own resonance frequency) inside the sensor housing. Fig. 4 shows that the only possible own resonance frequency of the housing lies at 1.06 GHz, which approximately corresponds to a wave length of 35 cm (axial size of the shielding housing).

Since the presented UHF PD diagnostic concept implies the measurement of radiated pulses outside the termination housing, it is of high interest to find out, what own resonance frequencies (eigenmodes) this body has. The eigenmode simulation was performed to match the working range of the sensors with the strongest resonance frequencies originating in the cable termination. The results are shown in Fig.4.

The information derived from simulations allowed us to modify the sensor's form and find its optimal position in order to reach the optimal PD signal extraction.

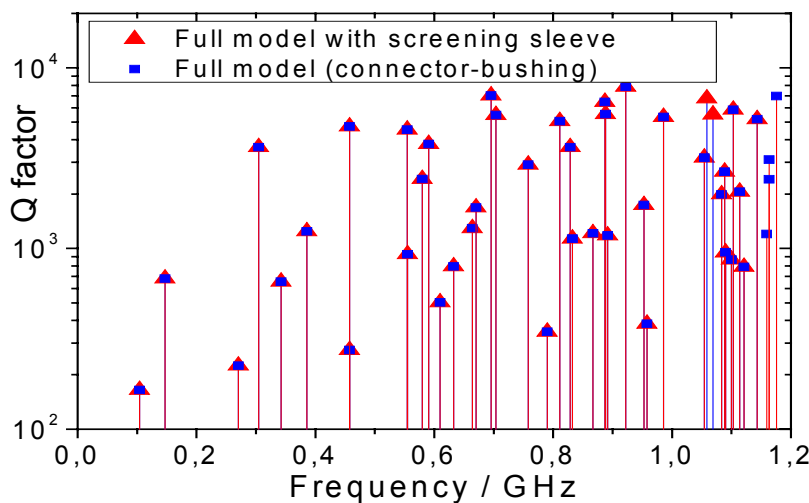


Fig. 4: Eigenresonanz-Frequenzen mit und ohne Schirmgehäuse
Eigenmode frequencies with and without screening sleeve

▪ Syntaktische und statistische Mustererkennung als Werkzeug für die Zustandsbeurteilung

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Das Asset-Management subsumiert alle Handlungen und Maßnahmen, die, vorzugsweise in Unternehmen, auf die Wertsteigerung oder wenigstens Werterhaltung von Anlage- und Umlaufvermögen zielen. Einschränkend dazu versteht man unter Anlagennahem Asset-Management (AAM), wie der Name bereits vermuten lässt, ausschließlich die Summe aller Handlungen und Maßnahmen zur Wertsteigerung bzw. –erhaltung von Anlagevermögen.

In Bezug auf Energieversorgungsunternehmen (EVU) sind dem Anlagevermögen, neben Immobilien, Unternehmensbeteiligungen und anderem, insbesondere auch die Betriebsmittel der Energiewandlung und –übertragung zuzurechnen.

Damit in EVU das AAM seiner Aufgabe gerecht werden kann, muss die gesamte Betriebsmittelpopulation einer möglichst kontinuierlichen finanziellen Bewertung unterzogen werden. Voraussetzung dafür ist die möglichst genaue Kenntnis der Struktur und des technischen Zustands der Betriebsmittelpopulation. Ohne deren Kenntnis wird die Bewertung beliebig ungenau.

Für die Beurteilung des technischen Zustands einer Betriebsmittelpopulation kennt man zwei verschiedene Ansätze:

- Statistische Analyse der gesamten Betriebsmittelpopulation oder Untermengen im Hinblick auf Ausfallwahrscheinlichkeit, Ausfallrate, Ausfallprognose usw.
- Zustandsdiagnostik auf Betriebsmittelebene mit dem Ziel einer möglichst zeitkontinuierlichen Protokollierung des jeweiligen technischen Zustands.

Gegenstand zurückliegender Untersuchungen war vornehmlich der Ansatz der Zustandsdiagnostik. Er soll im Folgenden näher ausgeführt werden.

Die Aufgabe der Zustandsdiagnostik besteht darin, ausgehend von Messwerten aussagekräftiger Messgrößen, den technischen Zustand eines Betriebsmittels abzuleiten. Die Zustandsdiagnostik ist dabei im Wesentlichen ein Mustererkennungsprozess, der sich entsprechend Fig. 1 in fünf Prozesszustände gliedert.

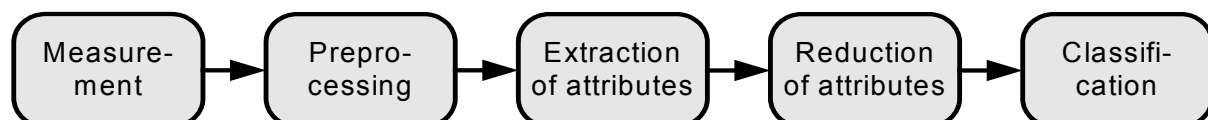


Fig. 1: Die Mustererkennung in ihre grundlegenden fünf Prozesszustände gegliedert
The process of pattern recognition divided into its basic five process states

In Bezug auf die Zustandsdiagnostik erfüllen die fünf Prozesszustände der Mustererkennung folgende Aufgabe:

■ Syntactical and Statistical Pattern Recognition as Tool for Condition Assessment

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Asset Management includes, preferable in companies, all acts and arrangements that aim at enhancement or at least conservation of value of fixed and circulating assets. Plant Asset Management (PAM), as the name suggests, is limited to acts and arrangements that aim at enhancement or conservation of value of fixed assets.

Besides immovables, participations and others, fixed assets in electric power companies (EPC) contain in particular also supplies for conversation and transmission of electrical energy.

A necessary precondition to exercise PAM is a preferably continuous financial evaluation of the supply population. Therefore, one has to know as accurately as possible structure and technical condition of the supply population.

Two different approaches are known to evaluate the technical condition of supply populations:

- Statistical analyses of the supply population or subsets of it in order to calculate failure probability, failure rate, failure prediction, etc.
- Condition diagnostics on supply level with the aim to monitor the technical condition of the particular supply.

Subject of previous research was in particular the approach of condition diagnostics. Thus, in the following, this approach will be worked out in detail.

The condition diagnostics' mission is to derive the technical condition of supplies based on values of significant measurements. Basically, condition diagnostics is a pattern recognition process that splits into five main states as can be seen in Fig. 1.

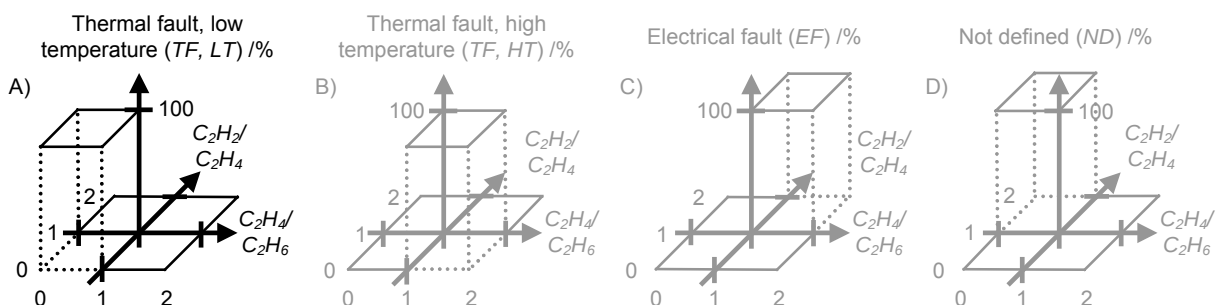


Fig. 2: Based on 2 gas ratios, GE-method distinguishes between 4 fault conditions
Die GE-Methode unterscheidet 4 Zustände anhand von 2 Gasquotienten

In terms of diagnostics the states of pattern recognition perform the following task:

1. Messung: Analoge Messwerterfassung, Abtastung und Diskretisierung
2. Vorverarbeitung: Entrauschung, Transformation, Normierung usw.
3. Extraktion von Merkmalen: z.B. Lage, Form, statistische Kennzahlen usw.
4. Reduktion der Merkmale: Konzentration auf aussagekräftige Merkmale
5. Klassifikation: Zuordnung von Mustern zu Fehlerklassen

Man kennt zwei grundsätzliche Ansätze zur Modellierung des Klassifikators im fünften Prozesszustand: *Syntaktische* sowie *statistische Modellierung*. Wichtige Vertreter beider Ansätze sind die Modellierungswerkzeuge (Fuzzy)-Inferenz-Systeme bzw. Künstliche Neuronale Netze.

Mit Fuzzy-Inferenz-Systemen kann regelbasiert, mit Künstlichen Neuronalen Netzen dagegen datenbasiert modelliert werden. Die Nutzung jedes dieser Werkzeuge ist sinnvoll, weil sowohl durch Regeln als auch durch Daten Wissen für die Modellierung des Klassifikators zugänglich wird. Unter gewissen Bedingungen besteht sogar eine funktionale Äquivalenz zwischen Fuzzy-Inferenz-Systemen 0-ter Ordnung nach Takagi-Sugeno (FIS) und einer speziellen Klasse von Künstlichen Neuronalen Netzen, den Radialen Basisfunktionen Netzen (RBF). Die Bedingungen sind nachfolgend aufgeführt:

- RBF und FIS: Nutzen dieselben an einem Raster ausgerichteten Stützpunkte.
- RBF: Die Netzeingabefunktion der Neuronen in der zweiten Schicht ist als Maximum-Abstand definiert.
- FIS: Die Zugehörigkeitsfunktionen sind identisch breit und spiegelsymmetrisch zum korrespondierenden Stützpunkt. Ihr Funktionswert ist dort 1 und ab den benachbarten Stützpunkten 0. Für jeden Stützpunkt existiert genau eine Regel, wobei die Konjunktion in der Prämisse als Minimum- und die Implikation als Produkt-Operator definiert ist. Die Summe aller Zugehörigkeitsfunktionen ist 1.

An dieser Stelle ein Beispiel zur Illustration der funktionalen Äquivalenz. Das Beispiel basiert auf der Zustandsdiagnosemethode von General Electric (Fig. 2), die aus der Dissolved Gas Analysis bekannt ist. Sowohl das RBF-Modell (Fig. 3) als auch das FIS-Modell (Fig. 4) dieser Methode leisten die gleiche funktionale Abbildung. Es ist daher abschließend festzuhalten, dass durch die Äquivalenz von FIS und RBF eine kooperative Anwendung der Methoden beider Werkzeuge möglich wird.

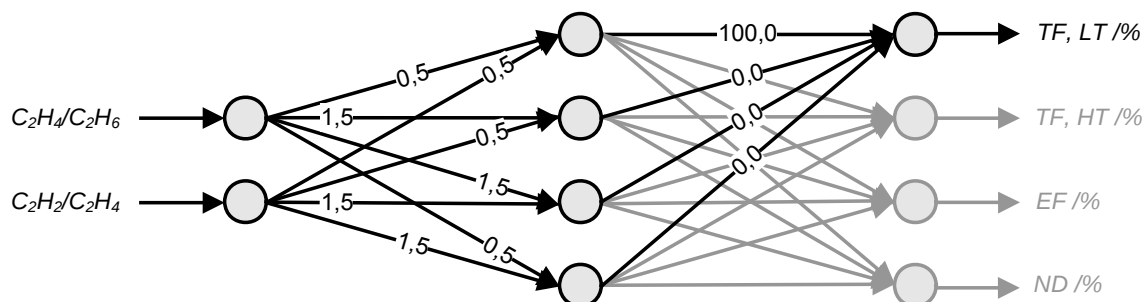


Fig. 3: Das RBF-Modell mit Kantengewichtung für den Fall „TF, LT“ nach Fig. 2A
The RBF-model with edges weighted according to the case “TF, LT” of Fig. 2A

1. Measurement: Analog data logging, sampling and descritization
2. Preprocessing: Denoising, transformation, normalization, etc.
3. Extraction of attributes: E.g. location, shape, statistical classification numbers, etc.
4. Reduction of attributes: Focus on significant attributes
5. Classification: Assignment of patterns to failure classes

Two approaches of pattern recognition are known to model the classifier in process state five: *Syntactical* and *statistical modelling*. Important representatives of these approaches are (fuzzy) inference systems and artificial neural networks, respectively.

With fuzzy inference systems one can model rule based and, by contrast, with artificial neural networks data based. It is useful to utilize each of these tools, because knowledge to model the classifier is becoming available with rules as well as with data. Under some constraints a Takagi-Sugeno fuzzy inference systems of 0-th order (FIS) and a special class of artificial neural networks, so called radial basis function networks (RBF), are even functionally equivalent. These constraints are listed below:

- RBF and FIS: Both use the same support points that are aligned in a grid
- RBF: In the hidden layer the net input function of each neuron is defined as maximum distance
- FIS: All membership functions have the same width and are mirror symmetrical to the corresponding support point. The function value is 1 for the corresponding support point and 0 for adjoining support points and beyond. There is exactly 1 rule for each support point. The rule uses minimum-operator in premise and product-operator in conclusion. The sum of all membership functions is 1.

At this point an example is given to illustrate the functional equivalence. The example is about a diagnostics method of General Electric that is well known from Dissolved Gas Analyses (Fig. 2). The method is modelled by a RBF (Fig. 3) and by a FIS (Fig. 4) as well. Each model performs the same functional mapping. So, we can finally say that thanks to the equivalence of FIS and RBF, the cooperative application of methods of both tools becomes possible.

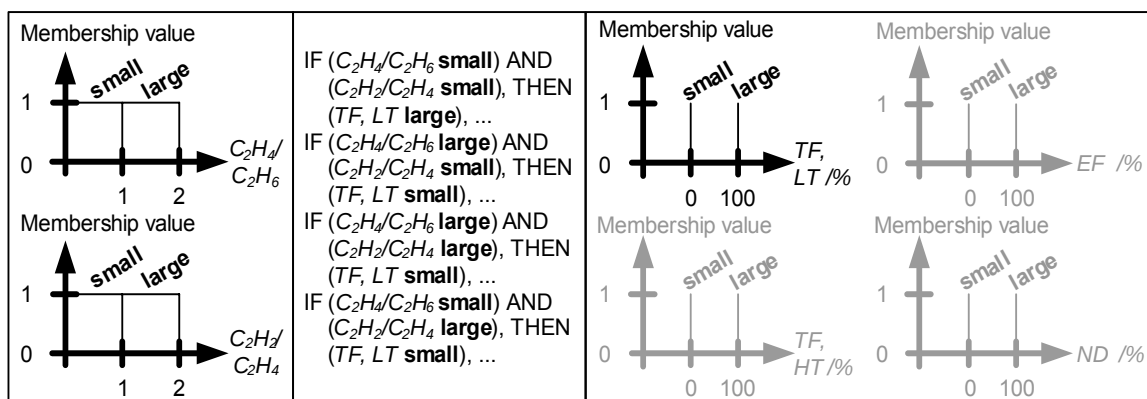


Fig. 4: The FIS-model including the rules according to the case "TF, LT" of Fig. 2A
Das FIS-Modell mit Produktionsregeln für den Fall „TF, LT“ nach Fig. 2A

System zur Ortung von Teilentladung in gasisolierten Schaltanlagen auf Basis von Laufzeitmessungen

Dipl.-Ing. Stefan Hoek

Die Folgen der Netzausfälle in den USA, Italien oder auch Norddeutschland haben in den letzten Jahren ein Bewusstsein für die Wichtigkeit einer hohen Versorgungssicherheit geschaffen. Der daraus resultierende Druck auf die Versorgungsunternehmen und die Veränderungen der Wettbewerbssituation in den letzten Jahren haben dazu geführt, dass die Diagnostik von Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik stark an Bedeutung gewonnen hat. Ziel ist eine Kostenreduktion durch eine verlängerte Nutzungsdauer und die zustandsorientierte Wartung der Betriebsmittel bei gleichbleibender hoher oder steigender Versorgungssicherheit. Eine zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie stellt eine Möglichkeit dar, rechtzeitig eine nutzungsverlängernde Maßnahme durchzuführen oder den Ersatz des Betriebsmittels zu planen. Durch eine empfindliche Messung von Teilentladungen (TE) können viele potentielle Fehlstellen in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) frühzeitig erkannt werden. Für die Bewertung des Risikos einer Betriebseinschränkung oder eines Ausfalles ist zum einen die Erkennung des Fehlertypus wichtig. Die Art der Fehlstelle lässt sich anhand verschiedener bekannter Methoden, z.B. aus phasenaufgelösten TE-Mustern, ermitteln. Eine weitere wichtige Information zur Risikoabschätzung ist eine schnelle und exakte Ortung der TE-Quellen. Bei der Ortung von TE in GIS können verschiedene Methoden, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen, verwendet werden.

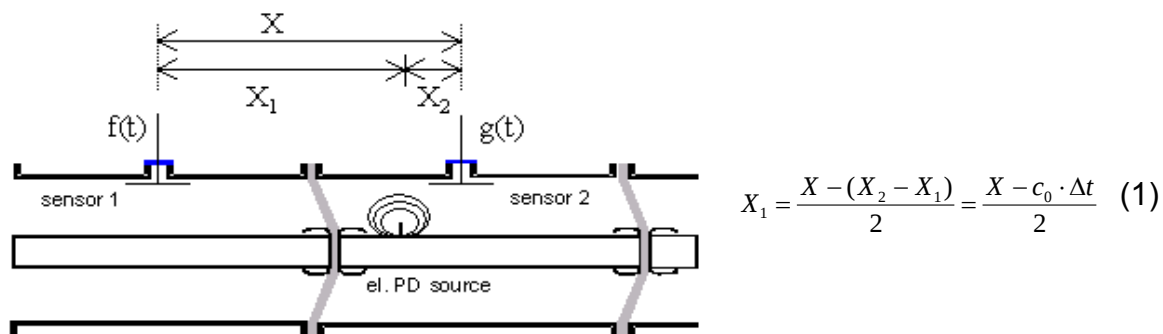


Fig.1: TE-Ortung mit der Laufzeitdifferenzenmethode und die Berechnung von X_1
PD location by time-of-flight measurement and calculation of X_1

Ein Ansatz zur Lokalisierung der TE ist, die Ausbreitung des UHF-Signals, welches von der TE-Quelle ausgesendet wird, zu detektieren und zu vermessen (Time-of-Flight-Methode). Hierzu war bisher, neben der Sensorik zur Erkennung der TE-Signale, ein hochauflösendes Oszilloskop zur Messung der Zeitdifferenzen der Signale (Δt siehe Abbildung 1: Gl (1)) notwendig. Jedoch ist die Verwendung eines Oszilloskops umständlich und kostenintensiv, weshalb am IEH ein Messsystem (PADLOS) entwickelt wurde, um die TE einfach und kostengünstig zu lokalisieren.

■ **System for Localization of Partial Discharge in Gas-Isolated Switchgears Based on Time Difference Measurements**

Dipl.-Ing. Stefan Hoek

The consequences of the black outs in the USA, Italy or also Northern Germany created a consciousness for the importances of a high supply security. The political pressure resulting from it and the liberalisation of the energy market led to the fact that the diagnostics of high voltage equipment gained strongly significance. One goal is to reduce costs by extended use and condition-based maintenance of the equipment with continuous high or rising supply security. A condition-based maintenance strategy represents a possibility to reduce operating costs. A sensitive measurement of partial discharges (PD) allows the recognition of defects in gas-isolated switchgears (GIS). To assess the defect's risk in GIS the recognition of the defect type is important. It may be determined using different well-known methods like the phase resolved partial discharge (PRPD) pattern. Further important information to estimate the risk is a fast and accurate localization of the PD sources. For the localization of PD in GIS different methods are used, which are based on different physical principles.

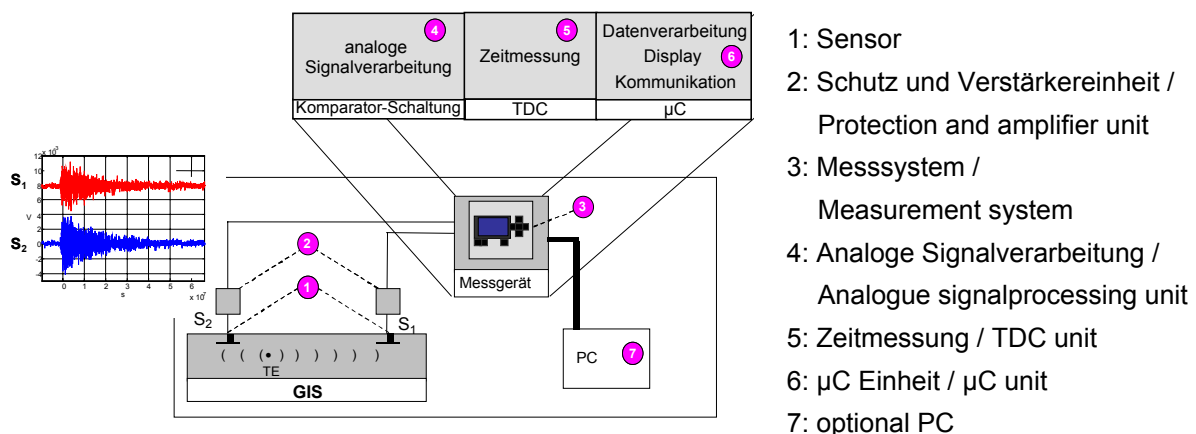


Fig. 2: Systemaufbau des PADLOS-Systems mit GIS
Measure system setup of PADLOS with GIS

An idea for the localization of PD is to detect the propagation of the UHF signal, which is sent by the PD and to measure the time difference (Δt see Fig. 1 / GI (1) between two sensor signals (time-of-flight method). A very fast oscilloscope is necessary for the measurements of the signals. The IEH developed a measure system named PADLOS to locate PD simply and economically because the use of an oscilloscope is inefficient and cost-intensive.

PADLOS – Partial Discharge Localization System

Das System besteht aus verschiedenen Einheiten. Eine Schutz- und Verstärkereinheit (Abb. 2 (2)) schützt das System gegen Überspannungen und bereitet das Signal auf. Eine analoge Signalverarbeitung detektiert die TE-Impulse und wandelt sie in digitale Start- bzw. Stopkommandos (Abb. 2 (4)) für die nächste Einheit um. Diese Messeinheit (Abb. 2 (5)) bestimmt die Zeitdifferenz zwischen den Kommandos mit einer Auflösung unter 100 ps. Eine nachfolgende μ C-Einheit (Abb. 2 (6)) steuert die Messung, unterstützt ein Benutzer-Interface (Taster und Display) und kann die Daten für eingehende Untersuchungen einer PC-Software übermitteln (Abb. 2 (7)).

