

INHALTSÜBERSICHT

1.	VORWORT	2
2.	PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEHRE	8
3.1	VORLESUNGEN	8
3.2	PRAKTIKA.....	12
3.3	EXKURSIONEN	13
3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN.....	14
4.	PROMOTIONEN.....	27
5.	FORSCHUNGSARBEITEN.....	38
5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	42
5.2	SMART POWER GRIDS	78
5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	98
6.	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	112
7.	MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	120
8.	EREIGNISSE UND KONTAKTE	122
9.	PRÜFEINRICHTUNGEN	124
10.	LAGEPLÄNE.....	125

1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2011 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

Die Katastrophe von Fukushima hat eine Wende in der deutschen Energiepolitik eingeläutet: Die Bundesregierung hat Hals über Kopf den Atomausstieg beschlossen, ohne sich der daraus entstehenden, vielfältigen Konsequenzen voll bewußt zu sein. So muss natürlich der nun noch weiter zu forcierende Ausbau der erneuerbaren Energien und der Netzinfrastruktur konsequent umgesetzt werden. Hier sind aber noch viele wirtschaftliche und technische Probleme zu lösen. Auch ist die Akzeptanz in der Bevölkerung an vielen Stellen noch nicht ausreichend, um die für die Energiewende notwendigen Maßnahmen durchsetzen zu können. Hier werden wir noch viel Aufklärungsarbeit leisten müssen.

Durch das mediale Interesse, das dem Thema Energieversorgung entgegengebracht wird, ist auch dieses Jahr die Anzahl der Studierenden in den Bachelorstudiengängen Elektrotechnik und Erneuerbare Energien erfreulicherweise wieder stark angestiegen. Insbesondere für den Bachelorstudiengang Erneuerbare Energien konnten wir nach einem anspruchsvollen Auswahlverfahren zum Wintersemester 170 neue Studierende begrüßen. Das Interesse der Studierenden an der Energieübertragung und der Hochspannungstechnik ist weiter ungebrochen. Aus dem Wahlverhalten des ersten Jahrganges der Studierenden der Erneuerbaren Energien zeigt sich, dass der Großteil den Bereich Elektrische Energiesysteme vertieft und somit zukünftig für die vielfältigen Forschungsaufgaben am Institut zur Verfügung steht.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Herr Professor Braun wurde Mitglied des Stuttgart Research Centre for Simulation Technology. Als assoziierter Wissenschaftler leitet er das Projekt „*Dynamische Simulation und Optimierung Dezentraler Energiekonzepte*“. In dem Projekt werden kooperativ zwei Promotionen am IEH und eine Promotion am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) mit Förderung durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg durchgeführt. Damit kann das IEH seine grundlagenorientierten Forschungsaktivitäten deutlich verstärken.

Neben den Dissertationen von Dr.-Ing. Franz Streibl (*Electrostatic Discharge Performance of Passive Surface-Mount Components*), Dr.-Ing. Rummiya Vilaithong (*Models for Thermal and Mechanical Monitoring of Power Transformers*) und Dr.-Ing. Michael Zerrer (*EMV-Bewertung von Einbauorten für Steuergeräte in Kraftfahrzeugen mit Hilfe der Transferfunktion*) dokumentieren über 60 Veröffentlichungen eindrucksvoll unsere Aktivitäten. In diesem Jahr waren wir unter anderem an den Abschlussberichten zweier CIGRE-Arbeitsgruppen beteiligt (*DGA in Non-Mineral Oils*

und *Guidelines for Unconventional PD Measurements*). Die Veröffentlichungen liegen teilweise auch auf unserer Homepage www.ieh.uni-stuttgart.de zum Download bereit.

Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns in diesem Jahr vier neue Mitarbeiter einzustellen, die sich neuer Fragestellungen annehmen werden. Dipl.-Ing. Simon Eilenberger, M. Sc. Mohsen Nemati und Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner werden auf den Gebieten der Modellierung, Simulation und Regelungsverfahren von Smart Grids forschen. Dipl.-Ing. Martin Siegel wird Fragestellungen zur Teilentladungsdiagnostik von Leistungstransformatoren untersuchen.

Im kommenden Jahr wird das Institut wieder Gastgeber des traditionsreichen Stuttgarter Hochspannungssymposiums sein, das wir am 6.-7.3.2012 im bekannten Rahmen in der Filderhalle in Leinfelden durchführen werden. Der Umbau der Energienetze wird im Mittelpunkt dieser Veranstaltung stehen. So haben wir als Titel der Veranstaltung *„Komponenten und Betriebsführung der Netze von morgen“* gewählt. Dankenswerterweise haben sehr renommierte Experten verschiedener Energieversorgungsunternehmen und Hersteller einen Beitrag zugesagt, so dass der unabhängige und vor allem sehr praxisnahe Charakter dieser Veranstaltung gewahrt bleiben wird. Auf Grund des Erfolges werden wir auch dieses Mal 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 zu diesem hochaktuellen Thema und die traditionell lebhaften Diskussionen.

Allen unseren Freunden möchte ich an dieser Stelle recht herzlich für Ihre Anregungen und Ihre Hilfe danken. Mein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft und jenen Firmen, die uns durch Aufträge und Spenden unterstützt haben. Wir hoffen, dass dieser Jahresbericht auch dazu beiträgt, die bestehenden Kooperationen auszubauen und neue Kontakte zu knüpfen. Dazu möchte ich besonders auf das Kapitel 3.4 Studentische Arbeiten dieses Jahresberichtes hinweisen, in dem wir zu Ihrer Information auch Kurzfassungen der durchgeführten Diplom- und Masterarbeiten anführen.

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

Stuttgart, im Dezember 2011

Prof. Stefan Tenbohlen

PREFACE

Dear friends!

As usual, we would like to inform you about our activities with our annual report 2011.

As a result of the Fukushima nuclear disaster the German government decided to stop the usage of nuclear energy and to strengthen the turnaround to renewable energies for more sustainability. But we should take into consideration that this rapid and clear change of politics will have multiple consequences.

First of all we have to boost the use of renewable energies and to expand the electrical power system. This includes the solution of a lot of economical and technical challenges. We have to accept that the exit from nuclear energy also includes unpopular but necessary measures e.g. construction works and building projects. It seems to me that we still have to give lots of information and explanations to achieve acceptance for the consequences of the energy turnaround.

This year the media focused on the field of future energy supply. As a result we are glad to see an increasing number of students in Electrical Engineering and Renewable Energies. Especially the Bachelor of Science in „Renewable Energies“ continues to be very successful. In winter term 2011/2012 we welcomed 170 excellent first term students, chosen from a large number of applicants. The students carry on being interested in power transmission and high voltage technology. The majority of renewable energies' students has chosen Electrical Power Systems as a special subject. So they are future candidates for the institute's various research projects.

Concerning our scientific work we look back on a very successful year.

Professor Braun became member of the Stuttgart Research Centre for Simulation Technology. As Participating Researcher he leads a project on dynamic simulation and optimization of decentralized energy supply concepts. In this cooperative project two PhDs at the IEH and one at the Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) are funded by the Ministry of Science, Research and the Arts Baden-Württemberg. This is a welcome strengthening of the institute's basic research activities.

The PhD-theses of Franz Streibl (*Electrostatic Discharge Performance of Passive Surface-Mount Components*), Rummiya Vilatithong (*Models for Thermal and Mechanical Monitoring of Power Transformers*) and Michael Zerrer (*Electromagnetic Compatibility Assessment of Mounting Locations for Electronic Components in Vehicles via Transfer Functions*) and more than 60 publications show the large

variety of our research activities. In 2011 we contributed to the final reports of two CIGRE-working groups (*DGA in Non-Mineral Oils* and *Guidelines for Unconventional PD measurements*). You can download most of our publications from our homepage www.ieh.uni-stuttgart.de.

In 2011 a large number of qualified IEH-graduates and a lot of industrial encouragements enabled us to employ four new researchers. Dipl.-Ing. Simon Eilenberger, M.Sc, Mohsen Nemati and Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner will work on the field of load modeling, simulation and control methods of Smart Grids. Dipl.-Ing. Martin Siegel will investigate unconventional partial discharge measurement in power transformers.

On March 6 and 7, 2012, the traditional Stuttgart High Voltage Symposium will take place in the Filderhalle in Leinfelden. The Symposium will focus on the conversion of the electric power networks. This year's title will be „Components and Operation of Future Power Networks“. Our conference (including an exhibition) will be supported by several industrial partners. This preserves the independent and very practical character of the symposium. Please find more information and a detailed programme under www.ieh.uni-stuttgart.de/symposium. We look forward to the presentation of new developments and results and to interesting discussions.

Finally I would like to send my sincere thanks to all our friends, who have contributed to our success in many ways. Especially I would like to express my gratitude to the Deutsche Forschungsgemeinschaft and all those partners who supported us with research contracts and donations. We hope that our annual report will strengthen existing collaboration and help to establish new contacts. For this purpose I would like to refer to chapter 3.4, where you can find abstracts of our graduate's work.

I am looking forward to continued close contact and co-operation with you also on behalf of Professor Feser, Professor Braun and all our members of staff. Our best wishes accompany you into the next year.

Stuttgart, December 2011

Prof. Stefan Tenbohlen

2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail: vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de	Telefon / phone: +49 (0)711-
Institutsleiter / Head of Institute:	Prof. Dr.-Ing. Stefan TENBOHLEN	-685-67871
Juniorprofessur Smart Power Grids:	Prof. Dr.-Ing. Martin BRAUN	-685-67875
Prof. im Ruhestand:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Kurt FESER	-685-67874
Lehrbeauftragte:	Dipl.-Ing. Ulrich SCHERER <i>EnBW Transportnetze AG</i>	-128-2437
	Dipl.-Ing. Thomas RUDOLPH <i>AREVA Energietechnik GmbH</i>	
	Dr.-Ing. Markus PÖLLER <i>DIGSILENT GmbH</i>	
	Dr.-Ing. habil. Sergey KOCHETOV <i>Robert Bosch GmbH</i>	-811-38682
Oberingenieure:	Dr.-Ing. Wolfgang KÖHLER <i>(Leiter des Hochspannungslabors Nellingen-Zinsholz)</i>	-341 2075
	Dr.-Ing. Ulrich SCHÄRLI	-685-67878
Akademische Mitarbeiter /		
Scientific Staff:	M. Sc. Ahmad ABDEL-MAJEED	685-69193
	Dipl.-Ing. Michael BELTLE	685-68061
	Dipl.-Wi.-Ing. Marc BRUNNER (ab 1.10.2011)	685-69197
	Dipl.-Ing. Dennis BURGER	-341 2075
	Dipl.-Ing. Simon BUROW	-341 2075
	Dipl.-Ing. Sebastian COENEN (bis 31.3.2011)	
	Dipl.-Ing. Simon EILENBERGER (ab 1.5.2011)	685-69194
	Dipl.-Ing. Maximilian HEINDL	-685-67857
	Dipl.-Ing. Jens HOHLOCH	-341 2075
	Dipl.-Ing. Mark JOVALEKIC	-685-67858

	Dipl.-Ing. Andreas MÜLLER	-685-67868
	Dipl.-Ing. Peter MÜLLER (bis 31.10.2011)	
	M. Sc. Mohsen NEMATI (ab 6.4.2011)	-685-67869
	Dipl.-Ing. Anne STROTMANN	-341 2075
	Dipl.-Ing. Alexander PROBST	-685-69196
	Dipl.-Ing. Martin REUTER	-685-67817
	Dipl.-Ing. Nicolas SCHMIDT	-685-67809
	Dipl.-Ing. Daniel SCHNEIDER	-685-67889
	Dipl.-Ing. Martin SIEGEL (ab 24.2.2011)	-685-67867
	Dipl.-Ing. Dejan VUKOVIC	-685-69195
	Dipl.-Ing. Andreas WEINLÄDER	-685-67838
Sekretariat / Secretary:	Nicole SCHÄRLI (Institutsteil Stuttgart-Vaihingen)	-685-67870
	Renate KINSKI (Hochspannungslabor Nellingen-Zinsholz)	-341 2075
	Hermine LWOWSKI	-685-67876
Technische Angestellte / Technical Staff:	Erwin BECK, Zentralwerkstattleiter	-685-67847
	Metin DEMIRHAN, Mechaniker	-685-67847
	Robert HÄBICH, Auszubildender	-685-67847
	Patrick HACKBARTH, Elektrotechniker	-685-67863
	Michael HERDTLE, Mechaniker	-341 2075
	Herbert KAUSSEN, Elektrotechniker	-341 2075
	Dieter MAJEWSKI, Mechaniker	-685-67847
	Hartmut RÖNISCH, Elektrotechniker	-685-67856
	Rudolf van de WEYER, Elektromeister	-341 2075
Gastwissenschaftler / Visiting scientists:	Laurentiu-Viorel BADICU, Bukarest (1.1.-31.8.2011)	
	Jimmy Cesar GONZALES ARISPE, San Juan/Argentinien (1.3.-31.8.2011)	
	Dr.-ing. habil. Zbigniew NADOLNY, Poznan/Polen LLP-ERASMUS-Gastdozent (17.-31.05.2011)	
	David OYEDOKUN, Kapstadt/Südafrika (6.7.-8.9.2011)	
	Prof. Dr.-Ing. habil. Krzysztof SIODLA, Poznan/Polen (4.-13.7.2011)	

3. LEHRE

3.1 VORLESUNGEN

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Elektrische Energietechnik I

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

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik I

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

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik II

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN***Elektrische Energienetze I***

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

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

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

Wintersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Kennwerte von Drehstrom-Freileitungen und Kabeln*
- *Belastbarkeit von Kabeln*
- *Einpoliger Erdschluss und Erdkurzschluss*
- *Lastflussberechnung*
- *Netzurückwirkungen*
- *HGÜ*

PROF. DR.-ING. M. BRAUN***Smart Grids***

Sommersemester, 2 V, 2 S, für Master-Studierende

- *Anforderungen der zukünftigen Energieversorgung*
- *Smart Grid Konzepte (z. B. Virtuelle Kraftwerke, Mikronetze)*
- *Regelung dezentraler Erzeuger, Speicher und Lasten (z. B. Photovoltaik und Elektrofahrzeuge)*
- *Modellierung und Simulation elektrischer Netze*
- *Netzqualität und Netzstabilität*
- *Netzbetriebsführung (z. B. Spannungs- und Frequenzhaltung)*
- *Netzanschlussbedingungen*
- *Netzplanung*

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

DR.-ING. W. KÖHLER

Hochspannungsprüf- und -messtechnik

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

DR.-ING. W. KÖHLER

Elektromagnetische Verträglichkeit

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

DIPL.-ING. U. SCHERER

Energiewirtschaft in Verbundsystemen

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

DIPL.-ING. T. RUDOLPH

Diagnostik und Schutz elektrischer Netzkomponenten

Wintersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

DR.-ING. M. PÖLLER***Netzintegration von Windenergie***

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

und weitere Dozenten der Fakultäten 4 und 6

Einführung Erneuerbare Energien

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

- *Klimaschutz und Erneuerbare Energien*
- *Solarthermie*
- *Photovoltaik*
- *Windenergie*
- *Wasserkraft*
- *Biomasse*
- *Wasserkraft*
- *Smart Grids*

DR.-ING. HABIL. S. KOCHETOV***EMV in der Automobiltechnik***

Sommersemester, 2 V, für Master-Studierende

- *Grundlagen der EMV in der Automobiltechnik*
- *EMV Design*
- *EMV Integration*
- *EMV Prüfverfahren in der Automobiltechnik*
- *EMV Simulation*

3.2 PRAKTIKA

DR.-ING. U. SCHÄRLI

Grundlagenpraktikum in Elektrotechnik

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

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

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

DR.-ING. W. KÖHLER

Praktische Übungen im Labor

Im Zuge der Umstellung von Diplom auf Bachelor/Master wurde das Fachpraktikum Hochspannungstechnik durch die „Praktischen Übungen im Labor“ ersetzt. Diese werden am Institut in Form von kleinen Forschungsarbeiten realisiert, die im Team von max. vier Studierenden bearbeitet werden, betreut von akademischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Die Studierenden eignen sich dabei sowohl fachliche Kenntnisse an als auch das Wissen, wie man ein Projekt im Team plant und bearbeitet.

PROF. DR.-ING. M. BRAUN

Praktikum in Erneuerbare Energien

Das Institut bietet für den Studiengang „Erneuerbare Energien“ einen Praktikumsversuch an, der die Grundprinzipien von Spannungs- und Frequenzregelung zeigt. Dabei kommt ein Inselnetz mit Batteriestromrichter zum Einsatz, in dem Netzspannung und –frequenz verändert werden können und der Einfluss von Wirk- und Blindleistung verdeutlicht werden.

3.3 EXKURSIONEN

14. – 17. Juni 2011: Besuch mit 25 Hörern der Fachvorlesungen bei
- HSP, Troisdorf Besichtigung der Fertigung von Durchführungen
 - Alstom Grid, Mönchengladbach Führung durch die Transformatorfertigung
 - ABB Calor Emag, Ratingen Mittelspannungsschaltanlagen
 - RWE, Garzweiler Revierexkursion durch den Braunkohletagebau, Besichtigung des Kraftwerks Niederaussem
 - Ford, Köln Produktion von Fiesta und Fusion



Die Exkursionsteilnehmer bei Alstom Grid, Mönchengladbach

21. Juni 2011, ganztägig

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

26. Juni 2011, ganztägig

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

3.4 STUDENTISCHE ARBEITEN

Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten vom 1.11.2010 bis 31.10.2011:

Ankermann, Tobias

Untersuchung der Gaslöslichkeiten und Gaslösungsprozesse in Transformatorisoliölen

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Lösungsprozesse in einem geschlossenen Transformator mit Ausdehnungsbehälter zu verstehen und somit die entstehenden Drücke, aufgrund von Laständerungen, berechnen zu können. Dazu wurden zuerst die Ostwald-Koeffizienten präzise bestimmt, da sie benötigt werden, um die ursprüngliche Konzentration gelöster Gase im Öl zu berechnen. Des Weiteren wurden Rechenverfahren entwickelt, um diese Koeffizienten berechnen zu können. Durch ein Modell eines geschlossenen Transformators wurde die Änderung des Drucks bei Lasterhöhung untersucht und mit Hilfe der bekannten Gasgesetze sind Gleichungen aufgestellt worden, mit denen es möglich ist, den maximal auftretenden und den stationären Druck voraussagen zu können. Es wurde untersucht, wie sich Druck und Temperatur auf die maximale Gaslöslichkeit und auf die Trägheit des Lösungsprozesses auswirken. Außerdem wurden Methoden entwickelt, die maximale Gaslöslichkeit zu berechnen.

Investigation of gas solution processes in transformer oils

The aim of this work is to understand the solubility processes in sealed transformers with oil expansion container and therefore to be able to calculate the originating pressures on the basis of load changes. The Ostwald-Coefficients were determined first for it exactly, because they are needed to calculate the original concentration of dissolved gases in oil. Furthermore arithmetic procedures were developed to be able to calculate these coefficients. The change of pressure was examined by a model of a sealed transformer by increasing load conditions and with the help of the known gas laws equations have been put up. Therefore it is possible to be able to forecast the maximum and the steady-state pressure. It was examined how pressure and temperature affects the maximum gas solubility and the inertia of the solubility processes. Moreover, methods were developed to calculate the maximum gas solubility.

Eilenberger, Simon

Machbarkeitsstudie für einen regelbaren Verteiltransformator

Immense Zuwachsraten dezentraler Erzeuger wie Biogas-, Windenergie- und vor allem Photovoltaikanlagen lassen Probleme bei der Energieeinspeisung und Spannungshaltung im Niederspannungsnetz entstehen. Dezentrale Erzeugereinheiten brechen die klassische Top-Down-Versorgungsstruktur auf und prägen diese durch bidirektionale, fluktuierende Lastflüsse, welche alternative Konzepte der Spannungshaltung im Niederspannungsnetz erfordern. Eines dieser neuartigen Konzepte ist ein für Verteiltransformatoren entworfener, hybrider, unter Last schaltbarer Stufenschal

ter (HOLTC). In dieser Arbeit wird der HOLTC als Simulationsmodell erstellt, an ein existierendes Modell eines auf Designparametern basierenden Verteiltransformators angebunden und an einem Prototyp verifiziert. Simulationen und Parametervariationen sollen Aussagen über technische Realisierbarkeit und Probleme im Bereich Komponentendesign und Power Quality aufdecken und Prognosen bzgl. im Labor nicht messbarer Lastfälle zulassen.

Feasibility Study for Regulated Distribution Transformers

Immense growth rates of decentralized energy providers, e.g. photovoltaics, are causing voltage stability problems in low voltage systems by breaking up the conventional top-down supply structure and affecting it by fluctuating bidirectional load flows, thus demanding for alternative low voltage stability concepts. One of these concepts is a hybrid tap-changer (HOLTC) designed for distribution network transformers (DNT) and capable of switching under load. In this work a simulation model of HOLTC is developed, appended to an existing model of a DNT, and verified by a prototype. Simulations are performed to assess technical feasibility, possible problems and forecasts of load cases not measureable due to load limitations of a laboratory setup.

Gu, Mengtao

Untersuchung eines Sensors zur Online-Überwachung der Durchschlagspannung von Transformatorenöl

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung eines neuartigen Sensors, um die Online-Überwachung der Durchschlagspannung von Transformatorenöl zu ermöglichen. Als Sensor werden in dieser Arbeit Automobil-Zündkerzen eingesetzt. Ihre Anforderungen werden diskutiert und ihre Funktionsfähigkeit untersucht. Die Messergebnisse von diesem Sensor werden mit den Messergebnissen einer DIN-genormten konventionellen Prüfmethode verglichen und es wird auch untersucht, ob eine Umrechnung zwischen beiden Messmethoden möglich ist. Der Einfluss des Sensors auf die Entstehung von Spaltgasen, die die Gas-in-Öl-Analyse beeinflussen könnten wird ebenfalls geklärt. Als Isolierflüssigkeit werden zwei Typen von Mineralölen verwendet: Einmal neues naphthenisches Mineralöl Lyra X und zusätzlich betriebsgealtertes Mineralöl aus Transformatorölprouben.

Development of a sensor for online breakdown voltage measurements

The goal of this work is the investigation of a new sensor, in order to make online monitoring for the breakdown voltage from transformer oil possible. Automobile spark plugs are used as sensor in this work. Their requirements and the examination for their operability will be discussed. The measurement results from this sensor will be compared with the measurement results of a DIN standard conventional testing method, and it will be discussed, whether a conversion between both measuring methods is possible. Another check is the determination of types and concentrations of dissolved gases in oil. Finally it is to be decided whether this sensor is suitable for

online monitoring. As insulating liquid two types of mineral oils are used in this work, one is the new mineral oil Lyra X, the other is service aged mineral oil.

Heinrich, Sebastian

Entwicklung einer ethernet-basierten Embedded-Messplattform

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Realisierung einer ethernet-basierten Messplattform für die Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) und die akustische Teilentladungsmessung von Leistungstransformatoren. Auf der Basis eines bereits bestehenden Mess(tel-)moduls wird ein vollständiges und vielseitig einsetzbares Messsystem entwickelt. Nach einer Einführung in die Grundlagen wird auf das Redesign eines bereits bestehenden Moduls eingegangen, welches so erweitert wird, dass nicht nur die SFRA-Messung, sondern auch die akustische Teilentladungsmessung möglich wird. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dann beschrieben, wie das zusätzlich benötigte Controllermodul aufgebaut ist. Der Betrieb mit WLAN vereinfacht entscheidend den Aufbau des Systems und verkürzt so die benötigte Zeit zum Ausführen der Messung.

Development of an Ethernet-based Embedded Measurement System

This diploma thesis is written about the realization of an ethernet-based measurement platform build for the SFRA and the acoustic partial discharge detection. It is shown that further development of an existing measurement module leads to a complete measurement system that is universally usable. The thesis describes how an existing module is upgraded in order to support SFRA and partial discharge localisation. This module is also redesigned to support an operation with WLAN. Further it is shown how a controller module must be designed. The whole system, consisting of a controller module and several measurement modules, is suitable for SFRA and detection of the origin of partial discharges.

Jourdan, Dirk

Entwicklung eines Systems zur Messung von Vibrationen an Leistungstransformatoren

In dieser Arbeit wurde ein System zur Messung und Auswertung von Vibrationen an Leistungstransformatoren entwickelt, mit dem eine automatisierte Messung während des Betriebs möglich ist. Dazu wurden in Matlab Programme entwickelt, welche die Signale von Sensoren mit einem Agilent-Datenlogger messen und auswerten können. Die untersuchten Sensortypen waren ein Beschleunigungssensor, ein Interferometer und ein Hydrophon, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Beschleunigungssensor lag. Das aufgebaute Messsystem wurde im Labor und an einem 2,1-MVA-Leistungstransformator getestet. In diesen praktischen Tests des entwickelten Systems hat sich gezeigt, dass sich die Sensoren und die Software für Messungen eignen.

Design and evaluation of a monitoring system for vibrations of power transformers

The purpose of this research project was to design an automated system to measure and analyze vibrations of power transformers during operation. Matlab programs were developed to measure and analyze the sensor signals with an Agilent data logger. The investigated sensor types were acceleration sensor, interferometer and hydrophone. This work concentrates on the type acceleration sensor. The designed measurement system was tested in the laboratory and on a 2,1 MVA power transformer. These practical tests showed that the developed system is suitable for measurements.

Körner, Christian

Untersuchung von Konzepten zur Spannungsregelung in Mittelspannungsnetzen bei starker Einspeisung regenerativer Stromerzeuger

Das Energieversorgungsnetz wird durch den verstärkten Einsatz von regenerativen Energiequellen vor große Herausforderungen gestellt. Vor allem im Mittelspannungsnetz können die dezentralen Einspeiser eine Lastflussumkehr verursachen. Diese Änderung des Lastflusses beeinflusst die einzelnen Knotenspannungen im Mittel- und Niederspannungsnetz. So kann es passieren, dass bei starker Einspeisung einzelne Knoten eine zu hohe Spannung aufweisen und die Grenzen laut DIN EN 50160 erreichen. Mit Hilfe einer lastabhängigen Sollwertanpassung am Spannungsregler des MS-Transformators kann das Spannungsniveau im Mittelspannungsnetz an die verschiedenen Zustände (Rückspeisung, Schwachlast, Starklast) angepasst werden. Die Simulationen haben bestätigt, dass es durch dieses Verfahren möglich ist, die Spannungshaltungsprobleme zu reduzieren. Allerdings wird sich die Situation bei einem weiteren Zubau von erneuerbaren Energien verschärfen und einen Netzausbau notwendig machen.

Analysis of concepts for voltage control at medium voltage grids with high degree of renewable energy generation

The energy supply system is confronted with major challenges by the increased use of renewable energy sources. Especially in the medium voltage network, dispersed generation causes power flow reversal. This change of power flow affects the individual node voltages in medium and low voltage grids. It can happen that, during high energy provision by renewables, individual nodes have voltage levels that are too high and therefore reach the limits according to DIN EN 50160. Using a load-dependent set point adjustment on the voltage regulator of the MS-transformer, the voltage level in the medium voltage grid can be adjusted to the various states (reverse power flow, low-load, high load). The simulations have confirmed that by this method it is possible to solve voltage stability problems. However, the situation will worsen with an increasing number of renewable energies and will make grid reinforcement necessary.

Kolb, Daniel

Bestimmung der Feuchtigkeits-Gleichgewichtsdiagramme für alternative Isolierstoffsysteme

In den vergangenen Jahren kann man ein steigendes Interesse an alternativen dielektrischen Materialien feststellen. Dies sind z.B. natürliche und synthetische Ester oder aus Aramid-Fasern bestehende feste Isoliermaterialien. Gleichgewichtsdiagramme bilden ein verbreitetes Verfahren zur Zustandsanalyse durch Feuchtigkeitsbestimmung. In dieser Arbeit werden Feuchtigkeits-Sättigungskurven von verschiedenen Isolierölen bis zu einer Temperatur von 140°C präsentiert, zusammen mit den Sorptionsisothermen von Nomex (Papier) und Nomex (Pressboard). Es werden Feuchtigkeits-Gleichgewichtsdiagramme für verschiedene Öl-Feststoffkombinationen vorgestellt und es wird gezeigt, wie diese Diagramme konstruiert werden. Zusätzlich werden mathematische Modelle für den Verlauf der Kurven präsentiert. Letztendlich werden diese Diagramme mit verschiedenen Materialkombinationen unter thermischem Gleichgewicht validiert und bestätigt.

Determination of moisture equilibrium diagrams for alternative insulating systems

In recent years one can observe a higher interest in alternative dielectric materials for power transformers. These are for example natural and synthetic esters or aramid fiber based solid insulation materials. Moisture equilibrium diagrams are a popular method to determine the moisture in solid insulation materials. In this paper moisture saturation curves of various insulation oils are presented up to a temperature of 140°C, together with the sorption isotherms of Nomex paper and pressboard. Moisture equilibrium diagrams are presented for different combinations and it is shown how to construct the diagram. Additional, different mathematical models for the curves are presented. Finally these diagrams are validated for different material combinations in case of thermal equilibrium.

Kopp, Joachim

Retrofill von Leistungstransformatoren mit natürlichen Estern

In der Diplomarbeit wird der Retrofill und Betrieb von Leistungstransformatoren mit natürlichen Estern (FR3) untersucht. Ein höherer Flammpunkt sowie die gute Umweltverträglichkeit sind die wichtigsten Vorteile. Beim Retrofill entsteht ein Gemisch aus gealtertem Mineralöl und dem neu eingefüllten FR3. Dieses vermischte sich gut und es traten keine Komplikationen auf. Die Gemische erfüllten alle Anforderungen an Transformatorester nach DIN EN 61099 bis auf den Pourpoint und die Kristallisation. Die Durchschlagsspannung kann bei Tieftemperaturen noch als ausreichend erachtet werden. Die Durchschlagsspannungsprüfverfahren müssen aufgrund der hohen Viskosität von FR3 angepasst werden. Aufgrund der hydrolytischen Alterung ist eine Transformatortrocknung fragwürdig. Außerdem konnten Handhabungsregeln und Grenzwerte für den Umgang mit Gemischen erarbeitet werden.

Retrofill of power transformers with natural esters

In this study the retrofill and operation of transformers with natural esters (FR3) is researched. A higher flash point and also the good environmental compatibility are

the main advantages. The result of the retrofill is a mixture of aged mineral oil and the newly filled FR3. The mixture blends properly and there were no complications. All requirements of transformer esters in accordance with DIN EN 61099 are fulfilled except the pour point and crystallisation. The breakdown voltage can be considered sufficient at low temperatures. The breakdown voltage test methods need to be adjusted due to high viscosity of FR3. Due to the hydrolytic aging a transformer drying is questionable. Furthermore handling rules and thresholds for the use of mixtures were developed.

Kruppa, Robert

Messung der Streuparameter einer Kfz-Hochvolt-Batterie

In der Automobiltechnik werden zur Messung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) sogenannte Bordnetznachbildungen (BNN) verwendet. Bisher existieren solche BNN lediglich für das 12-V-Bordnetz. In Hybrid- und Elektrofahrzeugen ist aufgrund der höheren Leistungsanforderungen der Verbraucher der Einsatz eines geschirmten Hochvoltbordnetzes erforderlich. Dies verändert jedoch die Eingangs-impedanz des Bordnetzes eines Hybridfahrzeugs. Um eine adäquate, dem Hybridfahrzeug angepasste BNN zu entwickeln, muss die Impedanz des HV-Bordnetzes durch Messungen bestimmt werden. In der vorliegenden Arbeit sind die Streuparameter einer Kfz-Hochvolt-Batterie gemessen worden.

Scattering Parameter Measurement of an Automotive Li-Ion Battery

Automotive engineers use Line Impedance Stabilization Networks (LISNs) as a substitute of car wiring harnesses and its components during tests of electromagnetic compatibility. So far, there exist only LISNs based on the 12 V car supply system. In hybrid and electric driven vehicles it is necessary to use high voltage (HV) electrical systems to efficiently transmit high power. To determine an adequate LISN assembly for a hybrid or electric driven vehicle the impedance of the real HV network and its parts has to be measured. In this work the scattering parameters of an automotive high voltage battery, have been determined.

Kurzenhäuser, Tobias

Entwicklung einer Methodik zur Analyse des Einflusses von Elektromobilität auf Niederspannungsnetze und Betrachtung zukünftiger Ladekonzepte

Es wird eine Methodik entwickelt, die den Ansatz der Monte-Carlo-Simulation verwendet, um den Einfluss durch das Nachladen von Elektrofahrzeugen auf das Niederspannungsnetz zu untersuchen. Durch reale Lasten mit probabilistisch erzeugten Ladeprofilen wird auf die Betriebsmittelauslastung sowie die Einhaltung des Spannungsbandes durch häufige Simulationen geachtet. Es zeigt sich, dass die Simulation mit probabilistischen Elektromobilitätslasten ein deutlich genaueres Bild des Spannungsbands zeichnet, wohingegen bei Haushaltslasten der Mehrwert sehr gering ausfällt. Des Weiteren werden einfach umzusetzende Formen des Lademanagements nachgebildet und deren Einfluss bzw. die Methodik an einem Beispielnetz überprüft. Dabei stellt sich heraus, dass bei den zugrunde gelegten

Szenarien bis zum Jahre 2020 durch Elektromobilität bei homogener Verteilung kaum Probleme im Netz zu erwarten sind.

Development of a methodology for the analysis of the influence of e-mobility on low voltage grids and consideration of future charging concepts

In this thesis a methodology is developed to investigate the influence of the recharging of electric vehicles on low voltage networks. The Monte Carlo method is used to test the impact using real household load patterns and statistic based load patterns. It appears that the simulation with probabilistic electromobility yields a detailed description of voltagebands whereas with household loads there is a very low benefit. In addition, easy to implement load management concepts are programmed. On a sample network their impact and the methodology is examined. As a result, based on the scenarios applied nearly no problems are to be expected in the network by e-mobility for 2020, when considering evenly distributed vehicles.

Leitner, Colin

DSP-basierte High-Speed-Signalerfassung

Transformatoren spielen in der Energieübertragung eine zentrale Rolle. Als wichtiges Diagnosemittel wird die FRA-Messung eingesetzt, um mögliche Wicklungsschäden zu erkennen. In dieser Arbeit wird ein Messgerät entwickelt, das mit einem besonderen Fokus auf einfache Verwend- und Erweiterbarkeit die FRA-Messung vereinfachen und verbessern soll. Durch den Einsatz von Ethernet als Steuer- und Messprotokoll und Power over Ethernet für die Stromversorgung ist nur noch ein einziges Kabel pro Messgerät notwendig. Der eingesetzte Blackfin-DSP erlaubt aufwendiges Postprocessing für die Signalanalyse und mit uClinux kommt ein vollwertiges POSIX-kompatibles Betriebssystem zum Einsatz, das eine einfache Anpassung der Software erlaubt. Messungen können über ein einfaches Webinterface in praktisch allen Programmiersprachen durchgeführt werden, ohne zusätzliche Software zu benötigen.

DSP-based High Speed Data Acquisition

Power transformers play a crucial role in energy distribution. Frequency response analysis is an important diagnostic method to detect winding damages in power transformers. An easy to use meter is developed in this thesis to enhance the FRA measurement process. The use of Ethernet as control and measurement protocol simplifies software development. The small size of the device allows measurements to be done directly at the target and long measurement cables can be avoided. The use of a Blackfin DSP allows enhanced signal postprocessing and uClinux as POSIX compatible userspace distribution makes changes to the software stack easy. Measurements can be made by an integrated web interface, which is also accessible from almost any programming language without any further software requirements.

Leng, Yan

Untersuchung der Flow Electrification verschiedener Öle

Im Isolier- und Kühlungssystem eines Leistungstransformators kann die Flow Electrification zu Unfällen führen. Um die Netzsicherheit und die Betriebsstabilität zu garantieren, ist es sehr sinnvoll, die Flow Electrification im Isolieröl quantitativ zu analysieren, die Electrostatic Charging Tendency zu berechnen und die Beeinflussungsfaktoren zu untersuchen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Prüfstand „Mini-Static Tester“ mit Ansteuerungsmöglichkeit mittels eines PC aufgebaut. Die Beeinflussung durch die Fließgeschwindigkeit und die Temperatur wurden untersucht. Schließlich wurden die Eigenschaften von zwei Isolierölen aus Sicht der Flow Electrification verglichen. Dabei handelte es sich um konventionelles Mineralöl Lyra X und den natürlichen Ester FR3. Es wurde festgestellt, dass dieses Pflanzenöl höhere ECT-Werte aufweist als Mineralöl.

Investigation of transformer oil flow electrification

Oil flow electrification may damage the insulation property of oil channels in large transformer and become a harmful factor, which could cause accidents in transformers. The phenomenon can be researched by means of analyzing the mechanism, tracking the Electrostatic Charging Tendency and studying the influences of related factors. In this diploma work, a test set-up called “Mini-Static Tester” was built to measure the Electrostatic Charging Tendency. The performance of tests was controlled by a Matlab GUI program. The influence of two main factors, the flow rate of oil and its temperature, were researched. Furthermore, the properties of two different samples, mineral oil Lyra X and FR3, have also been compared. As result we can see, that the ECT value of FR3 is much more larger than the value of Lyra X.

Ma, Juan

Alterungs- und Gasungsverhalten von Mineralöl und natürlichen Estern

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Alterung von Mineralöl und natürlichem Ester. Dazu wurden beide Stoffe für 14 Tage thermisch gealtert. Berücksichtigt wird, dass im Transformator das Öl mit Kupfer und Isolations-Papier in Kontakt kommt. Ein Ziel dieser Arbeit war es auch, den Einfluss beider Materialien auf das Gasungsverhalten von natürlichem Ester und Mineralöl zu untersuchen. Um diesen Einfluss zu simulieren, wurde bei den Proben, die bei 110°C gelagert wurden, Kupfer hinzugegeben. Diese beiden Proben wurden jeweils auf ihre Farbzahl und ihre Neutralisationszahl hin untersucht. Die Proben, die bei 120°C geschlossen gelagert wurden, wurden hinsichtlich ihres Gasungsverhaltens untersucht, besonders im Hinblick auf das Zufallsgasen - das sogenannte stray gassing.

Ageing and gassing behaviour of mineral oil and natural ester fluids

This diploma thesis deals with the ageing of mineral oil and natural ester. For this samples of both oils were stored in an oven for 14 days and were thermally aged. The thesis takes into account that in a transformer the oil/ester comes in contact with copper and insulating paper. One aim of this thesis was to investigate the effect of

both materials with regard to the gas production of the oil/ester. To simulate this effect, copper was added to the samples stored at 110°C. These two samples were used to investigate the colour of the oil and the change of the acid number during their ageing. The samples stored at 120°C were used to investigate the gas production during the ageing especially with regard to the production of random gases, also known as stray gassing.

Quingwen, Chen

Implementierung von Algorithmen in Matlab zur Detektion von Störlichtbögen in gemessenen Stromverläufen

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Erkennung von stromschwachen Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen. Es werden unterschiedliche Ansätze und die daraus resultierenden Algorithmen zur Detektion eines Störlichtbogens in Matlab-Programme implementiert. Die Detektion erfolgt hierbei ausgehend von den gemessenen Stromverläufen der Schaltanlagen.

Implementation of algorithm in Matlab for arc fault detection in measured current curves

The diploma thesis deals with the detection of low current arc faults in low voltage switchgears. Different approaches and the resulting algorithms to detect arc faults in measured current waveforms are implemented in Matlab programs.

Shen, Weiwei

Untersuchung einer neuen Sensorart für unterschiedliche akustische Messungen in Transformatorenöl

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der grundlegenden Untersuchung und Erprobung eines Hydrophons im Hinblick auf seine Eignung als Sensor für akustische Messanwendungen in Transformatorenöl. Durch die Vibrationsmessungen im Labor wird gezeigt, dass das Hydrophon in Öl zum Teil bessere Ergebnisse im Vergleich zu Beschleunigungssensoren auf dem Kessel liefert. Durch Laufzeitmessungen wird gezeigt, dass das Hydrophon für die akustische Messung und Ortung von Teilentladungen eingesetzt werden kann. Zuletzt wird durch Messungen gezeigt, dass das Hydrophon für den Empfang von UHF-TE-Signalen verwendet werden kann und als Trigger für die akustische TE-Messungen geeignet ist. Mit einem Hydrophon lassen sich somit gleichzeitig drei Messungen direkt im Öl durchführen. Verglichen mit den bedämpften Messungen am Kessel zeigen die Messungen im Öl eine höhere Empfindlichkeit.

Evaluation of a new sensor type for different measurement principles in oil

This project was concerning the basic examination and testing of a hydrophone with respect to its suitability as an acoustic sensor for the acoustic measurements of vibrations and partial discharges in transformer oil. It was verified by vibration measurements in the laboratory that the hydrophone provides comparable results to acceleration sensor attached on the outside tank wall. Proven by time of flight measurements, the hydrophone is also suited for detection and localization of PD.

Ultra high frequency (UHF) PD measurements found that the hydrophone is sensitive to electromagnetic emission and can be used as trigger for acoustic PD measurements. Therefore a hydrophone can be used for three measurements simultaneously. Compared to outside tank measurements in oil measurements lack damping and thus show higher sensitivity.

Siegel, Martin

Integration von Elektrofahrzeugen in ein Stromnetz mit hohem Anteil erneuerbarer Energien

Sowohl die Anzahl an Elektrofahrzeugen als auch fluktuierender erneuerbarer Stromerzeuger wird in Zukunft stark steigen. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Elektrofahrzeuge und der erneuerbaren Energien auf ein ländliches Netz durch Simulationen mit einer Netzberechnungssoftware untersucht. Dabei wird eine modulare Methodik zur Analyse von Netzen vorgestellt, die sich effizient auf weitere zu analysierende Netze übertragen lässt. Konkret wird gezeigt, dass das betrachtete Netz deutliche Überkapazitäten aufweist und in der Lage ist, die zusätzliche Belastung durch Elektrofahrzeuge und durch erneuerbare Energien aufzunehmen. Außerdem wird ein Lastmanagementsystem erstellt, welches die Netzauslastung weiter vergleichmäßigt und Spannungsbandverletzungen selbst bei lokalen Häufungen von Elektrofahrzeugen unwahrscheinlich macht.

Integration of electric vehicles in a grid with a high proportion of renewable energies

The number of electric vehicles, as well as fluctuating renewable energies will rise in the future. This thesis analyzes the impact of electric vehicles and renewable energy sources on a rural grid through simulations by the use of a network calculation software. Thereby, a modular methodology for the analysis of grids is presented, which could be efficiently transferred to additional grids to be analyzed. It is shown that the considered grid has significant excess capacity and is capable to take the increased load of electric vehicles and renewable energy up. Additionally, a load management system is developed, which further balances the grid load and prevents over- and under-voltage situations even with local accumulations of electric vehicles.

Yang, Song

Untersuchung und Vergleich des EMV-Störverhaltens verschiedener Schaltertypen in Mittelspannungsschaltanlagen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Störverhalten verschiedener Schaltertypen in einer Mittelspannungsschaltanlage untersucht und verglichen. Die Schaltanlage enthält drei gasisolierte Trennschalter und einen vakuumisolierten Leistungsschalter. Zuerst wurde der Trennschalter mit SF₆ oder Luft befüllt und dessen Störgrößenemission untersucht. Danach wurden Vorzündungen und Rückzündungen am Leistungsschalter betrachtet. Am Ende der Diplomarbeit wurden die unterschiedlichen Störgrößen verglichen.

Investigation and comparison of EMC disturbance of different switch types in medium voltage switchgear

Within the scope of this diplom project, the electromagnetic interference behavior for different types of switches in medium voltage switchgear is investigated. A gas insulated medium voltage switchgear is used in the investigation. It contains three gas insulated disconnecter switches and one vacuum circuit breaker. First the disturbances of the three position disconnecter in SF6 and in air are investigated and compared. Afterwards prestrikes and restrikes, generated by operations of vacuum circuit breaker, are investigated. In the last, the different arcing processors and disturbances are compared.

Zhang, Yuanyuan

Dielektrische Untersuchungen im Zeitbereich an Elektroisulierölen

In der Arbeit werden Leitfähigkeitsmessungen im Zeitbereich an Elektroisulierölen untersucht. Der Zustand des Isolieröls hat einen großen Einfluss. Der Wassergehalt, die Gaskonzentration und Säurekonzentration sind wichtige Zustandsgrößen von Mineralöl, da sie den Alterungsprozess von Leistungstransformatoren abbilden. Diese Arbeit diskutiert die Auswirkungen von Temperatur, Feuchtigkeit und Säurekonzentration auf die Eigenschaften des Isolieröls unter Laborbedingungen.

Dielectric time domain measurements with insulating oils

This study investigates conductivity of electrical insulating oils of power transformers with different conditions. The condition of the insulation system is essential. The water content, the gas concentration and acid concentration are the important properties of mineral oil, and they are also important factors for aging of power transformers. This work discusses the effects of temperature, water content and acid concentration for the condition of the insulating oil under laboratory conditions.

Abgeschlossene Studien- und Bachelorarbeiten vom 1.11.2010 bis 31.10.2011:

NAME	THEMA
Babat, Sahin	Regelung stufbarer Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung. Voltage Control by Tap-Changing Urban Grid Transformers.
Böttigheimer, Mike	Gasungsverhalten verschiedener Isolierflüssigkeiten bei elektrischen Durchschlägen. Gassing behaviour of different insulation liquids with impulse breakdowns.
Cassinikos, Philipp	Simulation der elektrischen Feldverteilung in pflanzlichem Isolieröl. Simulation of electrical field ditribution in vegetable-based oil.
Dadgostar, Hamid	Thermische Modellierung von Leistungstransformatoren. Thermal Modelling of Power Transformers.

Frey, Katharina	Wirk- und Blindleistungsregelungskonzepte mit Elektroautos im NS-Netz. Active and reactive power control with electric vehicles in low voltage grids.
Gnädig, Mario	Entwicklung einer Transferfunktion zur Vorhersage elektromagnetischer Abstrahlung von Kabelbäumen auf Basis von Störstrommessungen. Transfer Function Development for the Prediction of Cable Harness Radiation on Base of Current Measurements.
Hägele, Stephanie	Statistische Analyse von Haushaltsmessdaten. Statistical analysis of household measurement data.
Heckel, Marcel	Konzeption eines Lademanagements für Elektrofahrzeuge in MATLAB und Kosimulation mit PowerFactory. Concepts for load management systems for electric vehicles with MATLAB and co-simulation with PowerFactory.
Herold, Barbara	Untersuchung des Stray gassings von Transformatörölen auf pflanzlicher Basis. Stray gassing investigations with vegetable dielectric fluids.
Hillenbrand, Philipp	Simulation des Hochfrequenzverhaltens von Transformatorkwicklungen mit Hilfe der finiten Integrationsmethode (FIT). Simulation of High Frequency Behaviour of Transformer Windings using Finite Integration Technique (FIT).
Horn, Jochen	Möglichkeiten zur Einflussnahme von Elektroautos auf das Frequenzregelverhalten. Opportunities for electric cars to influence frequency control behaviour.
Hurst, Sascha	Dämpfung von Ferritmaterialien in Sättigung. Attenuation of DC saturated Ferrite materials.
Kathmann, Thomas	Erweiterung eines Systems zur Ortung von Teilentladungen in gasisolierten Schaltanlagen für Langzeitanwendungen. Extension of a system for partial discharge location in GIS for long-term applications.
Kayser, Georg	Probabilistische Lastmodellierung von Haushaltslasten. Probabilistic load modeling of domestic loads.
Koppon, Stefan	Messung von Durchschlag und Teilentladung in Bio- und Mineralölen. Measurements of breakdown and partial discharges in bio-based and mineral oils.
Mardaneh, Shahrouz	Impulsformanalyse mittels Wavelet-Transformation. Impulse Shape Analysis using Wavelet Transformation.
Moldenhauer, Florian	Evaluierung der Netzplanung im Hinblick auf Elektromobilität und dezentrale Erzeuger. Evaluation of grid planning in regard to e-mobility and dispersed generation.
Müller, Gert	Untersuchung der Approximation von Frequenzgängen zur Analyse von FRA-Messungen. Investigations of Frequency Response Approximations for FRA Measurement Analysis.

Papadopoulos, Nikolaos	Untersuchung und Vergleich des Wärmeüberganges zwischen Öl und Oberfläche von Drillleitern mit unterschiedlichen Umhüllungen. Investigation and comparison of the heat transfer between oil and surface of continously transposed cables (CTCs) with various coverings.
Petkov, Aleksandar	Messung der Schirmwirkung an KFZ-Hochvolt-Steckverbindern. Measurement of Screening Effectiveness at Automotive High-voltage Connectors.
Pham, Thanh Huy	Modellierung der Ausbreitungsmechanismen von Teilentladungssignalen in GIS. Modelling of PD Propagation Mechanisms in GIS.
Schäfer, Jonas	Vergleich von konventionellen zu statistischen Spannungsfallalgorithmen in NS-Netzen. Comparison of conventional to statistical voltage drop algorithms in low voltage grids.
Schmid, Steffen	Entwicklung eines Messstandes zur Untersuchung thermischer Fehler bei Elektroisolierten. Development of an experimental setup for the investigation of thermal faults in insulating liquids.
Vahidi, Farzaneh	Analyse von Ausfalldaten von Leistungstransformatoren. Analysis of failure data of power transformers.
Waible, Manuel	Einfluss des Leitungsabschlusses auf Funkstörgrößen. Influence of Line Termination on RF Interferences.
Wiest, Pascal	Möglichkeiten zur Netzstützung durch Batteriespeicher im MS-Netz. Possibilities for grid support with battery storage systems in medium voltage grids.
Wild, Manuel	Entwicklung und Aufbau eines Systems zur Übertragung von Raddrehzahlensignalen zur Verwendung bei EMV-Untersuchungen an Nutzfahrzeugen. Fiber Optic Signal Transmission System for Automotive Wheel Speed Signals to be used for EMC Testing of big Commercial Vehicles.

4. PROMOTIONEN

- **Electrostatic Discharge Performance of Passive Surface-Mount Components**

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. J. Schulze

Tag der mündlichen Prüfung:

03.05.2011

Whenever electronic devices feature a pluggable and conductive interface to wires, cables or other electronic devices, such connections potentially expose the internal circuitry of these devices to external disturbances. For this reason, the design engineer needs to take such disturbances into account when developing the interfaces and their circuits. Being prepared for such disturbances, however unlikely they may be, is essential for the durable and reliable function of electronic devices, for it otherwise may only take one of these rare incidents to damage or destroy them. This requirement is in particular self-evident for all automotive applications. Although the investigations presented here are focused on automotive electronics, the applicability of the results is of course not limited to such.

In this work the state of the art components commonly used for passive protection against electrostatic discharges (ESD) were thoroughly analysed regarding their behaviour during and changes in their characteristics after such discharges.

For this purpose, a completely new set of measurement instrumentation was designed and assembled to a semi-automatic ESD performance analysis system for surface mount technology (SMT) components.

The investigations revealed notable non-linear component behaviour during ESD according to the human body model (HBM) and lasting changes to the electrical small-signal characteristics of the components thereafter.

In case of the analysed thick-layer resistors, a drift of the resistance in dependence on the energy and number of the HBM impulses is found, along with a sparking effect that can occur beyond 4 kV for 0603 SMT packages.

For most of the multi-layer ceramic capacitors considered, a lasting drift of up to 25 % of the capacitance after HBM exposure and a rather notable saturation during these excessive voltage impulses is found.

Interestingly, most of the analysed capacitors remain functional with respect to small signals after low-energy HBM ESD breakdowns.

Similar considerations were conducted for multi-layer ferrite beads, which also show a detectable derating of up to 9 % and strong saturation during even low HBM ESD currents. Compared to the previously mentioned components, HBM driven breakdowns are not to be expected.

The usually biggest passive component of an electronic device, the printed circuit board (PCB), is also considered with respect to its ESD impulse conducting properties. To enable for simulative quantifications of voltage and current stress levels during HBM discharges, a formal procedure based on empirical formulae is provided that allows for the transfer of the distributed electrical characteristics of the conductive structures on and in multilayer PCBs to concentrated components. The resulting equivalent circuit can be used within fast time-domain circuit simulations.

Based on the findings concerning the static derating and non-linear dynamic behaviour of the lumped passive components mentioned above, respective simulation models are formulated and used alongside the equivalent circuits of distributed PCB structures to demonstrate a complete measurement-based modeling and transient simulation method for passive ESD protection circuits.

Finally, circuit simulations that employ all the found non-linear effects are compared to equivalent linear circuit simulations and show a drastically different, however more likely and realistic outcome. These modeling and simulation procedures are shown to be both practical and useful for ESD performance prediction and optimisation of a given passive circuit during design and post-failure analysis.

■ **Verhalten von passiven, oberflächenmontierbaren Bauteilen bei elektrostatischen Entladungen**

Dipl.-Ing. Franz Streibl

Elektronische Geräte mit leitfähigen Steckkontakten zu Kabeln, Kabelbäumen oder für elektronische Untermodule sind potentiell störbar durch über diese Steckkontakte einkoppelnde, externe Störgrößen. Aus diesem Grund müssen solche Störungen bereits zum Zeitpunkt der Geräteentwicklung von der Eingangsbeschaltung dieser Stecker auslegenden Ingenieur berücksichtigt werden.

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Elektronik dauerhaft und zuverlässig funktioniert und nicht bei dem entgegen aller Erwartungen doch auftretenden Störfall sofort beschädigt oder zerstört wird. Diese Anforderung an die Betriebssicherheit ist für alle Elektronik in automobilen Anwendungen von vornherein vorauszusetzen.

Obwohl die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen hauptsächlich an elektronischen Schaltkreisen für automobilen Anwendungen und den darin ein-

gesetzten Bauteilen durchgeführt wurden, sind die erzielten Ergebnisse nicht an diesen Anwendungskontext gebunden.

Konkret sind die für passive Schutzschaltungen gegen elektrostatische Entladungen (engl. electrostatic discharge, ESD) üblichen Bauteile eingehend auf ihr Verhalten während und Veränderungen ihrer Kennwerte nach solchen Entladungen untersucht worden.

Zu diesem Zweck wurden eigens hierfür entwickelte Messutensilen angefertigt und in einem Aufbau zur halbautomatischen Ermittlung des ESD-Verhaltens von oberflächenmontierbaren Bauelementen (engl. surface mount technology devices, SMT devices) zusammengeführt.

Die Untersuchung der Bauelemente brachte ein nicht vernachlässigbar nicht-lineares Verhalten während und eine dauerhafte Änderung der Kleinsignalkennwerte nach elektrostatischen Entladungen gemäß dem sogenannten menschlichen Körpermodell (engl. human body model, HBM) zu Tage.

Im Falle der untersuchten Dickschicht-Widerstände wurde neben einer von Energie und Anzahl der HBM-Impulse abhängigen Widerstandsdrift auch ein Funkeneffekt festgestellt, der bei der 0603 Bauform ab 4 kV einsetzen kann.

Für die meisten der im Folgenden untersuchten, keramischen Vielschichtkondensatoren wurde eine dauerhafte Drift des Kapazitätswerts um bis zu 25 % nach HBM-Beaufschlagung und eine deutliche Sättigung der effektiven Kapazität während solcher Überspannungsimpulse gefunden. Interessanterweise verbleiben die meisten der untersuchten Kondensatoren nach einem Isolationsversagen aufgrund energieärmerer HBM-ESD-Impulse in ihrer Funktion bei kleinen Signalen uneinträchtigt.

Ähnliche Untersuchungen wurden an Vielschicht-Ferritperlen durchgeführt, welche auch eine messbare Veränderung ihrer Induktivität um bis zu 9 % nach und starker Sättigung während bereits geringen HBM-Impulsströmen zeigen.

Das für gewöhnlich größte passive Bauelement einer elektronischen Baugruppe ist die Leiterplatte (engl. printed circuit board, PCB). Um simulative Abschätzungen der maximal zu erwartenden Spannungs- und Stromwerte zu ermöglichen, wird ein formales Vorgehen auf Basis von empirischen Formeln zur Überführung der elektrischen Streugrößen von gedruckten Strukturen auf und in mehrlagigen Leiterplatten in konzentrierte Schaltungselemente gezeigt. Die hieraus resultierenden Ersatzschaltungen können in schnellen Zeitbereichs-Schaltungssimulationen eingesetzt werden.

Auf Basis der Messungen zur statischen Degradation und des nichtlinearen, dynamischen Verhaltens der genannten passiven Bauelemente wurden Simulationsmodelle entworfen und nebst den Ersatzschaltungen aus den

konzentrierten Belägen der gedruckten Leiterbahnen in eine vollständige, transiente Simulationsmethode für passive ESD Schutzschaltungen überführt. Zuletzt werden Schaltungssimulationen unter Berücksichtigung aller gefundenen, nichtlinearen Effekte mit linearen Schaltungssimulationen verglichen. Erstere zeigen deutlich abweichende, wenn auch wahrscheinlichere und realistischere Ergebnisse.

Das gefundene Vorgehen zur Modellierung und Simulation eignet sich zur Vorhersage und Optimierung des ESD-Verhaltens einer vorgegebenen, passiven Schaltung während des Schaltungsentwurfs, aber auch bei der Fehlersuche.

■ **Modelle zur thermischen und mechanischen Überwachung von Leistungstransformatoren**

Rummiya Vilaithong, M. Sc.

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler, RWTH Aachen

Tag der mündlichen Prüfung: 01.07.2011

Leistungstransformatoren sind komplexe und damit kostspielige Betriebsmittel. Ein preisgünstiges Überwachungswerkzeug kann nur durch Fokussierung auf die wichtigsten Kennwerte des Transformators gewährleistet werden. Aktuelle statistische Untersuchungen an Leistungstransformatoren heben besonders die Wichtigkeit der Überwachung der Temperaturen in den Wicklungen, einschließlich Isolierung, sowie des Stufenschalters hervor. Demzufolge sind in der vorliegenden Arbeit verlässliche und preiswerte Möglichkeiten zur Online-Überwachung der Deckelöltemperaturen sowie der Stufenschalter untersucht worden.

Thermisches Modell zur Online-Überwachung der Deckelöltemperatur in Leistungstransformatoren

Gemäß dem internationalen Standard [IEC 60354, 1991] kann der Heißpunkt hingegen auch aus der Deckelöltemperatur (Temperatur im oberen Bereich des Transformatoröls) abgeschätzt werden. Die Deckelöltemperatur lässt sich unkompliziert oberhalb der Kühleinheiten messen. Unregelmäßigkeiten der Kühleinheiten können bei guter Modellierung der Deckelöltemperatur durch die Differenz zwischen modelliertem und gemessenem Temperaturwert erkannt werden. Die ausgesuchten physikalischen Modelle beruhen auf den internationalen Standards IEC60354 und IEEE Std. C57.91. Da einige Konstanten der Modelle von Herstellern nicht angegeben sind, werden diese anhand der Methode der kleinsten Quadrate abgeschätzt.

Seitdem künstliche neuronale Netzwerke in vielfältigen Einsatzgebieten verstärkt eingesetzt werden, existiert das Interesse, diese für die Modellierung der Deckel-

öltemperatur zu verwenden. In dieser Arbeit werden derartige numerische Modelle basierend auf einem künstlichen neuronalen Netzwerk untersucht. Verwendet werden Multilayer Feed-Forward und Recurrent Netzwerkstrukturen. Besonders erfolgreich waren die drei Backpropagation Algorithmen: Levenberg-Marquardt, Scaled Conjugate Gradient und Automated Bayesian Regularization. Die aufwendigeren Recurrent Netzwerkstrukturen wurden lediglich als One-Hidden-Layer konfiguriert.

Die Deckelöltemperatur wird anhand physikalischer und neuronaler Netzwerkmodelle für drei unterschiedliche Kühlungsarten (ONAN, ONAF und ODAF) berechnet. Die notwendigen Messdaten für die Untersuchung wurden freundlicherweise von der AREVA Energietechnik GmbH zur Verfügung gestellt und mit herkömmlichen Überwachungssystemen über längere Zeiträume aufgenommen.

Der besondere Vorteil der neuronalen Netzwerke gegenüber den physikalischen Modellen ist ihre rasche Anpassung an neue Betriebszustände der Kühleinheiten. Problematisch stellen sich für die Modellierung stark wechselnde Umgebungstemperaturen dar, wogegen veränderte Lastzustände nur geringfügig die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass durch die hohe Genauigkeit der Deckelöltemperaturberechnung mit neuronalen Netzwerken, Fehlfunktionen der Kühlanlage detektiert werden können und demzufolge neuronale Netzwerkmodelle für Online-Überwachungssysteme der Deckelöltemperatur gut geeignet sind.

Vibrations-Messungen zur Online-Überwachung von Stufenschaltern in Leistungstransformatoren

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird daher ein Vibrationsmesssystem für die Online-Zustandsüberwachung des Stufenschalterbetriebs beschrieben. Durch Vibrationsmessungen wird ein charakteristischer Zeitraum für den Schaltvorgang überprüft und als Kriterium für die Überwachung des ordnungsgemäßen Zustands des Stufenschalters verwendet. Der Ablauf der Hauptkontakte und Überschaltkontakte im Umschalter während des Schaltvorgangs werden untersucht. Die Implementierung eines Mikrocontrollers ermöglicht eine flexible Anpassung des Systems bei Änderungen der Messcharakteristik. Der Prozess ist unter statistischer Kontrolle, wie durch eine Kontrollkarte und die Shewhart Prozedur geprüft wird. Ferner wird aus Laborversuchen deutlich, dass bei fehlerhaften Zuständen, wenn sich beispielsweise Fremdkörper zwischen den Kontakten befinden oder bei fehlendem Kontakt, erheblich abweichende Vibrationssignale auftreten.

Die in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen belegen, dass die mittels Vibrationsanalyse gemessene charakteristische Zeit und ihre Standardabweichung als Überwachungsgrößen von Stufenschaltern geeignet sind. Die gesammelten

Erkenntnisse stellen eine gute Basis für die Umsetzung und Weiterentwicklung unter betrieblichen Bedingungen dar.

- **Models for Thermal and Mechanical Monitoring of Power Transformers**

Rummiya Vilaithong, M. Sc.

At present, for economic reasons, there is an increasing emphasis on keeping transformers in service for longer than in the past. A condition-based maintenance using an online monitoring and diagnostic system is one option to ensure reliability of the transformer operation. The key parameters for effectively monitoring equipment can be selected by failure statistics and estimated failure consequences. In this work, two key aspects of transformer condition monitoring are addressed in depth: thermal behaviour and behaviour of on-load tap changers.

In the first part of the work, transformer thermal behaviour is studied, focussing on top-oil temperatures. Through online comparison of a measured value of the top-oil temperature and its calculated value, some rapidly developing failures in power transformers such as malfunction of the cooling unit may be detected.

Predictions of top-oil temperature can be obtained by means of a mathematical model. Long-term investigations on some dynamic top-oil temperature models are presented for three different types of transformer units. The last-state top-oil temperature, load current, ambient temperature and the operating state of pumps and fans are applied as inputs of the top-oil temperature models. In the fundamental physical models presented, some constant parameters are required and can be estimated using a least-squares optimization technique. Multilayer Feed-forward and Recurrent neural network models are also proposed and investigated. The neural network models are trained with three different Backpropagation training algorithms: Levenberg-Marquardt, Scaled Conjugate Gradient and Automated Bayesian Regularization.

The effect of varying operating conditions of the cooling units and the non-steady-state behaviour of loading conditions, as well as ambient temperature are noted. Results show a sophisticated temperature prediction is possible using the neural network models that is generally more accurate than with the physical models. The results are sufficient to justify applying the neural network model in the online monitoring system.

In the second part of this work, an acoustic measuring system for online condition monitoring of the tap changer operation is developed. Transformers with on-load tap-changer (OLTC) are important elements in modern power systems since they allow

voltage to be maintained under load changes. Being a mechanical device that undergoes repeated operation, OLTCs have a high failure rate compared to other electricity distribution equipment. Failures of an OLTC may cause damage to other parts of the complete transformer unit. During the operation of an OLTC a series of mechanical and electrical events produce distinctive vibration and noise patterns. In principle, an analysis of these typical vibration signatures should reveal different aspects and phases of tap changer operation. The transition time interval during the tap change is expected to be constant as long as no fault appears.

In this work, the sequences of movable main contacts and transition contacts in the diverter switch during the transition phase are studied. Vibration signals through the tap change process are detected by a piezoelectric sensor coupled to an amplifier. The captured vibration signatures are analyzed. The tap change switching time interval is determined. This specific time interval is defined as a characteristic time of the tap change process. It is sent by means of an output current to an online monitoring system. Together with the statistical methods named control chart and Shewhart, the characteristic time is applied as a criterion of the tap changer monitoring. Results from on-site measurements show that the characteristic time under normal operation may be precisely obtained. Significantly, different vibration signals and different characteristic time during the tap change process under normal condition and fault conditions may also be seen. An acoustic monitoring system is thus suitable for detecting major defects in a tap changer.

In conclusion, both the top-oil temperature modelling and acoustic monitoring system for the tap changer have good potential to be part of a comprehensive condition monitoring system for power transformers.

■ **Bewertung der elektromagnetischen Verträglichkeit von Einbauorten für Steuergeräte in Kraftfahrzeugen mit Hilfe der Transferfunktion**

Dipl.-Ing. Michael Zerrer

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr. A. Enders, TU Braunschweig

Tag der mündlichen Prüfung:

05.12.2011

In Kraftfahrzeugen kommen heutzutage immer mehr elektronische Steuerkomponenten zum Einsatz, die eine Vielzahl an Funktionen übernehmen. Diese reichen von der Motorsteuerung bis hin zu Kommunikations- und Komfortfunktionen. Um ein störungsfreies Zusammenspiel dieser Komponenten im Fahrzeug sicherzustellen, kommt der EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) im Entwicklungsprozess neuer Fahrzeuge eine große Bedeutung zu.

Während die elektrische Vernetzung der Fahrzeuge weiter steigt, haben sich die Entwicklungszeiten für Neufahrzeuge so stark verkürzt, dass die Steuerkomponenten praktisch schon serienreif sein müssen, sobald der erste Fahrzeugprototyp verfügbar ist. Da Änderungen zu diesem Zeitpunkt sehr kostenintensiv sind, werden die elektrischen Komponenten im Vorfeld mit Ersatzmessverfahren auf ihre Störemission und Störempfindlichkeit getestet. Diese Verfahren werden im Labor – ohne das Vorhandensein einer Karosserie – durchgeführt. Die Schwierigkeit ist nun, Grenzwerte für die Labormessverfahren zu finden, die einerseits einen späteren EMV-sicheren Betrieb im Fahrzeug gewährleisten, andererseits aber auch nicht zu streng sind, was zu einer Überdimensionierung der Komponenten führen würde.

Neben den gesetzlichen Vorgaben und dem störungsfreien Betrieb der Komponenten untereinander stellen insbesondere bordeigene Empfangssysteme eine Herausforderung dar, da die zugehörigen Empfangsantennen prinzipbedingt empfindlich auf Störaussendungen aller Art reagieren. Neben den frequenzabhängigen Eigenschaften spielt der Einbauort der Komponente eine entscheidende Rolle für die Wahl des richtigen Grenzwertes. Um eine frühzeitige EMV-Bewertung von unterschiedlichen Einbauorten im Fahrzeug realisieren zu können, werden in dieser Arbeit Transferfunktionen an unterschiedlichen Fahrzeugen untersucht. Dazu kommen Fahrzeuge sowohl gleicher als auch unterschiedlicher Bauart zum Einsatz, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten baureihenabhängig bewerten zu können.

Die Art der Anregung wird dabei auf zwei unterschiedliche Arten realisiert. Zum einen werden bekannte Störsignale direkt an den Eingängen von Steuerkomponenten eingekoppelt und deren Ausbreitung zu den im Fahrzeug verbauten Antennen gemessen. Als weitere Messung wird das Fahrzeug von außen mit einem elektromagnetischen Feld bekannter Größe beaufschlagt und die Überkopplung auf bestimmte Kabelbaumabschnitte bestimmt. Die felderzeugende Antenne wird über einen Netzwerkanalysator angeregt, was eine sehr empfindliche Messung mit großem Dynamikumfang und kleinstmöglicher Störeinwirkung äußerer Felder ermöglicht.

Für die Einkopplung an den Eingängen von Steuerkomponenten kommen zwei unterschiedliche Injektionsarten zum Einsatz. Bei der direkten Einkopplung werden nur einzelne Adern angeregt, während bei der zweiten Methode mit einer Stromzange in Kabelbaumabschnitte über mehrere Adern eingekoppelt wird. Mittels Richtkoppler und Reflexionsmessungen wird der Impedanzfehlanpassung zwischen Einkoppelleitung und Fahrzeugkabelbaum Rechnung getragen, so dass nur die tatsächlich ins Fahrzeug eingekoppelte Leistung berücksichtigt wird.

Als Signalquelle für die Einkopplungen kommt neben einem Netzwerkanalysator auch ein eigens dafür entwickelter Störsimulator zum Einsatz. Dieser liefert eine definierte Störgröße und kann sowohl im Fahrzeug als auch im Labor verwendet werden. Dies erlaubt neben der qualitativen Beurteilung auch eine quantitative Aussage über die Zusammenhänge zwischen Labormessungen und Fahrzeugmessungen.

Spezielle Algorithmen und Mehrfachmessungen dienen zusätzlich der Sicherheit gegen ungewollte, externe Störeinflüsse. Per Software werden die Rohdaten dahingehend bearbeitet, dass neben einer Datenreduktion eine bessere Vergleichbarkeit und Darstellbarkeit erreicht wird. Dies wird mit verschiedenen, dafür entwickelten Programmen und Routinen in Matlab und Excel erreicht.

Aus den Messungen lassen sich einige Gesetzmäßigkeiten bezüglich geometrischer Eigenschaften für die Platzierung von Steuergeräten gewinnen. So zeigen Transferfunktionen von Einkoppelpunkten, die symmetrisch zur Längsachse der Fahrzeuge liegen, einen sehr ähnlichen Verlauf und können durch eine einheitliche Transferfunktion ersetzt werden. Auch Transferfunktionen nahe beieinanderliegender Einkoppelpunkte, wie mehrere Positionen an einem Multi-Pin-Stecker, zeigen einen gleichen Verlauf. Weiterhin geben die Messungen mit aktivem bzw. inaktivem Antennenverstärker Aufschluss über die maßgeblich wirksamen Koppelwege zum Empfangsgerät.

Die Messungen an Fahrzeugen unterschiedlichen Baureihen ergeben, dass sich Transferfunktionen von Messpunkten mit vergleichbaren Funktionen und Einkoppelorten um mehr als 30 dB unterscheiden, während analoge Messungen an Fahrzeugen der gleichen Baureihe oft nur Differenzen unter ± 5 dB aufweisen.

Auf diese Weise können Rückschlüsse von Vorgängermodellen auf deren Nachfolger innerhalb der gleichen Baureihe gezogen werden, die bereits sehr frühzeitig - ohne die Notwendigkeit eines Prototyps - angewendet werden können. Mit diesen Erkenntnissen können bereits in frühen Entwicklungsphasen unterschiedliche Einbauorte hinsichtlich ihrer EMV-Eigenschaften im jeweils interessierenden Frequenzbereich bewertet werden.

- **Electromagnetic Compatibility Assessment of Mounting Locations for Electronic Components in Vehicles via Transfer Functions**

Dipl.-Ing. Michael Zerrer

In modern motor vehicles, a lot of electric and electronic components for several control functions are used. These functions reach from motor management to functions of communications or comfort. To ensure an undisturbed, fail-free interaction, the EMC (electromagnetic compatibility) plays an important role, starting in the very early phases of the development process of new vehicles.

While the electrical interlinking of new vehicles is steadily increasing, the time for the development cycles has been shortened more and more. For this reason all electric components must be almost ready for series production when the first prototype of

the vehicle is available. Due to the fact, that changes at this time are very costly, alternative measurement methods, concerning the EMC-emission and susceptibility, are to be carried out before that state of time. These measurements must be performed in a laboratory – without a prototype of the subsequent vehicle. The difficulty thereby is to find the right limit values to ensure the later, EMC-safe operation of the components without using too severe limits, which would lead to oversized components, regarding their EMC-performance.

Besides the EMC-limits given by law and the undisturbed function of the components itself, the noise-free operation of all on-board reception systems must be ensured. Broadcasting services as well as the reception of other useful signals (such as mobile phone, GPS, vehicle-interval radar, etc.) are a special challenge, because of the sensitive reception levels of the vehicle's build-in antennas. Beyond frequency issues, the mounting location of the electric component plays an important role for defining the right EMC-limit values. To realise a possibility for an early assess of the EMC-Performance of different mounting places, this thesis investigates several transfer function measurements. These measurements are carried out on various vehicles of the same as well as of different production series to make an appraisal of the EMC-performance of varying mounting places.

The type of excitation for the measurements is realised in two different ways. On the one hand, well known disturbance signals are directly injected into connection jacks or part of the cable harness near electric components and the propagation to the vehicle's build-in antennas is measured. Secondly, the vehicle is illuminated with an electromagnetic field of known field strength from outside and the coupling to various parts of the cable harness is investigated. The field generating antenna is fed via a network analyser, which ensures a wide dynamic range and good susceptibility against other, non-defined external fields.