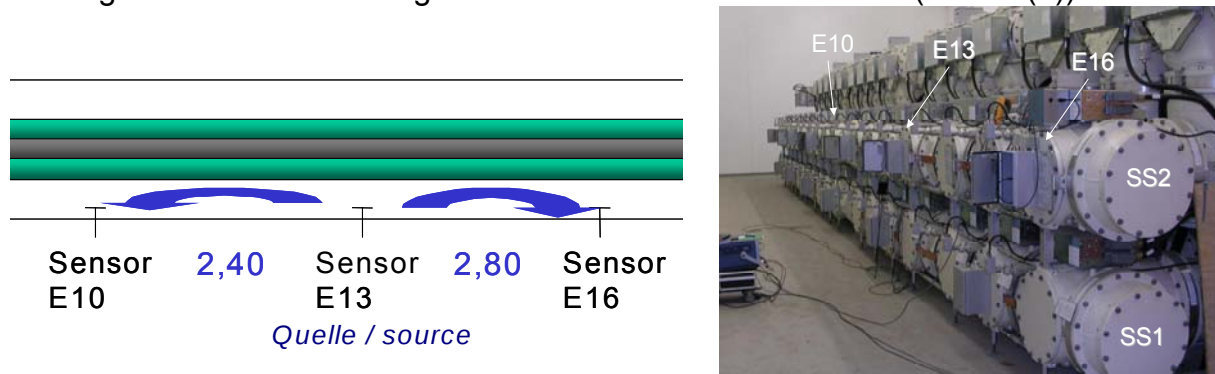


Fig. 3: Schematischer Aufbau (links) und entsp. 110-kV-Schaltanlage (rechts)
Schematic setup (left) and corresponding 110 kV substation (right)

Mit diesem Messsystem sind leicht Mehrfachmessungen mit mehreren hundert Einzelmessungen möglich. Somit sind statistische Auswertungen möglich, die Aufschluss über Reflexionen, Mehrstellen-TE oder Störer geben können. Bei der Auswertung ergeben sich zusätzliche Informationen, wie Mittelwert und Standardabweichung, die einen Hinweis auf die Verlässlichkeit der Messung geben.

Bei der Messung an einer 110-kV-Anlage (Abb. 3) wurden mit einer spannungsvariablen Impulsquelle Impulse über einen UHF-Sensor (E13) eingespeist. Mit kleinen Impulsspannungen können damit kleine Teilentladungen nachgebildet werden. Die Verteilung der gemessenen Werte (Zeitdifferenzen Δt zw. Sensor E10 und E16) ist im Histogramm (Abb. 4 / links) für 500 Messungen mit 5-V-Impulsen zu sehen. In Abbildung 4 (rechts) ist der Mittelwert und die Standardabweichung über die verschiedenen Impulsspannungen gegeben. Es ist gut sichtbar, dass sich der Mittelwert für größer werdende Impulsspannungen immer weiter dem theoretisch zu erwartenden Wert annähert. Dabei wird die Standardabweichung immer kleiner und ist damit ein Indikator für die Verlässlichkeit der Messung. Für diese Art von Anlagen bzw. Aufbau (Sammelschiene) ist der Messfehler für die Zeitdifferenz bei Impulsen mit Spannungen größer als 5 V (was lt. Hersteller einer scheinbaren Entladung < 5 pC entspricht) im Bereich von 1 ns. Für die Position folgte daraus eine Unsicherheit von ca. 15 cm. Die Genauigkeit der Ortung und Empfindlichkeit ist vergleichbar mit bisherigen Messverfahren, basierend auf Oszilloskopen.

PADLOS – Partial Discharge Localization System

The system contains different units. The protection and amplifier unit (Fig. 2 (2)) protects the system from over voltages and prepares the signal. The analogue signal-processing unit detects the PD impulses and converts it into digital start and stop commands (Fig. 2 (4)). The next unit determines the time difference Δt (Fig. 2 (5)) between these commands with an accuracy below 100 ps. The following μC unit (Fig. 2 (6)) controls the measurement, supports a user interface (button and display) and can transfer data for detailed investigations to the PC software (Fig. 2 (7)).

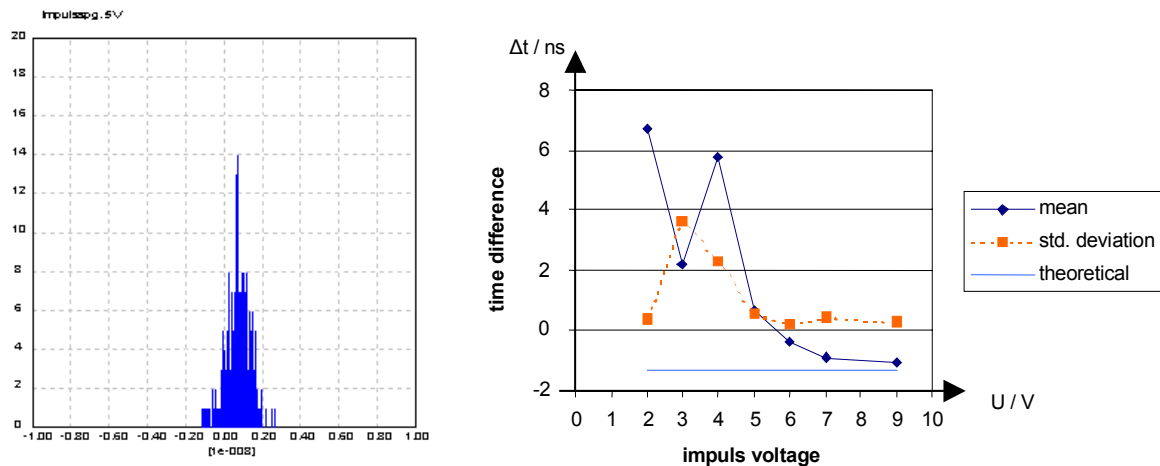


Fig. 4: Histogramm der Zeitdifferenzen für 5-V-Impulsspannung (links) und statistische Werte über der Impulsspannung (rechts)
Histogram of time difference for 5 V impulse voltage (left) and statistic values for dif. impulse voltage (right)

The measurement system PADLOS is able to make multiple measurements. It is possible to get a histogram vs. the time difference (Δt) or to get statistic information like average value and standard deviation of several hundred individual measurements. These additional values give information about reflections, multi-place PD or disturbers and about reliability of the measurement.

For measurement in a 110 kV substation (Fig. 3) impulses with a defined voltage were injected at a UHF sensor (E13). A higher voltage level emulate a higher PD level. The time difference (Δt) of the impulses was measured at sensor E10 and E16. In the histogram (Fig. 4 / left) the distribution is visible of over 500 measurements with a impulse voltage of 5 V. The average value, the theoretical value and the standard deviation versus the impulse voltage of the source is shown in Figure 4 (right) for the measurement at the substation. It is well visible, that for larger impulses the mean value gets more conform to theoretical value (expected value). The standard deviation gets smaller for larger impulses and is thereby an indicator for the reliability of the measurement. For this kind of GIS the measuring errors for the time difference is in the range of 1 ns with impulses larger than 5 V (as per manufacturer: PD < 5 pC). The error in time corresponds for the position an uncertainty of 15 cm. The accuracy and sensitivity of this system is comparable to methods based on an oscilloscope.

■ **Feuchtebestimmung, Durchschlagsspannung und neuartige Isolieröle für Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Maik Koch

Diese Forschungsarbeit untersucht Verbesserungen an dielektrischen Diagnoseverfahren zur Feuchtebestimmung, Messungen der Durchschlagsspannung von Mineralöl und Isolierstoffe auf Basis von Pflanzenöl für Leistungstransformatoren.

Feuchtebestimmung in Leistungstransformatoren

Wasser in Leistungstransformatoren spaltet die Zelluloseketten der Feststoffisolierung hydrolytisch auf, begünstigt Teilentladungen, verursacht Bläschenbildung (Bubbling) und verringert die Durchschlagsspannung des Isolieröls. Die Kenntnis der Feuchtigkeit in Öl-Papier-Isolierungen ist deshalb von großer Wichtigkeit für die Betreiber.

Dielektrische Diagnosemethoden versprechen eine viel höhere Zuverlässigkeit als das herkömmliche Verfahren, mittels eines Gleichgewichtsdiagramms die Papierfeuchte aus der ppm-Ölfeuchte zu ermitteln. Jedoch überlagern sich in den dielektrischen Eigenschaften der Transformatorisolierung verschiedene Effekte: Leitfähigkeit von Öl und Zellulose, Grenzflächenpolarisation, Temperatur, leitfähige Alterungsprodukte und schließlich auch Wasser. Da dielektrische Diagnosemethoden die Feuchtigkeit bestimmen sollen, liegt deren Qualität in der *Unterscheidung* der verschiedenen Einflüsse. Herkömmliche Analysesoftwaren unterscheiden die leitfähigkeitserhöhende Wirkung von Alterungsprodukten nicht von der des Wassers, stark gealterte Transformatoren werden in ihrem Wassergehalt überschätzt. Fig. 1 illustriert den nicht von Wasser unterscheidbaren Einfluss leitfähiger Alterungsprodukte auf die dielektrischen Eigenschaften von Pressboard.

Eine neue Diagnosesoftware wurde programmiert, welche die Wasser vortäuschende Wirkung von Alterungsprodukten kompensiert. Die Software vergleicht einen Labordatensatz mit den Daten des zu analysierenden Transformators und ermittelt so Feuchtigkeit und Ölleitfähigkeit. Als Labordatensatz dienen Messungen an Pressboard verschiedener Feuchtigkeit, bei unterschiedlicher Temperatur und auch im gealterten Zustand. Ob die Software in jedem Fall den Einfluss leitfähiger Alterungsprodukte kompensieren kann, muss durch weitere praktische Tests bewiesen werden.

Daneben wurde der Einfluss des Pressboardtyps und des imprägnierenden Öls auf die dielektrischen Eigenschaften untersucht. Pressboard mit höherer Dichte ($1,1\text{--}1,3\text{ g/cm}^3$) weist eine höhere Permittivität auf ($\varepsilon' = 4,6$) als Material niedrigerer Dichte ($0,9\text{ g/cm}^3$) mit $\varepsilon' = 3,0$. Bei der Analyse von Leistungstransformatoren können diese Eigenschaften die Genauigkeit beeinträchtigen.

■ Moisture Determination, Breakdown Voltage and Novel Insulation Oils for Power Transformers

Dipl.-Ing. Maik Koch

This research project investigates improvements on dielectric diagnostic methods for moisture evaluation, measurements of the breakdown voltage in mineral oil and insulation fluids based on vegetable oils.

Moisture determination in power transformers

Water in power transformers causes three damaging effects: it decreases the dielectric withstand strength, accelerates cellulose aging and causes the emission of gaseous bubbles at high temperatures. Therefore knowledge about the moisture concentration in a transformer is of great importance for a safe operation and for further maintenance actions.

Moisture analysis by dielectric methods bases on a comparison of a measured dielectric response to a modelled one. Therefore a dependable laboratory data set is required. Measurements in time and frequency domain determined the influences of moisture, temperature, aging, oil impregnation and pressboard type on the dielectric properties. Based on these measurements a new software to analyse dielectric properties of real power transformers was written. As a novel feature it compensates for the influences of conductive aging byproducts. These byproducts such as acids have the same effect on the dielectric response as water and thus cause an over-estimation of moisture in contaminated transformers (Fig. 1).

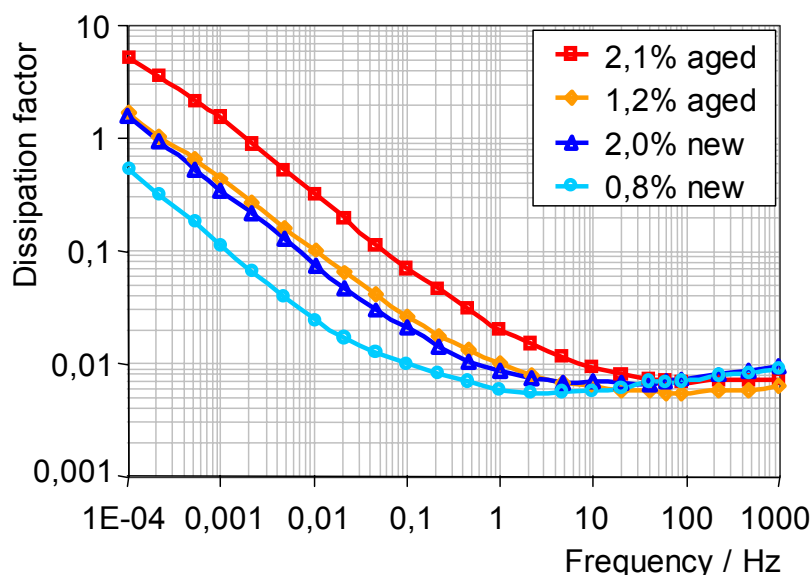


Fig. 1: Vergleich des Verlustfaktors von neuen und gealterten Pressboardscheiben bei ähnlichem Wassergehalt, gemessen bei 20°C Isolationstemperatur
Comparison of dissipation factor for new and aged pressboard discs having similar moisture contents measured at 20°C insulation temperature

Die Durchschlagsspannung von Mineralöl unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, Säure, Druck und Partikeln

Die Einflüsse von Feuchtigkeit, Säure, Druck und Partikeln auf die Durchschlagsspannung von mineralischem Isolieröl Nynas Nytro 3000 (X) wurde systematisch untersucht. Die Tests erfolgten nach IEC156/95 (VDE0370/Part5/96 und ASTM D1816), also mit kugelförmigen Elektroden in 2,5 mm Abstand. Feuchtigkeit stellt Ladungsträger zur Verfügung, eine erhöhte Feuchteverfügbarkeit verringert also die Durchschlagsspannung. Die Wassersättigung (relative Ölfeuchte) spiegelt das verfügbare Wasser wider und eignet sich deshalb besser zur Charakterisierung von Wasser als die herkömmliche Gewichtsfeuchte in ppm. Wird die Wassersättigung von 0 auf 20 % erhöht, so verringert sich die Durchschlagsspannung in Neuöl von 72 auf 61 kV. Auch Säuren als Alterungsprodukte verringern die Durchschlagsspannung (Fig. 2). Dabei verursachen jedoch speziell die niedermolekularen Säuren die deutlichste Verringerung, was durch Zugabe von Ameisensäure herausgefunden wurde. Die Säure- oder Neutralisationszahl bietet also keinen hinreichenden Indikator. Da Durchschlagsprozesse mit einer mikroskopischen Blase beginnen, erhöht der Öldruck die Durchschlagsspannung (Fig. 3). Unterdruck unterstützt die Blasenbildung, demnach sinkt die Durchschlagsspannung. Trockene Partikel zeigten nur einen geringen Einfluss.

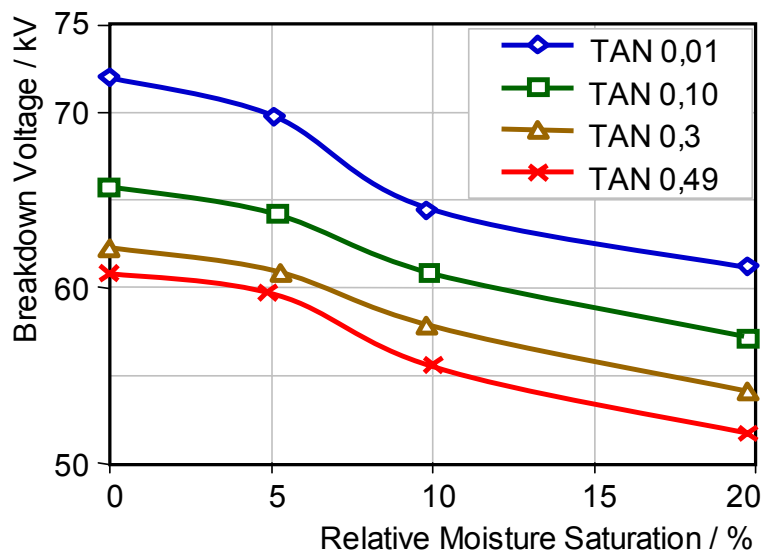


Fig. 2: Durchschlagsspannung von Mineralöl in Abhängigkeit von der Wassersättigung und der Säurezahl
Breakdown voltage in mineral oil as a function of relative moisture saturation and total acid number

Eine sehr hohe Streuung und unbefriedigende Reproduzierbarkeit begleiten die Messung der dielektrischen Festigkeit nach VDE0370, Teil 5. Ein neuartiger Prüf-ablauf und eine Überarbeitung der Norm erscheinen als wünschenswert.

The breakdown voltage of insulation oil under the influences of humidity, acidity, particles and pressure

The breakdown voltage of mineral insulation oil was systematically investigated under the influences of moisture, acidity, pressure and particles. The standards IEC156/95 (VDE0370/Part5/96 and ASTM D1816) specified the test conditions. Moisture provides charge carriers, therefore a moisture saturation of 0 to 20 % decreases the breakdown voltage from 72 down to 61 kV (Fig. 2). Acids as aging products decrease the dielectric strength too for the same reason. Not the total acid number TAN, but the low molecular acids effect the major decrease. Since the breakdown process starts with a microscopic bubble, an increasing pressure increases the breakdown voltage as well. The observed asymptotic behavior seems to come to a maximal end value of the breakdown voltage at around 150 kV. Under-inflation supports bubble generation, decreasing the dielectric withstand strength. Dry particles (cellulose fibers) decrease the breakdown voltage only at under-inflation, nearly no influence was observed at atmospheric pressure.

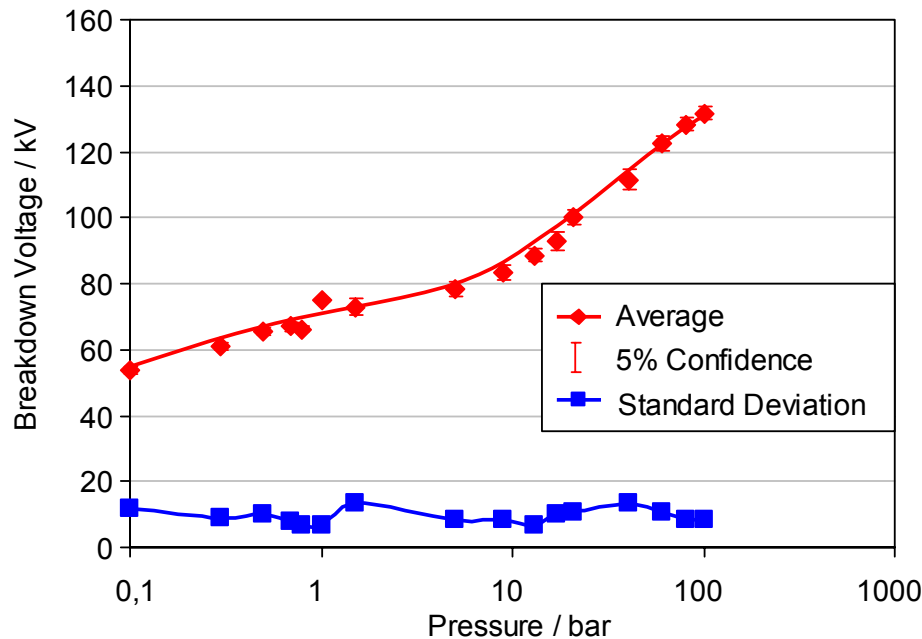


Fig. 3: Durchschlagsspannung von Mineralöl abhängig vom Öldruck
Breakdown voltage of mineral insulation oil depending on pressure

A very high scattering of the results signifies the breakdown voltage measurement. The first 40-100 breakdown tests were significantly lower than the later reached value. Furthermore the reproducibility does not satisfy. Thus a new test procedure and a new standard are desirable.

Isolierflüssigkeiten auf Basis von Pflanzenöl

Der Einsatz von Pflanzenölen (natürlichen Estern) als Isolier- und Kühlmedium in Leistungstransformatoren wird in den letzten Jahren häufig in der Fachliteratur diskutiert. Pflanzenöle besitzen einen höheren Flammpunkt, eine gute Umweltverträglichkeit, können mehr Wasser lösen und sollen sich bei Alterung positiv auf die Zellulose-Isolierung auswirken. Ein umfassender Vergleichstest zwischen fünf Ölen bei Neuzustand und nach thermischer Alterung prüfte ihre Eignung für Transformatoren.

Die Durchschlagsfestigkeit liegt mit mehr als 80 kV über der von Mineralöl. Noch deutlicher wird der Unterschied im gealterten Zustand (Kugelelektroden nach VDE 370 T.5). Das gegenüber Mineralöl 20-40fach höhere Wasserlösungsvermögen kann bei der Trocknung von Transformatoren mittels Ölumlauf vorteilhaft eingesetzt werden. Dabei transportiert Pflanzenöl viel mehr Wasser aus der Feststoffisolierung als das herkömmliche Mineralöl (Fig. 4 und Fig. 5). Die Neutralisationszahl der neuen Öle ist insbesondere bei den natürlichen Estern deutlich höher als beim Mineralöl. Nicht inhibiertes, hoch ölsäurehaltiges Sonnenblumenöl zeigte sehr gute Eigenschaften im Vergleich zu kommerzialisierten Pflanzenölen.

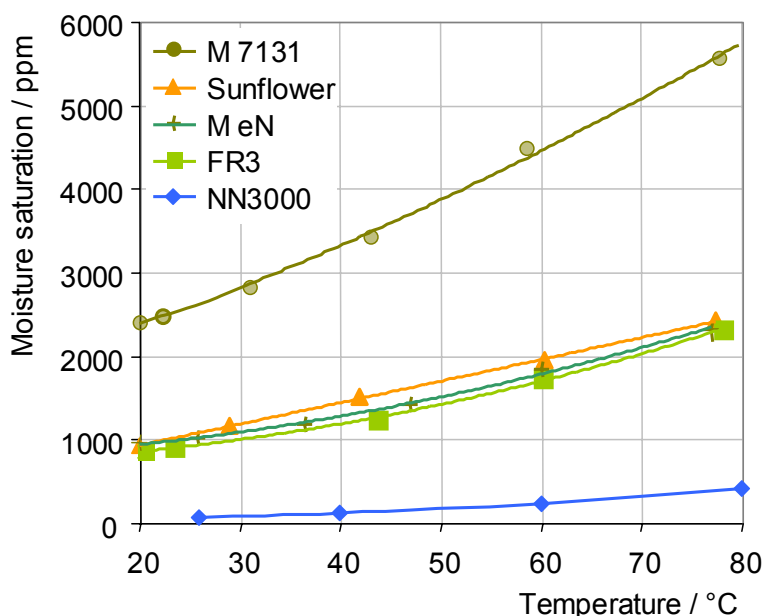


Fig. 4: Sättigungsisotherme für neue Öle: der synthetische Ester Midel 7131, die Pflanzenöle Sonnenblumenöl, Midel eN, Envirotemp FR3 im Vergleich zum neuen Mineralöl Nynas Nytro 3000

Moisture saturation graphs for new oils: synthetic ester Midel 7131, vegetable ultra-pure sunflower oil, Midel eN, Envirotemp FR3 in comparison to new mineral oil Nynas Nytro 3000

In dieser Untersuchung wurde der vergleichsweise hohe Stockpunkt bzw. die hohe Viskosität der Pflanzenöle, besonders im gealterten Zustand, als einziger Nachteil gegenüber Mineralöl gefunden. Weitere Forschungen betreffen die dielektrische Festigkeit auch bei inhomogenen Elektrodenanordnungen und das Gasungsverhalten.