The direct injection of the disturbance signal into the connection jacks of the electric components is carried out in two different ways. The direct, galvanic injection offers a possibility to stimulate only a single wire of the cable harness, while the injection via coupling clamp injects into a part of the cable harness with several wires. By using a directional coupler and performing reflection measurements, the mismatching of the different impedances of the injection line and the vehicle's cable harness is observed, so that only the effective injected power is used for further calculations.

Beside a network analyser, a special build noise source is used to inject the signal into the vehicle. The output of this noise source is a well-defined, reproducible signal, which could be used for both, vehicle and laboratory injection. This allows a qualitative and quantitative assessment of the relationship between vehicle measurements and laboratory measurements.

In addition to this, special algorithms and repeated measurement rows eliminate the uncertainty of external disturbances. The raw data of the measurements is processed

through a software to get a better comparison, more display options and also a reduction of data. Several program routines, written in Matlab and Excel are used to realise this processing.

Some rules regarding geometrical characteristics for the placing of electric components could be figured out through this thesis. Injection points with symmetry to the longitudinal axis of the vehicle show for example a very similar shape of transfer functions. Furthermore, transfer functions of injection points in close proximity, such as different pins of a multi-pin-connector also show a good similarity and could be replaced by one uniform transfer function. In addition to this, the measurements with active versus inactive antenna amplifier give information about the significant coupling mechanism to the receiving system.

Measurements on vehicles of different type series show a huge deviation up to more than 30 dB, even though the injection location and its functionality are the same in the different vehicles. Analogue measurements on vehicles within the same type series show deviations of ± 5 dB and less.

This allows a very early assessment of coupling phenomena in a new vehicle - without the need of the prototype model - by using the transfer functions of its predecessor(s). With this knowledge, the EMC-performance of new model series could be appraised regarding the different assembly locations as well as the interesting frequency areas, and EMC disturbances and interferences can be minimised.

■ **Localization of Partial Discharges in Power Transformers**

Su Su Win, M. Sc.

Hauptberichter:

Dr. Wunna Swe

Mitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:

21.03.2011

an der Mandalay Technological University, Myanmar

■ **CFD Calibrated Thermal Network Modelling for Oil-Cooled Power Transformers**

Wei Wu, M. Sc.

Hauptberichter:

Prof. Dr. Zhongdong Wang

Mitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:

26.09.2011

an der University of Manchester

5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Hochspannungstechnik

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

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

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

RESEARCH ACTIVITIES

Our institute's main research topics are mainly related to the reliability, cost-efficiency and sustainability of electric power supply. Thus we deal with tasks from the field of high-voltage insulation performance and condition assessment but also with requirements which arise from the increasing use of renewable energies. A special emphasis of our research work is in the field of electromagnetic compatibility (EMC) of both power electric and electronic systems.

High Voltage Engineering

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

The *operation* of electric power networks above their initial dimensioning levels and longer than their estimated lifespan requires a detailed monitoring of the operating conditions to ensure a safe supply with electric power also in the future (life cycle management). For this task the diagnostic tools which are necessary for different apparatus are developed or improved (e. g. partial discharge measurement, frequency response analysis, moisture determination, dissolved gas analysis, vibration measurement, on-line monitoring). These tools can be used to predict the overload capacity and residual life time of a H.V. apparatus. On the other side service and maintenance strategies for H.V. equipment are developed (asset management).

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

Smart Power Grids / Intelligente Stromversorgungssysteme

In diesem Forschungsgebiet werden Methoden, Konzepte und Verfahren zur ganzheitlichen Analyse, Betriebsführung und Auslegung des zukünftigen dezentralen Stromversorgungssystems mit hohem Anteil erneuerbarer Energien (Smart Grids) entwickelt. Wesentliche Forschungsthemen sind dabei:

- Regelungsverfahren und Betriebsführungsmethoden für dezentrale regenerative Erzeuger, stationäre Speicher, Elektrofahrzeuge und steuerbare Lasten
- Konzepte für flexible, dezentrale Netzarchitekturen und Verfahren für deren optimierte Auslegung
- Regelungsverfahren und Betriebsführungsmethoden (inkl. der Zustands-schätzung) für den Betrieb dezentraler Stromversorgungssysteme
- Methoden zur Komplexitätsreduktion von Simulations-, Optimierungs- und Betriebsverfahren bei interdisziplinärer, sparten- und spannungsebenen-übergreifender Betrachtung

Elektromagnetische Verträglichkeit

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren ein wichtiger Schwerpunkt. Zunächst standen Erzeugung und Messung elektromagnetischer Feldimpulse mit extrem hohen Amplituden und sehr kurzen Anstiegszeiten im Fokus, wie sie zur NEMP- oder LEMP-Nachbildung und für die Simulation von Trennerschaltungen in SF6-Anlagen nötig sind.

Die aktuell laufenden Forschungsarbeiten sind im Bereich der Automobil-EMV angesiedelt. Mittels Korrelationsbetrachtungen zwischen den im Automobilbereich üblichen Komponentenmessverfahren und den EMV-Messungen an Gesamtfahrzeugen wird untersucht, wie durch Messungen an einzelnen Fahrzeugkomponenten (z. B. Steuergeräten) auf das spätere Verhalten dieser Komponenten im Fahrzeug geschlossen werden kann. Eine weitere Arbeit befasst sich mit der EMV von Fahrzeugbordnetzen. Die zahlreichen elektrischen Aggregate und dabei insbesondere elektrische Antriebsstränge können neuartige impulsförmige Störgrößen aussenden, die von den bisherigen EMV-Prüfverfahren nicht abgedeckt werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Störgrößen zu erfassen und zu klassifizieren und neue Messtechnik zu entwickeln, mit deren Hilfe diese sporadisch auftretenden Störgrößen im Fahrzeug sicher und ohne wesentliche Störbeeinflussung aufgezeichnet werden können.

Weitere Aktivitäten laufen seit Jahrzehnten auf dem Gebiet der potentialfreien Messung elektrischer und magnetischer Felder. In jüngster Zeit wurden auch hier Neuentwicklungen gemacht, wobei der Einsatz neuartiger VCSEL-Laserdioden mit sehr geringem Stromverbrauch im Vordergrund stand.

Smart Power Grids

In this research area new methods, concepts and procedures are developed for the analysis, operation and design of the future decentralized power system with large shares of renewable energies (smart grids). Most relevant topics are:

- Control and operation approaches for distributed generators, storage systems, electrical vehicles and controllable loads
- Concepts for flexible decentralized power system architectures and approaches for their optimized design
- Control and operation approaches (incl. state estimation) for decentralized power systems
- Methods for reduction of complexity in simulation, optimization and operation approaches with regard to interdisciplinary analysis across voltage levels and energy sectors.

Electromagnetic Compatibility

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

Recent EMC research works concentrate on the automotive EMC. One topic is the correlation between full vehicle and single component EMC emission measurement procedures. The main aim is to estimate the emission behaviour of a single component in the car which is not yet available in an early state of its development. Another topic deals with the EMC of automotive electric power networks. Due to novel high power electric devices, especially in electric vehicles, it is possible that new impulsive disturbance occur on the electric power supply of the vehicle. These impulsive disturbances may cause new disturbing potential which isn't covered by the actual EMC susceptibility standards. The goal of this work is to detect and classify these new impulsive disturbances and also to develop new measurement tools for a convenient recording of these sporadically impulses in the automotive power network with as less coupling disturbances as possible.

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

5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

■ **Vibrationen von Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Michael Beltle

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

Die Nutzung der Vibrationen von Leistungstransformatoren als Messgröße zur Betriebsmittelüberwachung wird im Folgenden anhand eines speziellen Betriebsfalls vorgestellt. Im Rahmen dieser Forschungstätigkeit wird die Charakterisierbarkeit und Quantifizierbarkeit des Vibrationsverhaltens von Leistungstransformatoren betrachtet. Es wird untersucht, welche Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Belastungsszenarien von Leistungstransformatoren und deren Vibrationen bestehen.

Vibrationen werden durch spannungsabhängige und lastabhängige Effekte verursacht, welche die mechanischen Strukturen zu Schwingungen anregen. Die spannungsabhängige Magnetostriktion führt zu Schwingungen der Kernbleche: Die Weiß'schen Bezirke im Metall richten sich entlang des zeitlich veränderlichen magnetischen Hauptflusses aus. Die Ausrichtung führt zu einer mechanischen Längenänderung der Bleche und damit zu Schwingungen, wobei die mechanische Grundschwingung der doppelten elektrischen Netzfrequenz entspricht. Unter Last überlagern stromabhängige Effekte die Magnetostriktion.

Im Folgenden wird betrachtet, wie sich ein Gleichstromanteil im Wicklungsstrom auf das Vibrationsverhalten auswirkt. Der Effekt kann beispielsweise bei elektrischen Netzen mit langen Freileitungen durch geomagnetisch induzierte Ströme (engl. Geomagnetically Induced Currents, GIC) auftreten.

Der Gleichstrom erzeugt über die Wicklungen einen zusätzlichen, konstanten magnetischen Fluss. Diagnostisch ist die Überwachung der Gleichstromeffekte von Interesse, da sich durch die Verschiebung der Hysteresekurve auch die Verluste im Kern ändern, was zu einer erhöhten Materialbelastung führt. Fig. 1 zeigt die symmetrische Hysteresekurve in grau und eine Halbwellensättigung bedingt durch einen Gleichstromanteil in den Wicklungen in schwarz. Normalerweise wird ein Transformator nur im linearen Bereich der Magnetisierungskennlinie betrieben (graue Kurve), die Sättigung wird nicht erreicht. Durch einen ausreichenden Gleichstromanteil kann eine unsymmetrische Sättigung während einer Halbperiode auftreten. In Sättigung steigen die Wirkverluste der Ummagnetisierung überproportional an, was zu einer entspre-

■ **Vibrations of power transformers**

Dipl.-Ing. Michael Beltle

Service reliability in electrical power networks is of crucial importance. Failures can cause considerable damage to the economy. Considering the upcoming changes e.g. in the German power grid with increasing renewable energy sources also demands on grid resources, especially power transformers change. Distributed generation combined with power fluctuations of renewable sources cause higher stress levels for power transformers. A new approach of evaluation using transformer's vibrations is presented in the following.

Current research activity is trying to quantify and characterize the vibration behaviour of power transformers. Key issue of this investigation is the dependency between different operating conditions and the consequential vibrations of transformers.

Vibrations are caused by voltage-dependent and load-dependent effects, which lead to oscillations in mechanical structures of power transformers. The voltage-dependent magnetostriction leads to oscillations of the laminated sheets. The Weiss Domains in the metal align themselves along the time-varying magnetic main flux. This leads to a mechanical change of the length of laminated sheets and thus to vibrations. An electrical period leads to two maxima of the material expansion. A core typically oscillates with double electric frequency and harmonics. In load operation, current-related effects superimpose magnetostriction.

The presented work determines the influence of a superimposed direct current (DC) on transformer vibrations. For instance, the effect can occur in electrical grids with long overhead lines by geomagnetically induced currents (GIC).

If direct current is superimposed to the alternating current of a transformer additional constant magnetic flux is generated. For diagnosis purposes monitoring of the resulting effects is of interest, because the subsequent changes of the hysteresis loop lead to changes of core losses and therefore higher stress levels of the core. Fig. 1 shows symmetrical hysteresis in grey and half wave saturation in black caused by a superimposition of direct current. Normally, transformers operate within the linear range of the hysteresis loop (see grey curve). Saturation flux is not reached. By a sufficient injection of direct current asymmetrical saturation in one half wave can occur. During saturation the active losses of the core rise. Consequential also core temperature rises. Thus damages of the active part can occur, leading to a higher operational risk.

chenden Temperaturerhöhung im Kern führt. Dadurch kann das Aktivteil geschädigt werden, wodurch sich das Betriebsrisiko des Transformators erhöhen kann.

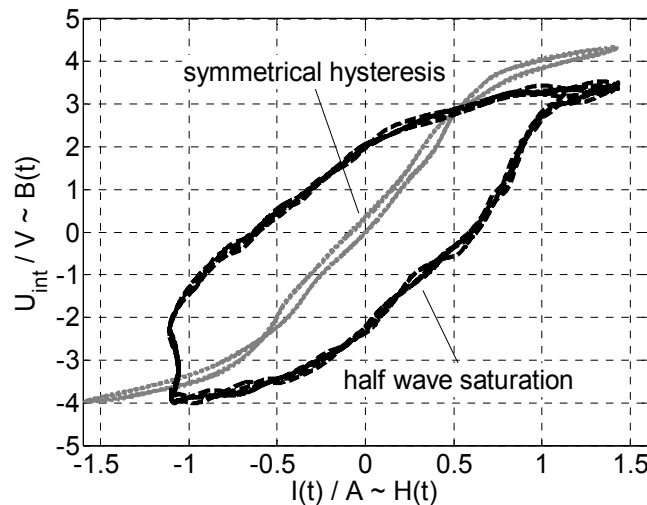


Fig. 1: Hysteresekurve einer symmetrischen Erregung mit linearem Bereich und symmetrischer Sättigung(grau).
 Unsymmetrische Form bedingt durch Gleichstromanteil (schwarz)
 Hysteresis loop of symmetrical excitation with linear area and symmetrical saturation (grey). Asymmetrical shape due to a superimposed DC component (black)

Die unsymmetrische Sättigung führt zu einer Änderung des Vibrationsverhaltens des Transformators, welches als Indikator für die Präsenz eines Gleichstromanteils verwendet werden kann. Der Sättigungseffekt tritt pro Periode nur in einem Maximum des Stroms auf. In Sättigung sind die Kernbleche vollständig magnetisiert. Dadurch wird die Permeabilität μ_r des Materials eins. Die Hauptinduktivität der Wicklung sinkt rapide, wodurch der Gesamtstrom durch die Wicklung steigt, da er im Wesentlichen nur noch durch den ohmschen Wicklungswiderstand begrenzt wird. In der zweiten Halbwelle tritt dieser Effekt nicht auf.

In Hinblick auf die Magnetostriktion bedeutet dies, dass sich die Grundfrequenz der mechanischen Schwingung halbiert. Deswegen wird das Vibrationsspektrum eines Transformators bei unsymmetrischer Sättigung mit einer zusätzlichen 50-Hz-Komponente überlagert. Fig. 2 illustriert diesen Effekt anhand des Frequenzspektrums einer Vibrationsmessung eines 30 kVA YNyn6-Verteiltransformators mit (Fig. 2a) und ohne (Fig. 2b) Gleichstromüberlagerung auf allen drei Phasen. Die Vibrationen können direkt auf dem geerdeten Kern oder auf der Kesselwand mit Beschleunigungssensoren gemessen werden.

Abhängig von der Auslegung des Kerns reicht oft ein kleiner Gleichstromanteil (wenige Prozent des Nennstroms), um eine unsymmetrische Hysteresekurve zu erzeugen. Der Effekt lässt sich mit der Vibrationsmessung einfach diagnostizieren. Betroffene Betriebsmittel können hinsichtlich ihres Betriebsrisikos überwacht werden und ggf. können weitere Maßnahmen zur Erhaltung der Versorgungssicherheit eingeleitet werden.

Unsymmetrical saturation causes changes of the vibration behaviour of the considered transformer. Therefore vibrations can be used as an indicator for the appearance of hysteresis changes and thus for detection of a superimposed direct currents in the transformer. Fig. 2 shows the frequency spectrum without and with superimposed direct current at a 30 kVA YNyn6 distribution transformer where direct current is applied to all three phases.

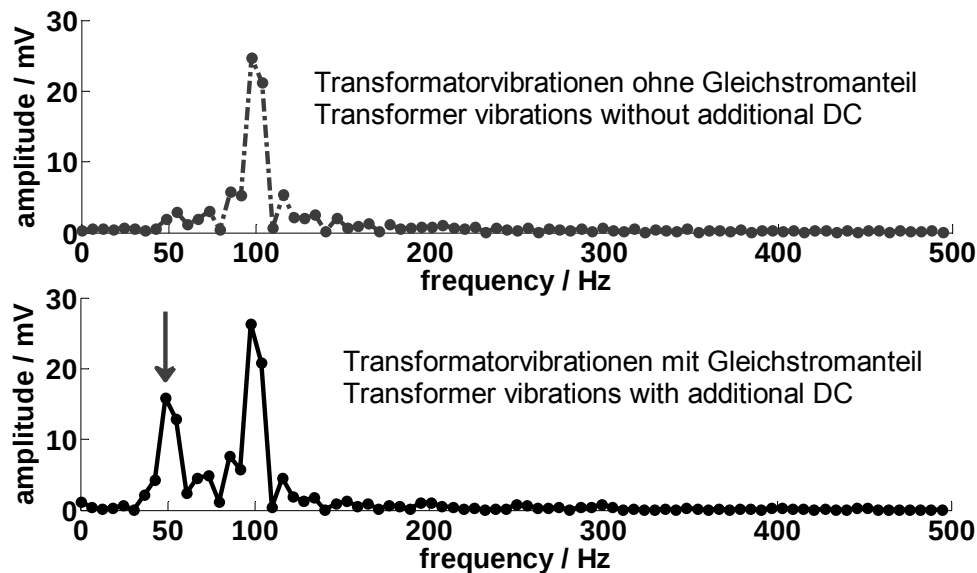


Fig. 2: Frequenzspektrum der Kernvibrationen, gemessen mit einem Beschleunigungssensor ohne (oben) und mit (unten) überlagertem Gleichstrom auf allen Phasen
 Frequency spectrum of core vibrations measured with an accelerometer without (upper graph) and with (lower graph) superimposed direct current

Vibrations can be measured directly at the core or on the outside tank wall using accelerometer sensors. Measurements at both positions show the effect. With half wave saturation the vibration pattern is superimposed with a 50 Hz component.

Saturation occurs at the maximum of the alternating current. During saturation the core plates are entirely magnetised, meaning all Weiss Domains are aligned along the external magnetic field. The susceptibility becomes zero and therefore μ_r converges to one. In the electrical equivalent circuit this means a significant decrease of the main inductivity and hence an increase of the alternating current into the transformer. During the second half wave of the current this effect does not occur. Therefore the basic frequency of the magnetostriction is cut in half leading to an additional 50 Hz component in the vibrations spectrum.

Depending on the core design a small direct current (only few percents of load current) is sufficient to create half wave saturation effects. Hence the operational risk might be increased. The effect is detectable easily using vibration measurement. Operating risks of affected equipment can be monitored and if necessary further measures can be taken to ensure the security of energy supplies.

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

Dipl.-Ing. Simon Burow

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

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

Eine Dämpfung dieser Überspannungen soll mit einfachen Möglichkeiten, die die Zuverlässigkeit einer GIS nicht verringern, erreicht werden. Dazu werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Mit dem Einsatz von Ferritringen, die auf dem Innenleiter der GIS angeordnet werden (Fig. 1), ließ sich keine Dämpfung der VFTs erzielen. Das Ferritmaterial gerät bei Strömen von über 10 kA in Sättigung und verliert dadurch seine dämpfenden Eigenschaften.

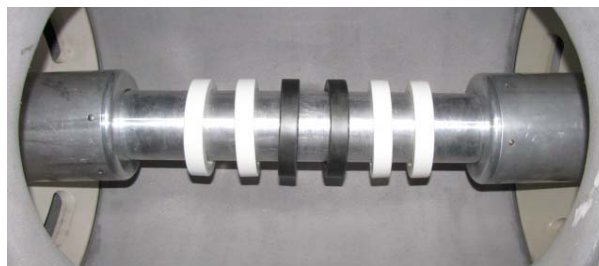


Fig. 1: Versuchsanordnung der Ferritringe
Test arrangement of ferrit rings

Ein zweiter Ansatz ist ein abgestimmter Hohlraum innerhalb der GIS, der durch die VFT zum Schwingen angeregt wird. Dabei soll den VFT Energie entzogen und somit eine Dämpfung erzielt werden. Fig. 2 zeigt einen Versuchsaufbau, an dem die Eigenschaften eines Hohlraums untersucht werden können. Nachdem erste Versuche vielversprechend ausfielen, wird dieser Ansatz neben weiteren vielversprechenden Möglichkeiten näher untersucht.

■ **Development of conceptions to damp „Very Fast Transient Overvoltages“ (VFTO) in Gas Insulated Substations (GIS)**

Dipl.-Ing. Simon Burow

Gas insulated substations are widely spread in energy distribution systems. Less required space, high reliability and low maintenance effort are some of the advantages of GIS. These properties make them not only suitable for special applications. During the last years GIS with a rated voltage up to more than 1000 kV were engineered.

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

With simple methods and without a loss of reliability a decline of these overvoltages should be achieved. Therefore different options are persecuted. The application of ferrite rings, which are arranged on the inner conductor of GIS (Fig. 1), yields to no damping effect. Current of more than 10 kA cause a deep saturation of the ferrite material. Thereby the damping characteristic of the ferrite rings get lost.



Fig. 2: Versuchsaufbau mit Hohlraumresonator in der GIS
Test setup with cavity in GIS

A second approach uses a cavity in the GIS. VFTO, which are traveling through the cavity, cause electro magnetic resonances in the cavity. In this way the energy of the VFTOs gets dissipated. Fig. 2 shows a test setup in the labitory which is used to investigate the characteristics of the cavity. The outcome of first tests with this resonator is slightly positive. So a further investigation of resonators and other promising approaches is going on.

Erkennung von Aktivteilbeschädigungen bei Großtransformatoren mit Hilfe von Transferfunktionsmessungen (FRA)

Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

Gegenstand dieser Forschungstätigkeit sind Untersuchungen über die Charakterisierbarkeit und objektive Quantifizierung von Veränderungen frequenzabhängiger Übertragungsfunktionen bei Leistungstransformatoren in Bezug auf verschiedene Beschädigungsarten des Aktivteils.

Frequency Response Analysis (FRA) als Diagnosemethode

Das elektrische Übertragungsverhalten von Leistungstransformatoren im Frequenzbereich bis 2 MHz wird durch die kapazitiven und induktiven Kopplungen zwischen Wicklungen, Kern und Kessel bestimmt. Die Übertragungsfunktion $\underline{TF}(f)$ ist eine gemessene Zustandsgröße und beschreibt das elektrische Übertragungsverhalten eines Transformators an seinen Anschlussklemmen nach Betrag und Phase in Abhängigkeit von der Frequenz. Das Übertragungsverhalten ist durch eine Vielzahl charakteristischer Resonanzen gekennzeichnet, die unmittelbar durch die Streukapazitäten und -induktivitäten, welche sich aus der Geometrie und Anordnung von Aktivteil und Kessel ergeben, bestimmt sind.

Die Übertragungsfunktion $\underline{TF}(f)$ als Zustandsgröße bildet diese geometrischen Gegebenheiten gleich einem Fingerabdruck ab. Fig. 1 zeigt den typischen Verlauf des Betrags einer solchen Übertragungsfunktion eines Transformators über der Frequenz.

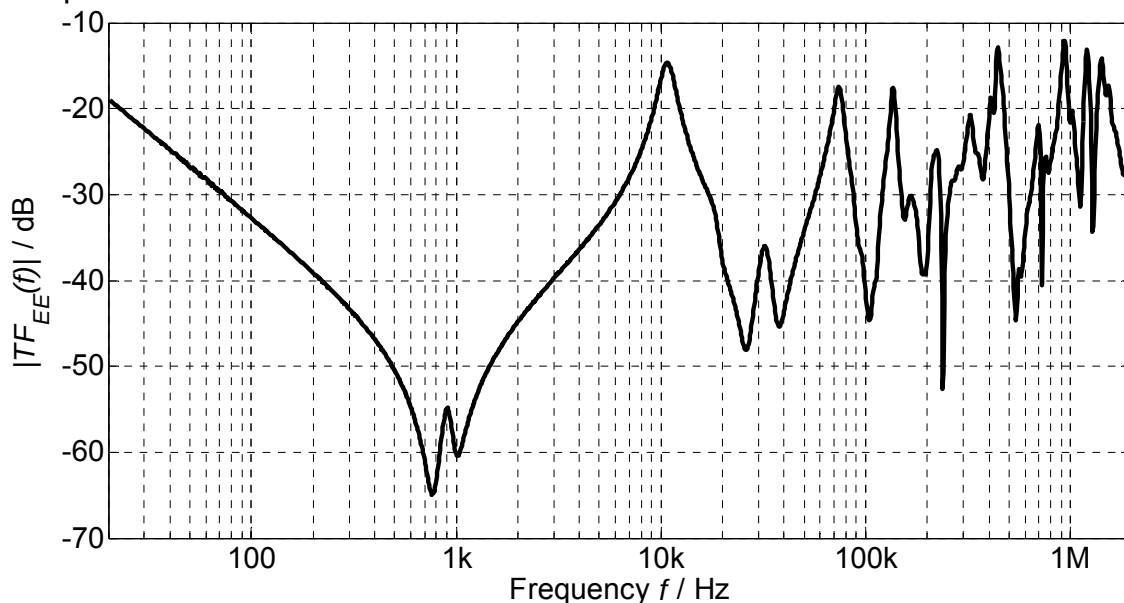


Fig. 1: Gemessene Transferfunktion eines Leistungstransformators (200 MVA 110/65 kV)

Measured end-to-end transfer function of 200 MVA 110/65 kV transformer

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

Dipl.-Ing. Maximilian Heindl

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

Frequency Response Analysis (FRA) as a diagnostic method

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



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

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

Verändern sich Abstände, d.h. die Geometrie des Aktivteils – und damit die Streukapazitäten und -induktivitäten – im Innern des Transformators, so hat dies unmittelbaren Einfluss auf das Resonanzverhalten. Die Folge sind Veränderungen der frequenzabhängigen Wicklungsimpedanz und damit der Übertragungsfunktionen des Transformators.

Untersuchungen in der Vergangenheit weisen der FRA als Diagnosemethode ein hohes Maß an Sensitivität aus, um geometrische und elektrische Veränderungen am Aktivteil eines Leistungstransformators zu detektieren. Beschädigungen sind oftmals Folge elektrischer Fehler wie Kurzschlüsse und können je nach Schwere den weiteren Betrieb des Trafos verbieten, sie erhöhen mindestens jedoch das Ausfallrisiko im weiteren Betrieb. Beispielhaft für einen Wicklungsschaden zeigt Fig. 2 den durch einen Kurzschluss in einem 110 kV-Netz verursachten Schaden an Phase U eines 220/110-kV-Transformators. Fig. 3 zeigt exemplarisch den Messaufbau zur Ermittlung einer Übertragungsfunktion an einem Leistungstransformator.

Bisher fehlen objektive Kriterien zum Vergleich und zur Beurteilung von Transferfunktionsmessungen. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Interpretation von Veränderungen bei Übertragungsfunktionen in Verbindung mit verschiedenen Fehlerarten. Bekannte Fehlerarten wie Deformationen wirken sich in Form von Verschiebung, Erzeugung oder Verschwinden von Resonanzstellen in einer Übertragungsfunktion aus. Um derartige Zusammenhänge aufzuklären, können bestimmte mechanische Fehler simuliert und die Veränderungen in der Übertragungsfunktion analysiert werden. Daraus können Regeln abgeleitet werden, die dabei helfen, zwischen unzulässigen und zulässigen Veränderungen der Übertragungsfunktion zu unterscheiden. Fig. 4 zeigt das 3D-Modell einer Transformatorwicklung mit nachgebildeter radialer Deformation.

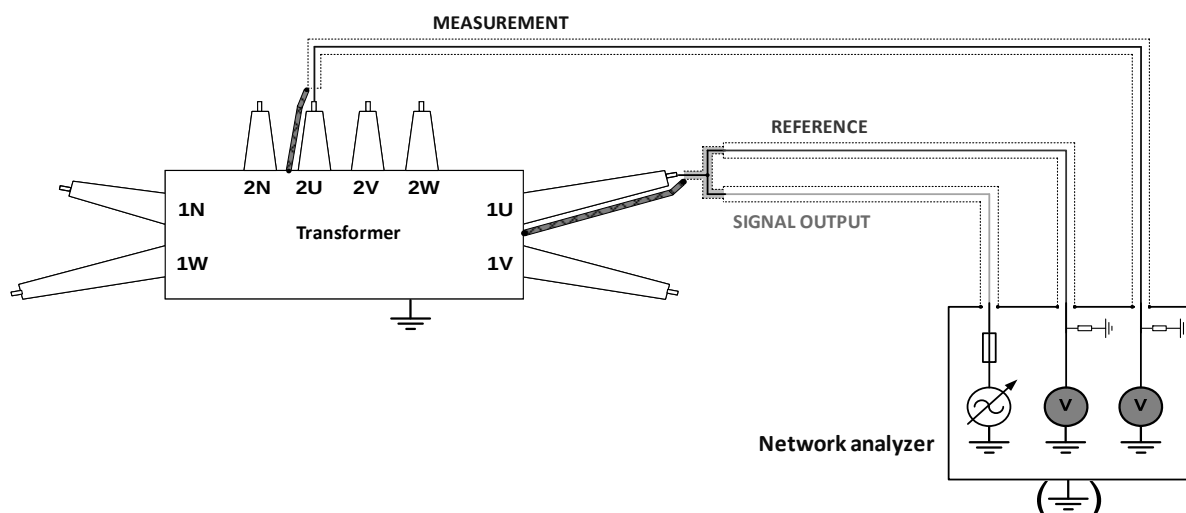


Fig. 3: Aufbau zur Messung der Übertragungsfunktion der kapazitiven Kopplung zwischen Ober- und Unterspannungsseite (sog. übertragene Spannung)
Setup for measurement of capacitive inter-winding coupling between primary and secondary voltage side

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

Fig. 2 shows a winding damage on Phase U of a 220/110 kV power transformer caused by a short circuit within the 110 kV grid. An exemplary measurement setup is shown in Fig 3. Until now, objective criteria for comparison and assessment of transfer function measurements are missing. Emphasis of this research work is the interpretation of transfer functions changes in relation to different failure types.

Known damage types, e.g. deformations, have an effect on the transfer functions like shifting, creating or disappearing of resonances. For further investigations on the relationship between physical (mechanical) changes of the active part and corresponding changes of the transfer function, certain damage types can be modeled into winding geometries. 3D simulations of the electro-magnetic field reveal relationships of how the transfer function is affected by such changes of the geometry. As an outcome, rules can be established which may allow to distinguish between acceptable and non-acceptable changes of the transfer function. Fig. 4 shows a 3D model of a transformer winding with reproduced (artificial) deformation.

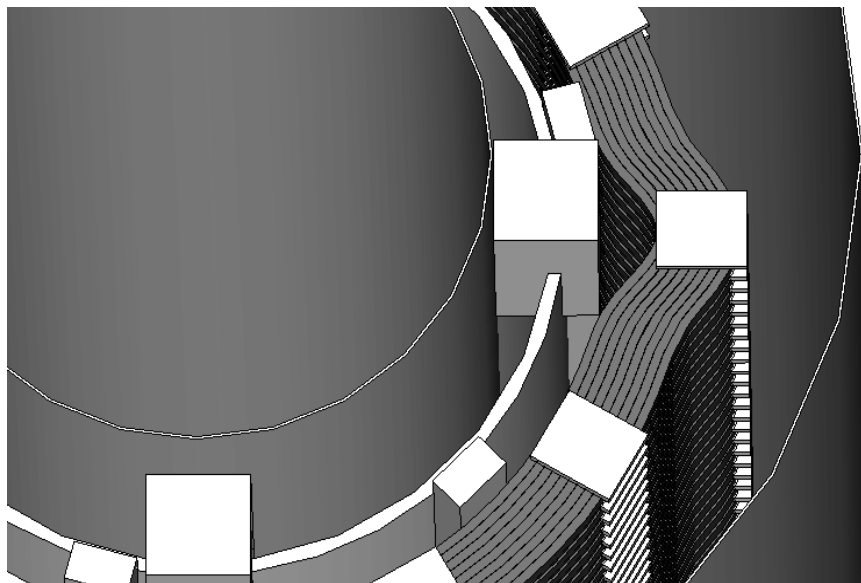


Fig. 4: Simulation einer radialen Wicklungsdeformation mit CST-Studio
Simulation of radial deformation (buckling) of transformer winding using
CST Studio

■ **Physikalisch-chemische Charakterisierung alternativer Isoliersysteme und Diagnose estergefüllter Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Die Forschung an alternativen Isoliersystemen für Transformatoren wurde im vergangenen Jahr weiter vorangetrieben. Diese Systeme bestehen in diesem Fall aus umweltfreundlichen Ölen als Ersatz für das klassisch verwendete Mineralöl und aus Nomex®, eine synthetische Aramidfaser, das die zellulosebasierte Feststoffisolation ergänzen oder gar substituieren kann.

Ein Vorteil ist die hohe Temperaturbelastbarkeit, die bei herkömmlichen Isoliersystemen ganz klar durch Sicherheitsbedenken und überproportionalen Lebensdauerverlust des Betriebsmittels schwer zu realisieren ist. Es wurden viele Aspekte, beginnend bei den **physikalischen Eigenschaften** der Materialien, über ihr **Betriebsverhalten** und letztendlich die **Diagnose** alternativer Isoliersysteme in zahlreichen Studien- und Diplomarbeiten beleuchtet.

Bei den physikalischen Eigenschaften wurden unter anderem das Wasseraufnahmevermögen und die Gaslöslichkeit in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Öle bestimmt. Die natürlichen und besonders die synthetischen Ester lösen aufgrund ihrer Molekularstruktur bei Raumtemperatur das 20- bis 40-fache an Wasser als der Durchschnitt der Mineralöle. Bei der reinen Gaslöslichkeit von unpolaren inerten Gasen tritt dieser Effekt überhaupt nicht auf. Sie befindet sich in ähnlichen Regionen. Vor allem die temperaturabhängige Änderung dieser Gaslöslichkeit ist für alle Öle gleich, falls die thermischen Expansionskoeffizienten vergleichbar sind. Für Feststoffe wurden mit Hilfe einer Klimakammer Wasserabsorptions-Isothermen von Nomex® Papier und Pressboard ermittelt. Mit den Sättigungskurven der Öle lassen sich diese zu Feuchtigkeits-Gleichgewichtsdiagrammen nach dem Modell von Oommen oder Fabre-Pichon kombinieren. Diese Diagramme dienen dem indirekten Abschätzen der Feuchtigkeit der normalerweise nicht erreichbaren Feststoffisolation über die Ölfeuchtigkeit. Anzumerken ist, dass ein solches Diagramm nur für eine Stoffkombination gültig sein kann. Es bot sich an, die Stoffcharakteristik analytisch in einem mathematischen Modell zu beschreiben, so dass es mit einer in Matlab geschriebenen Software möglich ist, neue Diagramme automatisch zu generieren. Die Richtigkeit dieser Diagramme wurde experimentell überprüft und der theoretische Fehler, bedingt durch sich verschleppende Messungenauigkeiten, quantifiziert.

Ein weiterer Punkt war die Untersuchung des Falls, dass ein alter Transformator mit natürlichen Estern neu befüllt wird (Retrofill). Es wird sich ein Gemisch aus altem und neuem Öl bilden. Verschiedene solche Gemische wurden auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Positiv ist, dass es keinen Anhaltspunkt für eine allgemeine Verschlechterung gibt. Es wird gezeigt, dass sich eine rein physikalische Mischung einstellt,

- **Physico-chemical characterization of alternative insulating systems and diagnosis of ester filled power transformers**

Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

During the last year research activity has been continued in the area of alternative insulating systems for power transformers. These systems consist in this case of environmentally friendly dielectric liquids as alternative to the classically used mineral oil. For solid insulation Nomex®, a synthetic aramid fibre, can complement or even substitute the cellulose based insulating material.

An advantage is the high temperature resilience, which cannot be realized easily with the classical insulation system due to safety risks and disproportionate high lifetime loss of equipment. Many aspects starting with the materials' **physical properties**, their **in-service behaviour** and finally **diagnostics** of these alternative insulating systems have been examined in many bachelor and master theses.

The investigated physical properties were among others the water and gas solubility depending on temperature for various oils. Natural and especially synthetic esters can dissolve 20 to 40 times more water than typical mineral oils due to their molecular structure. For gas solubility of non-polar and inert gases this effect doesn't happen at all. The liquids can dissolve gas volumes in a similar range. Especially the temperature dependant variation of this solubility is the same for all oils, if the thermal expansion coefficient is comparable. For solid dielectric material water absorption isotherms have been determined for Nomex® paper and pressboard. Together with the oil saturation curves it is possible to combine these to moisture equilibrium diagrams after T.V. Oommen or Fabre-Pichon. These charts help to estimate the moisture content of solid insulation which normally isn't accessible from oil analyses. It has to be noted, that such a diagram is only valid for one material combination. As it was possible to describe the materials' behaviour in a mathematical model, new charts can be automatically generated with the help of a specially developed Matlab software. The correctness of these diagrams has been experimentally validated and a theoretical error band for these curves was determined.