Vegetable Oil as Insulating Liquid in Power Transformers

Investigations on vegetable oils (natural esters) as insulation and cooling medium in power transformers were frequently discussed and published during the last years. Advantages of vegetable oil compared to mineral oil are a high flash point, good environmental compatibility, high water solubility and they seem to behave more cellulose-friendly during insulation aging. Five insulation oils were comprehensively benchmarked in order to find out their applicability for power transformers.

The breakdown voltage with more than 80 kV exceeds clearly that of mineral oil. Even more evident becomes the difference after aging (spherical electrodes according to IEC156/95). The 20-40 fold higher water solubility compared to mineral oil supports on-line transformer drying by oil circulation. Thereby vegetable oil much more efficiently dries the solid insulation compared to mineral oil (Fig. 4 and Fig. 5). The neutralization number of the vegetable oils is before aging much higher compared to that of mineral oil, but not after. Non-inhibited, high-oleic sun flower oil had very good properties in comparison to the other oils.

In this investigation only the comparatively high solidifying point res. the high viscosity especially after aging was the only drawback compared to mineral oil. Further research will regard the dielectric strength at inhomogeneous electrodes and the gassing behaviour.

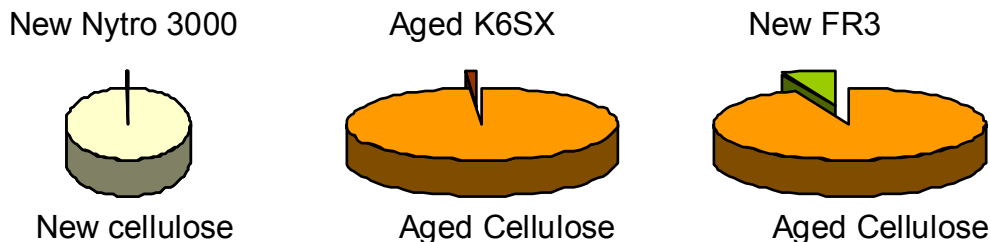


Fig. 5: Feuchteverteilung zwischen Öl und Zellulose im neuen Zustand, im feuchten bzw. gealterten Zustand und nach Öltausch mit einem natürlichen Ester
Water distribution between oil and cellulose under new conditions, aged and wet conditions and after oil exchange by a natural ester

Fig. 5 illustrates that cellulose contains the major part of water in a power transformer. Cellulose serves as a water storage medium, whereas oil serves for water transfer and for transformer drying in the case of an on-line oil circulation. The moisture distribution ratio is substantially changed only by introducing an insulating liquid with a high water solubility, as here the natural ester Envirotemp FR3.

- **Potentialfreie elektrische und magnetische Feldsonden zur Messung transienter elektromagnetischer Felder**

Dr.-Ing. W. Köhler

Die in den letzten Jahren am Institut entwickelten elektrischen und magnetischen Feldsonden wurden weiter optimiert und verbessert.

Bei der elektrischen Feldsonde wurde die Störsignaleinkopplung bei großen Feldamplituden deutlich verringert. Dazu wurde das Feldsondengehäuse etwas verkleinert und die kapazitive Sensorfläche und die von außen aufschraubbaren Ringelectroden zur Messbereichswahl wurden geometrisch optimiert. Fig. 1 zeigt die neue elektrische Feldsonde.



Fig. 1: Potentialfreie elektrische Feldsonde mit optimierter Sensorgeometrie und Abschirmelektrode
Potential-free electric field probe with optimized sensor and field screening electrodes

Zusätzlich wurde die Elektronikleiterplatte überarbeitet (z.B. durch Bedämpfung von langen Signalleiterbahnen), wodurch die Anstiegszeit der Feldsonde etwas kleiner wurde und die in der Sprungantwort geringfügig überlagerten Resonanzsignale unterdrückt werden konnten.

■ Potential-free Electric and Magnetic Field Probes for the Measurement of Transient Electromagnetic Fields

Dr.-Ing. W. Köhler

The field probes which have been developed at our institute in the last years have been improved and optimized.

The coupling of disturbance signals at high field amplitudes has been significantly reduced. This has been achieved by a smaller housing of the probe and due to a geometrical optimization of the capacitive sensor electrode and the toroidal field screening electrodes which are used for different measuring ranges. Fig. 1 shows a picture of the new electric field probe.

In addition the electronic printed circuit board has been improved (i.e. by damping resonating signal path tracks). The result is a reduced signal rise time and much smaller ringing signal content in the step response which now looks more smooth and clean (see Fig. 2).

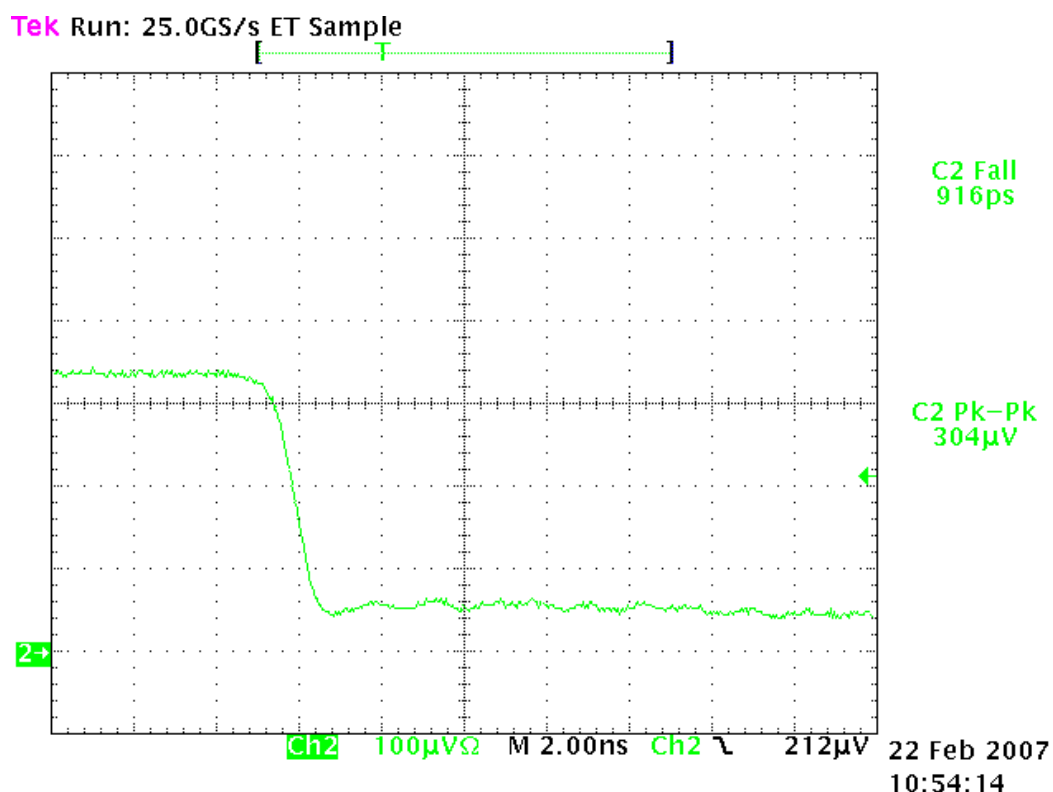


Fig. 2: Sprungantwort der optimierten elektrischen Feldsonde
Step response of the optimized electric field probe

Die magnetische Feldsonde wurde mechanisch komplett überarbeitet. Der sehr kompakte Aufbau der bisherigen Version wurde wesentlich geändert und die Elektronikleiterplatte ebenfalls. Diese ist jetzt größer und die gesamte Schaltung ist räumlich entkoppelt auf einer runden Leiterplatte angeordnet. Fig. 3 zeigt ein Foto der neuen Magnetfeldsonde.



Fig. 3: Potentialfreie magnetische Feldsonde mit optimiertem Gehäuse und Elektronikleiterplatte
Potential-free magnetic field probe with optimized housing and electronic PCB

Durch diese Maßnahmen konnten wesentliche Verbesserungen erzielt werden. Die bei steilen Impulsanstiegen vorhandenen Resonanzeffekte sind verschwunden und somit konnte die nutzbare Signalanstiegszeit auf unter eine Nanosekunde reduziert werden (Fig. 4). Durch den einfacheren mechanischen Aufbau und die frei zugängliche Elektronikleiterplatte wurde zudem die Servicefreundlichkeit wesentlich verbessert. Zusätzlich ist bei der neuen Magnetfeldsonde der Lichtwellenleiter am Feldsondengehäuse absteckbar.

The magnetic field probe has been mechanically redesigned (new housing). The quite compact mechanical design of the old magnetic field probe and its printed circuit board have been changed completely. The new PCB is bigger so that all electronic parts are located on one round shaped circuit board. In addition the single sections of the circuit are geometrically decoupled. Fig. 3 shows a picture of the new magnetic field probe.

By these means significant improvements could be achieved. The disturbing ringing signal which was present at steep impulses has almost disappeared. The result is a usable signal rise time of less than one nanosecond (see Fig. 4).

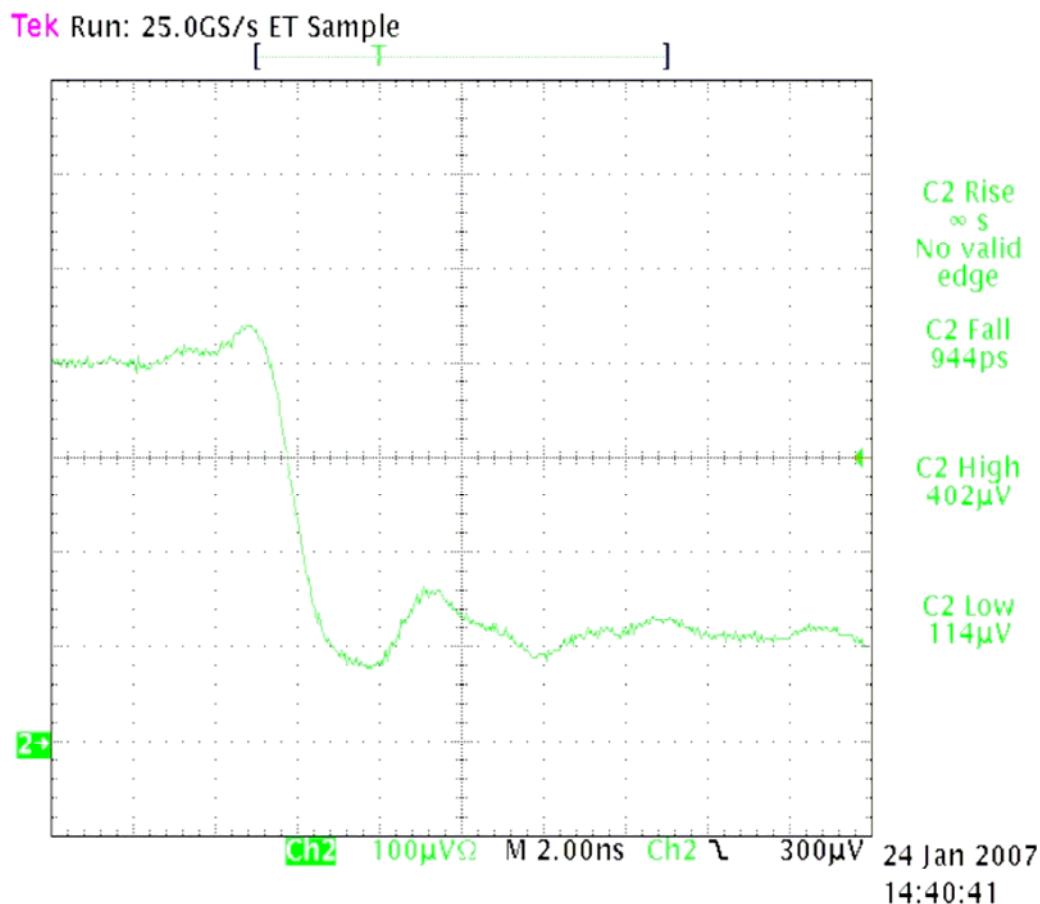


Fig. 4: Sprungantwort der optimierten magnetischen Feldsonde
Step response of the optimized magnetic field probe

Due to the simpler mechanical design and the new electronic printed circuit board where all components are easily accessible the new magnetic field probe is much easier to handle during service events. In addition the fibre optic cable can be plugged and unplugged from outside without opening the housing.

■ **Detektion von stromschwachen Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen**

Dipl.-Ing. Peter Müller

Störlichtbögen sind einer der häufigsten Gründe für den Ausfall einer Niederspannungsschaltanlage. Die durch einen Lichtbogen erzeugten Temperaturen und Druckwellen können zu einer völligen Zerstörung des Schaltschranks führen. Stromstarke kurzschlussähnliche Lichtbögen können durch Sicherungen und Schalter sicher abgeschaltet werden und sind in der Regel beherrschbar. Stromschwache Lichtbögen hingegen, mit Strömen unterhalb des Nennstromes, werden oft nicht oder zu spät erkannt (siehe Fig. 1). Stromschwache Störlichtbögen können durch stark verschmutzte Isolatoroberflächen entstehen, an denen sich Kriechströme bilden, die dann zum Überschlag führen. Eine weitere Ursache sind schmelzende Kupfersammelschienen. Lose Schraubverbindungen an Abgängen führen mit der Zeit zu Korrosion und infolge dessen zu einer immer stärkeren Erhitzung der Verbindung, bis der Übergangswiderstand so groß ist, dass die Wärmeverluste das Kupfer zum Schmelzen bringen.

Die Gefahr von stromschwachen Störlichtbögen liegt unter anderem darin, dass sie oft lange Zeit unerkannt bleiben. In dieser Zeit kann der Lichtbogen bereits große Teile der Schaltanlage zerstören, bis er entweder eine Schutzeinrichtung auslöst, oder aber in einen stromstarken, kurzschlussähnlichen Lichtbogen umschlägt und daraufhin die Anlage vollständig zerstören kann. Besonders gefährdet sind dabei die Schaltanlagen im Niederspannungsbereich. Hier werden die Sammelschienen in der Regel nicht isoliert. Aufgrund der geringen Spannung genügen wenige Millimeter Luft zur Isolation. Sie sind daher besonders anfällig für frei brennende Lichtbögen, ausgelöst durch Verschmutzung und andere Störfälle.

In einem neuen Ansatz soll untersucht werden, wie stromschwache Störlichtbögen frühzeitig detektiert werden können.

Zur Erzeugung stromschwacher Lichtbögen wird eine Anordnung wie in Fig. 2 beschrieben verwendet. Zur Begrenzung des Lichtbogenstromes werden Widerstände in Reihe zum Lichtbogen geschaltet. Die Funkenstrecke besteht aus zwei Kupferschienen im Abstand von 20 mm, ähnlich dem Abstand der Sammelschienen in einer Niederspannungsschaltanlage. Aufgrund der geringen Spannung kann die Funkenstrecke nicht von alleine durchzündet werden. Deshalb muss der Lichtbogen durch den Abbrand eines MF-Widerstandes getriggert werden. Der Widerstand erhitzt sich durch den großen Strom stark und beginnt zu brennen. Die entstehende Hitze und die ionisierten Gase ermöglichen dann einen Überschlag.

■ **Detection of Low Current Arc Faults in Low-Voltage Switchgears**

Dipl.-Ing. Peter Müller

Arc faults are a frequent reason for breakdown in switchgears. Temperatures and pressure generated by an arc can be responsible for total destruction of a switching station. High current arcs, similar to a short circuit, can be detected by fuses and switches and are widely controllable. Low current arcs, with currents lower than the rated current, are often not detected, or they are detected too late (see Fig. 1). Low current arcs can occur through heavy soiled insulators or if copper bars melt because of loose screw fitting contacts.

Low current arcs are especially dangerous because they are often detected too late. During the time of burning, these arcs may destroy large parts of the substation until they are triggering a fuse or change to a high current arc (like a short circuit) and destroy the whole substation. Particularly at risk are low voltage substations, where busbars usually are not isolated. Because of the low voltage only a few millimetres of air are used for isolation. For free burning arcs, triggered through heavy soiled insulators or other faults, they are especially endangered.

The goal of this new approach is to examine how to detect low current arcs in an early stage.

To generate low current arcs we used a circuitry like it is explained in Fig. 2. To limit current flow, two resistors are installed in series connection to the spark gap. The spark gap consists of two copper bars with a clearance distance of 20 mm, similar as the busbars in a substation. Because of the low voltage (230-400 V), the spark gap is not able to ignite independent. To trigger the spark gap a metal film resistor is burned between the copper bars. Because of the high current, the resistor heats itself and starts to burn. The resulting ionised gases and strong heat enable a flashover.

The arc current is recorded using Pearson-sensors. Typical for AC arcs is the expiration during zero crossing of arc-current and re-ignition while reaching re-ignition voltage. Because of re-ignition a steep current edge in the arc current is formed (see Fig. 3). The edge steepness is defined through re-ignition voltage, arc current and possible remaining ionisation in the spark gap of prior arcs.

Another attribute of an arc is the periodical cycling appearance. An arc which forms a risk for the switch gear will re-ignite after every zero crossing of the current. This periodical incident separates the arc fault from other arcs, for example switching arcs, which should end after one or two re-ignitions.

Mit Hilfe von Pearson-Sonden werden die beim Lichtbogen auftretenden Ströme gemessen. Charakteristisch für einen Wechselspannungslichtbogen sind das Erlöschen des Lichtbogens im Stromnulldurchgang und das Wiederzünden beim Erreichen der Wiederzündspannung. Durch das Wiederzünden entsteht eine steile Stromanstiegsflanke im Lichtbogenstrom (siehe Fig. 3). Die Flankensteilheit wird bestimmt durch die Wiederzündspannung, den Lichtbogenstrom und durch evtl. noch vorhandene Restionisation des vorherigen Lichtbogens.

Ein weiteres Merkmal des Lichtbogens ist das periodische Auftreten des Zündvorgangs. Ein Lichtbogen, der eine Gefahr für die Schaltanlage darstellt, zündet nach jedem Stromnulldurchgang neu. So entsteht ein fortlaufendes periodisches Ereignis. Dies unterscheidet den Störlichtbogen beispielsweise von einem Schaltlichtbogen, der nach ein bis zwei Zündvorgängen erloschen sein soll.

Derzeit werden Verfahren entwickelt, inwieweit die Frequenzcharakteristik des Lichtbogenstroms bei einer dreiphasigen Messung zum Schutz einer Schaltanlage genutzt werden kann. Ziel ist es, die Schaltanlage vor stromschwachen Lichtbögen zu schützen. Der durch Sensoren gemessene Strom wird auf spezifische Frequenzcharakteristiken des Lichtbogens untersucht, und im Falle eines Fehlers soll die Schaltanlage abgeschaltet werden.

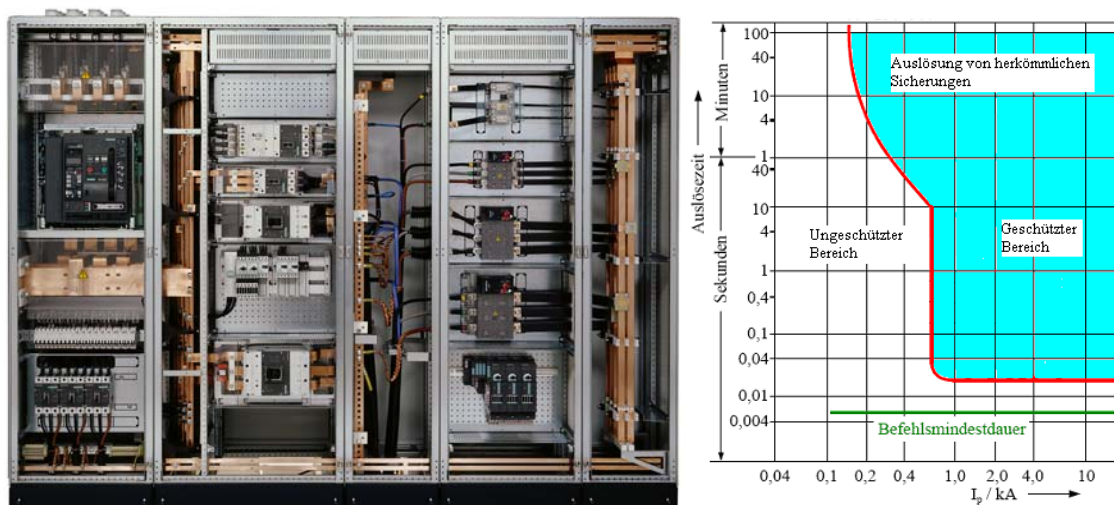


Fig. 1: Niederspannungsschaltanlage (links) und Schutzwirkung herkömmlicher Sicherungen (rechts)
Low-voltage switch gear (left) and protection effect of conventional fuses (right)

Currently procedures are developed how to use the frequency characteristics of arc current for protecting the substation. The goal is to protect the substation against low current arc faults. Current signals measured with sensors will be scanned for specific arc-characteristics. In case of detecting a fault, the substation should be switched of.

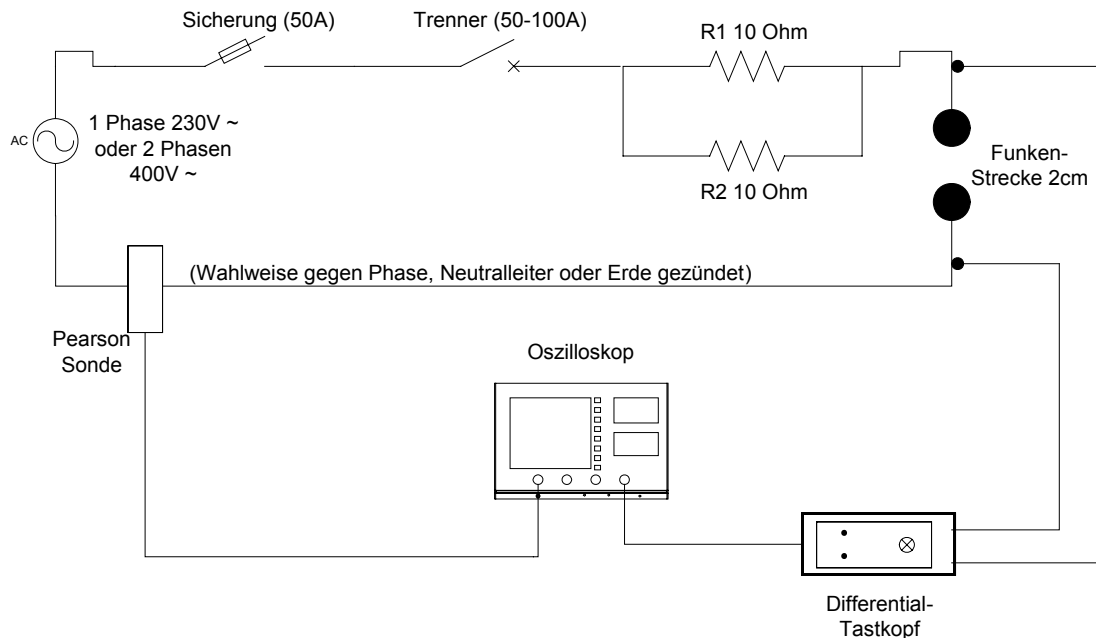


Fig. 2: Messaufbau zur Erzeugung eines stromschwachen Lichtbogens. Die Funkenstrecke muss durch Abbrand eines MF Widerstandes gezündet werden. Measurement setup for generation of low current arc faults. The spark gap has to be triggered by burning a metal film resistor.

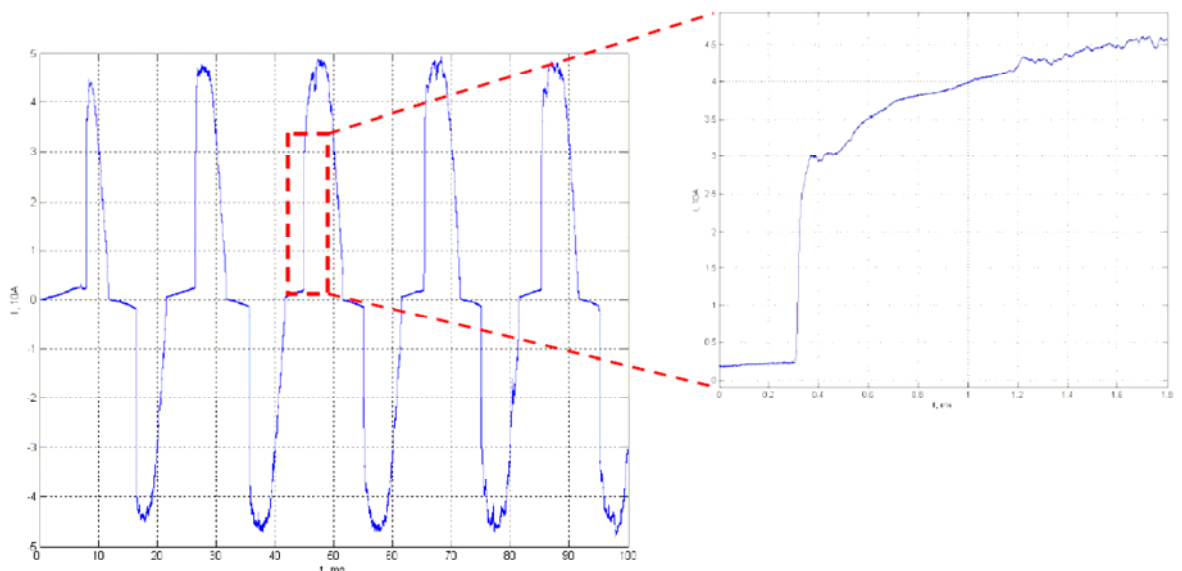


Fig. 3: Lichtbogenstrom (links) und Ausschnitt der steilen Stromanstiegsflanke beim Wiederzünden des Lichtbogens (rechts), Arc-fault current (left) and zoom of the rising edge of current while re-ignition of the arc(right)

■ **Bewertung der Einflüsse von mechanischen Fehlern an Übertragungsfunktionen in realen Leistungswicklungen, Messungen und Simulationen**

Dr.-Ing. Ebrahim Rahimpour

Aufgabe der modernen Diagnostik ist es, durch eine möglichst exakte Zustandsbestimmung die optimale Ausnutzung der Transformatoren im Hinblick auf die übertragbare Leistung und die Betriebsdauer zu gewährleisten, ohne die Betriebssicherheit unzulässig zu beeinflussen. Zu dieser Problemstellung werden verschiedene Verfahren erarbeitet und erforscht: thermische Überwachung, Öl-Analysen (DGA, Fufurol), TE-Messungen (elektrisch, akustisch, elektromagnetisch), Übertragungsfunktion, Relaxationsstrom, RVM (Recovery Voltage Measurement) und diverse andere. Jede Methode besitzt für sich eine ganz bestimmte Eignung, um Veränderungserscheinungen zu erfassen.

Für die Erkennung mechanischer Veränderungen in Wicklungen steht der Einsatz der Übertragungsfunktion zur Diskussion. Darüber hinaus soll herausgefunden werden, inwieweit dielektrische Fehler erkannt und lokalisiert werden können.

Das Verfahren ist eine vergleichende Methode, d.h. aktuellen Messungen sind immer Referenzmessungen gegenüberzustellen. Eine regelmäßige Kontrolle der Übertragungsfunktion ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung und kann Änderungen infolge des Betriebs frühzeitig erkennen. Treten signifikante Abweichungen in den Ergebnissen auf, so sollte neben der Erkennung auch eine Bewertung erfolgen. Für den Betreiber eines Transformators ist die Art und das Ausmaß einer möglichen Veränderung interessant.

Die wichtigsten Fehler, die mit Hilfe der Übertragungsfunktionen erkannt werden können, sind (Fig. 1):

- 1- Kurzschlüsse zwischen Windungen oder Spulen
- 2- Änderungen der Scheibenabstände
- 3- Radiale Deformationen
- 4- Axiale Verschiebungen

Derartige mechanische Defekte sind die Folge der bei transformatornahen Kurzschlüssen auf die Wicklungen einwirkenden Kräfte.

Alle oben genannten Fehler sind immer bei kleinen Modellwicklungen untersucht worden. Viele gute Resultate hinsichtlich der Einflüsse von mechanischen Fehlern auf Übertragungsfunktionen konnten durch Forschungen erzielt werden. Bei all den Forschungen fehlt aber noch immer, die Einflüsse von diesen Fehlern auf die Übertragungsfunktion bei realen Transformatorwicklungen zu untersuchen.

■ **Evaluating the Effects of Mechanical Faults on Transfer Function in Real Transformer Windings, Measurements and Simulations**

Dr.-Ing. Ebrahim Rahimpour

The aim of modern monitoring and diagnostic methods is to ensure the optimal and reliable utilization of transformers in respect to the transferred power and its life time. In this regard several procedures such as thermal monitoring, oil analyses (Dissolved Gas Analyses, Furfurol), partial discharge measurements (electric, acoustic), transfer function, relaxation current, recovery voltage measurement, etc., are investigated and applied. Each method can be applied for a specific type of problem and has its own merits.

Transfer function variations are used as a tool to recognize mechanical displacements and deformation of windings, but determining the exact location and the extent of these faults are subject to active research. The suitability of this method was confirmed in several experiments on power transformers in service.

This method is a comparative method, i.e., the measurement results should be compared with reference results. If significant deviations in the results occur, the transformer is faulty and appropriate action has to be undertaken. From the operation point of view, the type and the location of the fault are important. The correlation between the faults and the transfer function variations are not clearly known. These relations can be obtained by measurements on power transformers or by developing an appropriate model of the transformer for simulations.

The most important faults, which can be detected by the help of transfer function method, are as following (Fig. 1):

- 1- Short circuits between turns or discs
- 2- Disc space variations
- 3- Radial deformations
- 4- Axial displacements

Such mechanical faults are caused by large short circuit forces, which might be occurred nearby transformers.

All of above mentioned faults are always investigated on small model windings. In the literature, it could be found lots of excellent results about the effects of these mechanical faults on transfer function. By all of previous researches, such investigations on real transformer winding are not carried out. The real transformer windings are considerably greater than model windings, which are studied up to now in laboratories.

Reale Wicklungen von Leistungstransformatoren sind bedeutend größer als Modellwicklungen, die bisher im Labor untersucht worden sind.

Das Ziel der Forschung ist, eine reale große 400-kV-Hochspannungswicklung zu untersuchen und die sich ergebenden Messergebnisse mit Hilfe eines passenden Modells abzuschätzen. Das Testobjekt besteht aus 86 Scheibenspulen, die aus neun Windungen zusammengesetzt sind. Steht ein geeignetes Simulationsmodell zur Verfügung, ist es sehr einfach, viele verschiedene denkbare Fehler zu untersuchen, ohne kostspielige und auch in manchen Fällen unmögliche Messungen auszuführen. Das Modell sollte aber erst mit Hilfe der Forschung herausgefunden und verifiziert werden.



Fig. 1: Eine reale fehlerhafte Transformatorwicklung, bei der verschiedene Fehler aufgetreten sind.

A failed real transformer winding, which includes different types of faults

Da die Modellierung auf der Basis der Selbst- und Gegeninduktivitäten (Fig. 2) von verschiedenen detaillierten Modellen für die Zustandsdiagnose geeigneter und vorteilhafter ist, wird in dieser Arbeit diese Methode für die Transformatormodellierung genommen, um die Zusammenhänge zwischen berechneten oder gemessenen Übertragungsfunktionen, Änderungen in den Parametern des Modells und den auftretenden Fehlern in den Transformatorwicklungen zu untersuchen.

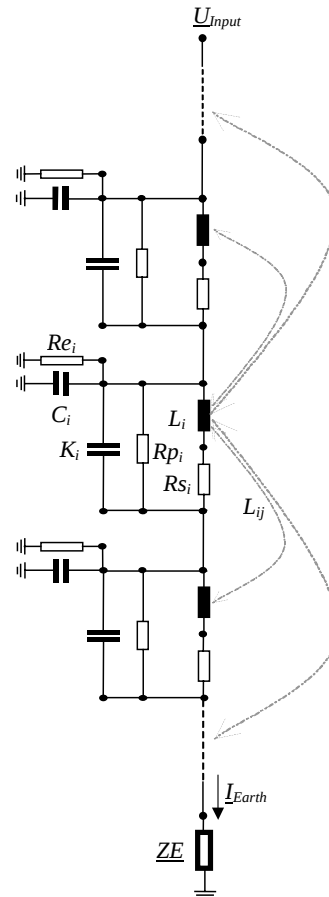


Fig. 2: Modell einer Transformatorwicklung auf Basis der Selbst- und Gegeninduktivitäten
Model of one transformer winding based on self and mutual inductances

The aim of the research is investigation and simulation of a real 400 kV high voltage winding. The test object includes 86 disks, nine turns in each disk. If there is a proper model to simulate of winding, it will be very easy studying of many different thinkable faults, without doing costly or even impossible measurements. However, the model should first be found out and verified through investigations.

Investigations show that among different approaches of the detailed modeling, the one, which is based on the self and mutual inductance (Fig. 2) is the most appropriate for the description of the magnetic field behavior and fault diagnostic purposes. Hence, this model is used in this work for the study of mechanical faults in transformer windings. The changing of model parameters due to occurred faults in winding is investigated and correlation between these changes and related faults is studied.

■ Unterteilung von EMV- Störgrößen in Gleich- und Gegentakteile zur Charakterisierung des Störverhaltens aktiver Schaltungen

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Die Problemstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) gewinnt mit steigender Komplexität der Anwendungen eine immer höhere Bedeutung. Allerdings erfolgt eine Bewertung der EMV-Eigenschaften eines elektrischen Gerätes meist am Ende der Entwicklungskette, was eine Sicherstellung der vorgegebenen Grenzwerte erschwert. Es obliegt dann der Erfahrung des Entwicklungsingenieurs, die Störabstrahlung sowie die Störfestigkeit des Moduls durch „trial and error“-Versuche zu verbessern. Besonders bei der Auslegung von Leitungsfiltren zur Reduzierung der leitungsgebundenen Störemission (conducted emission) im Frequenzbereich von 0,15 – (30)108 MHz erfolgt eine hohe Anzahl an Iterationsschritten, um die passende Filterstruktur zu finden. Grund dafür ist die Abhängigkeit der Filterdämpfung (Einfügedämpfung) vom jeweiligen Last- bzw. Eingangswiderstand. Für den genormten Prüfaufbau zur Komponentenmessung gemäß CISPR25 bzw. EN55011 ist die Eingangsimpedanz durch die entsprechenden Netznachbildungen bekannt. Es bleibt somit als Unbekannte die Lastimpedanz, die durch den Prüfling repräsentiert wird. Die Netznachbildung sorgt dafür, dass die hochfrequenten Störungen (I_p , I_n) vom Prüfling für beide Anschlussleitungen mit 50 Ohm terminiert werden und nicht durch die Spannungsversorgung geschlossen werden.

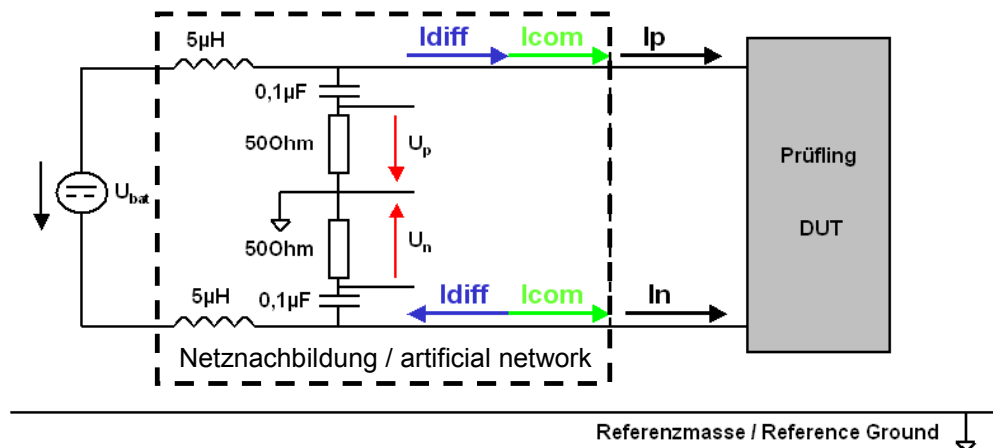


Fig. 1: Gesamtaufbau mit HF- ESB der Netznachbildung und Prüfling
Setup with high frequency EC for the artificial network and device unter test

Fig. 1 zeigt den Prüfaufbau mit Netznachbildung und Prüfling zur Messung der leitungsgebundenen Störspannung entsprechend CISPR25. Das Setup für Prüflinge mit 230-V-AC-Versorgungsspannung gemäß EN55011 entspricht mit einer V-Netznachbildung demselben Prinzip.

■ Separation of EMC- Disturbances into Common- and Differential-Mode Values to Characterize Active Circuits

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Due to the increasing level of component packaging and the rise of electronic devices, the problem of EMC became one of the major tasks within engineering. However the EMC-problem in general is the last considered task within the process of development. Thereby it is getting more complicated to find adequate solutions to pass the given limit values for radiated emissions and susceptibility requirements. In many cases the problem is solved with years of experience of EMC engineers with trial and error attempts. Especially in the field of designing power line filters to reduce conducted noise emissions within the frequency range of 0.15 –(30)108 MHz many investigations take place to find the appropriate filter structure. The main barrier to find a quick solution is the dependency of the insertion loss of the in and output impedance of the filter system. Within the measurement setup according to CISPR25 and EN55011 (FCC) the input impedance of the filter is known due to the connected artificial network (AN) respectively line impedance stabilisation network (LISN). However the load-impedance of the device under test (DUT) is still unknown and can only be estimated. The artificial network terminates the high frequency currents (I_p) and (I_n) through the 50 Ohm resistors and prevent a high frequency shortcut across the power supply. Figure 1 shows the setup to measure the conducted emissions according to CISPR25. An analogue equivalent circuit can be found for EN55011 (FCC) measurements.

The general high frequency currents I_p and I_n can be separated into common- and differential-mode currents. The differential-mode current corresponds to the active current. Common-mode current arises due to leakage capacitance and unwanted parasitic elements. The high frequency currents generate the measured voltages across the terminals with:

$$U_p = U_{com} + U_{diff} \quad (1)$$

$$U_n = U_{com} - U_{diff} \quad (2)$$

Both equations can now be solved in respect to U_{com} and U_{diff} to:

$$U_{diff} = \frac{U_p - U_n}{2} \quad (3)$$

$$U_{com} = \frac{U_p + U_n}{2} \quad (4)$$

Die gemessenen Störspannungen an den Netznachbildungen können in Gleich- und Gegentaktanteile unterteilt werden. Der differenzielle Strom entspricht dabei dem Nutzstrom, wobei Gleichtaktstörungen durch ungewollte kapazitive Kopplungen bzw. parasitäre Elemente entstehen. Durch eine phasenrichtige Addition bzw. Subtraktion können die Gleich- (Common-Mode) und Gegentaktspannungen (Differential-Mode) gemäß Gleichung (3) und (4) ermittelt werden. Für die phasenrichtige Addition und Subtraktion der nodalen Größen U_{bat+} und U_{bat-} werden 0° und 180° Power-Combiner verwendet, die bei der Kalibrierung des Systems mit berücksichtigt werden müssen. Abbildung 2 zeigt die gemessenen Störspannungen für eine dreiphasige gepulste Motoransteuerung.

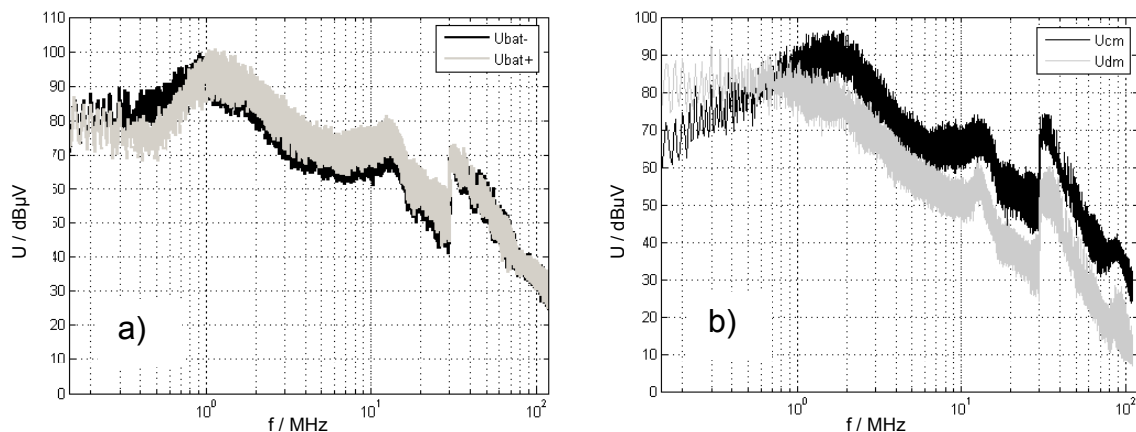


Fig. 2: a) Störspannung auf den Versorgungsleitungen U_{bat+} und U_{bat-}
b) Gemessene Gleich- (U_{cm}) und Gegentaktspannungen (U_{dm})
a) Conducted emission of the motor control unit
b) Separated emissions into common (U_{cm})- and differential-mode (U_{dm})

Deutlich zu sehen ist die bereits ab 1 MHz überwiegende Gleichtaktstörung im Vergleich zur Gegentaktstörung. Bei der Auslegung des Leitungsfilters muss somit verstärkt auf Gleichtaktstörungen eingegangen werden.

Aus dem HF-Ersatzschaltbild für Gleich- und Gegentaktstörer in Abbildung 3 ist es möglich, sich die Wirkung der möglichen Filterelemente herzuleiten. Für Leitungsfiler beschränkt sich die Auswahl auf vier mögliche Grundelemente. Abbildung 4 zeigt den Einfluss der einzelnen Filterelemente auf die verschiedenen Moden. Zu beachten ist dabei, dass Modenwandlungen auftreten, welche z.B. bei einer Gleichtaktanregung am Filtereingang zu einer Gegentaktstörung an den Netznachbildungen führt. Eine Seriendrossel zeigt Einfluss auf alle möglichen Kombinationen und kann dadurch nicht zur gezielten Unterdrückung einzelner Moden verwendet werden. Geringe Unsymmetrien innerhalb des Aufbaus einer Gleichtaktdrossel, oder auch stromkompensierte Drossel, können sich ebenfalls negativ auf das Dämpfungsverhalten bzw. die Modenkonversion auswirken. Das als Y-C-Struktur bekannte Element, mit zwei gegen die Bezugsmasse geschalteten Kondensatoren, ist ein effektives Mittel zur Begrenzung der Gleich- und Gegentaktstörer, wobei auch hier auf Symmetrie der Anordnung in Bezug auf die Bauteilwerte sowie die Anschlussgeometrie geachtet werden muss.

It is important to remark that the voltages have to be added respectively subtracted with the phase information. Figure 2 shows the measured voltages across the terminals for U_{bat+} and U_{bat-} as well as the separated common- and differential-mode voltages for a three phase motor control unit. The common-mode voltage is considerably higher over a wide frequency range than the differential-mode. This means that the common-mode voltage requires special attention within the filter development process.