Another point was the investigation of the consequences after retrofilling an old transformer with natural ester fluid. In this case a mixture of old and new oil is formed. Various mixtures have been checked for their properties and dielectric performance. There is no evidence for any impairment. It is shown that a purely physical mixture forms and the resulting characteristics are proportional to the amount of the mixed substances (e.g. density, conductivity or breakdown voltage). At no point, even after ageing experiments, a phase separation occurs, which could be theoretically critical, as the oils don't have the same permittivity. This can be shown very well with the integral property "breakdown voltage". For the measurement of

wobei sich die Eigenschaften proportional dem Stoffmengenanteil ergeben (z. B. Dichte, Leitfähigkeit, Durchschlagsspannung). Es kommt zu keiner Zeit, auch nach Alterungsexperimenten, zu einer Phasentrennung, die aufgrund der verschiedenen Permittivitäten der Öle theoretisch kritisch werden könnte. Dies lässt sich mit der integralen Zustandsgröße „Durchschlagsspannung“ als Indikator sehr gut zeigen. Bei der Messung der Durchschlagsspannung nach Norm wird klar, dass für die höher viskosen Fluide die Vorbereitungs- und Messvorschriften angepasst werden müssen.

Ebenfalls untersucht wurde die elektrostatische Aufladung des fließenden Öls, die aufgrund Stokes'scher Reibung und Reibung an den Grenzflächen zur Ladungsgenerierung und Ladungstrennung und damit zu Potentialveränderungen innerhalb des Isoliersystems führt. Dieses Phänomen begrenzt die Strömungsgeschwindigkeit und somit die Kühlleistung. Um vergleichende Aussagen zwischen Mineralöl und Pflanzenölen treffen zu können, wurde ein sogenannter Mini-Static-Tester aufgebaut, mit dem man die elektrostatische Aufladungstendenz in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit und Temperatur (Einheit pC/ml Öl) bestimmen kann. Ein natürlicher Ester hatte durchweg 30-fach höhere Werte als Mineralöl. Da das verwendete Prüfverfahren keine Übertragung auf die Realität erlaubt, ist es sinnvoll, weitere Untersuchungen mit echten Kanalmodellen und potentialfreien Messungen, z.B. mittels des elektro-optischen Kerr-Effekts, durchzuführen, um Empfehlungen für die Auslegung der Transformatorkühlung geben zu können.

Im Bereich der Diagnostik wird an die Vorarbeiten der vorherigen Jahre angeknüpft, in denen die Gas-in-Öl-Analyse für die alternativen Öle überprüft und gegebenenfalls angepasst wird. Elektrische Überschlüsse wurden in weiteren Varianten untersucht und kommen zum Ergebnis, dass diese Fehler ohne Anpassung der DGA-Interpretationsverfahren detektierbar sind. Neu sind die Teilentladungsuntersuchungen, die ebenfalls die gleichen Spaltgase wie in Mineralöl hervorrufen. Die Gaskonzentrationen bei extrem inhomogenen und starken elektrischen Feldern sind bei den Estern wesentlich höher als bei Mineralölen, da die Teilentladungsaktivität höher ist. Für thermische Fehler bis zu 700°C mussten die DGA-Interpretationsverfahren angepasst werden, da die thermischen Zersetzungsmechanismen der natürlichen Ester andere sind als die der reinen Kohlenwasserstoffe. Einen Einfluss auf die Gas-in-Öl-Analyse hat das sogenannte Stray Gassing (Zufallsgasen). Es wurde festgestellt, dass bei 60-70°C Öltemperatur bei natürlichen Estern dieses erwartete Phänomen auftritt und die Menge an Wasserstoff so groß ist, dass fälschlicherweise Teilentladungen diagnostiziert werden. Dies könnte die Maßnahme erfordern, dass gewisse Gaskonzentrationen, abhängig von der Last des Transformators, erst überschritten werden müssen, um eine verlässliche Gasanalyse durchführen zu können.

breakdown voltage according to existing standards, it could be shown that for fluids with higher viscosity the preparation and measurement procedure should be adjusted to get correct values.

Also the flow electrification of oils was investigated. Because of inner friction and friction at the liquid/solid interface charges are generated and separated and thus lead to changes of the electrical potential. This phenomenon limits the transformer oil flow rates and thus the cooling capacity. For conducting comparative measurements between mineral oil and natural esters, a so-called Mini-Static Tester has been built. With this setup it is possible to measure the electrostatic charging tendency (ECT unit: pC/ml oil) depending on temperature and flow rate. One natural ester oil had generally 30 times higher ECT values than mineral oil. These results give a general idea, but cannot be transferred to reality. Therefore investigations with duct models and electro-optical Kerr effect measurements could in future give suggestions for the design of transformer cooling.

In the area of diagnostics, work of the previous years has been continued for dissolved gas analysis (DGA) in case of alternative dielectric fluids. Experiments with electrical breakdowns have been varied and give all the result, that DGA interpretation doesn't need to be adjusted for this type of fault for alternative liquids. Investigations with partial discharges in oil are new. Here the key fault gases are the same in all liquids – mainly hydrogen. Fault gas concentrations in experiments with very inhomogeneous and strong electrical fields are significantly higher in ester liquids, because the partial discharge activity in this case is higher. For thermal faults of up to 700°C the DGA interpretation methods had to be adjusted, because the thermal decomposition mechanisms are different in natural esters compared to hydrocarbons. Also the stray gassing has an influence on the DGA, which manifests in a gas production even in a fault free situation. For natural esters this phenomenon can already be observed at oil temperatures around 60-70°C. In this case the amount of hydrogen reaches values that wrongfully indicate partial discharges. One workaround could be to define minimum gas limits, depending on the load of the transformer, to be sure that the gas analysis's reliability is high.

DGA-Reihenuntersuchung bei Verteiltransformatoren

Dipl.-Ing. Andreas Müller

Die Gas-in-Öl-Analyse (DGA = dissolved gas analysis) stellt ein Standardverfahren zur Zustandserkennung ölgefüllter Betriebsmittel des elektrischen Netzes dar. Vor allem die Diagnose von Leistungstransformatoren profitiert von der Leistungsfähigkeit dieser Methode. Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass thermische und elektrische Fehler sowie natürliche Alterung in einem Transformator durch die Zersetzung des Isolieröls und der Isolationsmaterialien spezifische Gase bilden, die sich im Öl lösen. Nachdem eine Ölprobe entnommen und diese im Labor untersucht wurde, kann über die enthaltenen Fehlergase mittels mehrerer Interpretationsverfahren auf den vorliegenden Fehler im Transformator geschlossen werden.

In der Regel wird die Gas-in-Öl-Analyse wegen der Kosten und dem Aufwand nur bei großen Leistungstransformatoren durchgeführt. Hier sollen allerdings Ergebnisse von Verteiltransformatoren vorgestellt werden. Die Ölproben wurden aufgrund einer Routineuntersuchung von Verteiltransformatoren entnommen. Insgesamt stehen die Ölanalysen von 37 unterschiedlich alten Transformatoren mit verschiedenen Belastungsprofilen zu Verfügung. Das Alter liegt zwischen 11 und 55 Jahren (Fig. 1).

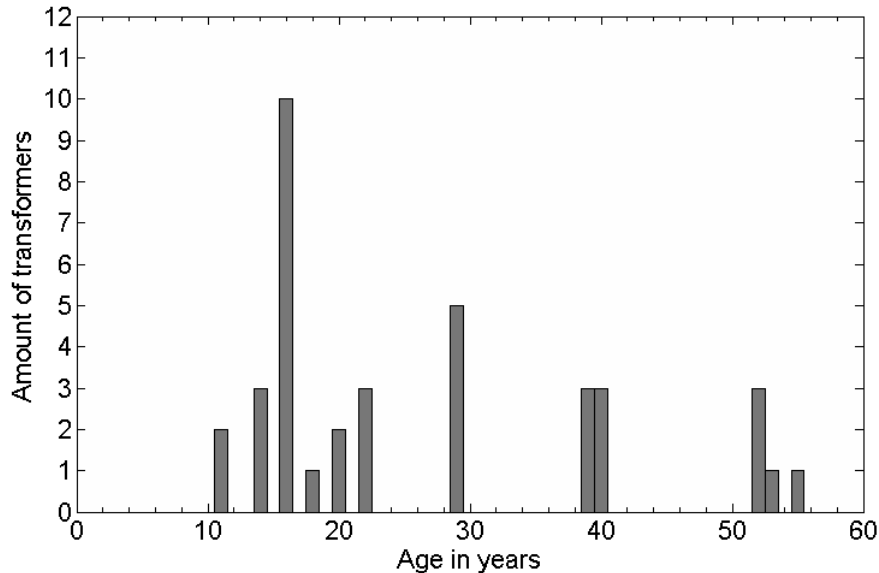


Fig. 1: Betriebsalter der Transformatorenflotte
Age distribution of transformer fleet

Die Nennleistung variiert zwischen 160 kVA und 1250 kVA. Alle Transformatoren sind ölisoliert. Untersucht wurden die physikalisch-chemischen Eigenschaften dieser Öle. Zusätzlich zu den Routinetests für Verteiltransformatoren wie Durchschlagsspannung, Wassergehalt und Säurezahl wurde die Gas-in-Öl-Analyse durchgeführt.

Im Folgenden soll der Fokus auf der Gas-in-Öl-Analyse der Öle solcher Verteiltransformatoren liegen.

■ **DGA survey of medium voltage distribution transformers**

Dipl.-Ing. Andreas Müller

The dissolved gas analysis (DGA) is a standard method for identifying the state of oil-filled electric network equipment. In particular, the diagnosis of power transformers benefits from the efficiency of this method. It is based on the fact that thermal and electrical failures as well as natural aging in transformers generate specific gases during the decomposition of the insulating oil and other insulating materials, which then dissolve in oil. After taking an oil sample and analysing it in the laboratory, it is possible to ascertain the transformer's internal error using several interpretation schemes.

Normally DGA is only applied to large power transformers regarding costs and effort. However, in this report results from medium voltage distribution transformers are presented. The oil samples were taken during a routine test of distribution transformers. Altogether 37 oil analyses from transformers with different load history and age are presented. The considered equipment is 11 to 55 years old (see Fig. 1). The rated power varies between 160 kVA and 1250 kVA. All transformers are oil immersed. Focuses of this contribution are the physio-chemical properties of the investigated oils. In addition to routine tests for distribution transformers like breakdown voltage, water content and acid number also dissolved gas analysis was performed.

In the following, the DGA of such distribution transformers is discussed. In a DGA the dissolved fault gases are measured in a laboratory using a gas chromatograph. Typically 11 fault gases are measured: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 , CO , CO_2 , O_2 and N_2 .

In Fig. 2 the total concentration of dissolved combustible gases (TDCG, here: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 and CO) are plotted over transformers' age. The TDCG concentration is normally an indicator for an ongoing fault in the transformer. However, the transformers' fault gas concentrations are in a typical range. In this case the observed transformers are only accumulating fault gases over the years.

The CO_2/CO ratio is known as an indicator of the decomposition of cellulose. In Fig. 3 the ratio is printed over transformers' age. In the diagram transformers between 10 and 30 years have a variable ratio between 5 and 48. This distribution may result from various load profiles of the considered transformers.

Bei der Gas-in-Öl-Analyse werden im Labor mit einem Gaschromatographen die gelösten Fehlgase im Öl bestimmt. Meistens wird die Konzentration von 11 Fehlergasen gemessen: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 , CO , CO_2 , O_2 und N_2 .

In Fig. 2 ist die Summe der Konzentrationen aller brennbaren Gase (TDCG = total dissolved combustible gases, hier H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 und CO) über dem Alter der Transformatoren dargestellt. Die TDCG-Konzentration ist normalerweise ein Hinweis auf einen aktiven Fehler im Transformator. Die Konzentrationen der einzelnen Fehlergase liegen in einem normalen Bereich. In diesem Fall sammeln die untersuchten Transformatoren nur die Fehlergase über die Jahre an.

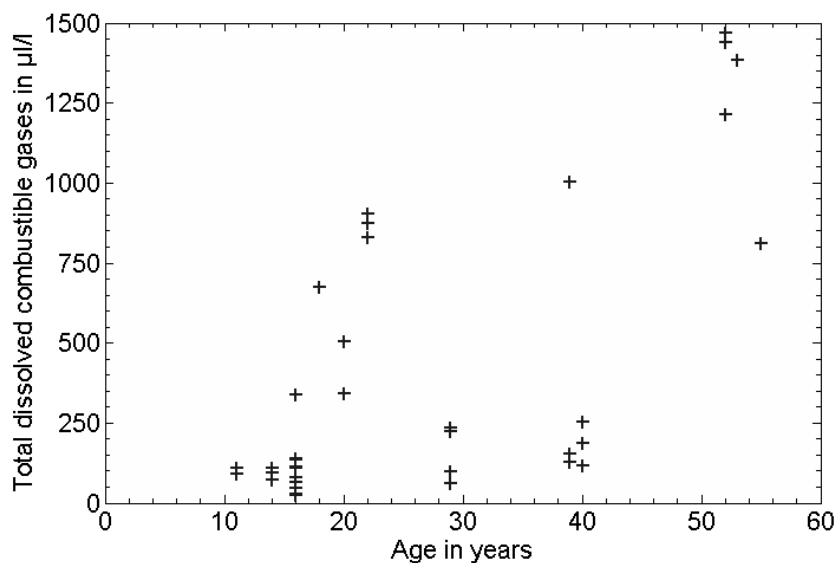


Fig. 2: Gelöste brennbare Gase über dem Alter der Transformatoren
Dissolved combustible gases over transformers' age

Das CO_2/CO -Verhältnis wird als Indikator für den Zelluloseabbau verwendet. In Fig. 3 ist das Verhältnis über dem Alter der Transformatoren dargestellt. Im Diagramm haben Transformatoren im Alter zwischen 10 und 30 Jahren ein variables Verhältnis zwischen 5 und 48. Diese Verteilung kommt möglicherweise von verschiedenen Auslastungen dieser Transformatoren. Im Vergleich dazu haben die älteren (> 35 Jahre) Transformatoren tendenziell ein kleineres CO_2/CO -Verhältnis als die Jüngeren. Als eine Folgerung dessen kann ein festes CO_2/CO -Verhältnis als ein Indikator für die Diagnostik problematisch sein, da sich das Verhältnis über die Jahre ändern kann.

In Fig. 4 sind die Konzentrationen von CO_2 und CO über dem Alter der Transformatoren dargestellt. Im Diagramm verändert sich die Konzentration von CO_2 über dem Lebensalter. Ein Konzentrationsmaximum bei ca. 20 Jahren ist zu erkennen. Ältere und jüngere Transformatoren haben eine geringere CO_2 -Konzentration. Im Vergleich dazu ist die CO -Konzentration über die Jahre leicht steigend. Eventuell ist das CO_2/CO -Verhältnis zeit- und lastabhängig. Die Interpretation des Verhältnisses kann möglicherweise verbessert werden, indem der Ursprung der Gase (Öl- oder Zellulosealterung) berücksichtigt wird.

In comparison older (> 35 years) transformers have a smaller CO_2/CO ratio by trend then younger ones. As a conclusion a fix CO_2/CO ratio as diagnostic indicator is maybe problematical because the ratio changes over the years.

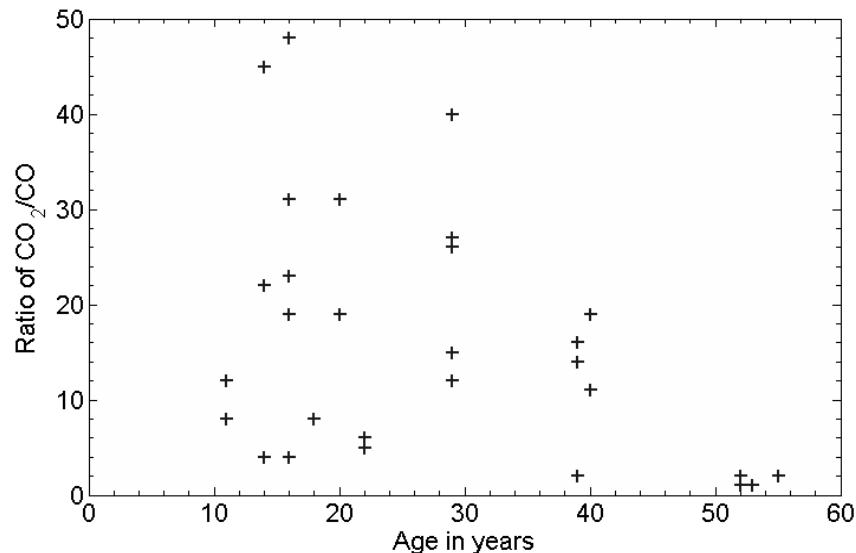


Fig. 3: CO_2/CO -Verhältnis über dem Alter der Transformatoren
 CO_2/CO ratio over transformers' age

In Fig. 4 the concentrations of CO_2 and CO are plotted over transformers' age. In the diagram CO_2 concentrations vary over age. A concentration maximum can be seen at an age of approximately 20 years. Older and younger transformers have a lower CO_2 concentration. In comparison the concentration of CO is slightly increasing over the years.

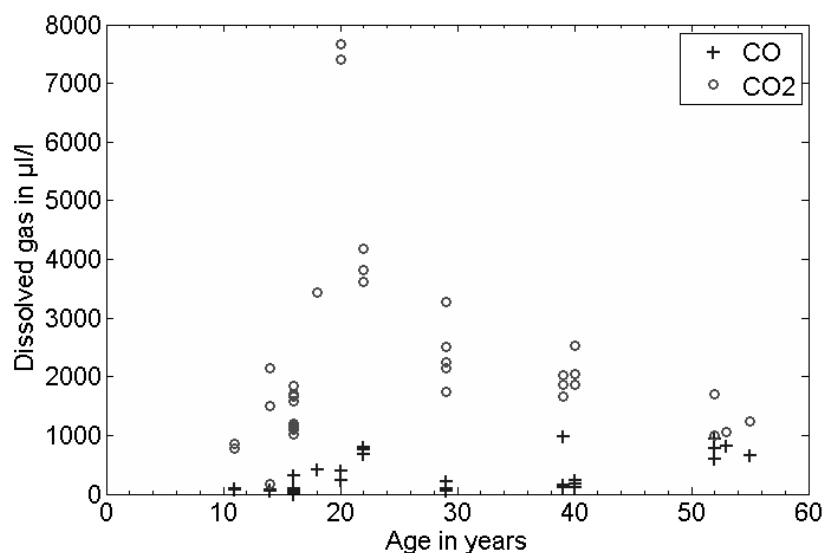


Fig. 4: Konzentration von CO_2 und CO über dem Alter der Transformatoren
 Concentration of CO_2 and CO over transformers' age

Maybe the CO_2/CO ratio is time and load dependent. The interpretation by this ratio could be improved by considering the origins of the gases like ageing of oil or cellulose.

Mustererkennungsverfahren zur Darstellung von Teilentladungen für Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Anne Strotmann

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

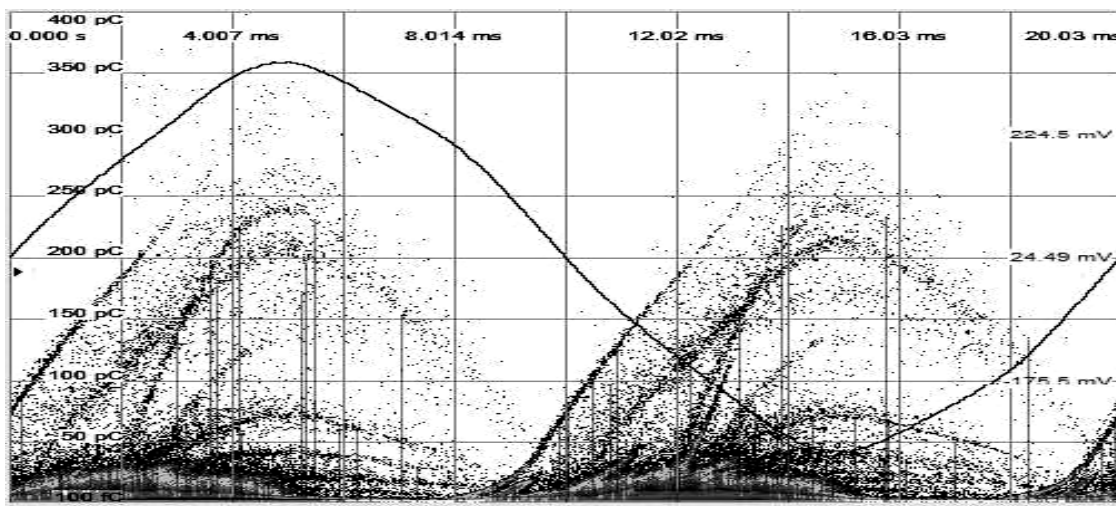


Fig. 1: Beispiel eines phasenaufgelösten Musters

Example of a PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) Pattern

Ein weiteres Mustererkennungsverfahren, das bei festen Isoliermaterialien erforscht wurde, ist die sogenannte Puls-Sequenz-Analyse. Bei der Erstellung eines PSA-Musters erfolgt eine zeitliche Zuordnung des TE-Impulses zum Verlauf der externen Prüfwechselspannung über die Phasenlage des Impulses innerhalb einer Periode. Die TE-Werte in pico-Coulomb (pC) werden bei der PSA nicht berücksichtigt.

In Fig. 2 ist die PSA schematisch dargestellt. Die Differenzen für das $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ Pattern werden nach den Gleichungen (1.1), (1.2) gebildet.

$$\Delta u_n = u_{n+1} - u_n \quad (1.1)$$

$$\Delta u_{n-1} = u_n - u_{n-1} \quad (1.2)$$

Jede TE-Fehlerstelle weist unterschiedlich charakteristische, lokale Feldänderungen auf, die zur Zündung einer Teilentladung führen.

■ Pattern recognition methods for presenting partial discharge measurements of power transformers

Dipl.-Ing. Anne Strotmann

Defects in transformer insulation cause partial discharges (PD), which can progressively degrade the insulating material and can possibly lead to electrical breakdown. Therefore, early detection of partial discharges is important. PD measurements can also provide information about the ageing condition of transformers and thus enable conclusions about their lifetime. Specific phase-related representations (fingerprints – Fig. 1) can assist to identify the fault type and a more precise localization of the fault.

Another pattern recognition method, which was investigated in solid insulation materials, is the Pulse Sequence Analysis (PSA). Therefore the sequences of three consecutive PD pulses are used to generate the PSA pattern. The PSA pattern is created with three PD impulses assigning to their external test voltage. The PD value of apparent charge in pico Coulomb (pC) is not considered in the PSA.

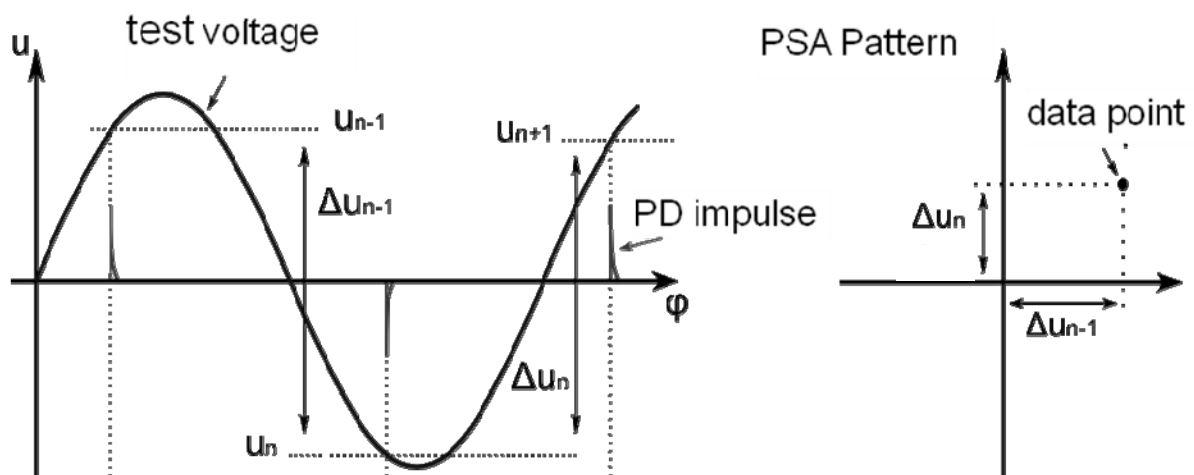


Fig. 2: Schema der Bildung des PSA-Musters
Principle of the generation of the PSA Pattern

In Fig. 2 the PSA is shown schematically. The differences for the $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ patterns are calculated according to equations (1.1) and (1.2).

Each PD fault has different characteristic local field changes that lead to the ignition of a partial discharge. Since the chosen analysis parameters Δu depending on these parameters, typical pattern for different PD sources are expected. In Fig. 3 the results of different PD sources can be seen.

Da der gewählte Analyseparameter Δu von diesen Parametern abhängig ist, können typische Muster für unterschiedliche TE-Quellen erwartet werden. In Fig. 3 wird der Unterschied einer Korona in Luft und zwei inneren TE-Quelle, hier eine Luftblase und eine Oberflächenentladung, deutlich.

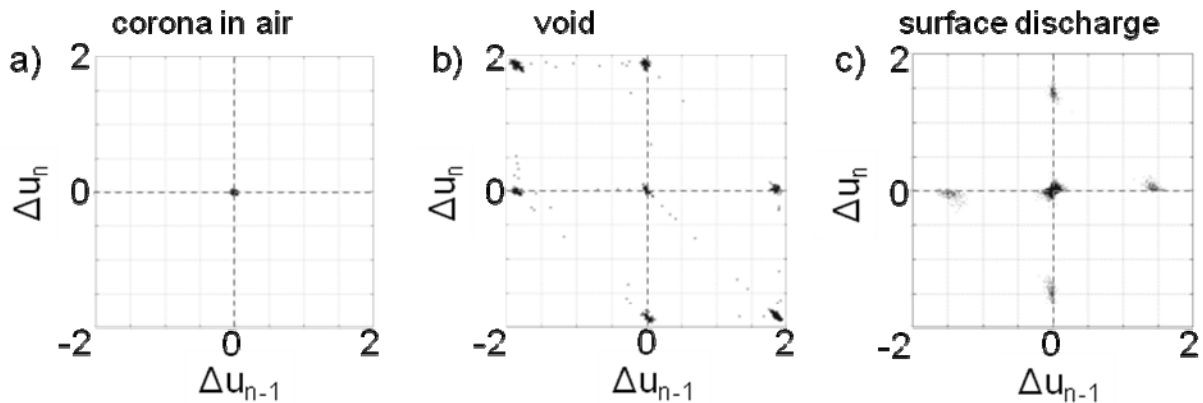


Fig. 3: PSA $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ -Muster

a) Korona in Luft b) Luftblase in Öl c) Oberflächenentladung

PSA Pattern $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$

a) corona in air b) void in mineral oil c) surface discharge

Die Einflüsse mehrerer TE-Quellen und äußerer Störer auf das PSA-Muster wurden untersucht. In Fig. 4 a) wird das Ergebnis der Messung mit zwei TE-Quellen auf unterschiedlichen Phasen dargestellt. Die Luftblase befindet sich an Phase L_1 und eine Kugel-Spitze-Anordnung an Phase L_3 . Die Messung wurde an Phase L_1 aufgezeichnet. Das PSA-Spannungsdifferenzmuster $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ bildet sieben Cluster aus, aber auch Verbindungslinien zwischen den Clustern. Im Vergleich mit dem Muster einer einzelnen Luftblase als TE-Quelle, siehe Fig. 3 b), kann die Fehlerstelle jetzt nicht mehr klar identifiziert werden.

Auch die Korona in Luft ist ein typischer Störer bei Vor-Ort-Messungen. In Fig. 4 b) ist das PSA-Muster $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ der Messung von einer Korona in Luft und einer Luftblase auf Phase L_1 gezeigt. Es bilden sich vier Cluster in der Mitte des Musters aus. Auch weitere Cluster ($\Delta u_n | \Delta u_{n-1}$) werden bei $(-1,5 | 2)$, $(2 | 0)$ und $(0 | 1,5)$ im Diagramm gebildet. Die TE-Quelle kann nicht eindeutig als eine Korona in Luft oder als eine Luftblase identifiziert werden, siehe Fig. 3 a) und b).

Zusammenfassend ist die PSA eine Mustererkennungsmethode, die sehr anfällig auf Störer oder mehrere TE-Quellen reagiert. Diese Einflüsse, die in Fig. 4 gezeigt werden, bestätigen, dass die PSA-Methode eine höhere Messempfindlichkeit als das PRPD-Muster benötigt.

Für Papier-Öl-Isolierungen zeigen die Ergebnisse der PSA Unterschiede der einzelnen TE-Quellen Korona in Luft, Luftblase und Oberflächenentladungen. Die PSA ist eine hilfreiche Mustererkennungsmethode für einzelne TE-Quellen. Das PRPD ist aufgrund der Informationen von Spannung, TE-Pegel und Phasenbezug zu bevorzugen. Das PSA-Muster kann als zusätzliche Methode eingesetzt werden.

The influences of multiple PD sources on the PSA pattern need to be investigated as well. By onsite measurements on older power transformers mostly more than one PD source can be detected. The influence of the noise and the coupled impulses of other phases suggest that multiple PD sources will change the PSA pattern as well.

In Fig. 4 a) the result of the measurement with two PD sources on different phases is shown. Therefore the first PD source, void, is located on phase L_1 and on phase L_3 a point-plate PD source was placed. The measurement was recorded on phase L_1 .

The PSA voltage difference pattern $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ forms seven clusters but also lines occur which connect the clusters. Compared to the result of the PD source of a single void, see Fig. 3 b), the PD sources cannot be identified clearly as void.

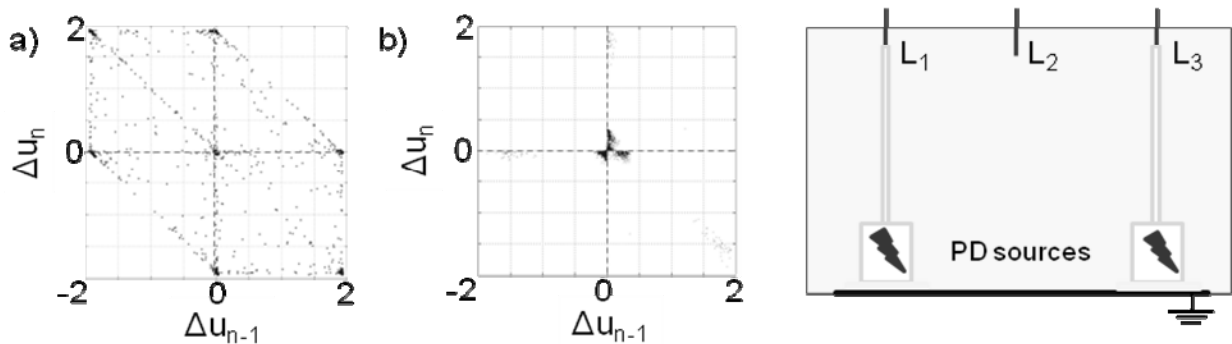


Fig. 4: PSA $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ -Muster a) Messung an L_1 mit TE-Quelle (Luftblase) an L_1 und Kugel-Spitze-Anordnung an Phase L_3 ; b) Messung an L_1 mit Luftblase auf Phase L_1 und Korona in Luft als externer Störer
PSA Pattern $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ a) of phase L_1 with PD source (void) on phase L_1 and a point-plate PD source on phase L_3 ; b) of phase L_1 with void on phase L_1 and corona in air as external disturbances

Also the corona in air is a typical disturbance for onsite measurements. In Fig. 4 b) the PSA pattern of the measurement of a corona in air and a void are shown. The PSA pattern $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$ forms four clusters in the middle of the pattern. Also small clusters can be seen on $(\Delta u_n | \Delta u_{n-1})$ at $(-1.5 | 2)$, $(2 | 0)$ and $(0 | -1.5)$. The PD source cannot clearly be characterized as a void or a corona in air.

In summary the PSA is a pattern recognition method which is highly susceptible for disturbances. Multiple PD sources or external PD changes the PSA pattern. The influences, shown in Fig. 4, confirmed that the PSA method needs higher measurement accuracy than the PRPD pattern. Noise disturbs the PSA pattern whereas a PRPD can be still interpreted.

For paper/oil insulations the results of the PSA showed differences of the typical PD sources corona in air, void and surface discharge. The PSA is a helpful pattern recognition method for single PD sources. The PRPD is still preferable because of the information of voltage, PD level and phase. For difficult cases a PSA pattern can be an additional method to describe the PD source.

■ **Beurteilung der Überlastbarkeit von ON-gekühlten Leistungstransformatoren im Online-Monitoring**

Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

Die Belastbarkeit eines Transformators ist eng mit dessen thermischer Auslegung verknüpft. Die bei der Spannungswandlung entstehenden Verluste müssen durch geeignete Kühlmaßnahmen abgeführt werden. Das sich dabei einstellende Temperaturniveau hat maßgeblichen Einfluss auf die Alterungsrate der Isolation und damit auf die Lebensdauer des Betriebsmittels. Die Hersteller legen daher die Transformatoren thermisch so aus, dass die geplante Lebensdauer unter Nennbedingungen im Nennbetrieb zu erreichen ist. Die tatsächliche Temperatur des Kühlmediums kann während des Betriebs jedoch zeitweise auf deutlich geringere Werte fallen, als dass dies unter Nennbedingungen angenommen ist. Weil niedrige Temperaturen des Kühlmediums wiederum die Kühlleistung verbessern, sinkt unter solchen Umständen auch das resultierende Temperaturniveau im Transformator. Günstige äußere Bedingungen können daher eine Belastung des Transformators oberhalb der veranschlagten Leistungsgrenzen ermöglichen, ohne dabei die Lebensdauer des Betriebsmittels herabzusetzen.

Um die Möglichkeit einer solch unkritischen Überlastung quantifizieren zu können, muss das thermische Verhalten eines Transformators bekannt sein. Mit Hilfe der thermischen Modellierung im Online-Monitoring ist es möglich, dieses Verhalten ausreichend genau abbilden zu können. Für die Gewinnung der nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurde ein sogenanntes Einkörpermodell verwendet. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass der gesamte Transformator eine homogene Temperatur aufweist. Die auf dieser Vereinfachung fußende Energiebilanz liefert eine Funktion, welche den zeitlichen Verlauf der Transformatortemperatur beschreibt. Neben bestimmten Spezifikationen, welche dem Handbuch des jeweils betrachteten Transformators entnommen werden können, werden dabei auch Charakteristika des Abwärmetransports benötigt. Eine zweckdienliche Modellierung des Wärmetransports ermöglicht eine empirische Bestimmung der benötigten Charakteristika anhand von Messdaten aus dem Betrieb des jeweiligen Transformators. Neben den Charakteristika der Kühlanlage können sich jedoch auch Umwelteinflüsse, wie etwa eine solarthermische Wärmeeinkopplung, auf das Verhalten des Transformators auswirken. Weil solche Einflüsse im Online-Monitoring üblicherweise nicht erfasst werden, kann deren Modellierung für eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung notwendig werden. Fig. 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen und der mittels thermischer Modellierung berechneten Öltemperatur eines 40 MVA ONAN-gekühlten Leistungstransformators im Sommer. Während im oberen Teil von Fig. 1 ein solarthermischer Wärmeeintrag zu Lasten der Prognosequalität vernachlässigt wurde, zeigt sich im unteren Teil von Fig. 1 eine

■ Evaluation of the overload capabilities of ON-cooled power transformers within online-monitoring

Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt

The loading capacity of a power transformer is closely connected to its thermal design. The occurring losses of power transformation have to be led off by a sufficient cooling system. The arising temperature distribution has a severe impact on the aging rate of the insulation and the life time performance of the operating resource. Accordingly, manufactures aim for a thermal design that permits the planned life time performance under rated load and standard conditions. However, e.g. the actual temperature of the cooling ambience may fall way below the assumed value in standard condition. Consequently, the arising temperature level inside the transformer would drop due to an improved performance of the cooling system caused by higher temperature gradients. Favorable conditions may thereby permit an increased loading rate without a shortening of the life time performance.