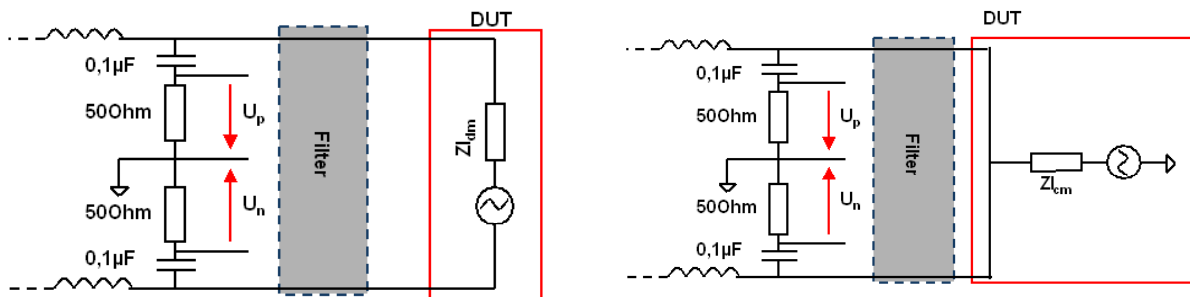


Fig. 3: HF-ESB für Gegen- und Gleichtaktstörungen
High frequency EC for differential- and common-mode disturbances

Structure /Mode	DM	DM->CM	CM	CM->DM
	X			
	X	X	X	X
	X		X	
			X	

- X- C- Structure
- Inductor
- Y- C- Structure
- Common-Mode Choke

Fig. 4: Einfluss einzelner Filterelemente auf Gleich- und Gegentaktstörungen
Influence of different filter elements to common- and differential disturbances

Out of the high frequency equivalent circuit for common- and differential-mode voltages in Fig. 3 it is possible to evaluate the influence of the filter elements to the different modes in Fig. 4. One should pay attention to possible mode conversions from e.g. common- to differential-mode. Especially series inductors will create a mode conversion in every direction. Although the desired mode is damped, the noise is converted into the other mode.

An ideal common mode choke is only blocking common-mode noise. In reality small unsymmetries whilst the production of the device or whilst mounting the device on a PCB (printed circuit board) can cause also an amount of mode conversion. The same problem has to be considered when using a Y- C- structure. Special attention should be paid to symmetry respectively same component values and PCB-routing.

■ **Untersuchung der Transmission elektrostatischer Entladungen innerhalb von elektronischen Geräten**

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Elektrostatische Entladungen sind die schädlichen, im wahrsten Sinne des Wortes blitzschnellen Auswirkungen der meist unbemerkt und langsam ablaufenden elektrostatischen Aufladung. Letztere entstehen beispielsweise durch Berührung und Trennung zweier Kunststoffgegenstände.

Durch den vermehrten Einsatz von Kunststoffen in technischen Systemen zu Lasten von leitfähigen Materialien treten elektrostatische Aufladungen heute häufiger auf, als noch vor Jahren. Dagegen nimmt die Immunität integrierter Schaltkreise, wie es beispielsweise die Mikrocomputer in modernen Kaffeemaschinen sind, gegenüber elektrostatischen Entladungen ab. Konkret sind die immer kleiner werdenden Halbleiterstrukturen zwar inzwischen in der Massenproduktion herstellbar, diese Mikrostrukturen sind jedoch auch anfälliger gegenüber den Strömen, wie sie von elektrostatischen Entladungen ausgelöst werden. Anfälligkeit bezieht sich hierbei auf verschiedene Fehlermechanismen, die durch elektrostatische Entladungen ausgelöst werden können. Grob unterteilt, kann man Fehler entweder auf die bei einer Entladung auftretende hohe Spannung oder aber auf den zeitgleichen Stromimpuls zurückführen.



Fig. 1: Zeitgemäßes SMD-Bauelement mit 0603-Gehäuse
Common surface mounted device in an 0603 package

Um diese Fehlermechanismen in und an den genannten Halbleiterschaltungen besser zu verstehen, müssen die wirksamen Vorgänge mit geeigneter Messtechnik sichtbar gemacht werden. Diese Messtechnik muss sich nicht nur für die zeitlich sehr kurzen Ereignisse im Nanosekunden-Bereich eignen, sondern auch den dabei auftretenden hohen Spannungen bzw. Strömen standhalten. Aus der Kurzzeitigkeit der ESD-Impulse folgt die Forderung nach hoher Bandbreite solcher Messmittel. Diese Anforderung kann nur durch kompakte Mess-Sonden erfüllt werden.

■ Investigation of the Transmission of Electrostatic Discharges within Electronic Devices

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Electrostatic discharges (ESD) are the harmful effects - literally as fast as lightning - of the usually unrecognised and slow build-up of electrostatic charge. The latter is caused by touching and separating two plastic items, for example.

Since more and more plastics are used in technical systems, effectively substituting naturally conductive materials such as metals, electrostatic charging was observed increasingly often in the recent years. However, the immunity of integrated circuits against electrostatic discharge is decreasing. Precisely speaking the smaller and smaller structures of modern semiconductors are manufacturable on high scales, yet it is these semiconductor structures which are weaker towards the currents caused by electrostatic discharges. In this context, weakness relates to different failure criteria, which can be caused by electrostatic discharges. A gross distinction can be made by tracing back a fault to either high voltages or high currents during a discharge event.



Fig. 2: ESD-Shunt, montiert auf einem üblichen SMA-Hochfrequenz-Stecker
Electrostatic-Discharge-Shunt mounted on a standard SMA-RF plug

In order to understand the failure mechanisms within the mentioned semiconductor circuits and the adjacent lumped circuitry it is necessary to enable measurements which can make the relevant processes visible. This measuring technology not only needs to be fit for the very short events, but it also has to withstand the occurring high voltages and currents. From the short duration of the ESD impulses follows the requirement of a high bandwidth of such measuring equipment. This requirement can be accomplished only by compact setup. Modern high voltage measuring equipment is constructed with have long insulation distances and thick insulator layers and therefore is not able to measure the short impulses of electrostatic discharges.

Heutige Hochspannungs-Messtechnik wird aus Sicherheitsgründen in der Regel mit großen Isolationsabständen und dicken Isolationsschichten ausgeführt. Sie ist deshalb für die kurzen Impulse einer elektrostatischen Entladung nicht geeignet. Solche Impulse sind für generische Hochspannungs-Messtechnik, wie sie beispielsweise in der Betriebsmitteldiagnostik bei Energieversorgungsunternehmen eingesetzt wird, aus den genannten Gründen nicht messbar.



Fig. 3: Erweitertes ESD-Target zur Vermessung von SMD-Bauelementen
Enhanced ESD-Target for measuring lumped Surface Mounted Devices

Dagegen kann die Forderung nach einer hohen Spannungsfestigkeit von den Messmitteln der Hochfrequenztechnik in der Regel nicht erfüllt werden. Eine Messung von ESD-Entladungen mit schneller Hochfrequenzmesstechnik führt normalerweise zur Beschädigung des Messmittels, was den Einsatz solcher Messgeräte ausschließt. Es muss ein Mittelweg gefunden werden, die gegensätzlichen Anforderungen an ESD-Messmittel zu erfüllen. Dies ist Gegenstand dieser Forschungsarbeit.

Die orts- und zeitgenaue Messbarkeit von ESD ist Voraussetzung für die Erstellung realitätsgetreuer Simulationsmodelle. Deshalb wurde unter anderem ein mechanischer Messadapter zur Messung schneller Ströme entwickelt, der speziell im Hinblick auf die Handhabung durch den Bediener während sich wiederholender Messzyklen optimiert wurde (Fig. 2). Um sowohl einzelne SMD-Bauelemente (Fig. 1) als auch kleine SMD-Bauteil-Netzwerke unter ESD-Beanspruchung zu vermessen, wurde ein sogenanntes Pommerenke-Target um diverse Fräsungen erweitert (Fig. 3). Damit soll einerseits ein möglichst normnaher Messaufbau beibehalten werden, andererseits aber auch die Montage von Bauteil-Netzwerken und der notwendigen Messmittel ermöglicht werden.

Erste Ergebnisse wurden bei Untersuchung der Degradation beziehungsweise des Parameterdrifts bei diskreten SMD-Bauelementen erzielt (s. Fig. 4).

On the other hand, the requirement of high dielectric strength can not be achieved with common RF measuring equipment and therefore this type of equipment is not applicable for the high voltages occurring during an ESD event.

Instead, a middle way needs to be found in order to fulfill the apparently contradictory requirements for ESD measuring equipment. This task is the main objective for the work presented here.

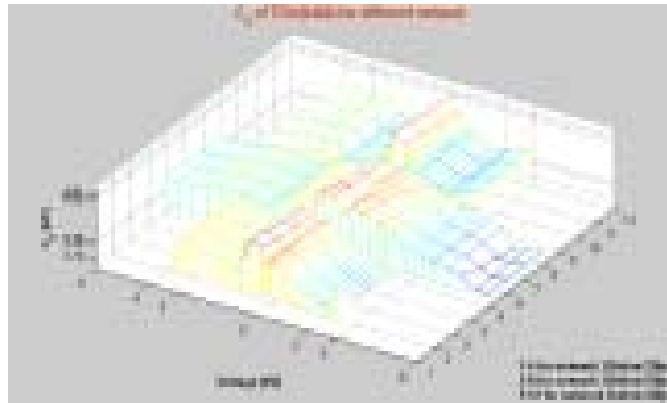


Fig. 4: Degradation von Standard SMD-Bauelementen nach Entladungen
Derating of standard lumped SMD elements after discharges

The spatial and timely exact measurability of an electrostatic discharge is the precondition for the creation of realistic simulation models. Because of this, a mechanical measuring adapter was developed, which is optimised with respect towards its handling during repeated measuring cycles (see Fig. 2).

Furthermore, a Pommerenke ESD-Target was enhanced by various grooves (see Fig. 3) in order to measure single lumped surface mounted devices (see Fig. 1) and small SMD-networks during ESD events within a close-to-standards measuring setup whilst enabling at the same time the necessary application of multiple measuring probes.

First results were achieved during investigating the derating, respectively the drift of parameters, of discrete surface mounted devices (see Fig. 4).

■ **Neuronale Netze zur Prognose der Deckelöltemperatur von Transformatoren**

M.Sc. Rummiya Vilaithong

Die Alterung von Öl-Papier-isolierten Leistungstransformatoren hängt zu großen Teilen von ihrer thermischen Belastung ab. Die Vorhersage der Deckelöltemperatur im laufenden Betrieb (online) stellt eine Möglichkeit dar, das thermische Verhalten von Transformatoren festzustellen. Die große Bandbreite an Einsatzgebieten der künstlichen neuronalen Netze zeigt, welche Bedeutung sie als Werkzeug in modernen numerischen Berechnungsmethoden einnehmen. Daher ist es ebenfalls von Interesse, diese Technologie bei der Vorhersage der Deckelöltemperatur einzusetzen.

Neuronale Netze sind nicht-lineare, statistische Systeme zur Datenmodellierung. Sie können eingesetzt werden, um komplexe Beziehungen zwischen Eingabe- und Ausgabedaten zu modellieren oder um Mustererkennung in vorhandenen Daten zu betreiben. Neuronale „feed-forward“-Netze sind die am meisten verbreiteten Modelle im praktischen Einsatz. Sie setzen sich zusammen aus vielen Berechnungselementen, den sogenannten Neuronen, welche parallel arbeiten. Diese Neuronen sind untereinander verbunden durch gewichtete Informationskanäle. Diese Gewichtungen werden durch einen Lernprozess bestimmt, beim sogenannten „Training“ des Netzwerkes.

Auf Basis der Daten eines 850-MVA-21/220-kV-ODAF-Transformators wurden verschiedene einfache feed-forward-Netzstrukturen zur Vorhersage der Transformator-Deckelöltemperatur untersucht. Die zuletzt gemessene Deckelöltemperatur, der Laststrom, die Umgebungstemperatur und die Betriebszustände der Pumpen und Lüfter wurden als Eingabedaten des Netzes verwendet. Die neuronalen Netzstrukturen wurden anschließend in mathematische Modelle zur Deckelöltemperaturberechnung überführt. Die Leistungsfähigkeit dieser Modelle ist dargestellt als Temperaturabweichung zwischen der gemessenen und der berechneten Deckelöltemperatur.

Vergleich verschiedener Lernalgorithmen und unterschiedlicher Anzahl von Neuronen in neuronalen „one-hidden layer feed-forward“-Netzen

Die durchschnittliche Abweichung der berechneten Deckelöltemperatur durch das neuronale „one-hidden layer feed-forward“-Netz, trainiert durch drei verschiedene rückwärtspropagierende Trainingsalgorithmen, ist in Fig. 1 gezeigt. Die Ergebnisse stellen die Abweichungen verschiedener Netze mit unterschiedlicher Anzahl an versteckten Neuronen zwischen 1 und 20 dar. Der Bayessche Regulierungsalgorithmus hat eine bessere Leistung gezeigt als die anderen untersuchten. Die geringste Temperaturabweichung beträgt 1,5 K und ist im Ergebnis des Netzes mit fünf Neuronen abzulesen. Jedoch ist eine gute Leistung, bei der die Abweichung geringer als 2 K ist, ebenfalls bei Modellen mit geringer Anzahl an Neuronen zu finden.

■ **Neural Networks for Transformer Top-Oil Temperature Prediction**

M.Sc. Rummiya Vilaithong

Aging of oil immersed cellulose insulation in power transformer depends mainly on its thermal load. In order to keep power transformers longer in service, it is worth to pay particular attention on their thermal behaviours. On-line transformer top-oil temperature prediction is an opportunity for diagnosis of the thermal behaviour of power transformers. Since an artificial neural network presents a growing new technology as indicated by a wide range of applications, it has become an important tool in modern numerical calculation. Therefore, there is also an interest for transformer top-oil temperature prediction using neural networks.

In practical terms, neural networks are non-linear statistical data modelling tools. They can be used to model complex relationships between input and output or to find patterns in data. **Feed-forward neural networks** are the most popular and most widely used models in many practical applications. They are composed of many computing elements, called neurons, working in parallel. Between the neurons, there are weighted connections, which are allowed to be adapted through a learning process by training the network.

Several simple feed-forward network structures for transformer top-oil temperature prediction have been investigated using the data from 850 MVA, 21/220 kV, ODAF transformer. They were trained with different backpropagation training algorithms. Last-state of measured top-oil temperature, load current, ambient temperature and operating states of pumps and fans were applied as input of the networks. The neural network structures were later compiled to mathematical models for top-oil temperature calculation at varying load current and ambient temperature. The performance of the model is presented by the temperature deviation between the measured and the calculated top-oil temperature.

Comparison of different learning algorithms and different number of neurons in one-hidden layer feed-forward neural networks

The average top-oil temperature deviations calculated from the single-hidden layer feed-forward networks trained by three different training algorithms are shown in Fig. 1. The results represent the deviations from different networks with the numbers of hidden neurons varied from 1-20. The Bayesian regularization-training algorithm has shown a better performance than others. The lowest average temperature deviation is 1,5 K and is found in the result of the network with five hidden neurons. It can be seen that a good performance, where the average temperature deviations are less than 2 K, can also be found in the models with the smaller number of neurons.

Untersuchung bezüglich der Anzahl versteckter Ebenen (hidden layers)

Die feed-forward-Modelle wurden des Weiteren mit zwei versteckten Ebenen und einer Anzahl versteckter Neuronen zwischen 1 und 10 in beiden versteckten Ebenen konstruiert. Der Bayessche Regulierungsalgorithmus wurde als Trainingsalgorithmus angewandt. Die niedrigste Temperaturabweichung beträgt 1,7 K und wurde für ein Netzwerk mit drei Neuronen in der ersten Ebene und acht Neuronen in der zweiten Ebene festgestellt. Es wird deutlich, dass hier Netzwerke mit zwei versteckten Ebenen keine bessere Leistung zeigen, als Netze mit nur einer versteckten Ebene (one-layer hidden).

Vergleich verschiedener neuronaler Netzwerktopologien

Im Vergleich zu feed-forward Netzen stellen rekurrente neuronale Netze Modelle dar, in denen Rückkopplungen (feedback) angewendet werden. Während sich die Informationen in einem feed-forward-Netz linear nur vom Eingang zum Ausgang fortpflanzen, werden bei einem rekurrenten Netz Informationen ebenfalls von späteren Verarbeitungsstufen zu früheren zurückgeführt.

Die Ergebnisse, die mit derselben Netzwerkstruktur erzielt wurden wie die mit dem feed-forward-Netz mit einer „hidden layer“, zeigen, dass das Elman-Netz mit einer versteckten Schicht die schlechteste Effizienz aufweist. Mit fünf Neuronen in der versteckten Schicht und dem bayesischen Regularisierungsalgorithmus beträgt die mittlere Temperaturabweichung 2,8 K.

Der Rechenaufwand für den Trainingsvorgang ist wesentlich größer als beim feed-forward-Netz, da rekurrente Netze eine höhere Komplexität aufweisen. Fig. 2 zeigt die innerhalb einer Woche gemessenen Deckelöltemperaturen und im Vergleich dazu die mit feed-forward-Netzen und rekurrenten Netzen berechneten Temperaturen.

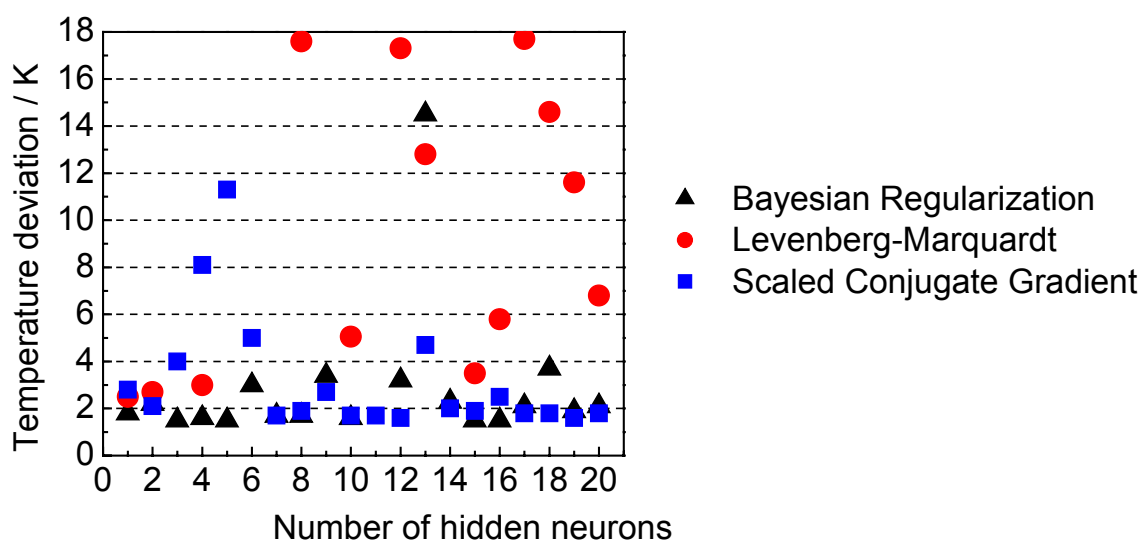


Fig. 1: Temperaturabweichungen mit verschiedenen Lernalgorithmen
Temperature deviations compared among different training algorithms

Number of hidden layers investigation

The feed-forward models were further constructed with two hidden layers and with a number of hidden neurons between 1-10 in both hidden layers. The Bayesian regularization was applied as the training algorithm. The results show that the lowest average temperature deviation is 1.7 K. It is found from the network with three neurons in the first layer and eight neurons in the second layer. It can be seen that the results from the two-hidden layer network do not present a better performance than the results from one-hidden layer network.

Comparison of different neural network topologies

Compared to feed-forward networks, **recurrent neural networks** are models with feedback connections. While a feed-forward network propagates data linearly only from input to output, recurrent network also propagates data from later processing stage to earlier stage.

The results, which investigated from the same network structure as the one-hidden layer feed-forward network, show that the one-hidden layer Elman network presents the worst performance. The average temperature deviation is 2.8 K with the five neurons in hidden layer using the Bayesian regularization-training algorithm.

The computational effort for a recurrent network is much higher than for a feed-forward network because of the large and more complex structure of recurrent network. Fig. 2 shows the temperature course for one-week period comparing between the top-oil temperature calculated from feed-forward and recurrent network.

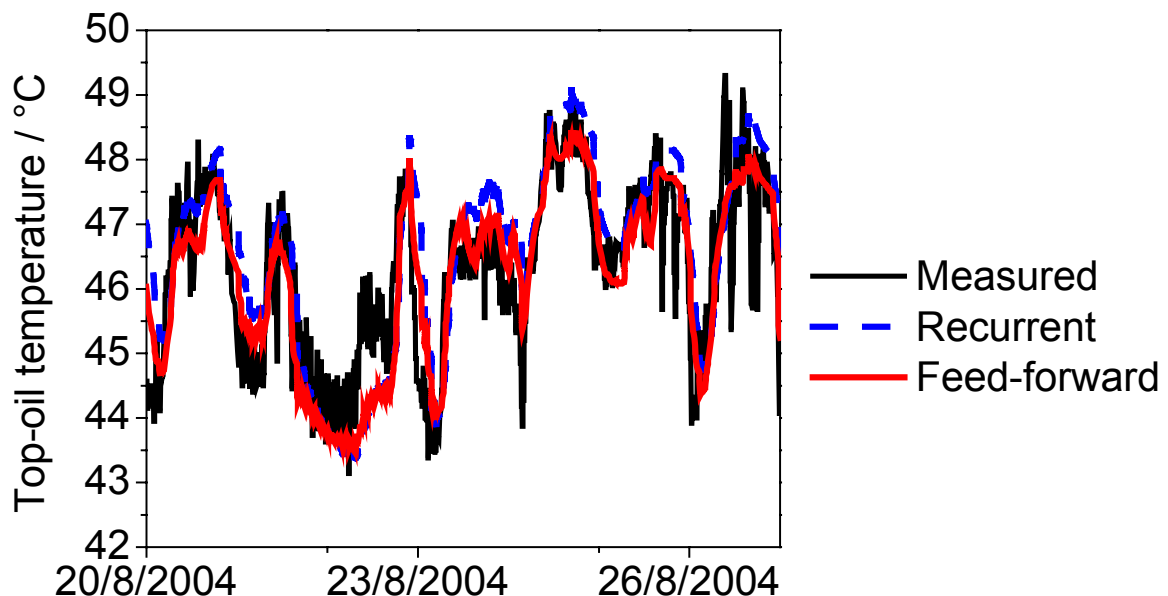


Fig. 2: Ergebnisse der gemessenen und berechneten Deckelöltemperatur von feed-forward-Netzen und rekurrenten Netzen
Measured and calculated top-oil temperature results from feed-forward neural network model and recurrent neural network model

■ Dielektrische Festigkeit von natürlichen Estern

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

Isolierflüssigkeiten für Transformatoren sollen heute nicht nur die speziellen Anforderungen hinsichtlich Isolierfähigkeit und Kühlung erfüllen, sondern sie sollen auch weitgehend umweltfreundlich sein. In diesem Zusammenhang muss die Suche nach „grünen Produkten“ als Alternative zu mineralischen Ölen erfolgen. Natürliche Ester können eine geeignete Antwort für Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsprobleme darstellen. Darüberhinaus könnten sie die „end-life“-Kosten von Transformatoren reduzieren.

Ein wichtiges Merkmal von pflanzlichen Ölen ist die dielektrische Festigkeit, die allerdings nicht vollständig untersucht ist. Zwar sind Angaben über standardisierte Durchschlagsversuche bei Wechselspannung (50 Hz) von Ölherstellern verfügbar, aber es gibt keine Informationen über die Festigkeiten von natürlichen Estern bei inhomogenen Feldverläufen und Beanspruchung mit Stossspannungen. Deshalb werden hier Ergebnisse von Messungen der Durchschlagspannung in homogenen und inhomogenen Feldern für AC und Blitzstoßspannungen 1,2/50µs aufgezeigt.

In den Versuchen wurden Midel eN sowie FR3 (natürliche Ester) mit Nynas Nitro 3000X (mineralisches Öl) verglichen. Vor Beginn der Durchschlagsversuche wurden die Öle getrocknet ($RH < 15\%$) und durch ein 5 µm-Filter gefiltert. Das getrocknete Öl wurde in homogenen Wechselspannungsfeldern mit einem Bauer-DTA-100E-Gerät als Spannungsversorgung untersucht. Die Elektroden mit Rogowski-Profil sind aus Kupfer gefertigt und haben einen Durchmesser von 35 mm. Sie sind in einem Ölcontainer mit einem Volumen von 0,4 l installiert. Der Abstand der Elektroden betrug 2 mm, das Öl wurde permanent gerührt. Die Messungen wurden gemäß VDE 0370 (Äquivalent zu IEC 60156) durchgeführt. Da die Viskosität von pflanzlichen Ölen höher ist als die von mineralischen Ölen, wurde die Pause zwischen den sukzessiven Durchschlagversuchen auf fünf Minuten erhöht. Jedes Öl wurde in einer Serie von 50 Durchschlagversuchen untersucht. Die Durchschnittswerte sind Fig. 1 zu entnehmen.

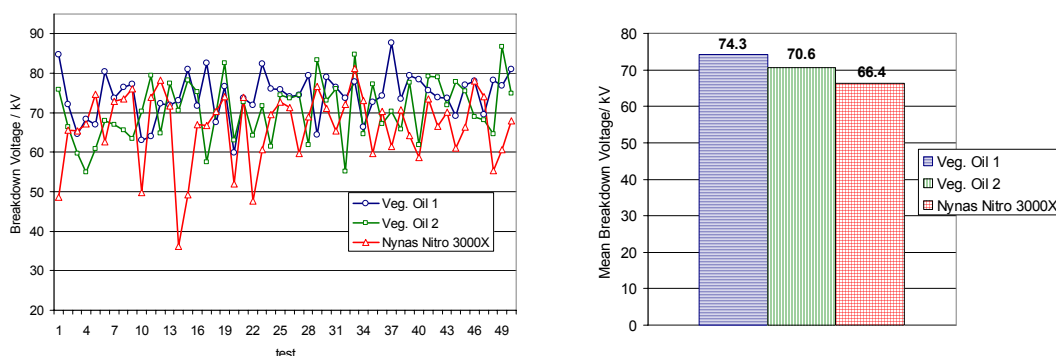


Fig. 1: Durchschlagversuche und mittlere Durchschlagspannung für 50 Hz AC, 2mm homogenes Feld
Breakdown tests and mean breakdown voltages for AC 50 Hz; 2mm uniform field

■ Dielectric Strength of Natural Esters

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

Nowadays, it is increasingly important that dielectric fluids provide a better balance between high functional performances versus low environmental impacts. In this frame, the search for “green products” as an alternative to mineral oil has to be carried out. Because of its non fossil origin, natural esters could be an appropriated response to environmental, safety and health problems, and could reduce the exploitation and end-life costs of transformers.

Although the vegetable oil’s dielectric strength for standard power frequency breakdown voltage tests is available from the oil manufactures there is no information about oil behaviour in non-uniform field and under impulse breakdown tests available. Hence, measurements of the breakdown voltage for uniform/non-uniform fields and AC 50 Hz / LI 1,2-50 μ s are conducted and results are presented.

Midel eN and FR3 (vegetable oils) were tested and also Nynas Nytro 3000X as a reference mineral oil. Before the breakdown tests the oil was dried (RH < 15%) and filtered with a 5 μ m filter. For testing under uniform AC field, Bauer DTA 100 E device was used as a power supply. The copper Rogowski shaped electrodes with a diameter of 35 mm were situated in the oil container with a volume of 0,4 l. The distance between the electrodes was 2 mm and constant oil stirring was performed. Measurements were conducted according to the VDE 0370 standard (equivalence for IEC 60156). Since the viscosity of the vegetable oils is higher than mineral oil’s viscosity, the pause time between successive breakdowns was increased to five minutes. Each oil was tested with a series of 50 breakdown tests. The results are shown in Fig. 1.

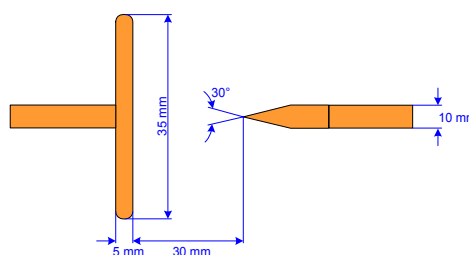


Fig. 2: Spitze-Platte-Anordnung mit inhomogenem Feld
Needle-plate electrodes as a source of non-uniform field

For testing under non-uniform AC field a test cell with a volume of 1,5 l and with needle-plate electrodes (Fig. 2) was built. Measurements were conducted in this case also according to the VDE 0370 (IEC 60156) standard. The voltage rise rate was 2 kV/s as well as for the uniform field tests. The distance between the electrodes was 30 mm and there was no oil stirring during the AC 50 Hz test. Each oil was tested with a series of 50 breakdown tests and mean values were calculated (Fig. 3).

Um Öl in inhomogenen Feldern zu untersuchen, wurde eine Zelle mit einem Volumen von 1,5 l mit Spitze-Platte-Elektroden (Fig. 2) gebaut. Als Spannungsversorgung diente das Bauer-DTA-100E-Gerät. Die Messungen in diesen Versuchen wurden ebenfalls nach VDE 0370 durchgeführt. Die Spannungsamplitude wurde mit 2 kV/s gesteigert, analog zum Versuch mit homogenem elektrischen Feld. Der Abstand der Elektroden betrug 3 mm, das Öl im AC-50-Hz-Versuch wurde nicht permanent gerührt. Jedes Öl wurde in einer Serie von 50 Durchschlagsversuchen untersucht. Die Durchschnittswerte sind Fig. 3 zu entnehmen.

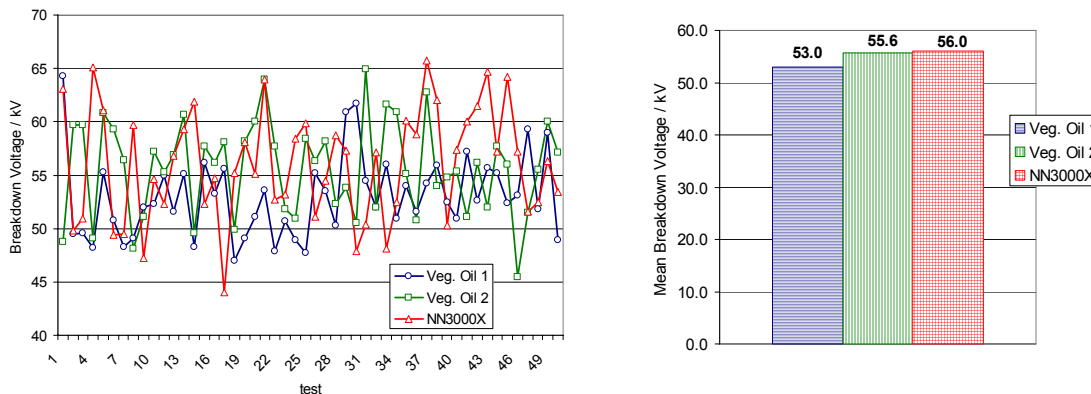


Fig. 3: Durchschlagversuche und mittlere Durchschlagfeldstärke für 50 Hz AC; 30mm inhomogenes Feld
Breakdown tests and mean breakdown voltages for AC 50 Hz; 30mm non-uniform field

Die Auswirkungen einer positiven Blitzstoßspannung wurden mit einem 1 MV-Marx-Generator untersucht. Die Testzelle, die für den Versuchsaufbau benötigt wird, besteht aus Elektroden, welche in Fig. 2 gezeigt werden. Die Messungen in diesen Versuchen wurden nach VDE 0432-1 (IEC 60060-1) nach Klasse 3 durchgeführt. Dabei wurde die Spannungsbeanspruchung in 3 kV Schritten gesteigert, bis es zum Durchschlag kommt. Jede Minute wurde ein Spannungsimpuls auf die Elektroden gegeben. Nach jedem Durchschlag war eine 10-minütige Pause notwendig, bevor weitere Untersuchungen vorgenommen werden konnten. Insgesamt wurden für jedes Öl 10 Durchschlagversuche durchgeführt. Die Durchschnittswerte zeigt Fig. 4.

Die pflanzlichen Öle zeigen etwas kleinere dielektrische Festigkeiten bei Blitzstossbeanspruchung als das Mineralöl. Demzufolge sind weitere Untersuchungen zur Festlegung von Designkurven und DIL-Faktoren notwendig. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass pflanzliches Öl eine höhere Permittivität als mineralisches Öl besitzt, was zu einer größeren Feldverdrängung in Öl-Pressspan-Strukturen führt.

The lightning impulse tests were done with a 1 MV 10-stage Marx generator with positive polarity. The test setup consists of the electrodes given in Fig. 2. Measurements were carried out according to VDE 0432-1 (IEC 60060-1) class 3. Test voltage was increased by 3 kV for each step until breakdown occurred. After a breakdown a 10 minutes pause followed before the next series of the measurement took place. Ten breakdown series for each kind of oil were done and mean breakdown voltages were calculated (Fig. 4).

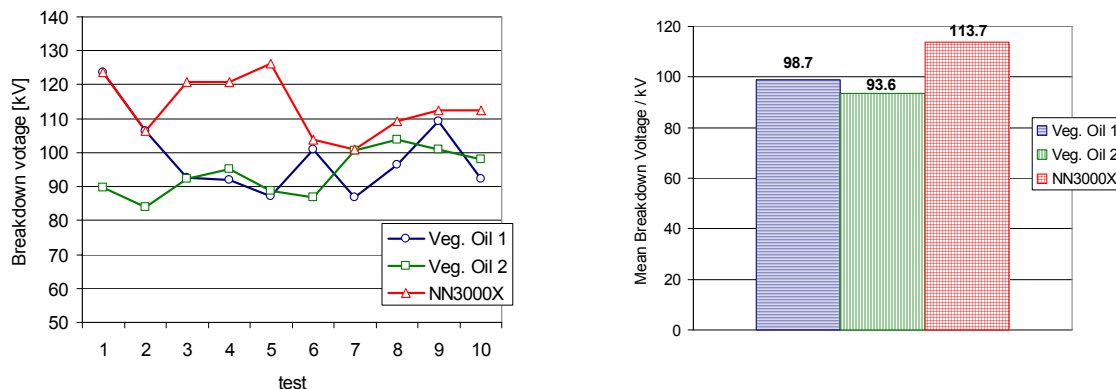


Fig. 4: Durchschlagversuche und mittlere Durchschlagfeldstärke für Blitzstoß 1,2/50 us; 30mm inhomogenes Feld
Breakdown tests and mean breakdown voltages for LI 1,2/50us; 30mm non-uniform field

The vegetable oils showed a different dielectric strength under different stresses. This calls for further consideration of the commonly used design curves and DIL factors. Another aspect is the fact that this oil has a higher permittivity than mineral oil. This will result in slighter electrical field displacement in the oil-pressboard structures.

In order to optimize the design it is necessary to perform further experiments considering initiation position and paths of breakdown in various oil-pressboard arrangements.

■ **Thermohydraulische Untersuchung von Transformatorwicklungen durch Messung und Simulation**

Dipl.-Ing. Andreas Weinläder

Die Temperaturverteilung in ölgekühlten Transformatorwicklungen wird bei der Auslegung eines Transformators üblicherweise durch die Verwendung von empirischen Daten – gewonnen aus einer Vielzahl von Messungen an gebauten Transformatoren – ermittelt. Da 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 weit 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 dann möglich, die ansonsten nur grob abschätzbare Wärmeübergangszahl zwischen Öl und Paperisolation zu bestimmen. In einer darauf aufbauenden Lösung der Wärmeleitungsgleichungen wird dann 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 Softwarepaket „CFX“ verwendet, welches auf Basis der Finite-Volumen-Methode arbeitet.

Zur Verifikation der numerischen Modelle werden zusätzlich Messungen an entsprechenden Modellen durchgeführt. Diese Modelle stellen Ausschnitte aus realistischen Wicklungen dar, wobei die Abmessungen nicht skaliert wurden. Durch diese Modelle wird ein vorgegebener und gemessener Ölvolumenstrom geleitet und an verschiedenen Stellen am Modell die Druckdifferenz zu einem Referenzpunkt gemessen. Hierdurch lässt sich unmittelbar der hydraulische Widerstand der Wicklung berechnen. Da eine direkte Messung der Geschwindigkeitsverteilung nur unter sehr großem Aufwand möglich wäre, wird die Übereinstimmung der gemessenen mit der simulierten Druckverteilung zusätzlich als Indiz für eine korrekt berechnete Geschwindigkeitsverteilung herangezogen. Der Messstand ist in Fig. 1 dargestellt.

Als Beispiel soll die Simulation der Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in einer Noppenbandwicklung gezeigt werden, deren Ölkanalgeometrie in Fig. 2 dargestellt ist. Eine solche Geometrie entsteht, wenn eine Scheibenwicklung ohne Radialkanäle in jeder Scheibe ein Noppenband in der gleichen radialen Position zwischen zwei Windungen enthält. Es war im konkreten Fall möglich, die periodische Symmetrie in Umfangsrichtung auszunutzen, ebenso konnte die Spiegelsymmetrie

■ **Thermal-hydraulic Investigation of Transformer Windings by Means of Measurement and Simulation**

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 the institute the commercial software package "CFX" is used, which works on the base of the Finite-Volume method.

For verification of the numerical models, additional measurements with according models are done. These models represent partitions of realistic windings, whereas the dimensions were not scaled. Through these models, a prescribed and measured volume flow of oil is led and the occurring pressure difference to a reference point is measured at different locations of the model. From these quantities, it is possible to calculate directly the hydraulic resistance. Since a direct measurement of the velocity distribution would require very large effort, the accordance of the measured with the simulated pressure distribution is taken as indication for the correctness of the simulated velocity distribution. The measurement setup is shown in Fig. 1.

As an example, the simulation of the velocity and temperature distribution of a clack band winding is demonstrated. The geometry of the oil channel of such a winding is shown in Fig. 2. Such a geometry accures when a disc type winding without radial channels contains in each disc a band of knobs in the same radial position between two windings. In the concrete case it was possible to utilise the periodic symmetry in circumferential direction. Also the mirror symmetry in both sides of radial direction was utilised. The discretisation was done with about 1.3 mio. elements (cells) and the computation was done on 16 Intel-Xeon EM64T (3,2GHz) processors in parallel. The around 1000 necessary iterations until fulfilling of the convergence criterions took

beiderseits in Radialrichtung ausgenutzt werden. Die Diskretisierung erfolgte mit ca. 1.3 Mio. Elementen (Zellen), die Berechnung erfolgte auf 16 Intel-Xeon-EM64T-Prozessoren (3,2 GHz) parallel, wobei für die ca. 1000 erforderlichen Iterationsschritte bis zur Erfüllung der Konvergenzkriterien ca. acht Stunden benötigt wurden. Im Gegensatz zu dieser gekoppelt thermo-fluidmechanischen Simulation benötigt die rein fluidmechanische Simulation dieser Geometrie nur einen kleinen Teil von o.g. Rechenzeit.

Einige Ergebnisse dieser Simulation sind in Fig. 3 dargestellt. Der berechnete Druckabfall entlang der modellierten Kanalstrecke wurde ebenfalls am Messmodell aufgenommen. Über unterschiedliche Durchflussraten liegt die Abweichung des Druckabfalls zwischen Messung und Simulation fast durchgehend deutlich unter 10%.

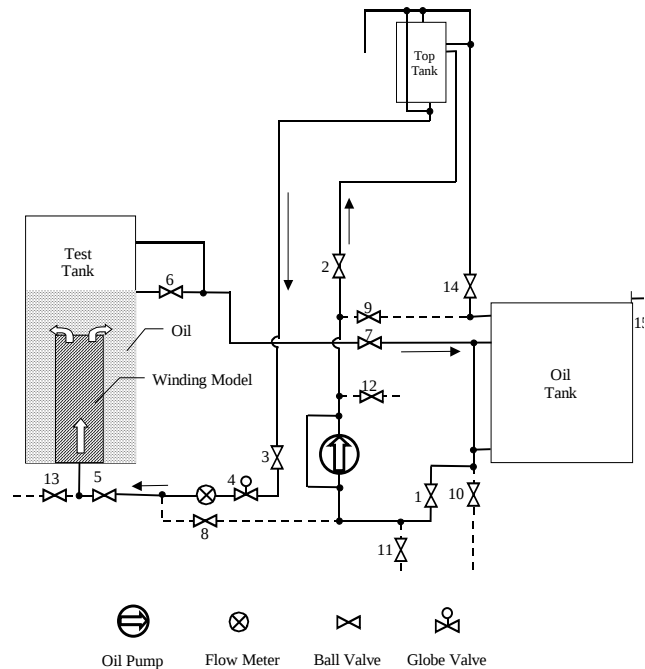


Fig. 1: Messstand (links) mit Prinzipskizze (rechts)
Measurement setup (left) and principal sketch (right)

around eight hours. In the opposite of this coupled thermal-fluidmechanical somulation, the only fluidmechanical simulation of this geometry takes only a little part of the above mentioned computation time.

Some of the results of this simulation are displayed in Fig. 3. The calculated pressure drop along the modelled flow way was also taken from the measurement model. Over different flowrates the deviation of the pressure drop between measurement and simulation was nearly continuously considerably under 10%.

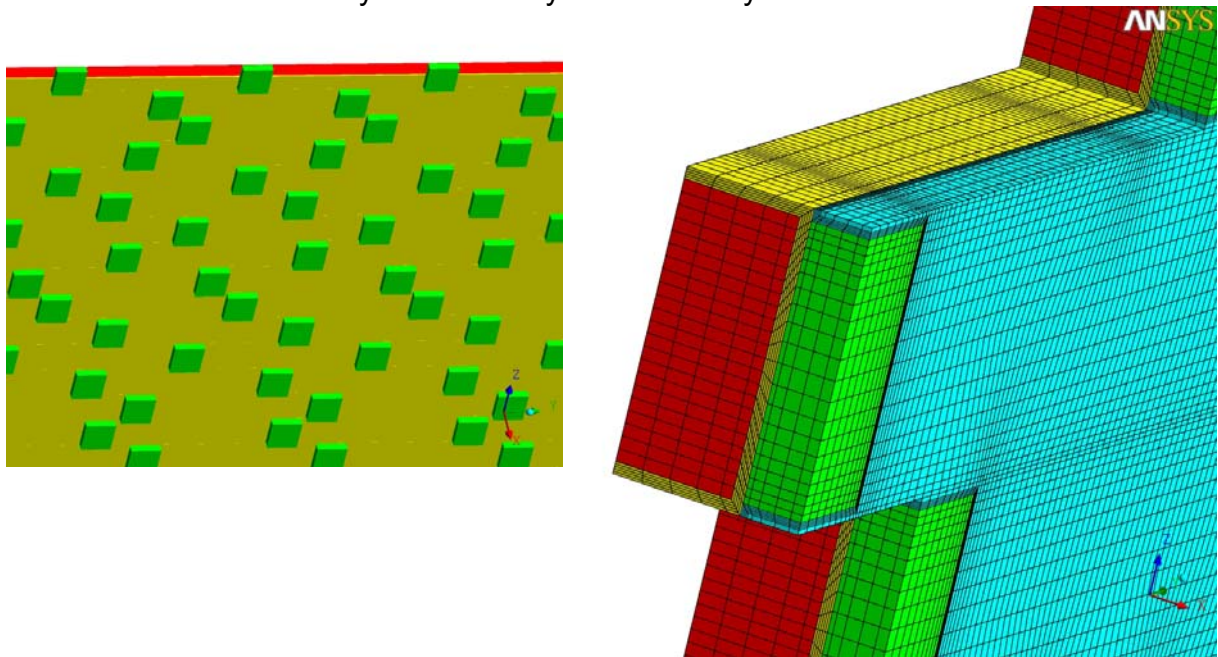


Fig. 2: Geometrie des Simulationsmodells (links) und vernetzter Ausschnitt (rechts)
Total model geometry (left) and meshed part of the winding model (right)

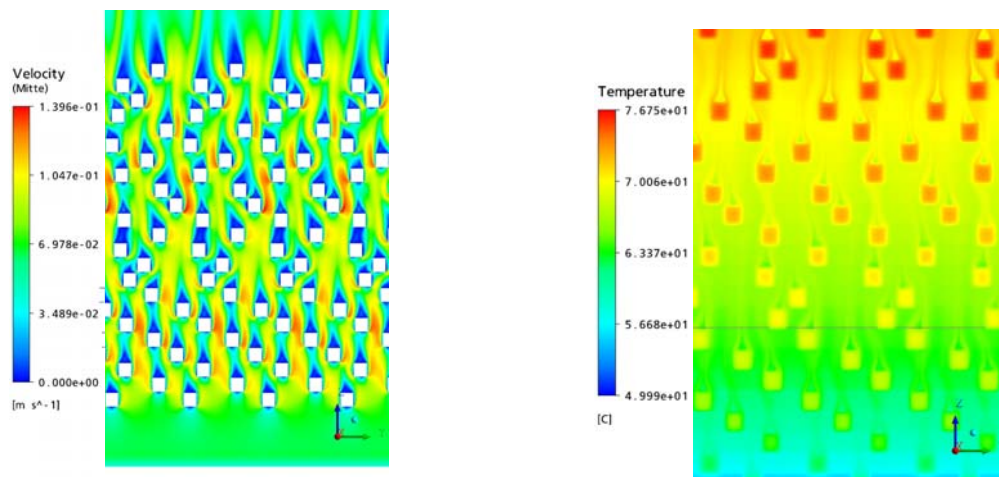


Fig. 3: Geschwindigkeitsverteilung (links), Temperaturverteilung (rechts)
Distribution of velocity (left), distribution of Temperature (right)

Der Einfluss des Messaufbaus auf die Reproduzierbarkeit der FRA

Dipl.-Ing. René Wimmer

Zur Beurteilung des mechanischen und elektrischen Wicklungszustandes eines Leistungstransformators wird die FRA (Frequency Response Aalysis) als ein adäquates Diagnoseverfahren eingesetzt. Die Bewertung der FRA erfolgt durch Vergleich der aktuellen Messung mit einer früheren, die auch Referenz-FRA genannt wird. Aufgrund 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-Diagnoseverfahren.