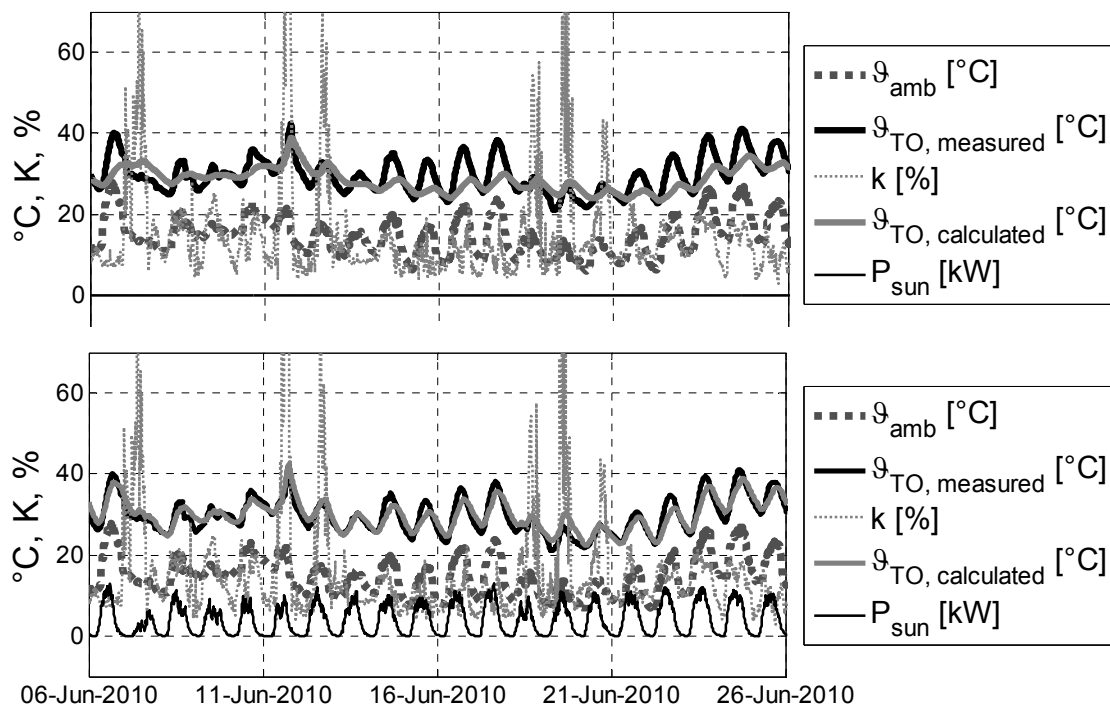


Fig. 1: Modellierungsergebnisse für einen 40 MVA ONAN-gekühlten Transformator ohne (oben) und mit (unten) Berücksichtigung solarthermischer Wärme
Modelling results of a 40 MVA ONAN-cooled transformer without (upper graph) and with (lower graph) consideration of solar thermal heat

Quantifying the potential of such an uncritical overload can only be accomplished with a profound knowledge about the thermal behavior of a transformer. Thermal modelling is an appropriate approach to describe this thermal behavior sufficiently. The subsequently presented results are based on a so-called one body model.

deutlich verbesserte Übereinstimmung zwischen Modellierungsergebnissen und Messwerten. Der dort modellierte solarthermische Wärmeeintrag ist mit P_{sun} bezeichnet.

Um eine unkritische und von der Umgebungstemperatur abhängige Überlastung abschätzen zu können, kann auf Normen zurückgegriffen werden. Die IEC 60076-7 ermöglicht eine Berechnung der maximal auftretenden Temperatur im Transformator, der sogenannten Heißpunkt-Temperatur ϑ_{HS} , in Abhängigkeit von der Öltemperatur und einiger, transformator-spezifischer Parameter. Durch Vorgabe eines Grenzwertes für ϑ_{HS} und passende Wahl der benötigten Parameter, kann mit Hilfe der Norm ein maximaler Lastfaktor abgeschätzt werden, welcher die Lebensdauer des Betriebsmittels nicht beeinträchtigt. Fig. 2 zeigt beispielhaft Ergebnisse einer solchen Überlastungsmöglichkeit in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für einen 31,5 MVA ONAN-gekühlten Transformator. Dabei wurden Heißpunkt-Temperaturen zwischen 88°C und 110°C angesetzt und die Auswirkungen einer Variation der einzelnen Parameter aus IEC 60076-7 dargestellt.

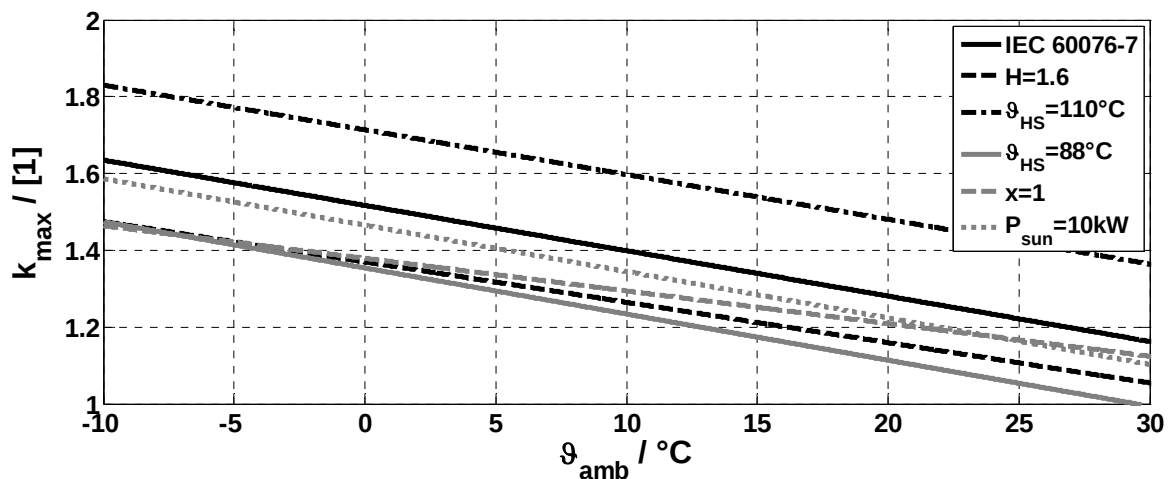


Fig. 2: Ergebnisse der Überlastrechnung nach IEC 60076-7 für einen 31,5 MVA ONAN-gekühlten Transformator
Results of the overload calculation according to IEC 60076-7 for a 31.5 MVA ONAN-cooled transformer

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen die Eignung der thermischen Modellierung für die Beschreibung des thermischen Verhaltens von Transformatoren und Abbildung eines solarthermischen Wärmeeintrags. Sie bescheinigen dem untersuchten Transformator außerdem bereits bei Umgebungstemperaturen von ca. 10°C ein nennenswertes Überlastungspotenzial. Hierbei dürfen jedoch die Belastungsgrenzen, die durch Anbauteile, wie zum Beispiel den Durchführungen und dem Stufenschalter gesetzt sind, nicht aus dem Auge verloren werden.

It implicates that the entire transformer has one homogenous temperature. The energy balance basing upon this assumption results in a time dependent function of the transformer's temperature. In addition to several specifications that can be found in the corresponding manuals of a certain transformer, defining characteristics of the cooling system have to be determined. An appropriate model of the underlying heat transfer allows an empirical determination of the required characteristics via measuring data. Apart from these characteristics certain environmental factors such as solar thermal heat can also have a notable impact on the transformers temperature development. To maintain a good accordance between measurements and modelling results, a proper modelling approach for factors that aren't recorded by standard online-monitoring systems can become necessary. Fig. 1 shows the time dependent progression of the oil temperature in a 40 MVA ONAN-cooled transformer in the summer obtained by measurements and calculations. The upper part of Fig. 1 shows an decreased agreement between measurements and calculations caused by neglected solar thermal heat. The lower part of Fig. 1 documents the improvements induced by taking this influence into account. The modelled solar thermal heat is referred as P_{sun} .

The application of available standards enables the estimation of a constant non-critical overload depending on the ambient temperature. The loading guide IEC 60354 describes the calculation of the maximum temperature inside the transformer, the so-called hot-spot temperature ϑ_{HS} , as a function of the top-oil temperature and several transformer dependent parameters. To determine a maximum constant loading rate, that isn't corrupting the life time performance of the transformer, a limiting value of ϑ_{HS} and an adequate selection of the parameters within IEC 60076-7 must be specified. Fig. 2 exemplifies the results of such a non-critical overload regarding a 31.5 MVA ONAN-cooled transformer and displays the influence of variations of the parameters given in IEC 60076-7.

The displayed results proof the abilities of thermal modelling concerning the prognosis of a transformer's thermal behaviour influenced by solar thermal heat. In addition, they certify a noteworthy overload potential for the analyzed transformer at only 10°C. Nevertheless, limitations concerning accessories like bushings or the on-load tap-changer have to be kept in mind.

■ Unkonventionelle Teilentladungsdiagnose von Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Martin Siegel

In zunehmendem Maße entsteht der Bedarf, die bestehende Isolationsqualität von öl/papierisolierten Transformatoren vor Ort und im Betrieb zu überprüfen, da eine wachsende Anzahl an Transformatoren ihre technische Lebenserwartung überschritten hat. Eine wichtige zerstörungsfreie und empfindliche Methode stellt dabei die Messung von Teilentladungen (TE) dar. TE in Öl sind sehr schnelle elektrische Prozesse, die elektromagnetische Wellen mit Frequenzen bis in den ultrahohen Bereich (ultra high frequency, UHF: 300 – 3000 MHz) abstrahlen. Gemessen werden diese elektromagnetischen Wellen durch UHF-Sensoren, wie beispielsweise in Fig. 1 zu sehen.

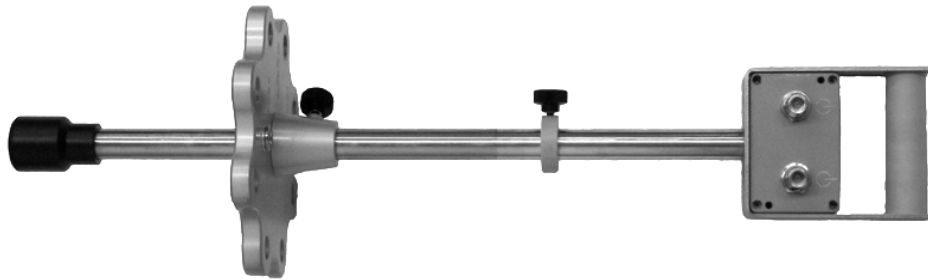


Fig. 1: UHF-Sensor für Standard-Ölschieber (DN80/DN50)
UHF probe for standard oil filling valve (DN80/DN50)

Diese Sensoren können bei laufendem Betrieb über einen zur Ölbefüllung genutzten Flachkeilschieber in das Innere des Transformators eingeführt werden. Im Innern dieses Faradayschen Käfigs ist der Sensor unempfindlich gegen externe elektromagnetische Störquellen. Ein entscheidender Vorteil der UHF-Methode ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber externen Korona-Entladungen, welche das größte Störpotenzial für die konventionelle elektrische Messung nach IEC 60270 darstellen. Dadurch kann mittels der UHF-Methode vor Ort in der Regel eine sichere Aussage über die TE-Aktivität eines Prüflings getroffen werden. Nach festgestellter TE-Aktivität ist die dreidimensionale Ortung der Fehlerstelle für die weitere Risikoanalyse von Interesse. Dazu werden zusätzlich Körperschallsensoren am Transformator-kessel angebracht. Da sich elektromagnetische Wellen im Transformator mit etwa 200 km/s ausbreiten und akustische Signale dagegen nur eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von rund 1400 m/s aufweisen, kann das UHF-Signal zur Laufzeitbestimmung mit akustischen Sensoren als Nullzeitpunkt verwendet werden. Die eigentliche Lokalisierung kann, wie in Fig. 2 dargestellt, auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Zum einen durch eine reine Laufzeitbestimmung bei verteilt angebrachten Sensoren und zum anderen durch die Bestimmung von Einfallswinkel und Entfernung bei einer Anordnung der Sensoren in einem sogenannten ULA (uniform linear array).

■ Non-conventional partial discharge diagnosis of power transformers

Dipl.-Ing. Martin Siegel

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

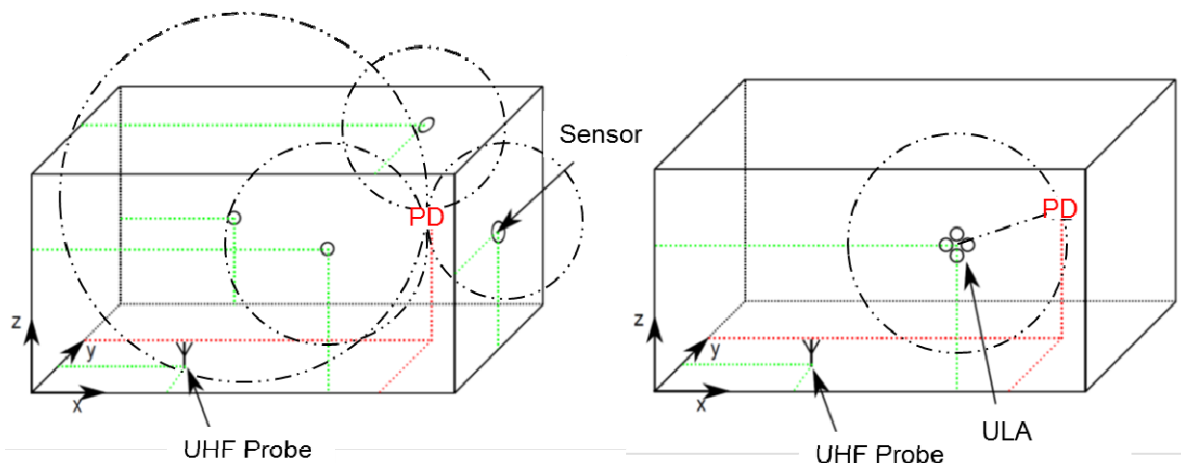


Fig. 2: Lokalisierung mittels verteilter Sensoren (links) und mittels ULA (rechts)
Localization using distributed sensors (left) and using ULA (right)

The probes can be inserted into transformers during operation using oil filling valves. As a result of the shielding characteristics of the transformer tank against external electromagnetic waves, usually a clear decision can be made concerning the PD activity of the test object. A key advantage of UHF method is its insensitivity to external corona discharges, which represent the highest potential for interference for conventional electrical measurement according to IEC 60270. When electrical or UHF PD measurements confirm PD activity, a three dimensional localization of PD sources is the next step for risk evaluation of PD phenomena. Therefore acoustic sensors are mounted on the transformer tank wall. Electromagnetic waves propagate in oil with about 200 km/s whereas acoustic signals only have a propagation velocity of about 1400 m/s. Thus, the UHF signal can be used as zero-time for time of flight determination in combination with acoustic sensors. The localization can be done in two different ways as shown in Fig. 2. On the one hand by a pure time of flight determination with distributed sensors and on the other hand by the determination of the incident angle and the time of flight using a sensor arrangement called ULA (uniform linear array).

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

Dipl.-Ing. Dejan Vukovic

Durch kontinuierliche Weiterentwicklung der Designkriterien wurde der dauerhafte Betrieb von Leistungstransformatoren erreicht. Seit der Konstruktion von ersten Leistungstransformatoren betrachtet man die Öl-Papier-Isolation als unerreichte Anordnung für Anwendungen der Hochspannungstechnik, besonders bei großen Leistungstransformatoren. Diese Kriterien beziehen sich auf die dielektrischen, thermischen und mechanischen Isolationseigenschaften.

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

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

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

Obwohl die natürlichen Ester in Verteiltransformatoren seit mehr als zehn Jahren verwendet werden, müssen detaillierte Untersuchungen über ihre Eigenschaften gemacht werden, bevor man es in Leistungstransformatoren nutzen kann. Die dielektrische Festigkeit ist die wichtigste Eigenschaft von Isolieröl. Der Einfluss von Feuchte und Partikeln, Alterung, elektrischer und thermischer Stress auf die dielektrische Festigkeit wurde intensiv untersucht. Die Durchschlagsspannung beider Isolationsflüssigkeiten im homogenen elektrischen Feld zeigt Fig. 1.

Dielectric strength of ester oil-paper insulation for application in power transformers

Dipl.-Ing. Dejan Vukovic

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

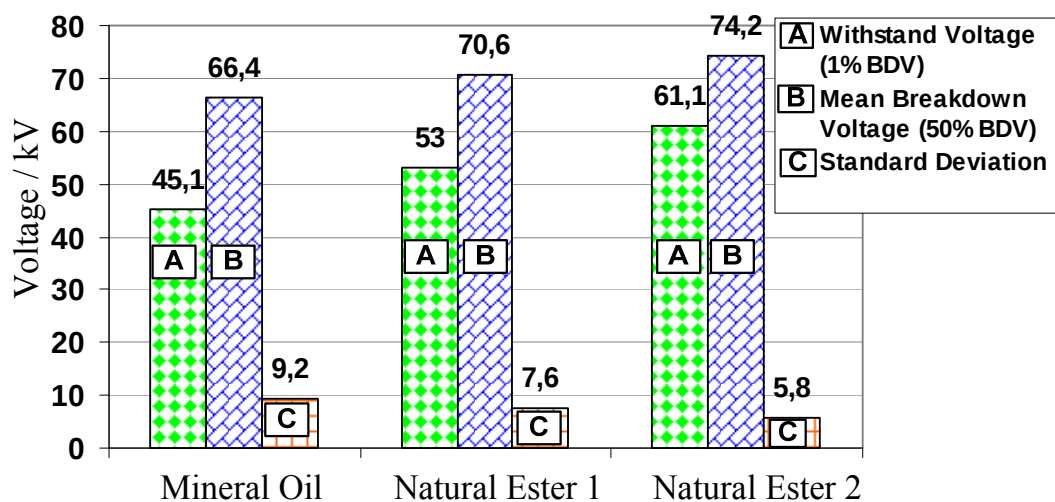


Fig. 1: Festigkeit von Mineralöl und natürlichen Estern im homogenen elektrischen Feld für 2 mm Abstand
Breakdown voltage values for mineral oil and natural esters in uniform AC electrical field for 2 mm gap

Since more than a century power transformers are filled with mineral oil serving as a heat transfer and insulating medium. Nowadays significant efforts are aimed in quest for environmentally friendlier replacement of this petroleum-based product. Natural esters refined from plant materials are introduced as a solution. They are non-toxic, more biodegradable and less flammable than a mineral oil (Tab. 1).

Although the natural esters are used in distribution transformers for more that last ten years there are significant considerations before they can be introduced in power transformers. The main characteristic is the dielectric strength. This characteristic is intensively investigated considering influence of different parameters like moisture and particle content, aging, electrical and thermal stresses. The breakdown values for both fluids in uniform electrical field (IEC 60156) are given in Fig. 1. These data confirm suitability of natural ester for application in distribution transformers where the distances and stresses are lower. Also, it can be seen that natural esters have lower standard deviation.

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

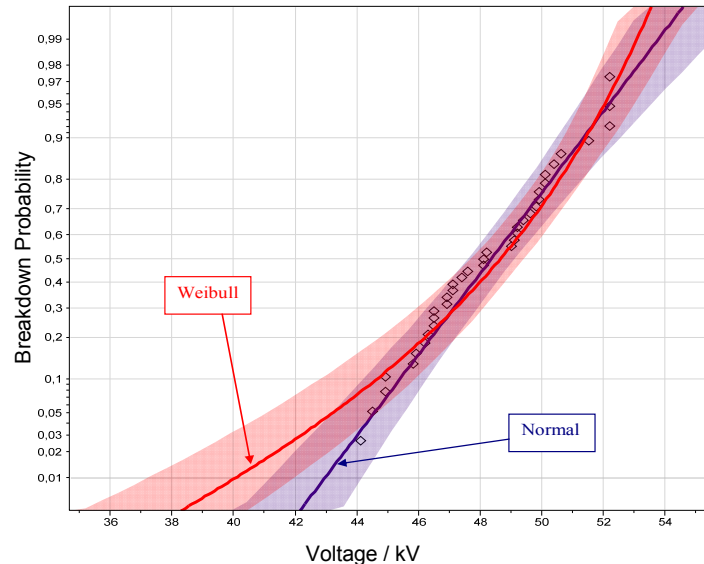


Fig. 2: Weibull- und Normal-Durchschlagswahrscheinlichkeitsfunktionen mit 95 % Konfidenzintervall für natürlichen Ester im inhomogenen elektrischen Feld
Weibull and Normal breakdown probability functions with 95 % confidence limits for natural ester in AC non-uniform gap

Für die Anwendung in Leistungstransformatoren sind die längeren Ölrecken und höheren elektrischen Belastungen relevant. Es wurde beobachtet, dass die natürlichen Ester eine niedrige dielektrische Festigkeit für längere Ölrecken, besonders in nichthomogenen elektrischen Feldern bei Blitzstoßimpulsen aufweisen. Diese Eigenschaft könnte erklärt werden, indem man Teilentladungen (TE) und Streamer als Vor-Durchschlagsphänomene untersucht. Die TE-Einsatzspannung ist niedriger bei natürlichen Estern als bei Mineralöl (Fig. 3). Ebenfalls propagieren die Streamer schneller in natürlichen Estern als in Mineralöl. Der schnelle Modus 3 wird in natürlichen Estern mit einer viel niedrigeren Spannung als bei Mineralöl erreicht. Das könnte bedeuten, dass längere Ölrecken in Leistungstransformatoren leichter überbrückt werden können beim Einsatz von natürlichen Estern. Da sie eine höhere Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_r = 3,2$) als Mineralöl ($\epsilon_r = 2,2$) haben, verteilt sich die elektrische Beanspruchung anders. Die Ausdehnungsentladungen über imprägniertes Pressboard ($\epsilon_r \geq 4,2$) könnten reduziert werden. Alle diese Unterschiede im dielektrischen Verhalten verlangen nach weiteren Verbesserungen des Isolationsdesigns von Leistungstransformatoren.

This means that natural esters can have lower withstand voltage than mineral oil even if they have similar mean breakdown values. The calculated withstand voltage depends as well on used probability distribution function. The Weibull distribution gives lower fluids withstand voltage than normal distribution (Fig. 2).

For power transformer more relevant are longer oil gaps under higher electrical stress. Natural esters showed lower dielectric strength in longer oil gaps, especially for non-uniform electrical field generated by lightning impulse. This characteristic can be explained by investigating pre-breakdown phenomena like partial discharges and streamers. It is found that partial discharge inception voltage is lower in natural ester than in mineral oil (Fig. 3).

Also, streamers propagate faster in natural ester than in mineral oil. The lightning impulse streamer reaches “fast mode” in natural ester at much lower voltages than in mineral oil. This can mean that in power transformer longer oil gaps can be bridged and broken easier in natural ester than in mineral oil.

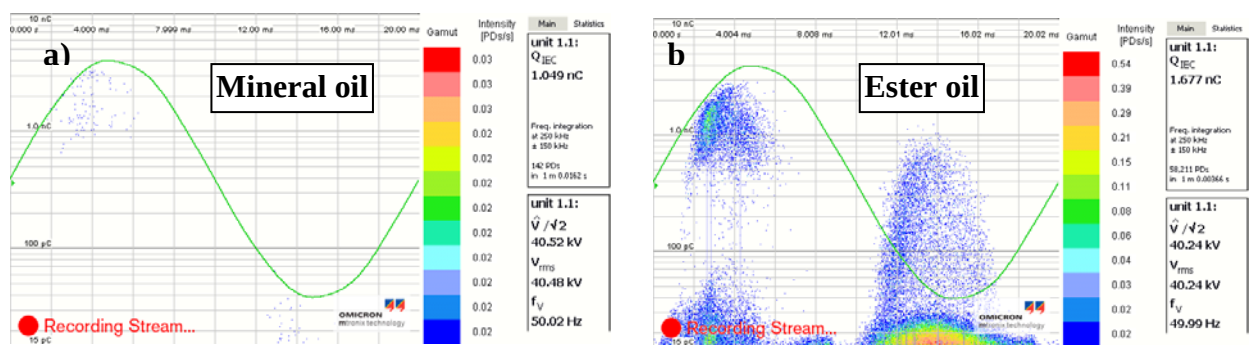


Fig. 3: Teilentladungen für Spitze-Platte-Abstand von 50 mm
Partial discharge activity for 50 mm point-plate gap

Because of the natural ester higher relative permittivity ($\epsilon_r = 3,2$) the electrical stress distribution will be different than in mineral oil ($\epsilon_r = 3,2$). The creep electrical stress over impregnated pressboard ($\epsilon_r \geq 4,2$) can be reduced. All these differences in dielectric behavior of these two fluids call for further optimization of power transformer insulation design.

■ **Thermohydraulischer Arbeitspunkt eines OD-gekühlten Maschinentransformators**

Dipl.-Ing. Andreas Weinländer

Die Temperaturverteilung in ölgekühlten Transformatorwicklungen wird bei der Auslegung eines Transformators gewöhnlicherweise 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 dann 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 Papierisolation 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.

Im Folgenden soll eine Anwendung der Ergebnisse von CFD-Simulationen gezeigt werden. Im gezeigten Beispiel eines großen Maschinentransformators wurden die Ergebnisse für die Druckabfälle und die Leitertemperaturen in Abhängigkeit des Ölmassenstroms, der in die Wicklungen eintritt, verwendet.

Eine wichtige Aufgabe war es, den thermo-hydraulischen Arbeitspunkt dieses Transformators, bei welchem das Öl aus der Kühlanlage direkt in die Wicklungen zurückgepumpt wird (OD-Kühlung), zu bestimmen. Da die unterschiedlichen Wicklungen mit ihren unterschiedlichen hydraulischen Widerständen durch eine gemeinsame Ölleitung gespeist werden, ist die Verteilung des gesamten Ölmassenstromes auf diese Wicklungen ohne weitere Rechnung unbekannt. Die genaue Kenntnis des Massenstroms, der tatsächlich in die jeweilige Wicklung eintritt, ist jedoch eine Voraussetzung, um die Temperaturverteilung innerhalb der Wicklung zu bestimmen. Entsprechend muss dieser Massenstrom bestimmt und - wenn nötig - korrigiert werden. Bevor der Massenstrom bestimmt werden kann, muss der Gesamtmassenstrom, der von der Pumpe geliefert wird, ermittelt werden. Da der Druckabfall am

- **Determination of the thermal-hydraulic working point of an OD-cooled step up transformer**

Dipl.-Ing. Andreas Weinläder

The distribution of temperature in oil cooled transformer windings is evaluated in the project of a transformer by means of empirical data, which are won from a large amount of measurements at formerly built transformers. Since the influence of larger deviations from usual design rules cannot be estimated reliably, it is hardly possible to recognise and to take advance from existing optimisation potentials. Furthermore, in a design according to conventional rules, the spares for security have to be dimensioned so far, that an exceedance of temperature limits is surely avoided, even in the case of the rather inaccurate methods for calculation. This leads in practice to a more or less overdimensioned transformer.

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

In the following we want to show an application of the results of CFD simulations. In the presented example of a large generator step up transformer we use the results for the pressure drops and conductor temperatures in dependency of the oil mass flow entering the windings.

As an essential task it was to determine the thermal-hydraulic working point of this transformer where the oil from the cooler is pumped directly back into the windings (OD-mode). Since the different windings with their different flow resistances are fed by one common oil pipe, the distribution of the total oil flow on these windings is not known without further calculation. However an exact knowledge about the flow rate actually entering a specific winding is a premise to evaluate the temperature distribution within this winding reliably. Accordingly, this flow rate needs to be determined and - if necessary - adjusted. Before the oil flow rate at the entrance of a specific winding can be ascertained, the total oil flow coming from the pumps needs to be assessed. Since the pressure drop at the oil-water heat exchanger is usually much larger than the pressure drop over the winding, it is reasonable to assume this total oil flow rate of the pump given by the cooler supplier to be impressed into the main pipe and to be independent from the hydraulic resistance of the winding. Subsequently, the total oil flow delivered by the pumps distributes between the windings according to their hydraulic resistance.

Öl-Wasser-Wärmetauscher gewöhnlich viel größer ist als der Druckabfall über der Wicklung, macht es Sinn anzunehmen, dass der gesamte Massenstrom der Pumpe - welcher vom Hersteller der Kühlanlage angegeben wird - in die Hauptleitung eingeprägt und somit unabhängig vom hydraulischen Widerstand der Wicklung ist. Folglich verteilt sich der Massenstrom der Pumpe auf die Wicklungen entsprechend deren hydraulischem Widerstand. Da beide Wicklungen durch einen gemeinsamen Kanal gespeist werden, ist der Druck an deren Einlass immer identisch. Folglich wird dieser gleiche Druckabfall durch einen Gesamtmassenstrom, der der Summe der beiden Teilmassenströme in die beiden Wicklungen entspricht, verursacht.

Als ein Beispiel soll ein gemeinsamer Druckabfall von 5000 Pa bei einer Öltemperatur von 40°C am Einlass angenommen werden. Mit den hydraulischen Kennlinien der jeweiligen Wicklung für 40°C (Fig. 1 und 2) kann ein Gesamtmassenstrom von $24,2 \text{ kg/s} = 9,8 \text{ kg/s} + 14,4 \text{ kg/s}$ ermittelt werden. Mit der nun bekannten Aufteilung des Massenstroms unter diesen Randbedingungen auf beide Wicklungen lässt sich mit Hilfe der thermischen Kennlinien die mittlere Wicklungstemperatur ermitteln. Entsprechend beträgt die sich in der Hochspannungswicklung einstellende mittlere Wicklungstemperatur entsprechend Fig. 3 61,9°C. Die entsprechende Heißpunkttemperatur kann ebenso mit Hilfe der thermischen Kennlinie für den jeweiligen Leiter in der Heißpunktzone ermittelt werden.

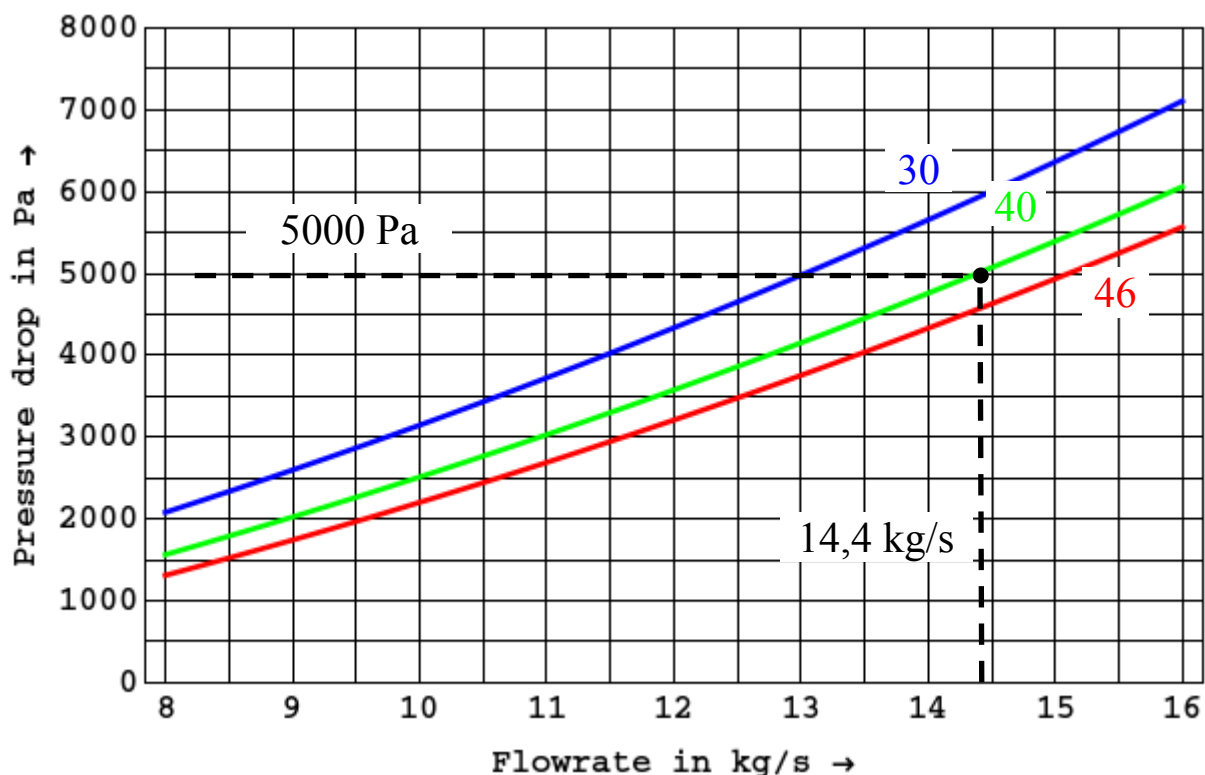


Fig. 1: Druckabfall an der Hochspannungswicklung
Pressure drop of high voltage winding

Since both windings are fed by one common channel, the pressure at their inlets is always identical. Consequently, a matching pressure drop in both windings is caused by a total oil flow rate, that can be calculated as the sum of the oil flow rates entering both windings. As an example we can assume a common pressure drop of 5000 Pa at an oil inlet temperature of 40°C. Given the characteristic hydraulic curves for this oil inlet temperature for both windings (Figure 1 and 2), a total flow rate of 24,2 kg/s = 9,8 kg/s + 14,4 kg/s can be determined. Now the flow distribution into both windings for this inlet conditions is ascertained, the characteristic thermal curves permit the evaluation of the average winding temperature in each winding. Accordingly, the arising average winding temperature in the HV winding at the previously defined working point is 61,9°C, as shown in Figure 3. The corresponding hot spot temperature could also be determined in the same way, using the characteristic curves for the individual conductor temperatures in the hot spot region.

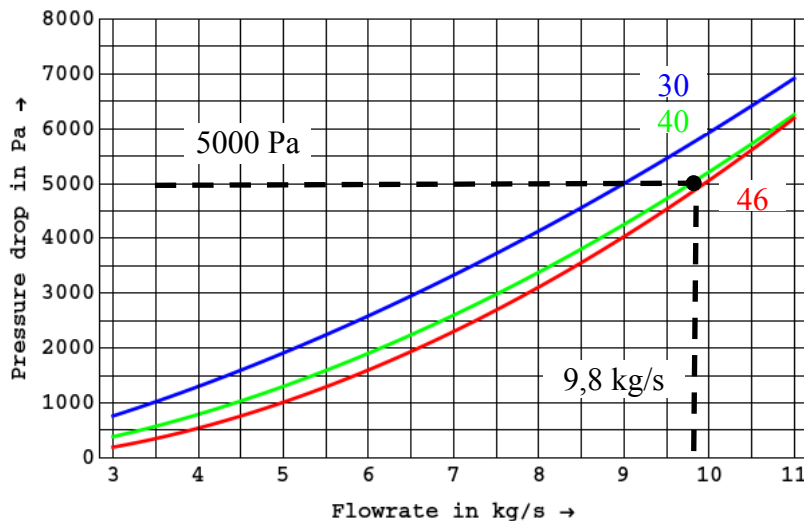


Fig. 2: Druckabfall an der Generatorwicklung
Pressure drop of generator winding

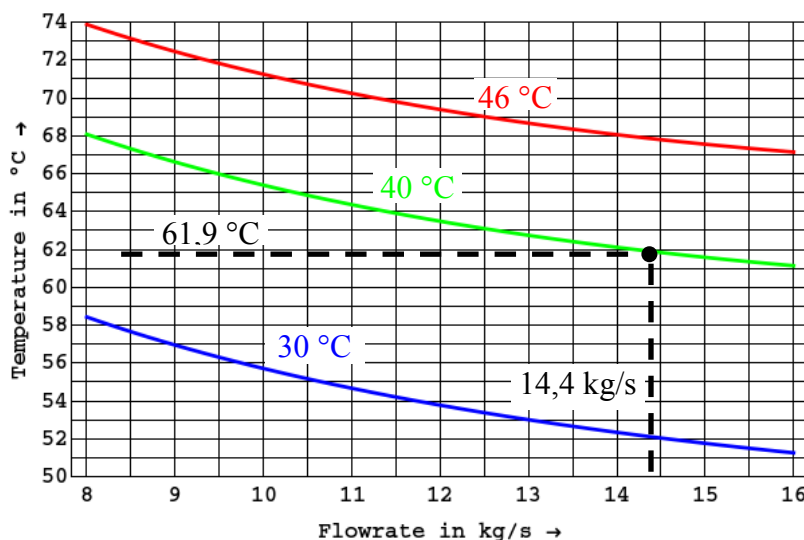


Fig. 3: Mittlere Leitertemperatur der Hochspannungswicklung
Average conductor temperature of high voltage winding

5.2 SMART POWER GRIDS

■ Zustandsschätzung für elektrische Niederspannungsnetze

M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

Der elektrische Verteilnetzbetrieb auf Nieder- und Mittelspannungsebene erfolgt derzeit „blind“. Es gibt in der Regel keine Messdaten, auf deren Basis der Verteilnetzbetreiber den Netzbetrieb optimieren kann. Durch den Ausbau von Photovoltaikanlagen im Niederspannungsnetz sowie den vorbereitenden Einsatz von intelligenten Messsystemen (Smart Meter) mit variablen Strompreisen als Anreiz für ein Lastmanagement und zukünftig auch Elektrofahrzeugen ergibt sich eine völlig neue Dynamik und damit eine Herausforderung für einen sicheren und wirtschaftlich optimierten Netzbetrieb. Die Grundlage dafür ist jedoch die Kenntnis des Zustandes des Niederspannungsnetzes.

In elektrischen Übertragungsnetzen ist eine Zustandsschätzung bereits seit den 1970er Jahren Stand der Technik. Für elektrische Verteilnetze (Nieder- und Mittelspannungsebene) sind Verfahren der Zustandsschätzung bisher aus zwei Gründen nicht eingesetzt (Quelle: ABB Technik 3/2009):

- „Es stehen nur sehr wenige Echtzeitmessungen zur Verfügung (bei einem Verteilungsstromkreis mit mehreren Tausend Knoten meist nur einige am Kopfende des Abzweigs).“
- Die komplexe Modellierung mehrphasiger asymmetrischer Verteilnetze stellt eine große Herausforderung für die Entwicklung effizienter und robuster Schätzalgorithmen dar, die für verschiedene Arten von Messungen geeignet sind.“

Diese Gründe resultieren aus grundsätzlichen Unterschieden zwischen Übertragungs- und Verteilnetzen:

- Übertragungsnetze sind vermascht und müssen deshalb im Ganzen analysiert werden, während Verteilnetze meist radial aufgebaut sind und auch in Teilnetzen separat analysiert werden können.
- Während in Übertragungsnetzen ein Netzimpedanzverhältnis $R/X \ll 1$ vorliegt, ist dies in Verteilnetzen oft sogar $R/X > 1$. Damit können die für Netze mit induktivem Verhalten vereinfachten Algorithmen der Zustandsschätzung nicht auf Verteilnetze übertragen werden.
- In Übertragungsnetzen liegt eine im Wesentlichen symmetrische Netzbelastung vor. Dagegen ist in Verteilnetzen, insbesondere Niederspannungsnetzen eine deutliche Unsymmetrie zwischen der Phasenbelastung vorhanden. Deshalb muss in Verteilnetzen eine deutlich schwierigere dreiphasige Berechnung stattfinden.

■ State estimation for low voltage network

M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

The electrical distribution system operator on low- and medium voltage level is currently „blind“. Generally there are no measurement data, which can be used by the distribution system operator to optimize their network operation. The expansion of photovoltaic systems in the low-voltage grid as well as the prepared use of intelligent measurement systems (smart meters) with variable tariff structures as an incentive for a load management system and also electric vehicles in the future lead to an entirely new dynamic and thus a challenge for a reliable and economic network operation. The basis for this is, however, the knowledge of the state of the low-voltage grid.

In transmission systems, state estimation is a routine task and a lot of established methodologies exist. State estimation for distribution networks at low and medium voltage level is not yet applied due to two reasons:

- There are very few real-time measurements available (for distribution networks with several thousand nodes usually only a few at the beginning of the branch).
- The modeling of complex multi-phase asymmetric distribution is a major challenge for developing efficient and robust estimation algorithms which are suitable for different types of measurements.

New distribution network management applications, which are enabled by control possibilities and state estimation, are shown in Table 1, each application with its functionalities and benefits. The target of the suggested project is the development and analysis of a state estimation in the low voltage network in order to provide the necessary information for the applications.

The planned future use of smart meters, however, offers new possibilities, since in principle measured data, such as power, voltage and current of each customer's connection can be obtained almost in real time. The availability of this information is an essential basis for state estimation. With a more accurate real-time model of the network through the distribution state estimation, other management functions such as voltage and reactive power optimization, network restoration, load balancing and optimal network configuration can be more reliably.

- Das Übertragungsnetz ist in der Regel durch eine ausreichende Anzahl von Messstellen an den Netzbetriebsmitteln beobachtbar. Bei Nieder- und Mittelspannungsnetzen hat der Netzbetreiber in der Regel keine oder nur sehr wenige Messstellen im Vergleich zu ca. 1.000-10.000 Knoten. Damit sind Verteilnetzbetreiber in der Regel „blind“. Dies könnte sich zukünftig mit dem Einsatz einer Smart-Meter-Infrastruktur ändern.
- Die Knotenzahl im Verteilnetz kann sogar höher sein als im Übertragungsnetz. Dennoch ist der spezifische Aufwand für Mess-, Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen pro übertragene Energieeinheit deutlich höher, so dass dieser erst noch gerechtfertigt werden muss.

Neue Verteilnetzmanagement-Anwendungen, welche durch die Regelmöglichkeiten sowie eine Zustandserfassung über Messdaten ermöglicht werden, sind in Tabelle 1 mit ihrer Funktionalität und ihrem Nutzen dargestellt. In dem vorgeschlagenen Vorhaben soll die Entwicklung und Analyse einer Zustandsschätzung für das Niederspannungsnetz durchgeführt werden, um für diese Anwendungen die notwendige Informationsgrundlage zu schaffen.

Wesentlicher Gegenstand in diesem Projekt ist die Entwicklung und Analyse einer Zustandsschätzung für elektrische Niederspannungsnetze, welche die Grundlage für die in der Einleitung genannten, künftigen Optimierungen bilden. Für eine Zustandsschätzung sind Messdaten notwendig wie in Fig. 1 dargestellt, welche entweder aus der Messinfrastruktur des Verteilnetzbetreibers oder den Smart-Meter-Messungen an den Anschlusspunkten der Kunden abgeleitet werden können.

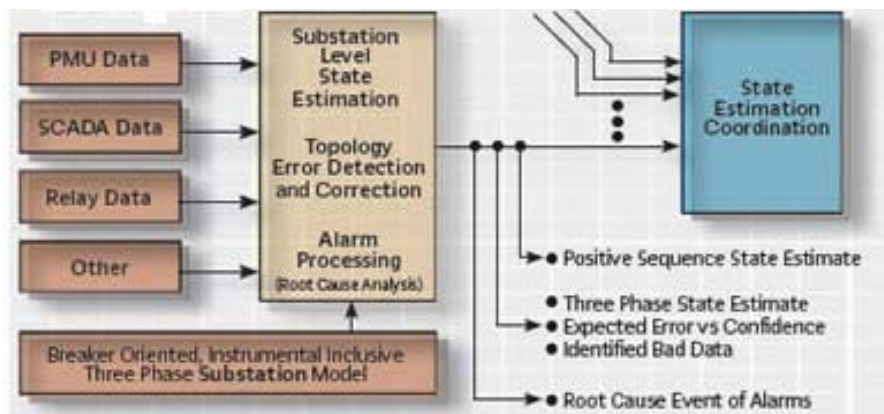


Fig 1: Funktionsbeschreibung der Zustandsschätzung (Quelle: <http://www.pacw.org>)
Functional description of state estimation (Source: <http://www.pacw.org>)

Dieses Vorhaben wird unterstützt durch das Juniorprofessoren-Programm des MWK im Rahmen der „Zukunftsoffensive IV - Innovation und Exzellenz“.

The key issue of this project is the development and analysis of a state estimation in low voltage grids, which forms the basis for future improvements. In order to estimate the state of a network, measurement data is necessary as shown in Fig. 1 that can either be obtained from the respective infrastructure of the electrical distribution system operator or from the measurements provided by smart meters of private customers which are connected to the points of common coupling.

DMS- Application	Functionality	Use
Asymmetric load flow analysis	Determination of the currents and voltages in the lines and nodes for the entire distribution system, either online or offline in simulation mode.	- Improved network observability - Improved equipment utilization - Improved emergency planning
Fault location	Identification of possible fault locations in the network	- Improved efficiency of the crews in the handling of failures - Reduced outage duration (CAIDI) und unavailability (SAIDI) for the customers
Voltage/ Reactive power regulation	Monitoring and control of capacitors, voltage regulators and load tap changers to reduce the peak load and system losses	- Reduced customer-side demand peak at peak times - Reduced system losses - Improved voltage profile
Remote operation and restoration	Automatic feeder reconfiguration taking account of system operating conditions	- Reduced CAIDI and SAIDI - Reduced system losses

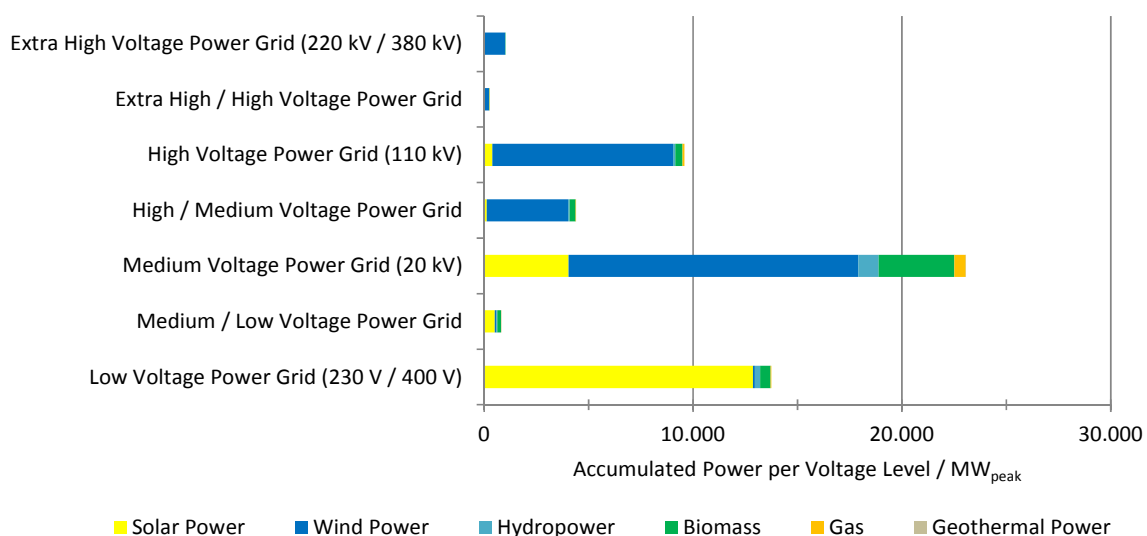
Tab. 1: Funktionalitäten und Nutzen fortschrittlicher Verteilnetzmanagement-Anwendungen durch den Einsatz von Zustandsschätzung (Quelle: ABB Technik 3/2009)
 Functionalities and benefits of advanced distribution management applications through the use of state estimation (Source : ABB Technik 3/2009)

Dynamische Simulation und Optimierung dezentraler Energiekonzepte

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

Der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland auf 80% der Stromversorgung bis zum Jahr 2050 wird zu einer Transformation des Energiesystems führen. Eine entscheidende Tendenz ist dabei die zunehmende Dezentralisierung mit inzwischen über 900.000 Anlagen im elektrischen Verteilungsnetz.

Fig. 1 verdeutlicht diese Entwicklung:



Source: energymap.info, Date: June 2011

Fig. 1: Kumulierte Leistung je Spannungsebene (Quelle: energymap.info)
Accumulated Power per Voltage Level (source: energymap.info)

Um diesen Entwicklungen gerecht zu werden, sind neben einem konventionellen Ausbau bestehender Netze weitere Vorgehensweisen denkbar. Vorstellbar sind hier beispielsweise ein aktiver Verteilnetzbetrieb, eine effektive Nutzung von Energiespeichern zur Entlastung des Netzes oder auch eine gezielte Beeinflussung der Last durch dynamische Tarifstrukturen für private Haushalte.

Um die verschiedenen Ausgestaltungsvarianten des künftigen Energiesystems bereits heute adäquat beurteilen zu können, sind zunächst Zukunftsszenarien zu definieren, welche ein künftiges Energiesystem möglichst realistisch erfassen. Auf dieser Basis sind Modelle zu entwickeln, welche eine volkswirtschaftliche Bewertung der verschiedenen, potentiell nutzbaren Smart-Grid-Technologien, wie sie weiter oben exemplarisch genannt werden, ermöglichen. Die grundlegende Idee besteht hierbei in der Verbindung eines überregionalen mit einem regionalen Netzmodell.

■ **Dynamic simulation and optimization of decentralized energy concepts**

Dipl.-Wi.-Ing. Marc Brunner

The development of renewable energies in Germany with a share of 80% of the entire power supply in 2050 will lead to tremendous transformations of the energy system. One major implication of this development is the continuously increasing decentralization which led to more than 900.000 energy production plants feeding in at the electrical distribution network level today. Fig. 1 clarifies this development.

In order to comply with these restraints, various approaches are conceivable besides a mere reinforcement of existing networks. Active distribution networks, an effective use of energy storage systems or even an incentive-based control of loads by dynamic tariff structures for private households can be possible alternatives.

First of all, scenarios describing future energy systems have to be defined in order to adequately assess the various possible designs of future energy systems. Enabling for an economic assessment of the aforementioned smart grid technologies, models have to be established based on the prior scenario development, as mentioned above. Finally, it is the essential idea to combine a regional model with a supraregional model.

The supraregional model should therefore depict the dynamic behavior of energy supply and demand with special consideration of a decentralized power generation as provided by renewable energies. In that context, it is a major objective to compare system costs caused by deployment of controllable generators, loads and storage systems whose operation is optimized from an economical point of view.

As the majority of decentralized energy generators feed in their energy at medium and low voltage level and therefore can induce reverse power flows from the distribution to the transmission network, energy distribution networks have a huge impact on the simulation results generated by the supraregional model. As a consequence of this, it is an absolute need to take an integrated approach with both distribution and transmission networks.

Due to reasons of the complexity of simulation, it is not possible to incorporate a detailed calculation of low and medium voltage networks in order to calculate the optimal structure of a supraregional energy system as, for instance, a single medium voltage grid with all connected low voltage grids can easily reach the amount of 10.000 nodes and more. Hence, a reduction of simulation complexity becomes necessary. In order to do so, the calculation of equivalent networks, the reduction of temporal resolution or probabilistic load flow calculation can be possible solutions.

Das überregionale Modell soll das dynamische Verhalten von Erzeugung und Verbrauch unter besonderer Berücksichtigung einer dezentralen Energieeinspeisung durch beispielsweise erneuerbare Energien oder auch Elektromobilität abbilden. Übergeordnete Zielsetzung ist hierbei jeweils der Vergleich der entstehenden Kosten durch Zu- bzw. Neubauvarianten für eine jeweils nach ökonomischen Gesichtspunkten optimierte Betriebsweise der einzelnen Erzeuger, Verbraucher und Speicher.

Da eine sehr große Anzahl an dezentralen Energieerzeugungsanlagen auf Mittel- bzw. Niederspannungsebene einspeist, haben Verteilnetze, welche hierdurch zeitweise sogar zu Netto-Stromlieferanten werden können, einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse des überregionalen Modells. Es ist daher nötig, diese eigenständig zu berücksichtigen.

Die Berechnung der kumulierten Rückwirkung aller Verteilnetze eines Übertragungsnetzbereichs auf die optimale Struktur eines übergeordneten Energiesystems ist aus Komplexitätsgründen jedoch nicht mehr realisierbar, da bereits ein einziges Verteilnetz mehr als 10.000 Knoten aufweisen kann. Es ist daher nötig, die Komplexität der Simulation zu reduzieren. Hierzu kann die Bildung von Netzäquivalenten genauso beitragen wie eine Reduktion der zeitlichen Auflösung oder probabilistische Lastflussrechnungen. Gemein muss jedoch allen Vereinfachungen sein, dass wesentliche Aussagen weiterhin ausreichend genau getroffen werden können. Ein weiterer Modellierungsfokus liegt zudem auf einer spartenübergreifenden Betrachtung, in welcher elektrische Energie nur als eine von mehreren Energieformen verstanden wird. Hierdurch können beispielsweise Strom-, Gas- und Wärmeprozesse parallel berücksichtigt werden.

Durch die Kombination beider Modelle sind Aussagen in Bezug auf eine optimale Gestaltung des künftigen Energiesystems möglich, ohne dabei die Probleme auf den unteren Spannungsebenen zu vernachlässigen. Hierdurch können schließlich Empfehlungen bezüglich zukünftiger Investitionsstrategien in Kraftwerke, erneuerbare Energien oder auch den Ausbau von Netzen ausgesprochen werden.

In diesem Vorhaben sollen methodische Weiterentwicklungen für die Modellierung, Simulation und Optimierung dezentraler Energiekonzepte durchgeführt werden. Das IEH arbeitet bei diesem Vorhaben mit dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) zusammen. Das Projekt ist ein mit dem Stuttgart Research Centre for Simulation Technology assoziiertes Projekt. Die Förderung des Vorhabens erfolgt durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg.

Despite the reduction of complexity, every single simplification still has to provide sufficiently accurate information. Special attention regarding the modeling of distribution systems has to be directed to understand an energy system as a multi energy carrier system, in which electrical power is one energy carrier amongst others. For instance, this enables for a simultaneous modeling of power, gas and heat systems.

Conclusions with respect to the possible design of future energy systems without neglecting constraints that appear only on low voltage levels can be drawn by connecting the regional with the supraregional model. By doing so, it finally becomes possible to recommend alternative future investment strategies for power plants, renewable energies or the expansion of existing energy networks.

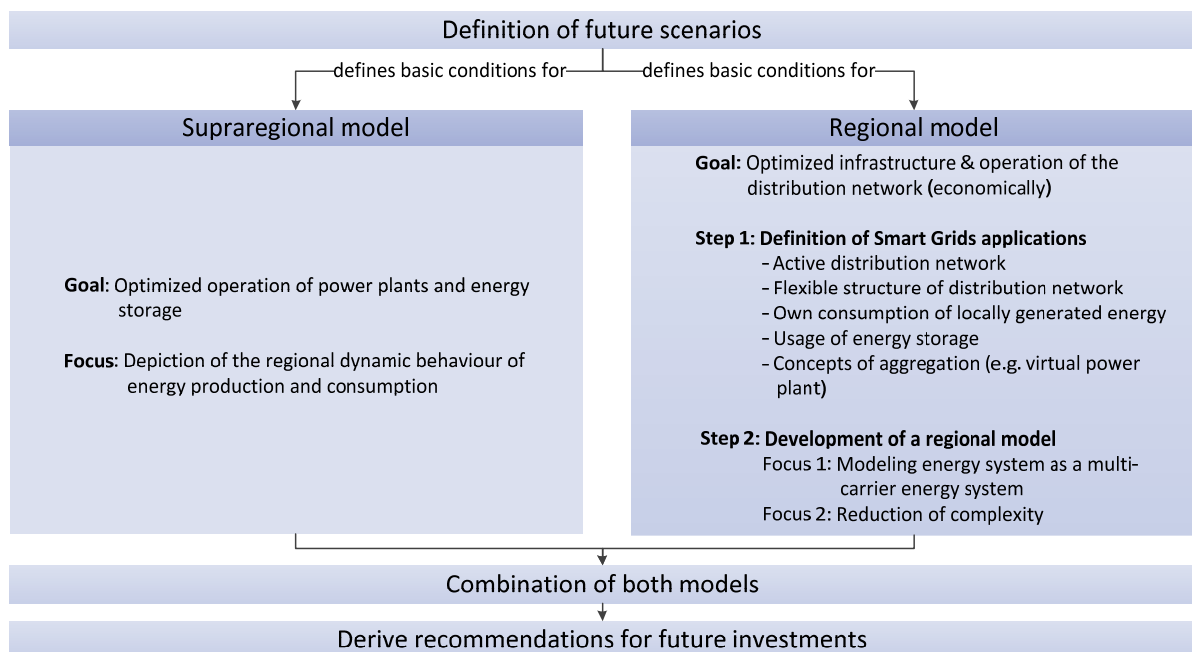


Fig. 2: Zusammenfassung des methodischen Vorgehens (Quelle:eigene Darstellung)
Summary of methodology (source: own illustration)

The key issue of this project is to methodologically improve means to model, simulate and optimize decentralized energy concepts. The Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH) collaborates with the Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER). The project is associated with the Stuttgart Research Centre for Simulation Technology. It is funded by the Ministry of Science, Research and the Arts Baden-Württemberg.

■ **Analyse des Systemverhaltens zukünftiger Smart Grids und deren veränderte Anforderungen für einen optimierten Verteilnetzbetrieb**

Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

Durch den von der Gesetzgebung getriebenen, kontinuierlichen Zubau von erneuerbaren Energieerzeugern sowie weiterer dezentraler Erzeuger wird, technisch gesehen, ein neues Zeitalter der Energieversorgung eingeleitet. Obwohl die Einflüsse auf die Hoch- und Höchstspannungsebene bei kleinen und mittleren Anschlussleistungen im Niederspannungsnetz eher marginal sind, zeigen sich deutliche Auswirkungen der Integration besagter Erzeugereinheiten auf der Mittel- und Niederspannungsebene. Während Mikro-KWK und Biomasseanlagen noch weitgehend problemlos in das Verteilnetz zu integrieren sind, können bei der Integration von PV-Anlagen, abhängig vom Anlagen-Durchdringungsgrad, schon aktuell drastische Auswirkungen auf das Verteilnetz beobachtet werden. Bereits heute kann es passieren, dass eine hohe solare Einstrahlung regional den Energiefluss in den unteren Netzebenen umkehrt und aus dieser Region zeitweise einen Netto-Stromlieferanten macht. Die Anforderungen an den Netzbetreiber für einen optimalen Verteilnetzbetrieb sind dabei allerdings grundverschieden zu denen vor einigen Jahren, da das klassische Top-Down-Versorgungsprinzip aufgebrochen wird. Die daraus resultierenden, in die Netze induzierten Leistungsflussfluktuationen treiben die Niederspannungsnetze immer häufiger an ihre Belastungsgrenzen und erzwingen bei Netzbetreibern aufwendige Investitionen in den Netzausbau, die unter Umständen durch geeignete Maßnahmen vielleicht vermieden werden könnten. Aus diesem Grund müssen schon heute Modellregionen, die diese Problematik zumindest ansatzweise nachbilden können, untersucht und modelliert werden, um aussagekräftige Daten zu sammeln. Durch Abbildungen in Simulationsprogrammen können weitere Anforderungen an die intelligenten Netze der Zukunft herausgearbeitet werden. Nach der Identifikation von Gemeinsamkeiten können bereits heute innovative Lösungsansätze und Entwicklungsetappen festgehalten werden. Ein Übergang zum intelligenten, aktiven Energieversorgungsnetz kann dann entsprechend schneller und effizienter gestaltet werden, da notwendige Zwischenschritte auf dem Weg zu einem Smart Grid dann bereits bekannt sind.

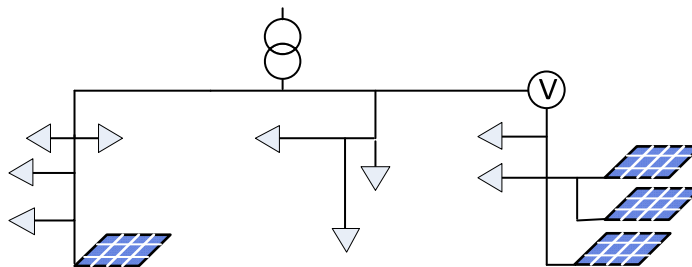


Fig. 1: Schematische Darstellung eines Niederspannungsnetzes mit PV-Einspeisern
Schematic illustration of a distribution network with PV devices

- **Analysis of the system performance of future smart grids and their changing requirements for an optimized distribution network operation**

Dipl.-Ing. Simon Eilenberger

The continuous deployment of renewable energy sources in Germany leads to a new era of decentralized electrical power supply. There are several impacts by the integration of the mentioned generation units to the medium and low voltage grids.

While micro-power-heat cogeneration units and biomass devices can be integrated normally with little challenges, we can notice significant influences of the integration of photovoltaic systems on the distribution network. It can already happen today that a regional high solar irradiation is reversing the power flow changing the behaviour from a distribution to a supply grid over a period of time. The requirements for the network operator for an optimized distribution network operation however have changed significantly because the classical top-down supply principle is changing. The resulting power flow fluctuations cause more often the trespassing of voltage limits in the distribution network. To keep voltage limits capital expenditures of grid operators for network reinforcements are required that could be reduced by different approaches.

For this reason it is important to analyze model regions accounting for these challenges already today in order to obtain a thorough system understanding. With simulation programs it is possible to analyze further requirements of the future. It should be possible to identify cutting-edge approaches for the evolution process. A transition to an intelligent, active electrical distribution network can accordingly be formed faster and more efficiently.

To achieve any improvement to common known principles and controls of the passive distribution grid and to master the transition to an improved operation it is essential to understand the different system performance and moreover being able to simulate it. By the use of a wide basis of measurement data gathered in a case study grid it is possible to extract on the one hand important perceptions of the in-service behaviour of distribution grids with high amounts of renewable energy sources and to develop on the other hand operating and control procedures for several system components.

Therefore commonly used models for dynamic analyzes will be developed and implemented in a simulation environment. With these models and simulations of different operation modes it is possible to establish more criterias for an active distribution grid operation. The development of intelligent network operation methods makes it possible to postpone or even omit the reinforcement of networks.

Um Verbesserungen von bisher üblichen Verfahren und Regeln des momentan passiven Verteilnetzbetriebs finden zu können und den Übergang zum aktiven Verteilnetzbetrieb zu meistern, muss in dieser Arbeit zuerst das signifikant andersartige Systemverhalten verstanden und in Simulationen nachgebildet werden können. Durch eine breite Basis von Messdaten, die in der Modellregion aufgenommen werden, sollen neben dem Zugewinn wichtiger Erkenntnisse zum Betriebsverhalten von Verteilnetzen mit hohem Anteil regenerativer Energieerzeuger auch Betriebs- und Regelverfahren für einzelne Systemkomponenten entwickelt werden. Dazu sollen allgemein verwendbare Modelle für dynamische Analysen gewonnen und in einer Netzsimulationsumgebung implementiert werden. Durch Simulationen verschiedener Betriebszustände mit den gewonnenen Modellen können weitere wichtige Kriterien für einen aktiven Verteilnetzbetrieb gefunden werden. Die Frage, ob ein Netzausbau notwendig oder unnötig ist, kann durch die Entwicklung intelligenter Netzbetriebsverfahren verzögert werden oder sogar entfallen. Die entwickelten Verfahren werden im Hinblick auf ihre technische Effektivität und ihre wirtschaftliche Effizienz bewertet und auf ihre allgemeine Anwendbarkeit und Übertragbarkeit in Verteilnetze geprüft. Mit den nun bekannten Verfahren und Optimierungen bieten sich vielfältige Möglichkeiten: Neben Potenzialabschätzungen für die Aufnahme-fähigkeit von PV-Anlagen in speziellen Niederspannungsnetzen können verschiedene Entwicklungsschritte auf dem Weg zum zukünftigen Smart Grid in einer Roadmap zusammengestellt und die Notwendigkeit der Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen festgestellt werden.

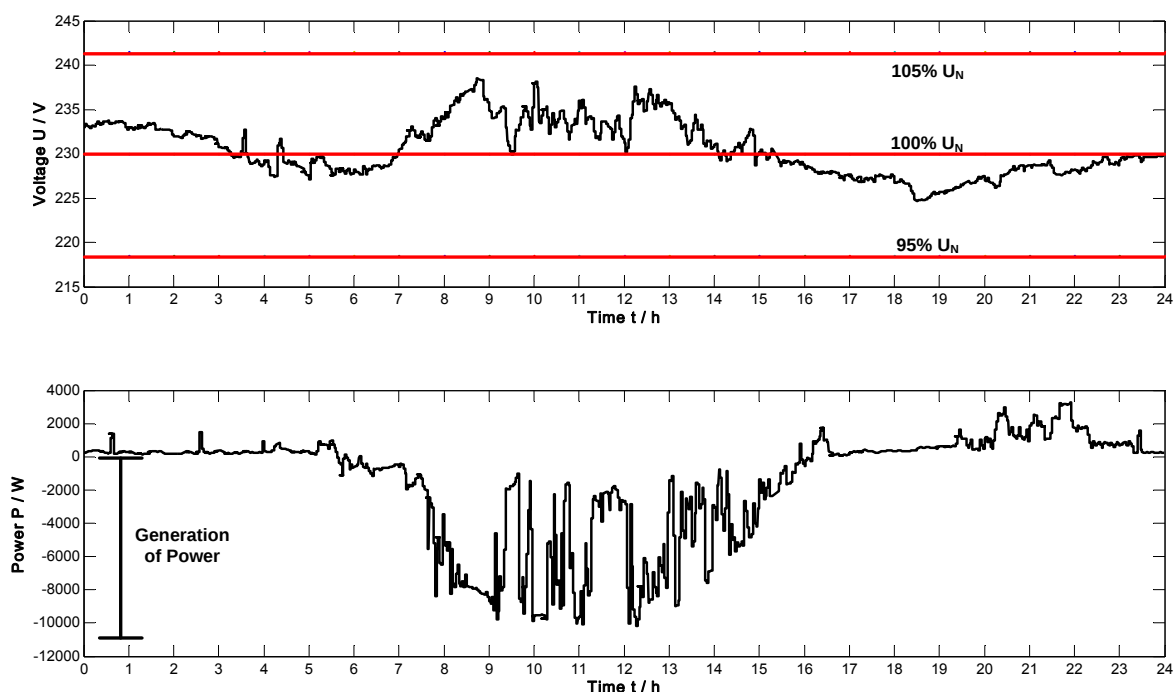


Fig. 2: Exemplarischer Spannungsverlauf an einem Knoten im Niederspannungsnetz bei vorhandener Einspeisung von PV-Anlagen
Exemplary voltage characteristics of a node in a distribution network while PV devices supplying power

The developed methods will be rated with regard to their technical effectiveness and their economical efficiency and verified regarding their general adaptability and assignability in distribution networks. The currently known methods and optimizations inherit several versatile possibilities: Beside estimations with regard to the potential to improve the hosting capacity of photovoltaic systems in low voltage grids there is the possibility to develop a roadmap towards a future smart grid and to determine the necessity of adjustments on basic regulatory conditions.

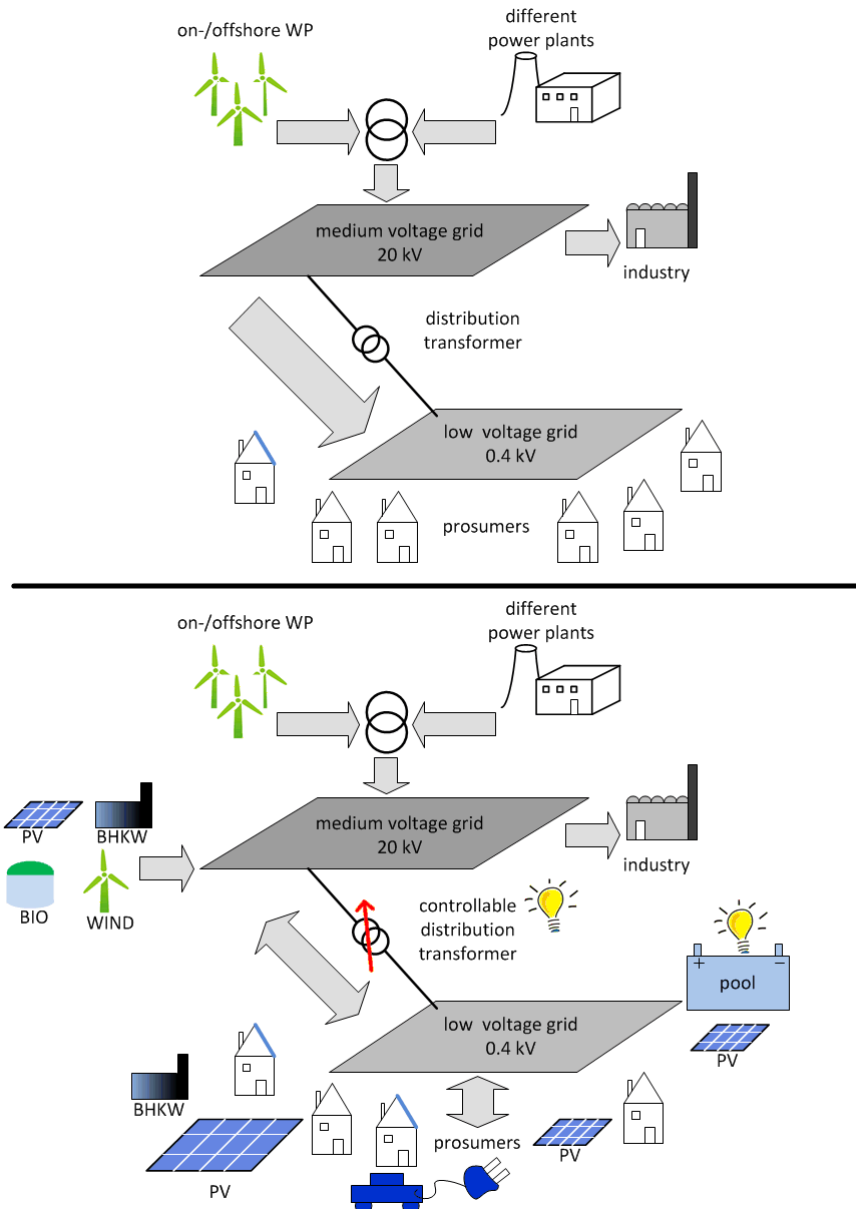


Fig. 3: Mögliche Veränderungen in einem zukünftigen Verteilnetz
Possible changes in a future distribution grid

Mikronetze, der Weg zu flexibleren Stromnetzen

M.Sc. Mohsen Nemati

Auf der Niederspannungsebene können vernetzte Generatoren eine neue Klasse von Versorgungssystemen bilden, das Mikronetz. Ein Mikronetz besteht aus mindestens einem Erzeuger und einer Last. Zum Ausgleich von Abnahme- bzw. Einspeisespitzen ist der Einsatz eines zusätzlichen Energiespeichers denkbar. Fig. 1 zeigt die wichtigsten Komponenten eines Mikronetzes.

Ein privater Haushalt mit eigener Photovoltaikanlage kann ein Mikronetz darstellen, wie beispielweise auch ein Krankenhausnetz oder sogar ein ganzes Niederspannungsnetz. Generell gilt, je größer das Mikronetz, desto niedriger werden die Schwankungen bei Erzeugungs- bzw. Verbrauchsänderungen. Fig. 2 zeigt ein Beispiel eines Mikronetzes für einen Haushalt.

Das Hauptmerkmal der Mikronetze ist ihre Fähigkeit, in zwei unterschiedlichen Modi betrieben zu werden. Diese Teile des Niederspannungsnetzes können entweder im Verbund mit dem übergeordneten Netz oder mit Hilfe neuartiger Leistungselektronik- bzw. Regelungstechnik im Störfall im Stromnetz automatisch getrennt als Inselnetze weiter betrieben werden und so die Versorgungssicherheit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Netzes erhöhen.

Die Wahrscheinlichkeit eines Stromausfalls oder Blackouts reduziert sich durch Inselnetzbildung und verschiedene Lastmanagementverfahren deutlich. Auch durch verteilte Energieerzeugung und Energiespeicher wird die Versorgung weiter sichergestellt.



Fig. 1: Allgemeines Konzept eines Mikronetzes mit verschiedenen Bestandteilen
General Concept of Microgrids with Different Components

■ Microgrids, the way to more flexible power grids

M.Sc. Mohsen Nemati

Microgrids are generally defined as low voltage networks with distributed generators, together with controllable loads and local storage devices for balancing the consumption and generation. Fig. 1 shows important components of microgrids. For example a private household with own photovoltaic modules, electrical grid of a hospital or also entire low voltage grid can build different microgrids. As a general rule, the bigger the microgrids get, the lower the fluctuation of the voltage level, given any specific change in power generation or consumption.

Fig. 2 shows a sample microgrid as a low voltage household (smart home).

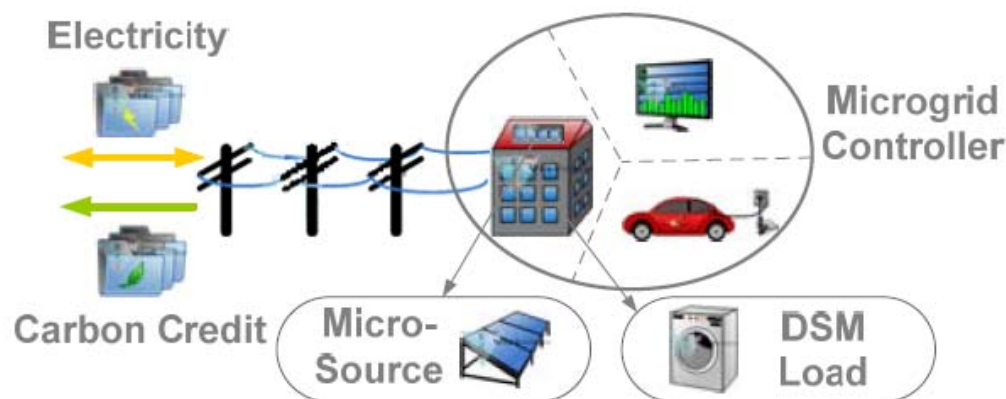


Fig. 2: Beispiel Microgrid als Hausnetz (smart home) - (Quelle: www.microgrids.eu)
Sample microgrid as a low voltage household (Smart home) - (Source: www.microgrids.eu)

The main feature of microgrids is that, although they operate mostly connected to the distribution network, they can be automatically transferred to an islanded mode in case of faults in the superior network and can be resynchronised after restoration of the superior network voltage.