Leitungsstechnik

Die Übertragung der Signale vom Transformator zum Messgerät sollte ausschließlich mit Koaxialkabeln erfolgen. Allerdings ist für die Schirmerdung des Koaxialleiters die Distanz zwischen Transformator клемme und Transformatorкessel zu überbrücken. Diese Distanz kann bis zu mehreren Metern betragen und es stellt sich demzufolge die Frage, wie die Koaxialleitungen mit dem Transformator zu verbinden sind. Eine Möglichkeit wäre, dass ab einem Leitungssplitter der Innenleiter und der Schirm des Koaxialkabels in ungeschirmten, separaten Leitungen geführt wird. Während die Leitung, die mit dem Innenleiter des Koaxialkabels verbunden ist, zur Anschlussklemme des Transformators führt, wird die Leitung, die mit dem Schirm des Koaxialkabels verbunden ist, mit dem Kessel des Transformators verbunden (Fig. 1).

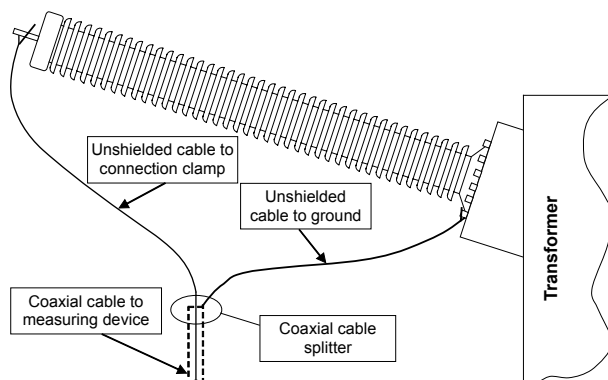


Fig. 1: Anschlussstechnik mit ungeschirmten Leitungsteilen
Connection technology with unshielded lines

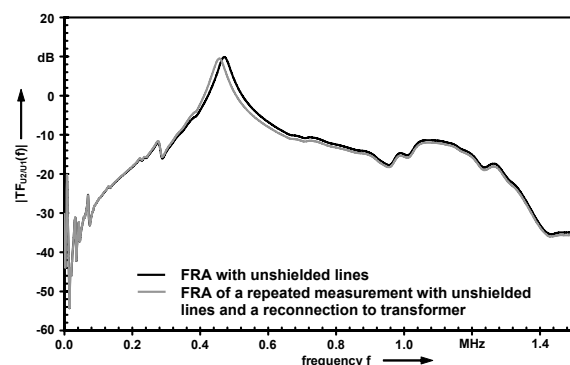


Fig. 2: Einfluss ungeschirmter Signalleitungen auf die FRA
Influence of unshielded signal cables to the FRA

Der Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der FRA wird wie folgt untersucht:

- 1) Die Kabel hängen unter der Durchführung.
- 2) Die Kabel hängen unter der Durchführung wie bei Fall 1), allerdings werden die Kabel an einer anderen Stelle mit dem Kessel und dem Dorn verbunden.

■ The Influence of Measuring Setup on the Reproducibility of the FRA

Dipl.-Ing. René Wimmer

The FRA (Frequency Response Aalysis) is a well-established method used for assessment of mechanical and electrical conditions of power transformer windings. The evaluation of FRA is done by comparison between a current FRA and a previous one, which is also called as reference FRA. Due to the fact, that, small mechanical winding damages do not result in substantial changes in the curve progression of the FRA, a high reproducibility of the test reading is an important requirement for successful use of the FRA as a diagnostic method.

Cable Technique

The transmission of signals from the transformer to the measuring device should be carried out exclusively by coaxial cable. However, the problem, that results here is, how to connect the coaxial cable to the transformer. The distance between the transformer terminal for signal recording and the transformer tank for cable shield grounding can be several meters long. One possibility would be: to start from a coaxial cable splitter, the inner conductor and the shield conductor of a coaxial cable are guided as separate unshielded lines. The line connected to the inner conductor of the coaxial cable leads to the transformer terminal and the other line that is connected to the shield of the coaxial cable is connected to the transformer tank (Fig. 1). The influence on the reproducibility of the FRA was investigated as following:

- 1) The cables hang below the bushing.
- 2) The cables hang below the bushing as described in case 1), but the position of connection points at the tank and the connection terminal are changed.

As shown in Fig. 2, the resonant frequency varies around 470 Hz depending on the cable arrangement. According to that, the use of partly unshielded cables provides degree of freedom that obviously can lead to measurement errors and consequent misinterpretations. That is the reason for what shielded signal cables should be used ideally up to the transformer clamp in order to minimize the dependency from the cable arrangement and to increase the reproducibility.

Grounding Concept

Effects of the interference sensitivity of a normal wire and a ground strap to the FRA shall be determined experimentally. The test setup is a normal FRA measurement setup with the corresponding grounding lines. A loop of one winding emitting a sinusoidal interference signal of 80 kHz is placed under the bushing of a 333 MVA autotransformer (Fig. 3). The 80 kHz signal is generated by a signal generator and accordingly amplified by an audio amplifier.

Wie in Fig. 2 zu erkennen ist, verschiebt sich je nach Kabelanordnung die Resonanzfrequenz bei 470 kHz. Bei dieser z.T. ungeschirmten Leitung gibt es demnach Freiheitsgrade, die zu Messfehlern und folglich zu Fehlinterpretationen führen können. Die Signalleitungen sollten daher möglichst bis zur Klemme des Transformators geschirmt geführt werden, um die Abhängigkeit der Kabelanordnung zu minimieren und die Reproduzierbarkeit zu steigern.

Erdungskonzept

In einer Versuchsanordnung wird die Auswirkung der Störempfindlichkeit eines Drahtes und eines gewebten Erdungsbandes auf die FRA ermittelt. Als Prüfkreis dient ein normaler FRA-Messaufbau mit den jeweiligen Erdungsleitungen. Unterhalb der Durchführung eines 333-MVA-Spartransformators ist eine Schleife mit einer Windung aufgebaut, die ein sinusförmiges Störsignal von 80 kHz emittiert (Fig. 3). Die Erzeugung des 80-kHz-Signals erfolgt mit einem Signalgenerator und wird von einem Audioverstärker entsprechend verstärkt.

In Fig. 4 ist das Störsignal bei einer Erdanbindung mit Draht deutlich in Form von zusätzlichen Resonanzfrequenzen im FRA-Verlauf zu erkennen. Die maximale Schwankungsbreite beträgt hierbei 7 dB. Bei einer Erdanbindung mit Erdungsband ist das Störsignal im FRA-Kurvenverlauf zwar auch erkennbar, jedoch weist sie hier eine maximale Schwankungsbreite von nur 1 dB auf.

Eine Erklärung hierfür ist der Skineffekt: Bei einer Frequenz von 80 kHz beträgt die Eindringtiefe je nach Material nur 0,25 mm bis 0,3 mm. Maßgebend für die Längsimpedanz eines Leiters ist daher die Größe der Oberfläche. Gewebte Leitungen aus dünnen Einzelleitungen, die aufgrund dessen eine große Oberfläche besitzen, weisen daher eine geringere Impedanz als normale Rundleiter auf.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die geometrische Anordnung der Erdungsbänder. Hierbei wird folgendes Szenario betrachtet: Bei der Referenzmessung ist das Erdungsband entlang der Durchführung straff gezogen, bei der Wiederholungsmessung hängt das Erdungsband unter der Durchführung durch.

Fig. 5 zeigt eine Verschiebung der Resonanzfrequenz um 20 KHz. Eine Erklärung hierzu ist, dass neben dem elektr. Netzwerk des Transformators auch das elektr. Netzwerk des Messaufbaus mit der FRA erfasst wird. Hängt nun das Erdungsband bei der Wiederholungsmessung durch, anstatt es wie bei der Referenzmessung straffgezogen ist, verändert sich sowohl dessen Längsinduktivität als auch die Koppelkapazitäten, die zwischen der Durchführung und dem Erdungsband aufgebaut werden.

Aufgrund der dargestellten Einflussfaktoren sind daher ausschließlich geschirmte Leitungen bis zur Durchführung und Bänder für die Erdverbindungen für den Messaufbau zu verwenden, um eine gute Reproduzierbarkeit der FRA zu erhalten.

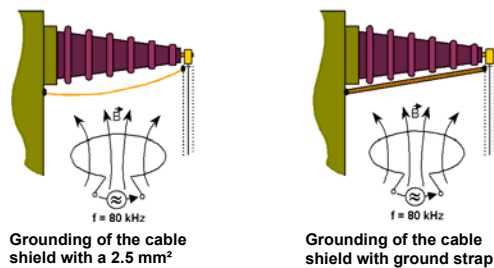


Fig. 3: Magnetische Störung unterschiedlicher Erdleitungen
Magnetic disturbance of different ground conductors

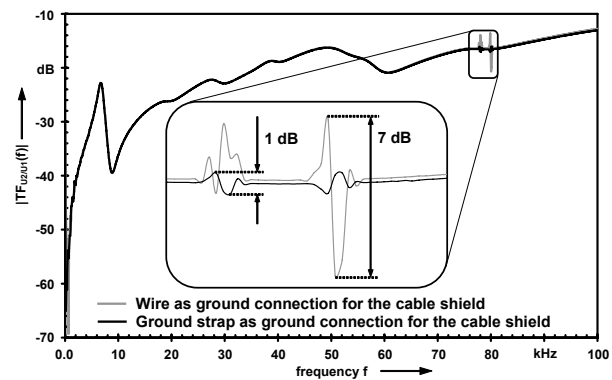


Fig. 4: Störempfindlichkeit der FRA auf unterschiedliche Erdleitungen
Interference sensitivity of FRA for different ground conductors

Fig. 4 clearly shows the additional resonant frequencies in the FRA curve caused by the interference signal in case of grounding with a normal wire. The maximum fluctuation range is 7 dB. In case of using a ground strap as ground connection the interference signal is certainly visible on the FRA curve but with a maximum fluctuation range of only 1 dB.

An explanation for that is the skin-effect: at 80 kHz the penetration depth range barely between is only 0.25 mm to 0.3 mm depending on the material. The size of the surface is decisive for the longitudinal impedance of a conductor. Woven bands made of thin single wires have a very large surface, thus, depending on the frequency, they provide considerably lower impedance than normal circular conductor.

Another influence factor is the geometrical arrangement of the ground strap. The following scenario is conceivable: the ground strap is pulled tightly along the bushing for the reference FRA measurement, the ground strap sags under the bushing for the repeated FRA measurement.

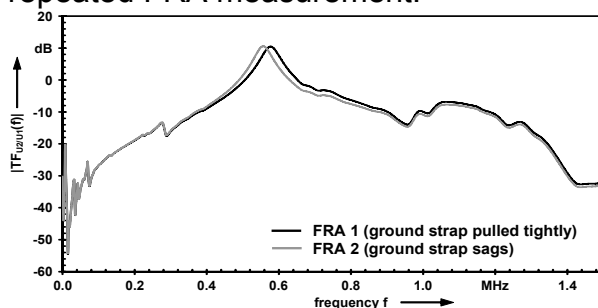


Fig. 5: Der Einfluss auf die FRA bei unterschiedlichen geometrischen Anordnungen der Erdungsbänder
Influence to FRA with different geometrical arrangement of the ground strap

Fig. 5 shows a displacement of the 570 kHz resonant frequency by 20 kHz. The explanation for this is that not only electrical network of the transformer, but also the electrical network of the measurement setup is recorded with the FRA. In comparison to a pulled tightly ground strap a sagged ground strap has a higher longitudinal inductance, a higher resistance and another coupling capacitance, which exist between the bushing and the ground strap.

Due to the described influence factors excluding shielded cables up to the transformer terminals and braid for the grounding connections should be used for the measurement setup in order to get a high reproducibility of FRA-measurements.

■ **Klassifizierung von Einbauräumen für Steuergeräte in Kraftfahrzeugen mit Hilfe von charakteristischen Transferfunktionen**

Dipl.-Ing. Michael Zerrer

Moderne Fahrzeuge werden mit immer mehr elektronischen und elektrischen Steuergeräten ausgerüstet, die unzählige Dienste verrichten, um dem Fahrer das Autofahren angenehmer zu machen. Dazu gehören sicherheitsrelevante Einrichtungen wie Motormanagement, ABS oder ESP ebenso wie Abstandswarner, Klimasteuerung oder Unterhaltungselektronik. Neben den Anforderungen seitens des Gesetzgebers dürfen diese Steuergeräte auch keine unzulässigen Emissionen in die Fahrzeugelektronik abgeben. Dazu gehört insbesondere, dass keine unzulässigen Störungen auf die fahrzeugeigenen Empfangsantennen, z. B. für Rundfunk, Mobilfunk, Navigation (GPS) etc. eingekoppelt werden.

Gerade bei neuen Fahrzeugentwicklungen ist es in frühen Entwicklungsstadien unmöglich, solche Beeinflussungen messtechnisch zu erfassen, weil ein Vorserienmodell des Fahrzeugs erst zu einem relativ späten Zeitpunkt zur Verfügung steht. Zu dem Zeitpunkt, wenn erste Versuchsmessungen am Fahrzeug mit den einzelnen Komponenten gemacht werden können, müssen die Steuergeräte aus zeitlichen Gründen fast schon serienreif sein. Große Veränderungen, z. B. im Layout einer Platine eines solchen Gerätes, kommen in aller Regel sehr teuer. Daher ist man bestrebt, die Emissionen und insbesondere die Kopplung auf die fahrzeugeigenen Antennen möglichst frühzeitig abschätzen zu können.

Mit Hilfe von Transferfunktionen können verschiedene Einbauräume im Fahrzeug kategorisiert werden. Fig. 1 zeigt den Messaufbau zur Ermittlung von Transferfunktionen mit dem Netzwerkanalysator. Dabei wird mit Hilfe einer Einkoppelvorrichtung an verschiedenen Stellen am Kabelbaum des Fahrzeugs eingekoppelt und die Transferfunktion S_{21} zu einer der fahrzeugeigenen Antennen gemessen. Wenn die Empfangseinheit ein Diversity-System besitzt, wird dieses deaktiviert, da ein Umschalten der Antennen während der Messung die Ergebnisse verfälschen würde.

Außerdem wird der Reflexionsfaktor S_{11} gemessen, um damit die Transferfunktion S_{21} zu korrigieren. Der Netzwerkanalysator hat eine Impedanz von $50\ \Omega$ über den gesamten zu vermessenden Frequenzbereich. Da der Kabelbaum an der Einkoppelstelle keine konstante $50\ \Omega$ aufweist, treten an dieser Stoßstelle Reflexionen auf. Ein Teil des eingekoppelten HF-Signals vom Netzwerkanalysator wird reflektiert und somit nicht ins Fahrzeug eingekoppelt. Durch die Gleichungen aus Fig. 2 wird die Transferfunktion so korrigiert, dass nur der tatsächlich ins Fahrzeug eingekoppelte Anteil berücksichtigt wird.

■ Classification of Assembly Places of Electronic Components of a Vehicle Using Characteristic Transfer Functions

Dipl.-Ing. Michael Zerrer

In modern vehicles, more and more electric and electronic components do different jobs to support the driver. Their spectrum reaches from safety-systems like brake assistant or electronic stabilisation system to comfort functions like climate control or entertainment systems. The emission of these components on the one hand may not exceed certain limits given in the automotive EMC standards (CISPR 25) and in addition they may not disturb any other systems in the vehicle. Especially the antennas mounted in the car play an important role, because an undisturbed radio reception or mobile phone communication should always be ensured. The same could be applied to other reception antennas like navigation (GPS) or distance control systems (radar).

Particular in the development cycle of new vehicles, early measurements of electronic components are not possible, because there is no pre-produced vehicle available. From the time, when a pre-produced vehicle is available there is only little time until the start of production and all the electronic components have to be nearly in maturity phase. Changes, for example in the layout of circuit boards at this time are very expensive. Therefore it is desirable to assess the emission of an electronic component and its coupling to the vehicle's antennas in an early state of the development cycle.

By means of transfer functions, different assembly places in a vehicle can be classified. Fig. 1 shows the schematic test setup for the measurement of transfer functions S_{21} with the network analyser.

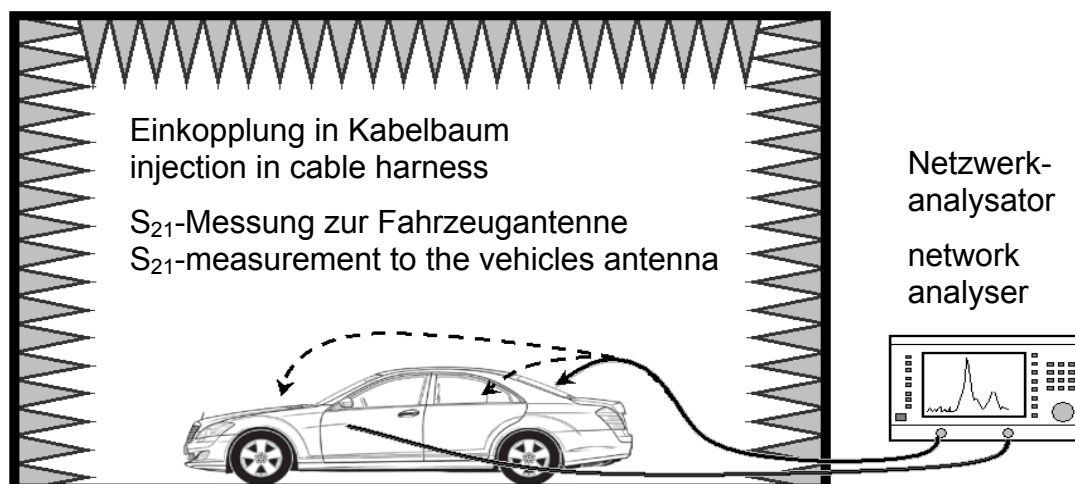
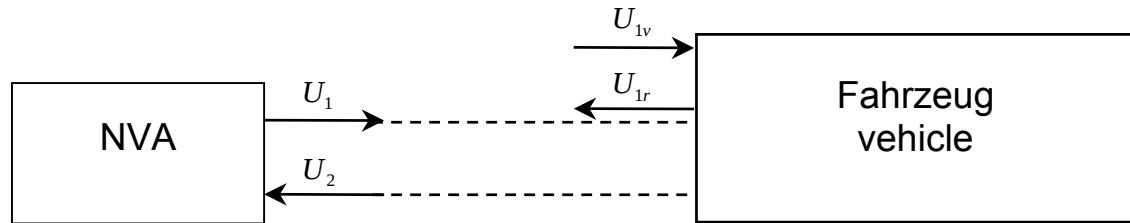


Fig. 1: Schematischer Messaufbau zur Ermittlung von Transferfunktionen mit dem Netzwerkanalysator (NVA)
Schematic test setup to for the measurement of transfer functions with the network analyser (NVA)



$$S_{21\text{gemessen}} = \frac{\vec{U}_2}{\vec{U}_1} \quad S_{21\text{exakt}} = \frac{\vec{U}_2}{\vec{U}_{1v}} \quad S_{11\text{gemessen}} = \frac{\vec{U}_{1r}}{\vec{U}_{1v}} \rightarrow S_{21\text{exakt}} = \frac{S_{21\text{gemessen}}}{1 - S_{11}}$$

Fig. 2: Betrachtung des Reflexionsfaktors S_{11} zur Korrektur der Transferfunktion S_{21}
Correction of the transfer function S_{21} with the reflection factor S_{11}

Messungen an verschiedenen Fahrzeugen ergeben, dass manche Gesetzmäßigkeiten unabhängig vom Fahrzeugtyp gültig sind. So können Transferfunktionen von Einkoppelpunkten, die nahe beieinander liegen, in den meisten Fällen durch eine charakteristische Transferfunktion ersetzt werden. Bei Multi-Pin-Steckverbindern kann ebenso eine durchschnittliche charakteristische Transferfunktion gefunden werden. Bei einem Multi-Pin-Stecker ist es weiterhin möglich, die Einkoppelvorrichtung in unterschiedlichen Kombinationen aufzustecken, so dass unterschiedliche Adern vom Netzwerkanalysator angeregt werden. Messungen vor dem Einstecken der Einkoppelvorrichtung müssen sicherstellen, dass durch den Massenanschluss des Netzwerkanalysators keine Versorgungsleitung kurzgeschlossen wird. Anhand solcher Messungen können auch die Einsteckpositionen so gewählt werden, dass die zusätzlich eingebrachte Impedanz des Netzwerkanalysators einen möglichst kleinen Einfluss hat.

Legt man eine Symmetrieachse längs der Mitte eines Fahrzeugs, kann man damit das Fahrzeug in eine linke und rechte Hälfte unterteilen. Zu dieser Längsachse gibt es viele Steckverbinder, die symmetrisch zueinander liegen, wie beispielsweise Sensoren an der Radaufhängung, Fensterheber oder die Anschlüsse für die Beleuchtung. Wenn zwei Einkoppelpunkte eine solche Symmetrie aufweisen, haben sie in nahezu allen gemessenen Fällen eine sehr ähnliche Transferfunktion. Fig. 3 zeigt die Transferfunktionen aus zwei unterschiedlichen Fahrzeugen von Einkoppelpunkten mit einer solchen Symmetrie. Als Empfangsantenne dient die Rundfunkantenne. Diesen Steckern kann man jeweils eine durchschnittliche, charakteristische Transferfunktion zuweisen.

Mit solchen prinzipiellen Erkenntnissen kann das EMV-Verhalten von verschiedenen Einkoppelpunkten bereits im Vorfeld abgeschätzt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Unterteilung des Fahrzeugs in Motorraum, Fahrgastraum und Kofferraum. Auch bei dieser Unterteilung können charakteristische Gemeinsamkeiten und Unterschiede für den jeweiligen Fahrzeugabschnitt gefunden werden. Solche Erkenntnisse können dann eingesetzt werden, um die EMV-Eigenschaften unterschiedlicher Einbauorte in Abhängigkeit der Frequenz bereits in frühen Entwicklungsstadien abzuschätzen.