The operation of microgrids offers distinct benefits to customers and utilities, i.e. increasing security of supply, reduction of overall energy consumption, improved energy efficiency, losses reduction and improvement of supply reliability. Local power generation and storage, islanding capability and load management allow portions of the grid and critical facilities to operate independently of the larger grid when necessary and thus reduce blackouts.

One of the positive features of microgrids is relatively short distances between generation and load. Due to this factor the energy losses and overloading of grid elements can be decreased.

In Mikronetzen wird die Energie nahe am Verbraucher erzeugt, deswegen können Verluste und Belastungen von verschiedenen Komponenten im Netz verringert werden.

In Fig. 1 wird das Mikronetz am Verknüpfungspunkt, (engl. Point of Common Coupling, PCC) mit dem Stromnetz verbunden. Die Mikronetz-Leitstelle (engl. Microgrid Central Controller, MGCC) ist verantwortlich für die Steuerung verschiedener Komponenten, wie Wechselrichter, Generatoren und regelbarer Lasten.

Das Konzept der Mikronetze stellt insbesondere im Inselbetrieb hohe Anforderungen an die Regelstrategie, damit Frequenz- bzw. Spannungstoleranzbänder nicht verletzt werden.

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

- Entwicklung von Komponentenmodellen und Optimierung von Spannungs- und Frequenzregelungsmethoden für unsymmetrische Mikronetze.
- Entwicklung des Komponentenmodells eines Endkunden (Smart Home) mit regelbaren lokalen Anlagen (z.B. Wärmepumpen und Elektrofahrzeug).
- Weiterentwicklung eines intelligenten Lastmanagements.

Because of these benefits microgrids have been proposed as novel distribution network architecture within the smart grids concept, which provide higher flexibility and security of supply.

As shown in Fig. 1 a microgrid is connected to upstream network through a Point of Common Coupling (PCC). The Microgrid Central Controller (MGCC) is responsible for the optimization of operation of different components like inverters, generators and loads.

In order to fully exploit the possible advantages of inverter-based islanded microgrids, adequate control strategies that are specifically designed for the Inverters in the islanded microgrid need to be developed.

Future works of IEH focus on following topics:

- Development of models of unbalanced microgrids components and optimization of voltage and frequency control methods.
- Development of smart home models with controllable local devices like heat pumps and electric vehicle.
- Further development of a smart load management system.

■ Auswirkungen von Elektromobilität auf zukünftige Netztopologien

Dipl.-Ing. Alexander Probst

Elektromobilität hat das Potential, in den nächsten Jahren zum Massenmarkt zu werden. Dies hat verschiedene Gründe, wie die Umweltfreundlichkeit und der verringerte CO₂-Ausstoß von Elektroautos. Bereits bei dem derzeitigen deutschen Strommix können Elektroautos mit den sparsamsten Dieselmotoren bei den Emissionen konkurrieren. Darüber hinaus wird sich bei einer zunehmenden Verbreitung von erneuerbaren Energien ein deutlich günstigeres Bild für die Elektroautos ergeben. Abgesehen davon sind Elektroautos lokal emissionsfrei und auch deutlich leiser als konventionelle Fahrzeuge. Dies wird insbesondere in Metropolen die Lebensqualität erhöhen. Ein weiteres politisches Motiv ist auch die Diversifizierung der Primärenergie. Strom kann im Gegensatz zu Diesel und Benzin aus verschiedenen Energiequellen gewonnen werden und nicht nur aus Erdöl. Es ist damit zu rechnen, dass die Energiepreise und insbesondere die Rohölpreise rapide steigen werden. Dadurch können die Gesamtkosten für ein Elektroauto schon bald günstiger sein als für ein herkömmliches Fahrzeug.

Die Frage, die sich daraus ergibt, ist, ob das heutige Stromnetz in der Lage dazu ist, künftigen Elektroautos ausreichend Ladeleistung bereitzustellen. Wie viele Elektroautos verkraftet das Netz? Und gibt es eventuell sogar Möglichkeiten für die Elektroautos, sich an Netzdienstleistungen zu beteiligen und so das Netz zu entlasten? Ziel der Arbeit am IEH ist es, den Einfluss von Elektromobilität auf die Stabilität des Stromnetzes zu untersuchen und gleichzeitig abzuschätzen, inwieweit es Möglichkeiten zur Unterstützung bei Netzdienstleistungen gibt.

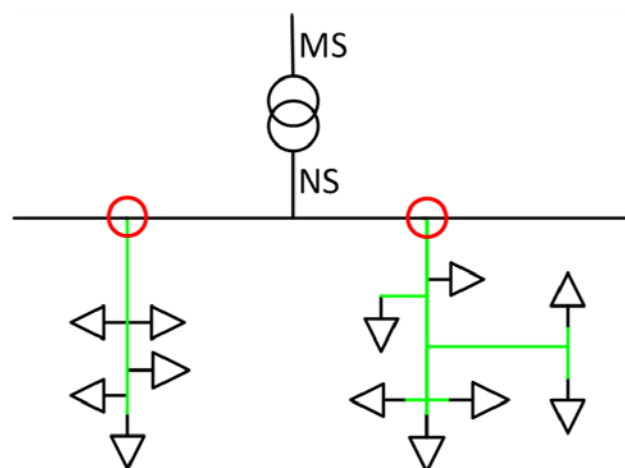


Fig. 1: Exemplarische Darstellung eines Niederspannungsnetzes
Exemplary representation of a low voltage grid

Bei dem in Fig. 1 gezeigten Niederspannungsnetz stellt sich beispielsweise die Frage, wie groß die Leiterquerschnitte an den Abgängen dimensioniert werden müssen. Dies hängt von der Anzahl der angeschlossenen Haushalte ab.

■ Effects of electric mobility on future grid topologies

Dipl.-Ing. Alexander Probst

Electric Mobility has the potential to become a mass market. There are several reasons to sustain this assumption, such as the environmental friendliness of electric cars and the associated reduction of CO₂ emissions. Even with the current German electricity mix, electric cars can already compete with the most fuel-efficient diesel models in emissions. In addition, an increasing share of renewable energies would even amplify these advantages. Beside this, electric vehicles are locally emission-free and quieter than conventional vehicles. This would improve the quality of life especially in metropolitan areas. Beyond that, the resulting diversification of primary energy would be a political motivation. Electricity, in contrast to diesel and gasoline, can be produced from different energy sources and not only from petroleum. The discussion about global peak oil raises concerns about sustainability and future energy prices. It is expected that energy prices and in particular crude oil prices will rise. This may lower the total costs for electric cars below the costs for a conventional vehicle.

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

The aim of my work at the IEH is to examine the influence of electric vehicles on the stability of the power grid and simultaneously to assess to what extent it is possible to support grid services.

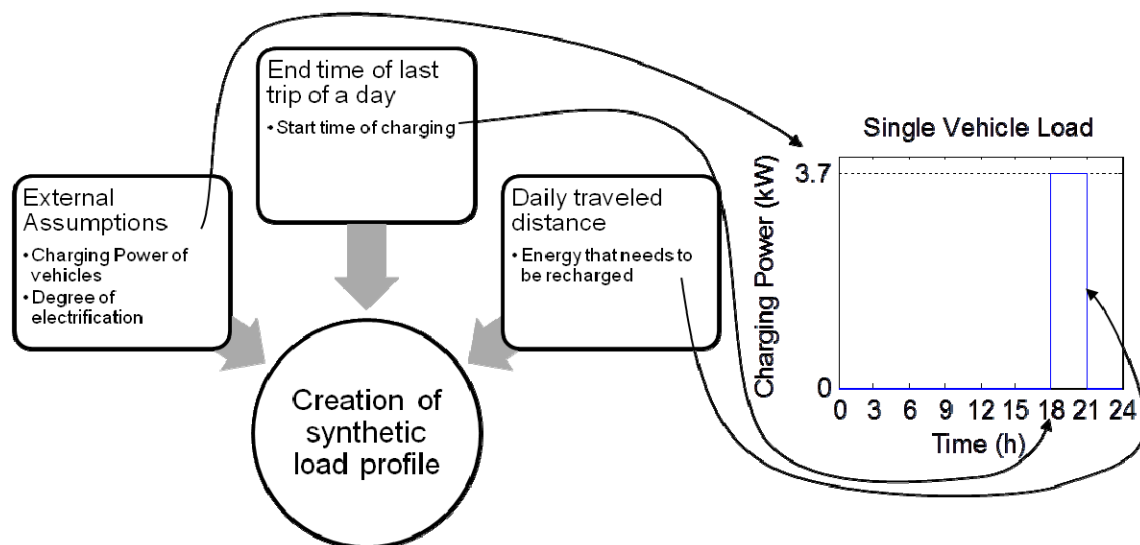


Fig. 2: Erstellung synthetischer Lastprofile für Elektroautos
Creation of synthetic load profiles for electric vehicles

Da in Zukunft einige Haushalte ein Elektroauto laden werden und bereits heute viele Haushalte eine Photovoltaikanlage besitzen, müssen die heutigen Netzplanungsgrundsätze zur Kabeldimensionierung überdacht und angepasst werden. Zu diesem Zweck müssen zukünftige Lastprofile von Elektroautos abgeschätzt werden, was in Fig. 2 skizziert ist. Hierzu ist es notwendig, Annahmen über zukünftige Ladeleistungen und Durchdringungsgrade von Elektroautos zu treffen. Darüber hinaus wird das Mobilitätsverhalten heutiger Autofahrer berücksichtigt, um abzuschätzen, wann ein Fahrzeug nach Hause kommt und geladen wird und wie weit es gefahren ist, um die nachzuladende Energiemenge festzustellen. Weiterhin könnte ein solches Profil durch ein Lademanagement beeinflusst werden, wie dies in Fig. 3 dargestellt ist.

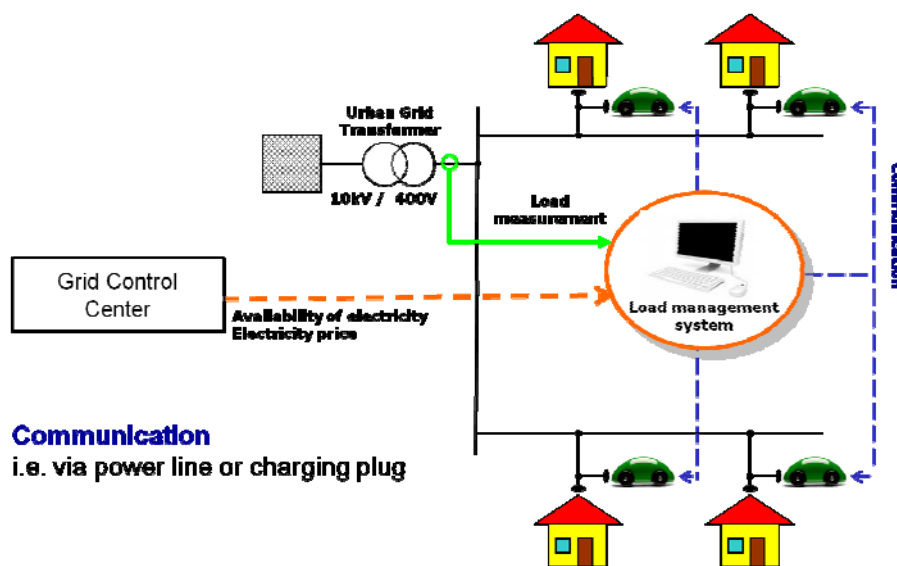


Fig. 3: Beispielhaftes Lademanagement mit Kommunikationskanälen
Exemplary load management with communication channels

Ein solches Lademanagement kann dezentral oder auch zentral mit Kommunikation zu den Fahrzeugen und zum Ortsnetztransformator ausgeführt sein, um beispielsweise seine Belastung mit zu berücksichtigen. In Kombination mit realen Messdaten lässt sich nun abschätzen, welche Leistung bei einer bestimmten Anzahl an Haushalten auftreten kann (siehe Fig. 4).

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

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

The low voltage network shown in Fig. 1, for example, raises the question how large the cable diameters need to be chosen for the feeders. This depends on the number of connected domestic loads.

Today, households are already having photovoltaic systems and some of them will have an electric vehicle in the near future. This causes the need for an adaption of today's network planning principles for cable diameter sizing accounting for these new technologies. Future load profiles of electric vehicles can be estimated, which is outlined in Fig. 2. For this it is necessary to make assumptions about the charging power and market penetration of electric vehicles. In addition, the mobility behavior of today's car owners is taken into account to estimate the starting time and duration of charging, which depend on the arrival time at home and the daily travelled distance. Furthermore, such a profile could be influenced by a load management system, as shown in Fig. 3.

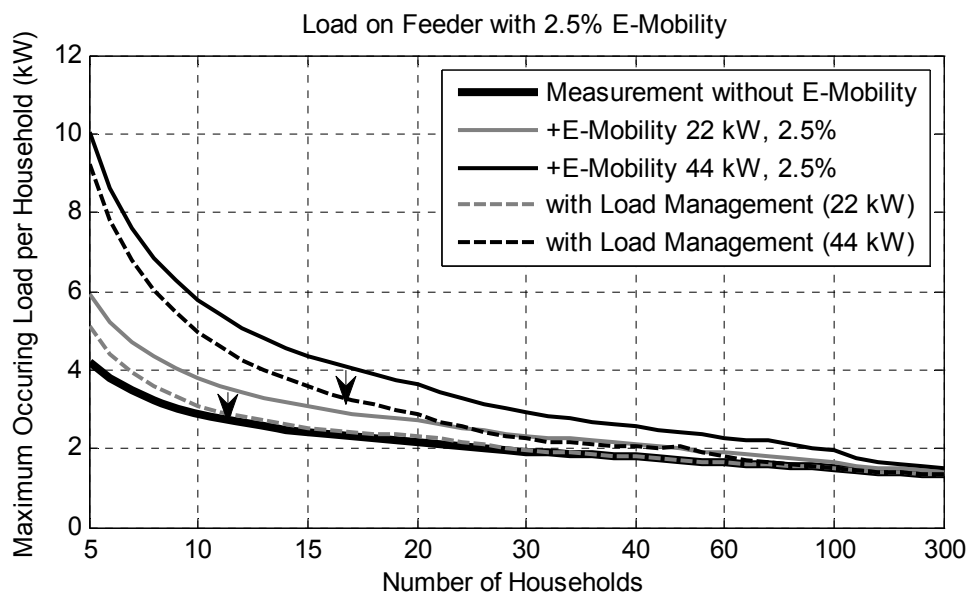


Fig. 4: Spitzenlast pro Haushalt aus Messdaten mit und ohne Elektromobilität
Peak load per household out of measurement data with and without E-Mobility

This load management system can act locally or centrally with communication to the vehicles like depicted in Fig. 3 and decide when and which vehicle to charge. In combination with real measured data, it can now be estimated which peak load is to be expected by considering a certain number of households (see Fig. 4).

It is obvious that electric mobility leads to a significant increase in the occurring peak load, especially for small numbers of households. This results from the fact that they would be charged mainly after work in evening hours when there is already a high demand for electricity. However, the use of a load management system can result in a considerable reduction of peaks.

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

5.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

■ Elektromagnetische Verträglichkeit in Mittelspannungsschaltanlagen

Dipl.-Ing. Dennis Burger

Mittelspannungsschaltanlagen dienen dem Zu- und Abschalten von elektrischen Energieverbrauchern und -Erzeugern zur Mittelspannungsebene eines Energieverteilnetzes. Als Mittelspannung werden in der elektrischen Energietechnik Spannungen von 1 kV bis 40 kV bezeichnet. Der Einsatz von Schwefelhexafluorid (SF_6) als Isolationsmedium für Mittelspannungsschaltanlagen bringt eine deutliche Verringerung des Platzbedarfs und des Wartungsaufwandes gegenüber luftisolierten Anlagen (AIS) mit sich. Aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit hat der Einzug von SF_6 als Isolationsmedium für neue Herausforderungen in der Schaltanlagentechnik gesorgt:

Zum einen haben deutlich verringerte Isolationsabstände für ein nahes Zusammenrücken von Primär- und Sekundärelementen und damit für stärker ausgeprägte Beeinflussungsmechanismen gesorgt. Andererseits generieren Trennschalter unter SF_6 aufgrund der höheren Durchschlagfeldstärke breitbandigere transiente Störgrößen. Höhere Amplituden sowie höhere Frequenzinhalte der sekundärseitigen Störgrößenbeaufschlagung folgen der frequenzbedingt stärkeren Kopplung von der Primär- auf die Sekundärseite (z.B. auf Stromwandlerleitungen).

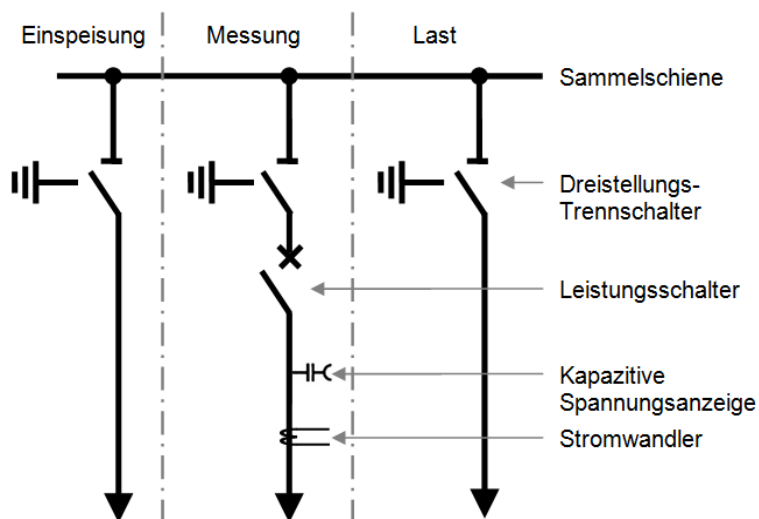


Fig. 1:
Einpoliges Ersatzschalbild
der Test – Schaltanlage

Single line diagram of the
switchgear under test

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

■ Electromagnetic compatibility in medium voltage switchgear

Dipl.-Ing. Dennis Burger

Medium voltage switchgears are built for the controlled connection and disconnection of electric energy consumers and producers to the medium voltage level of power distribution grids. The medium voltage level of power grids ranges from 1 kV up to 40 kV. Using sulfur-hexafluoride (SF_6) as the insulating medium in switchgear results in a significant reduction in space requirements and in maintenance expenses compared to air-insulated switchgear (AIS).

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

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

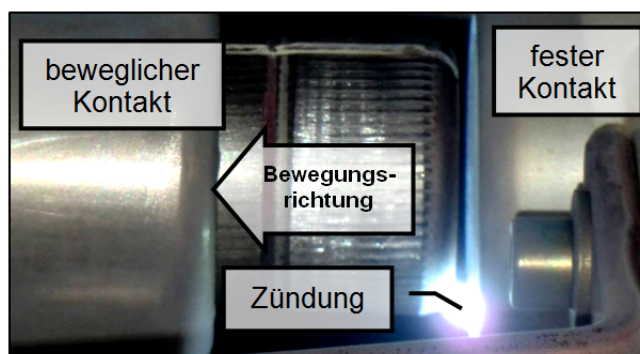


Fig. 2:

Zündung zwischen den Schaltkontakten beim Öffnen des Trenners

Ignition between the disconnector contacts during an opening operation

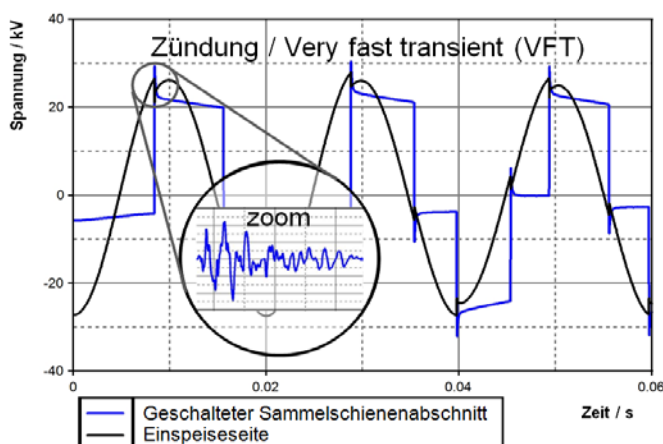


Fig. 3:

Spannungsmessung (der Einspeise- und der Sammelschienenenseite) während der Zündvorgänge

Voltage measurement (of the feeding side and busbar side) during the disconnector arcing process

Entstehung transienter Störgrößen durch Trennschalter Operationen:

Betrachtet wird die spannungsmäßige Trennung eines leerlaufenden Sammelschienenabschnitts durch einen Trennschalter. Unmittelbar nach der galvanischen Trennung der Schalterkontakte befindet sich das abgetrennte Sammelschienenstück aufgrund der verbleibenden Ladungsträger auf einem konstanten Potential (trapped charge). Das Potential des Gegenkontakts verändert sich jedoch mit der Frequenz des speisenden Netzes. Die zunehmende Potentialdifferenz führt zu einem proportional dazu ansteigenden elektrischen Feld zwischen den Trennerkontakten. Schließlich wird die Durchschlagfeldstärke des Isolationsmediums (Luft oder SF₆) überschritten und eine Durchzündung führt zur schlagartigen Umladung des leerlaufenden Sammelschienenstücks. Sobald die Umladung vollzogen ist, erlischt der Lichtbogen und der Prozess startet von Neuem.

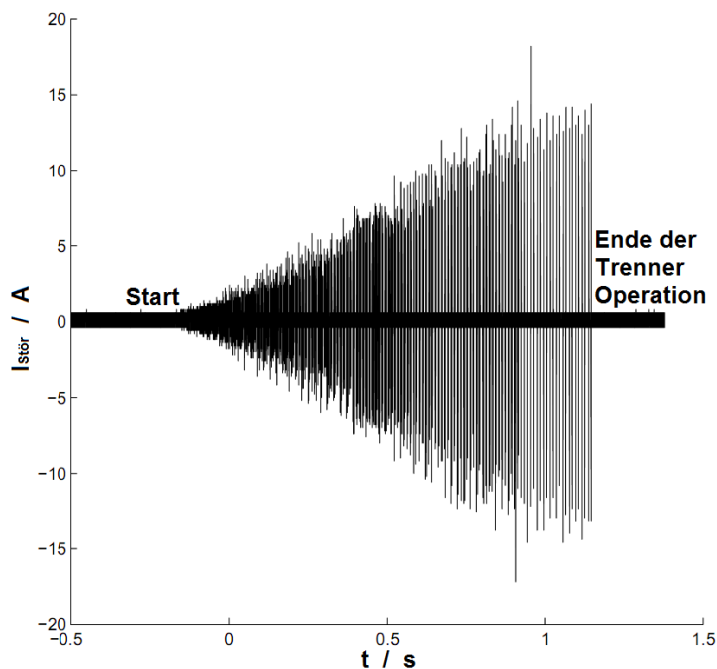


Fig. 4:

Gleichtakt Störstrom auf der Stromwandlerleitung (sekundärseitig) während der Trennung eines leerlaufenden Sammelschienenabschnitts

Common mode disturbance current through the secondary wiring of the current transformer during a disconnector's breaking operation

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

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

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

A commercial SF₆-insulated, three phase metal enclosed switchgear was installed to investigate its EMC behavior. It consists of three switchgear panels, respectively one for feeding and one for the connection of a load. The third switchgear panel is used for the installation of secondary equipment as well as for the measurement of electromagnetic noise.

Generation of transient disturbances by disconnector operations:

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

Immediately after the electrically disconnection of the switch contacts, the disconnected part of busbar stores the actually present charge and remains at a constant voltage (trapped charge effect). However, the potential of the opposite contact changes due to the sinusoidal AC voltage of the feeding side. The increasing potential difference enforces a proportionally rising electric field between the disconnector contacts. Finally, the breakdown field strength of the insulating medium (air or SF₆) is reached and a reignition leads to the sudden reloading of the disconnected part of busbar. Once the charge transfer is completed, the arc extinguishes. This process repeats several times per half cycle. The ignitions occur until the disconnector contacts have reached a sufficient distance not to exceed the breakdown field strength of the insulation medium any more. Enlarging the distance of the disconnector contacts increases the amplitude of the transient travelling waves caused by the charge transfer (see Fig. 3).

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

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

■ Elektromagnetische Verträglichkeit von KFZ-Hochvolt-Bordnetzen

Dipl.-Ing. Jens Hohloch

Mit dem Einsatz von elektrischen Fährantrieben in Kraftfahrzeugen muss das Fahrzeugbordnetz für die Übertragung höherer Leistungen ausgelegt werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Bordnetzen werden deshalb größere Bordnetzspannungen im Bereich mehrerer hundert Volt verwendet. Aufgrund der hohen Zahl von elektrischen und elektronischen Komponenten auf engstem Raum erhält die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eine große Bedeutung. Ein großes Störpotential stellen Strom- und Spannungsänderungen dar, die durch Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter verursacht werden. Um eine Beeinflussung verschiedener Fahrzeugkomponenten zu verhindern, müssen diverse Entstörmaßnahmen, wie z.B. die Schirmung von Leitungen und Komponenten, ergriffen werden. Für die Charakterisierung der Schirmwirkung und des elektromagnetischen Verhaltens von Komponenten des HV-Bordnetzes, wie Leitungen und Steckverbindungen, werden verschiedene Messverfahren untersucht. Bei den Messanordnungen wird am Prüfling ein äußeres Mess- bzw. Speisesystem aufgebaut. Die Beurteilung der Schirmwirkung erfolgt über die Messung des frequenzabhängigen Kopplungsverhaltens (Fig. 1) der beiden Systeme mittels eines Netzwerkanalysators (VNA), die aus den Innenleitern, einem äußeren Leiter der Messvorrichtung und dem Kabelschirm als gemeinsame Impedanz gebildet werden. Zur Untersuchung der Strom- und Spannungsverhältnisse an einem Fahrzeug-Gesamtsystem wurde ein Messsystem entwickelt und in ein Hybridfahrzeug eingebaut, das Strom- und Spannungsverläufe am HV-Bordnetz im Frequenzbereich von DC bis 40 MHz erfassen kann. Die Strom- und Spannungssensoren sind an verschiedenen Stellen im HV-Bordnetz platziert, um die Ausbreitung von Störgrößen näher untersuchen zu können. Die Auswertung der Messsignale erfolgt mittels Oszilloskop im Fahrzeuginnenraum.

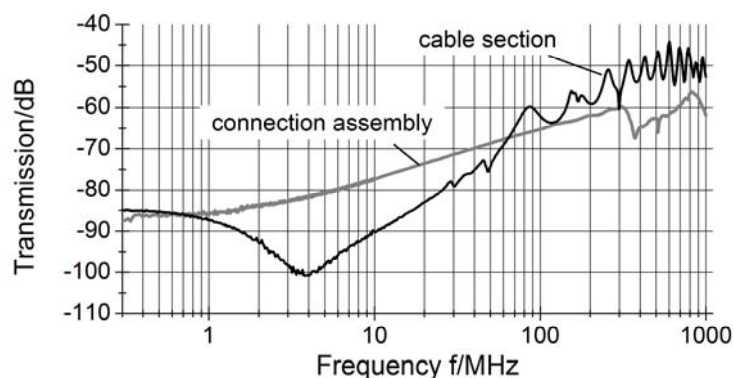


Fig. 1: Kopplungsverhalten zwischen innerem und äußerem System einer geschirmten HV-Komponente im Frequenzbereich von 300 kHz bis 1 GHz
Coupling behaviour between the inner and external system of a shielded HV component in the frequency range from 300 kHz to 1 GHz

■ Electromagnetic compatibility of high-voltage automotive networks

Dipl.-Ing. Jens Hohloch

The use of electrical drive systems in motor vehicles requires an electrical power system which is designed for the transmission of higher power. Compared to conventional automotive electrical systems, there are used higher voltages in the range of several hundred volts. Due to the high number of electrical and electronic devices and components in a limited space, the electromagnetic compatibility in motor vehicles is an important issue. Steep voltage and current edges caused by switched power semiconductors in the high-voltage network are a major source of disturbances. Several measures, such as shielding of HV-cables and components, must be taken to avoid those interferences between different devices of the electrical system. For the qualification of the screening effectiveness and the characterization of the electromagnetic behavior of components of the HV network different measurement methods are investigated. For the experimental set up an external system is built-up around the device under test (DUT) which is used as feeding respectively measuring circuit. The evaluation of the screening effectiveness is done by measuring the frequency dependent coupling transfer function (Fig 1) between the two systems by means of a vector network analyzer (VNA). These systems are formed by the inner conductors of the HV-cable, the cable screen and the external conductor of the measuring device. The cable screen of the DUT acts as common impedance. For the investigation of the electrical characteristics of the high-voltage power train in an overall system, a special measuring system was developed and installed at a car with a mild hybrid system. It can be used to measure current and voltage profiles in a frequency range from DC to 40 MHz. The voltage and current sensors are positioned at suitable positions in the high-voltage network so that the propagation of disturbances can be examined. The evaluation of the measuring signals is done by means of an oscilloscope in the passenger compartment.

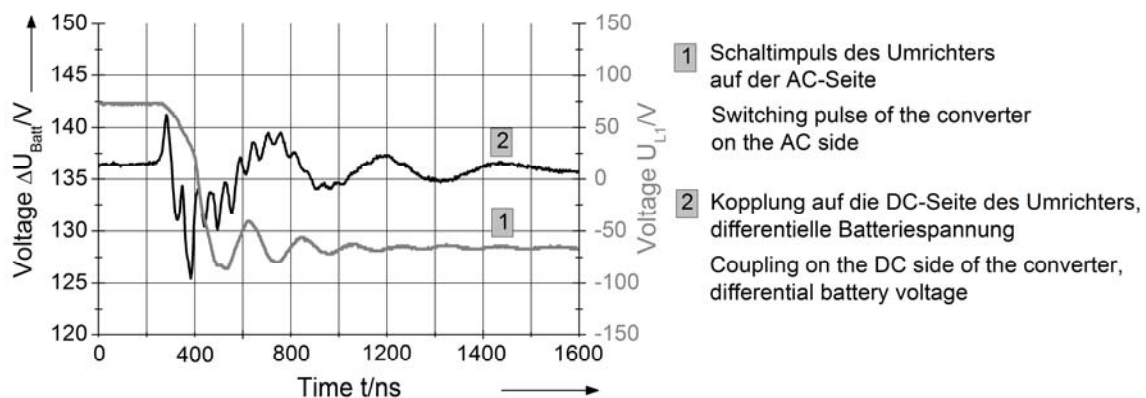


Fig. 2: Beispiel eines gemessenen Impulses auf dem Hochvolt-Bordnetz
Example of an impulse measured on the high-voltage power train

■ **Einfluss der Netzimpedanz von Hochvolt-Systemen in elektrisch angetriebenen Kfz auf EMV-Entstörkonzepte**

Dipl.-Ing. Martin Reuter

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei elektrischen Kfz-Antrieben stellt eine besondere Herausforderung dar: Schnelle Taktflanken in der Leistungselektronik werden für eine möglichst hohe Effizienz benötigt. Im sperrenden bzw. leitenden Zustand sind die Verluste in den Leistungshalbleitern gering, aber während der Zustandsänderung erreicht die Verlustleistung kurzzeitig einige Kilowatt. Um die Verluste und damit auch die Erwärmung gering zu halten, wird versucht, mit steilen Taktflanken den Schaltvorgang möglichst schnell ablaufen zu lassen. Durch steile Taktflanken entstehen allerdings hochfrequente Spektralanteile, die bis in den Frequenzbereich von Radio- und anderen Funkdiensten reichen können. In empfindliche Elektronik, wie etwa Radiovorverstärker, können diese Störungen einkoppeln und die Funktionalität des gesamten Audiosystems beeinträchtigen.

Ein Lösungsansatz zur Verringerung der abgestrahlten Funkstörungen besteht in der vollständigen Schirmung des Hochvolt-Bordnetzes (HV-BN). Dieser Schirm verändert aber den heute üblichen Kabelbaum aus ungeschirmten Einzeladern zu einer geschirmten Koaxialanordnung und dadurch auch die Eingangsimpedanz des Leistungsbordnetzes. Die auf Leitungen befindlichen Störströme und Störspannungen einer Komponente, wie z.B. einer Motorsteuerung, hängen stark von der Impedanz ab, mit der die Störquellen innerhalb der Komponente belastet werden. Deshalb sollte die Eingangsimpedanz der Fahrzeugnachbildung während der EMV-Messung möglichst ähnlich der Lastimpedanz sein, die die Komponente später im Kfz „sieht“, nämlich der Eingangsimpedanz des HV-BN.

Derzeit wird die EMV einer Komponente (DUT – Device under Test, engl. für Prüfling) mit dem in Fig. 1a gezeigten Messaufbau nach der Norm CISPR 25 gemessen. Die Eingangsimpedanz der Bordnetznachbildungen (BNN), die die Lastimpedanz des 12-V-Bordnetzes in einem konventionell betriebenen Fahrzeug nachbilden sollen, ist in dieser Norm definiert und in Fig. 1b dargestellt. Für die Messung von geschirmten Komponenten kann dieser Messaufbau relativ leicht angepasst werden, indem die Schirme der Koaxialkabel auf eine gemeinsame Gehäusemasse mit der BNN gelegt werden, wie das in Fig. 1a gestrichelt angedeutet ist. Allerdings hat dieser Aufbau von der Komponente aus gesehen eine Eingangsimpedanz von $50\ \Omega$ ab etwa 10 MHz. Sollte eine Komponente, deren EMV auf diese Lastimpedanz optimiert wurde, später im Fahrzeug eine davon deutlich abweichende Eingangsimpedanz „sehen“, so könnten getroffene EMV-Maßnahmen wirkungslos, bzw. sogar konterkariert werden.

- **Influence of network impedance in automotive high voltage systems on radio frequency disturbances**

Dipl.-Ing. Martin Reuter

The electrification of the automotive power train requires a novel electrical power bus system. Recent automotive low voltage (LV) networks (12 V) are not able to meet power demands of electric driving engines because of high currents required for power transmission. Automotive high voltage (HV) power networks reduce needed currents to values, which can be handled more efficiently. One major task in developing electric cars is to control their electromagnetic interferences (EMI). Maximum efficiency of power electronics requires fast slew rates of switching semiconductor devices. But fast slew rates result in bus disturbances consisting of radio frequency (RF) spectral components with high amplitudes. These RF disturbances may propagate along HV power lines and are able to interfere with other electronic devices.

A complete shielding of the HV traction network is intended to reduce RF interferences. Thus the network configuration is changed from unshielded single core multi wire harnesses into coaxial conductor layouts, and therefore also the impedance characteristics of the entire network are changed. As the conducted emissions of the interference sources within the power electronics are dependant of their load impedance, the investigated component should be tested in an environment closest possible to vehicle situation. Therefore the DUT should be connected to an impedance, which emulates an automotive HV network, while EMC tests. If the load impedances within component and vehicle level tests match, then the investigated component will also behave in a similar manner.

Recently the EMC on component level is evaluated using a test setup according to CISPR 25, as sketched in Fig. 1a. The vehicle is simulated by two Line Impedance Stabilization Networks (LISN/BNN), their input impedance is shown in Fig. 1b. These LISNs have been developed to emulate an unshielded automotive LV network, but they can easily be adapted for shielded cables. Therefore the shielding is connected to ground at the connecting point of cable and LISNs, as indicated by dashed lines in Fig. 1a. This setup has an input impedance of 50 Ω above 10 MHz. Optimizing the EMC performance of a component to that load impedance, and introducing this component into a vehicle environment differing substantially from this load, chosen EMC countermeasures can become ineffective, or can even intensify RF interferences by unintended resonances.