The signal output of the network analyser is connected to the wiring harness of the vehicle using a special injection fixture. The receiving port of the network analyser is connected to one of the vehicle's antennas. If there is a diversity system existing in the vehicle's receiving unit, this system is deactivated to prevent a switching between different antennas which would falsify the measurement results.

According to Fig. 2 the reflexion factor S_{11} is measured to correct the transfer functions. The network analyser has a impedance of 50Ω over the whole frequency range, while the impedance of the vehicle's cable harness is not constant. Therefore reflections will appear, when the HF-signal of the network analyser crosses the connection of the injection fixture and the cable harness. A part of the HF-signal will be reflected and not coupled into the vehicle's harness.

Measurements show, that some principles could be validated, independent of the kind of vehicle. Injection locations in close proximity to each other often show accordance in their transfer functions. The same could be noticed for different combinations of injections in multi-pin-connectors, if different pins are stimulated. Such injection combinations could be replaced through one average characteristic transfer function. Before plugging the injection fixture into the jacks, measurements have to be carried out to ensure, that no power lines are shorted by the network analyser. The combinations were chosen in a way, that the additional impedance of the network analyser has minimum influence.

Injection locations which are symmetrical in respect to a longitudinal axis of a vehicle, for example sensors of the suspension, show often quite similar transfer functions. Fig. 3 shows such transfer functions of two different vehicles. These symmetric injection locations could be associated each with one average characteristic transfer function.

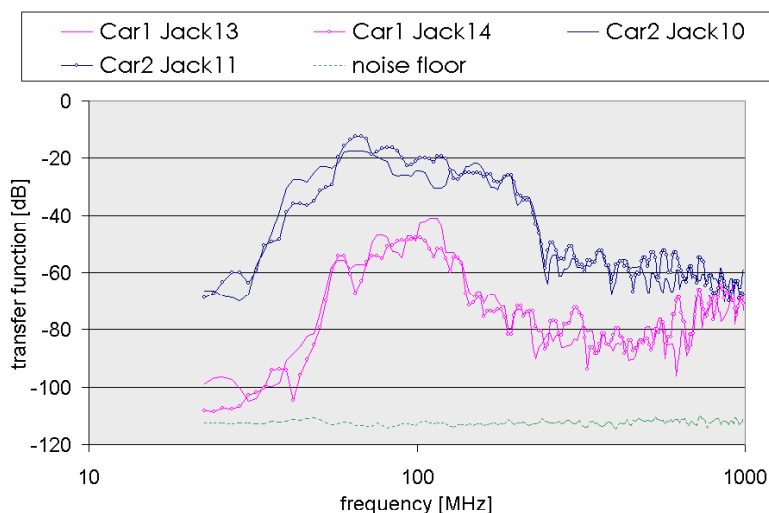


Fig. 3: Verlauf zweier Transferfunktionen für symmetrische Einkoppelstellen an zwei unterschiedlichen Fahrzeugen

Transfer functions of symmetrical injection locations of two different vehicles

The knowledge of such principles makes it possible to estimate the vehicle's EMC-performance even in a quite early state of the development cycle.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

J. Aragón-Patil, M. Fischer, S. Tenbohlen

Improvement of Dissolved Gas Analysis (DGA) by Means of Experimental Investigations of Generated Fault Gases and a Fuzzy Logic Based Interpretation Scheme.

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-157

J. Aragón-Patil, M. Fischer, S. Tenbohlen

Improvement of interpretation of dissolved gas analysis for power transformers.

Third International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectrics Materials (APTDAM 2007), Wroclaw, Poland, September 26-28, 2007, page No. 91-97

J. Aragón-Patil, S. Tenbohlen, E. Bräsel, U. Sasum

Improved Monitoring of Dissolved Transformer Gases on the Basis of a Natural Internal Standard (NIS).

Cigré SC A2 & D1- Colloquium, Brugge, Belgium, October 7-12, paper No. PS1-10

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

Performance Check and Sensitivity Verification for UHF PD measurements on power transformers

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-100

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

UHF Partial Discharge Diagnosis of Plug-in Cable Terminations.

7th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'07, June 24-28, 2007, Paris, France, paper No. 0133

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

On-Line Partial Discharge Diagnostics for Cable Terminations.

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-70

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

New Procedures for Partial Discharge Localization in Gas-Insulated Switchgears in Frequency and Time Domain

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-547

C. Keller, K. Feser

Fast Emission Measurement in Time Domain.

IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, No. 4, November 2007, pp. 816-824

M. Koch, S. Tenbohlen, D. Giselbrecht, C. Homagk, T. Leibfried

Onsite, Online and Post Mortem Insulation Diagnostics at Power Transformers

Cigré SC A2 & D1 Colloquium, Brugge, Belgium 2007

M. Koch, S. Tenbohlen, M. Krüger, A. Kraetge

Improved Moisture Analysis of Power Transformers Using Dielectric Response Methods

MATPOST'07, 3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment, Lyon, France, 2007

M. Koch, S. Tenbohlen, M. Fischer

The Breakdown Voltage of Insulation Oil under the Influence of Humidity, Acidity, Particles and Pressure

International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM, Wroclaw, 2007

M. Koch, S. Tenbohlen

Systematic Investigations on the Evolution of Water Vapour Bubbles in Oil-Paper-Insulations

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T9-167

M. Koch, S. Tenbohlen, J. Blennow, I. Hoehlein

Reliability and Improvements of Water Titration by the Karl Fischer Technique

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T10-53

M. Koch, S. Tenbohlen, M. Krüger, A. Kraetge

A Comparative Test and Consequent Improvements on Dielectric Response Methods

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T8-168

H. Moranda, M. Koch

Program do analizy odpowiedzi czestotliwosciowej (FDS) dielektrykow

Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2006

M. Koch

Wasser in Großtransformatoren - Richtig messen und den Zustand beurteilen

Nachhaltige Energieübertragung mit sicheren Transformatoren, Hamburg, 11. Mai 2007

M. Koch

Feuchtebestimmung durch verbesserte Onsite-Diagnostik

Workshop Diagnostik von Leistungstransformatoren, 18.-19. September 2007,
Bregenz, Österreich

M. Koch

Moisture Determination by Improved Onsite Diagnostics

Workshop Diagnostic Measurements on Power Transformers, 02.-03. Oktober 2007,
Bregenz, Österreich

M. Koch

Feuchtebestimmung durch verbesserte Verfahren der dielektrischen Diagnostik

Leistungstransformatoren – Monitoring und Instandhaltung, Energy-Support / VWEW
Fachtagung, 22. - 23. Oktober 2007, Fulda

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

Report WG A2.26 (CIGRE), Electra, No. 228, Oct. 2006, pp. 30-34

E. Rahimpour, S. Tenbohlen

A Mathematical Model to Investigate Disc Space Variation in Power Transformer using Transfer Function Analysis

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia,
August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-146

E. Rahimpour, A. Mousavi

Determining the Frequency Characteristic of Transformer Reflection and Transmission Coefficients using Detailed Mode I

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia,
August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper-No. T2-66

R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian

The Influence of Connection and Grounding Technique on the Repeatability of FRA-Results

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia,
August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-522

R. Wimmer, S. Tenbohlen, M. Heindl, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian

Development of an Algorithm to Assess the FRA

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia,
August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-523

R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser

Online Monitoring of a transformer by means of FRA

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T7-524

R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian

A new Approach of FRA Assessment with Algorithms

Cigré SC A2 & D1 – Colloquium, Bruges, Belgium, October 7-12, paper No. PS2-16

R. Vilaithong, S. Tenbohlen, T. Stirl

Neural Network for Transformer Top-Oil Prediction

15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, Proceedings of the ISH, paper No. T5-69

R. Vilaithong, S. Tenbohlen, T. Stirl

Online Tap Changer Diagnosis Based on Acoustic Technique

3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment (MATPOST'07), Lyon, France, November 15-16, 2007, Proceedings of the MATPOST

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

Estimation of Electromagnetic Coupling Phenomena in a Vehicle Wiring Harness Using Characteristic Transfer Functions

18th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, München, 24. bis 28. September 2007, Paper-No. 45

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

A Statistical Method to Improve Correlation of Automotive EMC-Measurements

18th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, München, 24. bis 28. September 2007, Paper-No. IF-3/4

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 12.12.06 Sitzung des Fachbereichs Q2 „Werkstoffe, Isoliersysteme und Diagnostik“ der ETG, Frankfurt, S. Tenbohlen
- 26.01.07 Sitzung des Deutschen Arbeitskreises DAK CIGRE SC D1 „Emerging Technologies“, Dortmund, S. Tenbohlen
- 13.-14.03.07 Seminar Kabelanschlusstechnik „Auslegung von Hochspannungskabelanlagen bis 300 kV mit kunststoffisolierten Kabeln und deren Garnituren“ bei Pfisterer, Winterbach, Vortrag und Messsystem-Vorführung durch D. Denissov
- 20.-23.03.07 Durchführung von zwei VDE-Seminaren „Moderne Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren“ in Stuttgart, Beiträge durch Prof. Tenbohlen, S. Coenen, R. Wimmer, M. Koch
- 23.-24.04.07 Technische Akademie Esslingen, Seminar „Teilentladungen in hoch beanspruchten elektrischen Isolierungen“. Praktische Vorführungen durch S. Coenen, D. Denissov; Vortrag: S. Tenbohlen
- 29.03.07 CIGRE WG A2.30 „Moisture in Power Transformers“, Meeting in Fürth, Mitarbeit und Redaktion einer Broschüre „Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems“, S. Tenbohlen, M. Koch
- 30.03.07 Sitzung der CIGRE WG D1.01 „Fluid Impregnated Systems“, Fürth, S. Tenbohlen
- 16.04.07 Sitzung der VDE-Arbeitsgruppe K 124, Dresden, S. Tenbohlen
- 19.-20.04.07 Sitzung der CIGRE WG A2.26 „Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings“, Madrid, S. Tenbohlen
- 26.-27.04.07 Sitzung der CIGRE TF 01.01.15, Athen, S. Tenbohlen
- 14.-15.05.07 HIGHVOLT-Kolloquium, Dresden, „Detection of Partial Discharges in Power Transformers using UHF PD Measurements and Accoustic Measurements“, Vortrag von S. Tenbohlen
- 24.-28.09.07 18th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, München, Heinz Rebholz, Wolfgang Köhler, Vortrag von M. Zerrer; Industrial Forum, Beitrag von M. Zerrer
- 27.-31.08.07 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia
Vorträge durch S. Coenen, D. Denissov, S. Hoek, M. Koch, R. Vilaithong
- 29.08.07 Sitzung der CIGRE TF D1.33.06, Ljubljana, S. Tenbohlen
- 03.-05.09.07 Volta Kolloquium, Como, Italien, „Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency Range“, Vortrag von S. Tenbohlen

- 11.-12.09.07 Workshop on variable frequency diagnostics in Stockholm, Sweden; Vorträge von S. Tenbohlen "Measurement and Interpretation of FRA for Condition Assessment of Power Transformers" und M. Koch "Creating a Reliable Data Base for Moisture Evaluation of Power Transformers"
- 26.-28.09.07 3rd International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, Wroclaw, Poland: A. Weinländer (eine Posterpräsentation), M. Fischer (zwei Vorträge)
- 07.10.07 Cigré TF D1.01.14, „Dielectric response methods in comparison“, Meeting während des CIGRE A2 D1 Colloquiums, Brügge, S. Tenbohlen, M. Koch
- 10.10.07 CIGRE WG A2.26 "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings" Meeting während des Colloquiums in Brügge, S. Tenbohlen
- 22.10.07 Sitzung des ETG-Beirates, Karlsruhe, S. Tenbohlen
- 23.-24.10.07 ETG-Kongress in Karlsruhe, S. Tenbohlen
- 15.-16.11.07 3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment MATPOST'07, Lyon, France, Vortrag von R. Vilaithong

8. EREIGNISSE UND KONTAKTE

Gastwissenschaftler und Institutsleben

Von März 2007 bis August 2007 besuchte uns Herr Dr. Hengzhen Dai aus Dalian/China mit einem Stipendium. Unser ehemaliger Kollege Herr Dr. Ebrahim Rahimpour (Universität Zanjan/Iran) arbeitet seit Juli 2007 für ein Jahr mit einem Stipendium der Georg-Forster-Stiftung (unter dem Dach der Alexander von Humboldt Stiftung) am Institut.

Traditionell fanden auf dem Söllerhaus vom 11.-13. April 2007 und vom 19.-21. September 2007 die Mitarbeiter-Workshops des Instituts statt. Die Mitarbeiter berichteten über den aktuellen Stand ihrer Arbeit und nutzten die Möglichkeit zur Diskussion mit den Kollegen. Die freie Zeit konnte mit Wanderungen und Skilaufen verbracht werden.

Am "Tag der Wissenschaften" am 23. Juni 2007 präsentierte das Institut einem interessierten Publikum Experimentalvorführungen in der Hochspannungshalle. Im Hörsaalfoyer fanden zahlreiche Diskussionen mit Besuchern und Beratungsgespräche mit Studieninteressierten statt.

Der Institutsausflug am 25. Juli 2007 führte uns nach Bad Friedrichshall. Von Kochendorf aus ging es bei wunderbarem Sonnenschein mit Kanus auf dem Fluss oder per Fahrrad auf festen Wegen durch das Neckartal bis nach Gundelsheim. Nach einer Stärkung besichtigten wir das Salzbergwerk in Bad Friedrichshall-Kochendorf. Später konnten wir in Gundelsheim an einer Weinprobe teilnehmen, die uns die Unterschiede zwischen badischen und württembergischen Tropfen klar machte. Einen herzlichen Dank an Jackelyn für die Organisation!

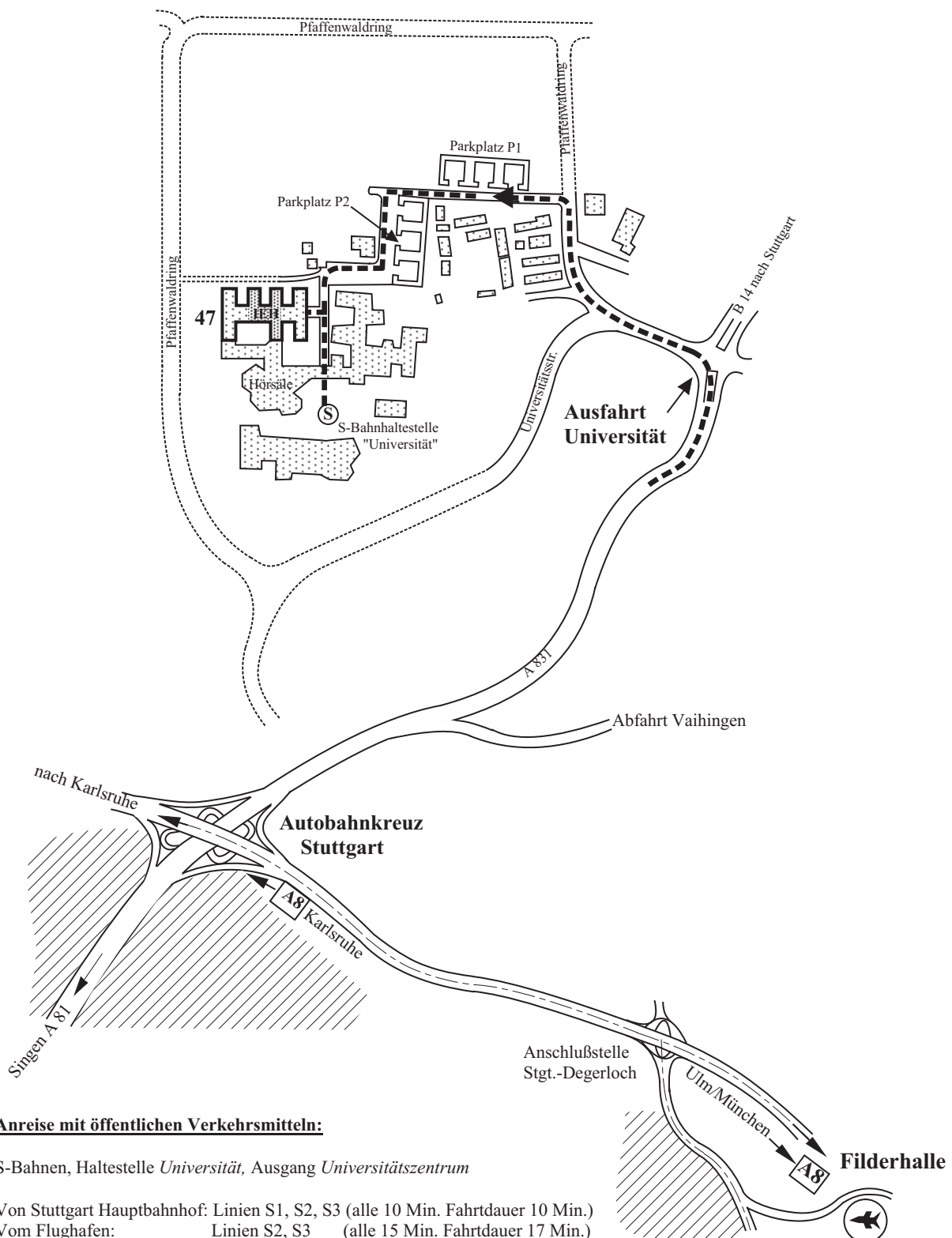
Eine Dreier-Doktorfeier hatte es am IEH noch nie gegeben. Am 2. März 2007 luden die Kollegen Tammam Hayder, Jozsef Osztermayer und Enzo Cardillo nach bestandenen Dr.-Prüfungen alle Kolleginnen und Kollegen sowie viele Ehemalige und Studenten des Instituts zu einer Feier in die Hochspannungshalle ein.

9. PRÜF- UND MESSEINRICHTUNGEN

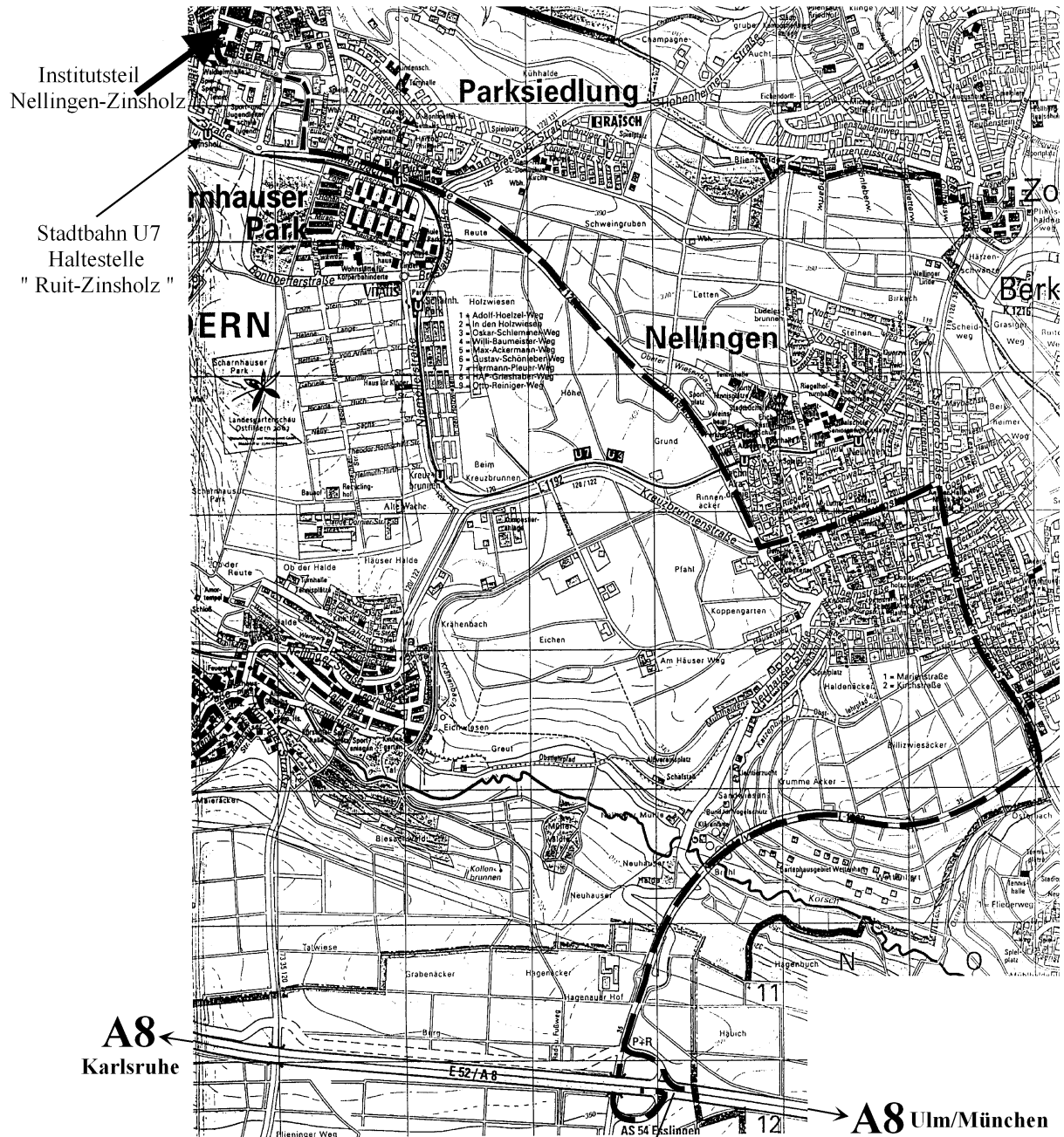
Stoßspannungsanlagen	bis 2000 kV, 100 kJ
Generator für schwingende Schaltstoßspannung	bis 1300 kV
Schwingende Blitzstoßspannung	bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ
Stoßstromanlage	bis zu 6 Impulse wechselnder Polarität, 80 kV, 150 kJ
Wechselspannungskaskade	2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung
Wechselspannungsanlage	300 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz
Gleichspannungsanlage	bis 600 kV, 10 mA
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluftantenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m 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 1 GHz, Messempfänger bis 2,7 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
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 Abstraten bis über 4 GHz, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren
Teilentladungsmeßgeräte	zur phasenaufgelösten Messung und Interpretation
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlagspannungsmessgerät

10. LAGEPLAN

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



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



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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

**Anschlußstelle
54 Esslingen/Ostfildern**

11. NOTIZEN