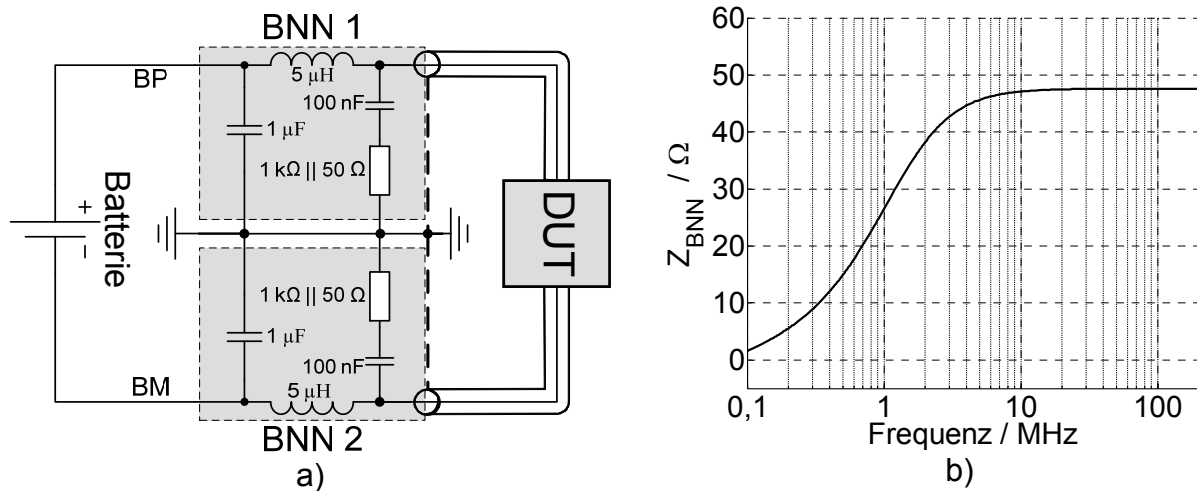


Fig. 1: Messaufbau zur Messung der EMV auf Komponentenebene (a) und Eingangs-Impedanz einer CISPR 25-konformen Bordnetznachbildung (b)
Measurement Setup for Component level EMC tests (a) and Input Impedance of LISN according to CISPR 25 over frequency (b)

Die zusätzliche Schirmung der Hochvoltkabel bringt eine weitere Änderung mit sich: Diese Kabel haben einen konstanten Querschnitt und damit einen konstanten Wellenwiderstand, den es so im Niedervoltbordnetz (12 V) nicht gibt. Messungen zeigen, dass HV-Kabel einen Wellenwiderstand von 6 – 20 Ω besitzen, abhängig von Querschnitt und eingesetztem Dielektrikum. Demnach wären die Versorgungsleitungen des Prüflings an der Stoßstelle zur BNN fehlangepasst und ein Teil der emittierten Funkstörungen würden dort reflektiert werden. Damit werden nicht nur verfälschte Pegel gemessen, sondern an den Resonanzfrequenzen der Hochvoltkabel ließen sich die Emissionen noch nicht einmal abschätzen: Bei diesen Frequenzen können sich stehende Wellen ausbilden, deren Amplitude nur noch von dem Ohm'schen Widerstand des Kabels abhängen.

Solche Resonanzeffekte sind in Fig. 2 dargestellt. Die Kurven zeigen die Funkstörspannung (2a) und den Störstrom (2b) auf einem HV-Kabel in Abhängigkeit dreier Abschlussimpedanzen. Bei einem Abschluss mit 50 Ω , also einer BNN nach CISPR 25, treten zwar niedrigere Ströme, aber dafür überhöhte Spannungswerte auf. Hingegen beim rein kapazitiven Abschluss (0 Ω im betrachteten Frequenzbereich) treten erhöhte Störströme und verringerte Spannungen auf. Bei beiden Abschlüssen können jedoch deutliche Resonanzüberhöhungen durch die Fehlanpassung beobachtet werden, die nur beim Abschluss der Leitung mit ihrem Wellenwiderstand $Z_L = 18,5 \Omega$ stark gedämpft sind.

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

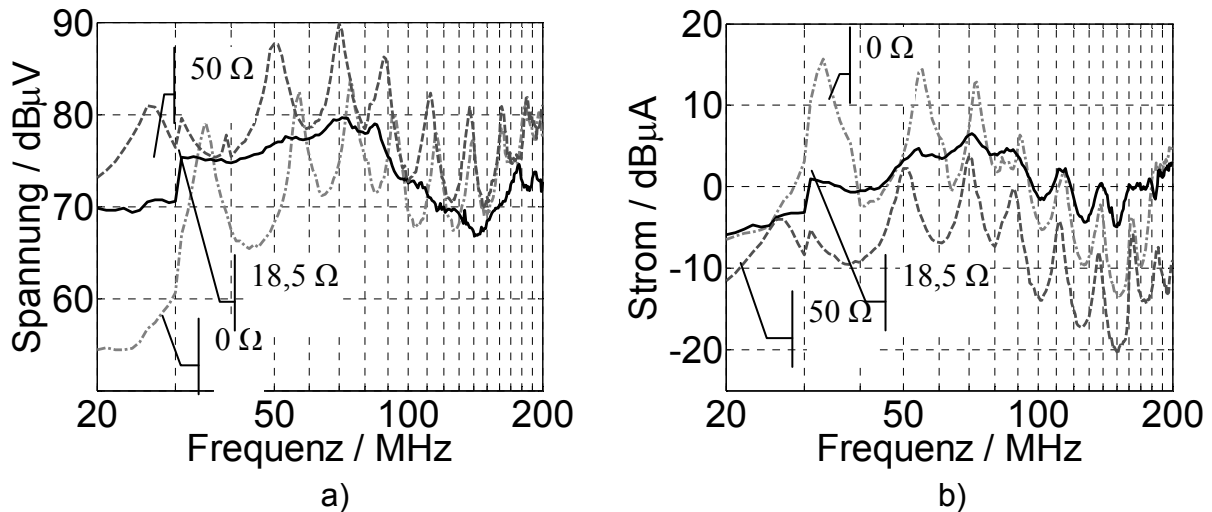


Fig. 2: Funkstörspannung an BNN (a) und Funkstörstrom auf Hochvoltkabel (b) in Abhängigkeit des Abschlusses
Interference voltage at LISN (a) and Disturbance current on HV cable (b) in dependant of Line Termination impedance

The additional shielding of HV cables brings a second effect along: These cables have a constant geometry over their length and therefore a constant wave impedance that does not exist in unshielded LV networks. Measurements show, that automotive HV cables have characteristic impedances in a range of 6 – 20 Ω , dependant on diameter and dielectric constant of their insulating material. Terminating these lines with LISNs an impedance mismatch occurs and conducted emissions are partially reflected. This does not only distort measurement results, but also line resonances and standing waves occur. At resonance frequencies the conducted emissions of a DUT cannot even be estimated, as the amplitudes of standing waves are only limited by the cable resistivities.

Such resonances are shown in Fig. 2. The displayed curves highlight measured RF voltages within attached LISNs (2a) and disturbance currents on the HV cable (2b) dependant on three load impedances. Terminating the line with 50 Ω (LISNs according to CISPR 25) lower disturbance currents are measured, but resonance magnification of the interference voltage occurs. Trying to reduce RF emissions by decoupling the line using a capacitor to ground (0 Ω within investigated frequencies) results in increased currents but reduced voltages. Both terminations show significant exaggerations of conducted emission due to line resonances, which can only be avoided by terminating the cable with its wave impedance $Z_L = 18.5 \Omega$.

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

■ **Vorhersagemethoden der Abstrahlung bei Komponententests nach CISPR 25**

Dipl.-Ing. Daniel Schneider

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

Die erste Methode verfolgt einen mathematischen Ansatz, welcher sich auf ein Hertzsches Dipol Modell stützt. Hierbei wird ein Kabelbaum als Dipol modelliert und die Geometrie des Aufbaus berücksichtigt. Die zweite Methode verwendet zur Bestimmung der Abstrahlung eine messtechnisch erstellte Transferfunktion. Die Erstellung der Transferfunktion kann durch zwei Messverfahren erfolgen: Zum einen über Streuparametermessungen mit einem Netzwerk Analysator (NWA) und zum anderen über einen Messempfänger (ME). Die jeweiligen Transferfunktionen enthalten somit Eigenschaften des gesamten Aufbaus.

Ein Vergleich anhand eines EUT (Equipment under Test) zeigt die Grenzen der Methoden. Eingesetzt wird ein batteriebetriebener Impulsgenerator. Abbildung 1 zeigt hierzu schematisch den Messaufbau, welcher sich auf einem geerdeten Messtisch befindet. Über eine 1 m lange Zweidrahtleitung wird das EUT mit den Bordnetznachbildungen (LISN) verbunden. Der Messaufbau befindet sich in einer Schirmkabine und wird gemäß CISPR 25 aufgebaut. Als Referenz dient eine Messung mittels bikonischer Antenne in horizontaler Polarisierung und ME (Peak). Die zwei Transferfunktionen werden mit derselben Zweidrahtleitung erstellt, welche auch für die Anbindung der DUT verwendet werden. Es erfolgt eine Stromzangenmessung mit einem ME (Peak) für die Berechnung der Feldstärke.

■ **Investigation on radiated emission prediction methods for components according to CISPR 25**

Dipl.-Ing. Daniel Schneider

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

The first method pursues a mathematical approach which bases upon a Hertzian dipole model representing a cable harness and considering the geometry of the test setup. The second method employs a transfer function determined by measurements. For the creation of a transfer function there are two procedures. One is using scattering parameter measurements with a vector network analyzer and another is using a test receiver. Those transfer functions include all aspects of the test setup like near field coupling of the antenna with the setup as well as the geometrical conditions.

A comparison with an equipment under test (EUT) shows the limits of both methods. A batterie powered impulse generator is used. Fig. 1 shows a sketch of the test setup which is mounted on an earthed measurement table. The EUT is connected with two cables to the line impedance stabilisation networks (LISN). The test setup is according to CISPR 25 and situated in a semi anechoic chamber. A reference measurement (Peak) is performed by a test receiver with a biconical dipole in horizontal polarization. The two transfer functions are obtained with the same cables like in the test setup. For the calculation one current probe measurement is performed with a test receiver (Peak) at the same position on the cables like for the transfer functions.

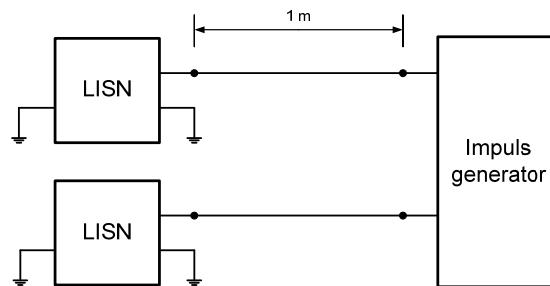


Fig. 1: Messaufbau für den Impulsgenerator
Test setup for the impulse generator

Diese Messung erfolgt an der Position der Leitung, an welcher auch die Messung für die Transferfunktion erfolgt.

Fig. 2a zeigt das Ergebnis, ermittelt mit dem Hertzschen Dipol Modell. Die gemessene Feldstärke E_{meas} befindet sich in einem 40 dB breiten Zielbereich zwischen E_{calc} (Berechnung Dipol im Freiraum) und $E_{\text{calc} + \text{Image}}$ (Berechnung Dipol 5 cm über einer Massefläche). Die berechnete Feldstärke $E_{\text{calc} + 2 \times \text{Image}}$ (Berechnung Dipol 5 cm über einem Tisch, welcher 95 cm über einer Massefläche liegt) liefert ab 100 MHz ein Ergebnis mit einer Genauigkeit von 5 dB. Unterhalb von 100 MHz kommt es zu Abweichungen von bis zu 20 dB. Dies liegt an der Modellierung des nicht unendlich ausgedehnten Messtisches, den vernachlässigten Beugungseffekten an Kanten und der Nahfeldkopplung zwischen Messaufbau und Antenne. Effekte der Schirmkabine, welche im Messsignal enthalten sind, können zu Abweichungen führen.

In Fig. 2b sind die Ergebnisse beruhend auf der Transferfunktionsmethode zu sehen. Beide Transferfunktionen liefern sehr gute Vorhersageergebnisse. Im direkten Vergleich zwischen Hertzischem Dipol Modell zur Transferfunktion kann mit der Transferfunktionsmethode über den gesamten Frequenzbereich die genauere Vorhersage getroffen werden. Dies begründet sich darin, dass der verwendete Impulsgenerator, wie auch die Signalquelle bei der Erstellung der Transferfunktion, einen Eingangswiderstand von 50 Ω besitzt. Damit sind die Transferfunktionen impedanzverhältnismäßig abgestimmt. Bei Veränderung der Impedanzverhältnisse verändert sich die Genauigkeit der Vorhersage.

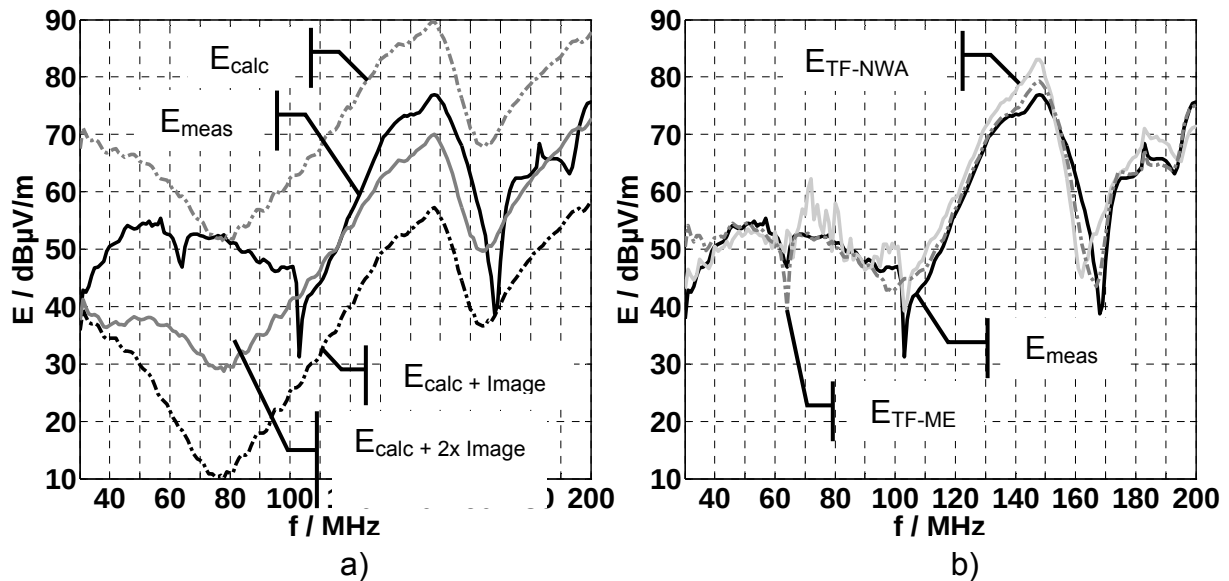


Fig. 2: a) Vergleich der gemessenen und mittels Hertzischem Dipol Modell berechneten Störaussendung des Impulsgenerators
Comparison of measured and with Hertzian dipole model calculated emissions of the impulse generator
b) Vergleich der gemessenen und mittels Transferfunktion ermittelten Störaussendung des Impulsgenerators
Comparison of measured and with transfer function calculated emissions of the impulse generator

Fig. 2a shows the result of the Hertzian Dipole model. The measured field strength E_{meas} is in a 40 dB wide corridor inbetween E_{calc} (calculation dipole in freespace) and $E_{\text{calc}} + \text{Image}$ (calculation dipole 5 cm over conducting plane). The calculated field strength $E_{\text{calc}} + 2x \text{ Image}$ (calculation dipole 5 cm over a table which is 95 cm over a conducting plane) gives a result with an accuracy of 5 dB beginning from 100 MHz. Below 100 MHz there are differences up to 20 dB. This is because of the model regarding measurement table, lack of diffraction on edges and near field coupling between the antenna and the test setup. Effects of the semi anechoic chamber, included in the measurement signal, can lead to differences.

Fig.2b shows the results of the transfer function method. Both transfer functions lead to a very good result. Directly compared to the Hertzian Dipole model the transfer function is more precise. This is because of the 50Ω input resistance of the used impulse generator, which has the same value like the signal source that is used for the generation of the transfer functions. Hence the transfer functions are adapted in reference to the impedances of the test setup. With changing impedances the accuracy of the result will decrease.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

K. Büdenbender, T. Stetz, R. Emmerich, F. Bätz-Oberhäuser, H. Einfeld, M. Braun
Ladestrategien für Elektrofahrzeuge.

VDE Kongress "E-Mobility", Leipzig, 8.-9. November 2010

A. Probst, S. Tenbohlen

Herausforderungen und Chancen für das Stromnetz durch Elektromobilität.

VDE-Kongress 2010 - E-Mobility: Technologien - Infrastruktur - Märkte, Leipzig, November 2010

N. Schmidt, S. Tenbohlen

Beurteilung der Überlastbarkeit von ON-gekühlten Leistungstransformatoren.

EW - Das Magazin für die Energie Wirtschaft, Jg. 109 (2010), Heft 25, S. 70-74

R. Bründlinger, C. Mayr, H. Fechner, M. Braun, K. Ogimoto, K. Frederiksen, B. Kroposki, G. Graditi, I.F. MacGill, D. Turcotte, L. Perret

Bringing together international research on High Penetration PV in Electricity Grids – The new Task 14 of the IEA-PVPS programme.

4th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources, Albuquerque, New Mexico, USA, 6.-10. December 2010

M. Duval, I. Hoehlein, F. Scatiggio, M. Cyr, M. Grisaru, R. Frotscher, M. Martins, L. Bates, P. Boman, A.C. Hall, G. Wilson, L. Arvidsson, M. Szebeni, K. Carrander, H. Athanassatou, A.M. Haug, A. Moellmann, H.J. Knab, J. VanPeteghem, G. Buchgraber, S. Tenbohlen, R. Maina, B. Pahlavanpour, P. McShane, C. Myers, R. Martin, Z. Wang

DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria.

ELECTRA No. 253, December 2010, page 85-89; see also Technical Brochure No. 443, WG D1.32

E. Gulski, T. Strehl, M. Muhr, S. Tenbohlen, S. Meijer, M.D. Judd, R. Bodega, E. Lemke, R.A. Jongen, S. Coenen, B. Larzelere, M. Hanai, P. Agoris

Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements.

ELECTRA No. 253, December 2010, page 91-95; see also Technical Brochure No. 444, WG D1.33

M. Koch, S. Tenbohlen

Evolution of Bubbles in Oil-Paper-Insulation Influenced by Material Quality and Aging.

IET Electr. Power Appl., Jan. 2011, Vol. 5, Iss. 1, pp. 168-174

A.U. Schmiegeler, P. Knaup, A. Meißner, M. Braun, M. Landau, K. Büdenbender, R. Geipel, C. Vachette, H.-D. Mohring, J. Binder, D.U. Sauer, D. Magnor, C. Jehoulet, H. Schuh

Leistungsfähigkeit und Verhalten von PV- Speichersystemen, Erfahrungen mit Sol-ion Systemen.

26. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2.-4. März 2011

K. Büdenbender, H. Barth, M. Braun, P. Strauß

Eigenverbrauch: Wirtschaftlichkeit und Technik, neue Einspeiseregeln.

26. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2.-4. März 2011

M. Reichmuth, I. Erfurt, K. Büdenbender, H. Barth, M. Braun

Eigenverbrauch von PV-Strom – Wohin führt die letzte EEG-Änderung?

26. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2.-4. März 2011

K. Büdenbender, M. Braun, U. Thomas, A. Schmiegeler, D. Magnor, J.C. Marcel

Verbesserung der PV-Integration in das Verteilnetz.

ep Photovoltaik, 3/4 2011

G.A. Taylor, C.J. Axon, D. Wallom, S. Salvini, L. Lewin-Eytan, S. Grenard, M. Braun, P. Lang

Developing novel high performance computing and messaging solutions for smart distribution network operation.

Novel Solutions for ICT as the Backbone of Smart Distribution, Darmstadt, 12.-14. April 2011

D. Burger, S. Tenbohlen, W. Köhler, W. Ebbinghaus

Investigation of Electromagnetic Disturbance Sources in Medium Voltage Switchgear.

21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Frankfurt, June 6-9, 2011, Paper No. 0388

A. Probst, M. Siegel, M. Braun, S. Tenbohlen

Impacts of Electric Mobility on Distribution Grids and Possible Solution through Load Management.

21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Frankfurt, June 6-9, 2011, Paper No. 0126

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

Current Characteristics of Serial and Parallel Low Current Arc Faults in Distribution Networks.

21st International Conference on Electrical Distribution (CIRED), Frankfurt, June 6-9, 2011, Paper No. 0181

J. Smajic, W. Holaus, A. Troeger, S. Burow, R. Brandl, S. Tenbohlen

HF Resonators for Damping of VFTs in GIS.

International Conference on Power Systems Transients, Delft, Netherlands, June 14-17, 2011, Proceedings of the IPST, Paper No. 185

D. Vukovic, S. Tenbohlen, J. Harthun, C. Perrier, H. Fink

Breakdown Strength of Vegetable-based Oils Under AC and Lightning Impulse Voltages.

17th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, Norway, June 26-30, 2011, Paper No. 116

M. Jovalekic, D. Vukovic, S. Tenbohlen

Dissolved gas analysis of alternative dielectric fluids under thermal and electrical stress.

17th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, Norway, June 26-30, 2011, Paper No. 97

M. Jovalekic, D. Kolb, S. Tenbohlen, L. Bates, R. Szewczyk

A Methodology for Determining Water Saturation Limits and Moisture Equilibrium Diagrams of Alternative Insulation Systems.

17th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, Norway, June 26-30, 2011, Paper No. 122

M. Beltle, S. Tenbohlen

Investigations on Vibrations of Power Transformers.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-073

M. Heindl, M. Beltle, M. Reuter, D. Schneider, S. Tenbohlen

Investigation of GIC related Effects on Power Transformers using modern Diagnostic Methods.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-077

D.T. Oyedokun, C.T. Gaunt, S. Tenbohlen, M. Heindl, M. Beltle, M. Reuter, D. Schneider

Laboratory Test for GIC Effects on Power Transformers.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. B-037

S. Burow, S. Tenbohlen, W. Köhler, J. Smajic, A. Tröger, W. Holaus

Can ferrite Materials or resonant Arrangements reduce the Amplitudes of VFTO in GIS?

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. B-035

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

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

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. D-075

M. Heindl, S. Tenbohlen, R. Wimmer

Transformer Modeling Based on Standard Frequency Response Measurements.
17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-076

A. Müller, M. Jovalekic, S. Tenbohlen

Assessment of Oil Analysis Data for Medium Voltage Distribution Transformers.
17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-070

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

Correlation of DGA, UHF PD Measurement and Vibration Data for Power Transformer Monitoring.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-071

S. Coenen, A. Müller, M. Beltle, S. Kornhuber

UHF and Acoustic Partial Discharge Localisation in Power Transformers.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. D-015

A. Weinläder, N. Schmidt, S. Tenbohlen, J. Harthun, H. Fink, S. Chen

Thermal-Hydraulic Investigation of a Large Power Step Up Transformer.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. H-015

A. Pfeffer, S. Tenbohlen, S. Kornhuber

Influences of PD Location and Frequency ranges on Measured Apparent charges.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. D-40

A. Pfeffer, S. Tenbohlen, S. Kornhuber

Pulse-Sequence Analysis of Partial Discharges in Power Transformers.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. D-41

M. Jovalekic, D. Vukovic, S. Tenbohlen

Dissolved gas analysis of alternative dielectric fluids under thermal and electrical stress.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. F-067

M. Jovalekic, S. Tenbohlen, L. Bates and R. Szewczyk

Water saturation limits and moisture equilibrium diagrams of alternative insulation materials.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany,
August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. E-077

S. Tenbohlen, F. Vahidi, J. Gebauer, M. Krüger, P. Müller

Assessment of Power Transformer Reliability.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. G-026

G.T. Velez, A. Weinläder, S. Tenbohlen, P.K. Petrov

Verification of Analytical Expressions for Calculation of the Resistance to Ground of Single Conductive Concrete Encased Grounding Electrodes by FEM.

17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. A-009

W. Yan, M. Braun, J. von Appen, E. Kämpf, M. Kraiczy, C. Ma, T. Stetz, S. Schmidt
Operation Strategies in Distribution Systems with High Level PV Penetration.

ISES Solar World Congress, Kassel, August 28 - September 2, 2011

R. Estrella, P. Strauss, M. Braun, S. Karres, W. Klaus, I. Rodriguez, A. Moreno, A. Samaniego, L. Manzano

PV-Battery-Biofuel Hybrid System for ZERO Fossil Fuel Electricity Generation on the Galapagos Islands.

ISES Solar World Congress, Kassel, August 28 - September 2, 2011

A. Abdel-Majeed, R. Viereck, F. Oechsle, M. Braun, S. Tenbohlen

Effects of Distribution Generators from Renewable Energy on the Protection System in Distribution Networks.

UPEC - 46th International Universities' Power Engineering Conference, Soest, September 5-8, 2011

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

Influence of Capacitive and Inductive Loads on the Detectability of Arc Faults.

57th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Minneapolis, USA, September 11-14, 2011, Proceedings of the 57th Holm Conference

N. Schmidt, S. Tenbohlen, R. Skrzypek, B. Dolata

Assessment of Overload Capabilities of Power Transformers.

Cigre SC A2 & D1 Joint Colloquium, Kyoto, Japan, September 11-16, 2011, Proceedings of the Cigre A2/D1 Joint Colloquium, Paper No. PS1-O-28

M. Braun, C. Ma

*Improving Capacity Utilization - Low Voltage Grids with high Photovoltaic penetration
The Electric Power System of the Future - Integrating supergrids and microgrids.*

CIGRE Symposium, Bologna, September 13-15, 2011 (Vortrag von C. Ma)

D. Burger, S. Tenbohlen, W. Köhler, W. Ebbinghaus

Sources of Transient Electromagnetic Disturbance in Medium Voltage Switchgear.

EMC Europe 2011, York, United Kingdom, September 26-30, 2011, Paper No. 114

J. Hohloch, W. Köhler, S. Tenbohlen, M. Aidam, T. Krauß
Measurement of Conducted Interferences in Automotive High-Voltage Power Networks.

EMC Europe 2011, York, England, September 26-30, 2011, Paper No. 250

M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler, A. Ludwig
Impedance Analysis of Automotive High Voltage Networks for EMC Measurements.
10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, York, England, UK, September 27-29, 2011, Conference Proceedings, Paper No. 130

M. Koch, M. Jovalekic, S. Tenbohlen
Diagnostic Tests for Ester Filled Transformers.

CIGRE SC A2 & D1 Joint Colloquium, September 2011, Kyoto, Japan

S. Rätzke, M. Koch, S. Tenbohlen, M. Jovalekic, A. Marinescu, I. Budan
Monitoring the water content in power transformers during oven drying process.
CIGRE SC A2 & D1 Joint Colloquium, September 2011, Kyoto, Japan

M. Jovalekic, S. Tenbohlen, L. Bates, R. Szewczyk
Water saturation limits and moisture equilibrium diagrams of alternative insulation materials.

CIGRE SC A2 & D1 Joint Colloquium, September 2011, Kyoto, Japan

E. Rahimpour, S. Tenbohlen
Fault Diagnosis of Actual Large-Power High-Voltage Windings using Transfer Function Method.

Archives of Electrical Engineering, Vol. 60, No. 3, pp. 269-281, September 2011

H. Barth, M. Jung, M. Braun, B. Schmülling, U. Reker
Concept Evaluation of an Inductive Charging System for Electric Vehicles.
3rd European Conference SmartGrids and E-Mobility, München, October 18, 2011

M. Fischer, S. Tenbohlen, M. Schaefer, R. Haug
Determining Power Transformers' Sequence of Service in Power Grids.
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, Issue 5, pp. 1789-1797, October 2011

M. Koch, S. Rätzke, M. Freiburg, M. Jovalekic
Monitoring of the Drying Process of Power Transformers Using Dielectric Response Analysis.

10th HRO CIGRÉ Session, Cavtat, November 6-10, 2011

M. Braun, J. von Appen, W. Yan, E. Kämpf, T. Stetz, C. Ma
Maßnahmen für eine verbesserte PV-Netzintegration / Measures for improved PV grid integration.

Internationaler ETG-Kongress, Würzburg, 8.-9. November 2011, Beitrag Nr. P31

A. Probst, M. Braun, S. Tenbohlen

Erstellung und Simulation probabilistischer Lastmodelle von Haushalten und Elektrofahrzeugen zur Spannungsbandanalyse.

Internationaler ETG-Kongress, Würzburg, 8.-9. November 2011, Beitrag Nr. P06

F. Bätz-Oberhäuser, F. Ackermann, H. Einfeld, R. Horff, R. Emmerich, M. Braun

Multifunktionale Stromrichtersysteme zur Nachbildung netzgekoppelter Elektrofahrzeuge.

Internationaler ETG-Kongress, Würzburg, 8.-9. November 2011, Beitrag Nr. P71

M. Jung, H. Barth, M. Braun

Höher integrierter Stromrichter - Kombiniert kabelgebundenes und induktives Laden von Elektrofahrzeugen.

Internationaler ETG-Kongress, Würzburg, 8.-9. November 2011, Beitrag Nr. 3.12

T. Stetz, M. Braun, H.-J. Nehrkorn, M. Schneider

Maßnahmen zur Spannungshaltung in Mittelspannungsnetzen – Welchen Beitrag können dezentrale Energieerzeugungsanlagen leisten? / Methods for Maintaining Voltage Limitations in Medium Voltage Systems.

Internationaler ETG-Kongress, Würzburg, 8.-9. November 2011, Beitrag Nr. 1.12

M. Speckmann, F. Schlögl, P. Hochloff, K. Lesch, T. Stetz, M. Braun

The RegModHarz Architecture – Facing the Challenges caused by Transformation to a Distributed Energy System.

International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 7, Nr. 4, 2011

T. Stetz, M. Braun

Dezentrale Verfahren zur Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen – eine Fallstudie.

Elektrotechnik & Informationstechnik, Vol. 128, Nr. 4, 2011

K. Büdenbender, M. Braun, T. Stetz, P. Strauß

Multifunctional PV Systems Offering Additional Functionalities and Improving Grid Integration.

International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 7, Nr. 2, 2011

S. Tenbohlen, A. Probst, P. Wajant

Neuer Strom in alten Netzen?

In: Erneuerbare Energie, 3. Auflage, S. 112-119. Herausgeber Thomas Bürke und Roland Wengenmayr, © 2012 WILEY-VCH Verlag

A. Weinläder, W. Wu, S. Tenbohlen, Z. Wang

Prediction of the Oil Flow Distribution in Oil-immersed Transformer Windings by Network Modelling and CFD.

IET Electric Power Applications (paper accepted for publication, Manuscript ID: EPA-2011-0122)

S. Coenen, S. Tenbohlen, R. Heywood, M. Boltze

Prospects and Limits of on-site PD Measurement Technique.

2011 International Conference of Doble Clients, Boston, 2011

S. Tenbohlen, A. Pfeffer, S. Coenen

On-site Partial Discharge Measurement in Power Transformers by UHF Sensors.

Highvolt Symposium, Dresden, 2011

M. Koch, S. Rätzke, M. Krüger, S. Tenbohlen

A Systematic Benchmark of today's Moisture Assessment Methods for Power Transformers.

Matpost 2011, Lyon, France, 2011

S. Tenbohlen

Herausforderungen und Lösungen für die Energieversorgungsnetze.

Stiftungsreihe 93, ISSN 0932-156x, Alcatel-Lucent Stiftung, Stuttgart 2011

7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

- 8.-9.11.10 VDE-Kongress 2010 „Smart Cities“, Leipzig, Prof. Tenbohlen, Prof. Braun, A. Probst
- 12.1.11 Meeting der CIGRE-Arbeitsgruppe WG D1.25 „Application Guide for PD Detection in GIS using UHF for Acoustic Method“, Prof. Tenbohlen
- 10.2.11 VDE Kassel, Jahresmitgliederversammlung, Kassel, Vortrag Prof. Braun
- 11.2.11 Sitzung des deutschen Arbeitskreises der CIGRE SC D1 „Materials and Emerging Test Techniques“ in Kassel, Prof. Tenbohlen
- 24.2.11 Erneuerbare Energien Tage, Die Netzwerkpartner, Düsseldorf, Vortrag Prof. Braun
- 2.-4.3.11 26. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, Prof. Braun
- 15.3.11 Besprechung des ETG-Fachbereichs Q2 „Werkstoffe, Isoliersysteme und Diagnostik“ in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 27.-31.3.11 Meeting der CIGRE-Arbeitsgruppen
WG D1.35 “Performance of high voltage and high current measurement systems for high voltage testing”,
WG D1.36 “Special requirements for dielectric testing of Ultra High Voltage (UHV) equipment”,
WG D1.37 “Maintenance and evaluation of measuring procedures for conventional and unconventional partial discharge testing”
und der Advisory Group D1.02 „High Voltage and High Current Testing and Diagnostic“
in Stralsund, Prof. Tenbohlen
- 12.-14.4.11 Symposium “Distribution systems of the future: Novel solutions of the information and communication technology as the backbone of Smart Distribution” in Darmstadt, Prof. Braun
- 14.-15.4.11 Meeting der CIGRE-Arbeitsgruppe WG A2.37 „Transformer Reliability Survey“ bei Maschinenfabrik Reinhausen in Regensburg, Prof. Tenbohlen, Frau Vahidi
- 24.5.11 Treffen BSW AK Netzfragen, Prof. Braun
- 6.-9.6.11 International Conference and Exhibition on Electricity distribution (CIRED) in Frankfurt, Papers von D. Burger und A. Probst, weitere Teilnehmer: P. Müller und Prof. Tenbohlen
- 14.-17.6.11 International Conference on Power Systems Transients, Delft, Simon Burow

- 20.-22.6.11 CIGRE JWG A2/C4.39 „Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System“, Meeting in Nijmegen, Niederlande, M. Heindl
- 30.6.11 6th General Assembly of the European Photovoltaic Technology Platform, Brüssel, Vortrag Prof. Braun
- 22.-26.8.11 17th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Hannover, Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, M. Beltle, S. Burow, M. Heindl, M. Jovalekic, Dr. W. Köhler, A. Müller, M. Reuter, D. Schneider, D. Vukovic
- 5.-8.9.11 UPEC 2011, 46th International Universities' Power Engineering Conference, Soest, Vortrag von A. Abdel-Majeed
- 8.9.11 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Keynote plenary presentation von Prof. Braun
- 11.-16.9.11 CIGRE SC A2 & D1 Joint Colloquium in Kyoto, Japan, Prof. Tenbohlen
- 22.9.11 Sitzung DKE 1911.5 Netzintegration Elektromobilität, Kassel, Prof. Braun
- 26.-30.9.11 EMC Europe 2011, „10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility“, York, England, UK, W. Köhler, D. Burger, J. Hohloch, M. Reuter, Vorträge von D. Burger, J. Hohloch, M. Reuter
- 29.9.11 „Sicherheit und Datenschutz bei Smart Energy“, Fachkonferenz und Berliner Gespräch, gemeinsame Veranstaltung des Münchner Kreis und der Alcatel-Lucent-Stiftung, Prof. Tenbohlen
- 12.10.11 des deutschen Arbeitskreises der CIGRE SC A2 „Leistungstransformatoren“ in Regensburg, Prof. Tenbohlen
- 19.-20.10.11 Fachtagung „Photovoltaik und Netzintegration“, Vortrag Prof. Braun
- 7.-8.11.11 ETP-Konferenz „Die intelligente Netzleitstelle im Smart Grid“, Düsseldorf, Vortrag Prof. Braun
- 8.-9.11.11 ETG-Kongress „Umsetzungskonzepte nachhaltiger Energiesysteme – Erzeugung, Netze, Verbrauch“ in Würzburg, Prof. Tenbohlen, Prof. Braun, A. Probst
- 15.11.11 GMM-Fachtagung: „EMV von Elektro- und Hybridfahrzeugen“, Zwickau, J. Hohloch, M. Reuter, D. Schneider
- 22.-23.11.11 ETG-Workshop „Feldsteuernde Isoliersysteme“ in Darmstadt, Prof. Tenbohlen, D. Vukovic
- 29.11.11 Treffen der CIGRE WG D1.31 “Dielectric Performance of insulating liquids for transformers” in Stuttgart, Prof. Tenbohlen, D. Vukovic
- 11.-15.12.11 Forschungsaustausch mit Universität Kapstadt, Prof. Tenbohlen, M. Reuter und Studierende aus der Crossing Borders-Gruppe der Erneuerbaren Energien

8. EREIGNISSE UND KONTAKTE

Acht Monate lang bis Ende August 2011 arbeitete Herr Laurentiu-Viorel BADICU von der Politehnica Bukarest als Gastwissenschaftler bei uns. Herr Jimmy Cesar GONZALEZ ARISPE aus San Juan/Argentinien war mit Unterstützung des DAAD sechs Monate am IEH tätig.

Außerdem besuchte uns Herr Dr.-Ing. habil. Zbigniew NADOLNY aus Poznan im Rahmen des ERASMUS-Lifelong Learning Programm und hielt Vorlesungen. Ebenfalls aus Poznan war Prof. Dr.-Ing. habil Krzysztof SIODLA zu Gast.

Im Rahmen eines BMBF-Projekts arbeitete Herr David OYEDOKUN (University of Cape Town/Südafrika) zwei Monate auf dem Gebiet „Geomagnetic Induced Currents“ am Institut. Frau Janine Jagers (Eskom, Südafrika) arbeitete drei Wochen auf dem Gebiet der Auswertung von Transformatorausfällen.

Traditionell fand auf dem Söllerhaus vom 6.-8. April 2011 der Workshop der akademischen Mitarbeiter statt. Sie berichteten über den Stand ihrer Arbeit und nutzten die Möglichkeit zu Diskussionen.

Der Oktober-Workshop (5.-7.10.2011) auf dem Söllerhaus wurde gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der University of Cape Town/Südafrika durchgeführt.



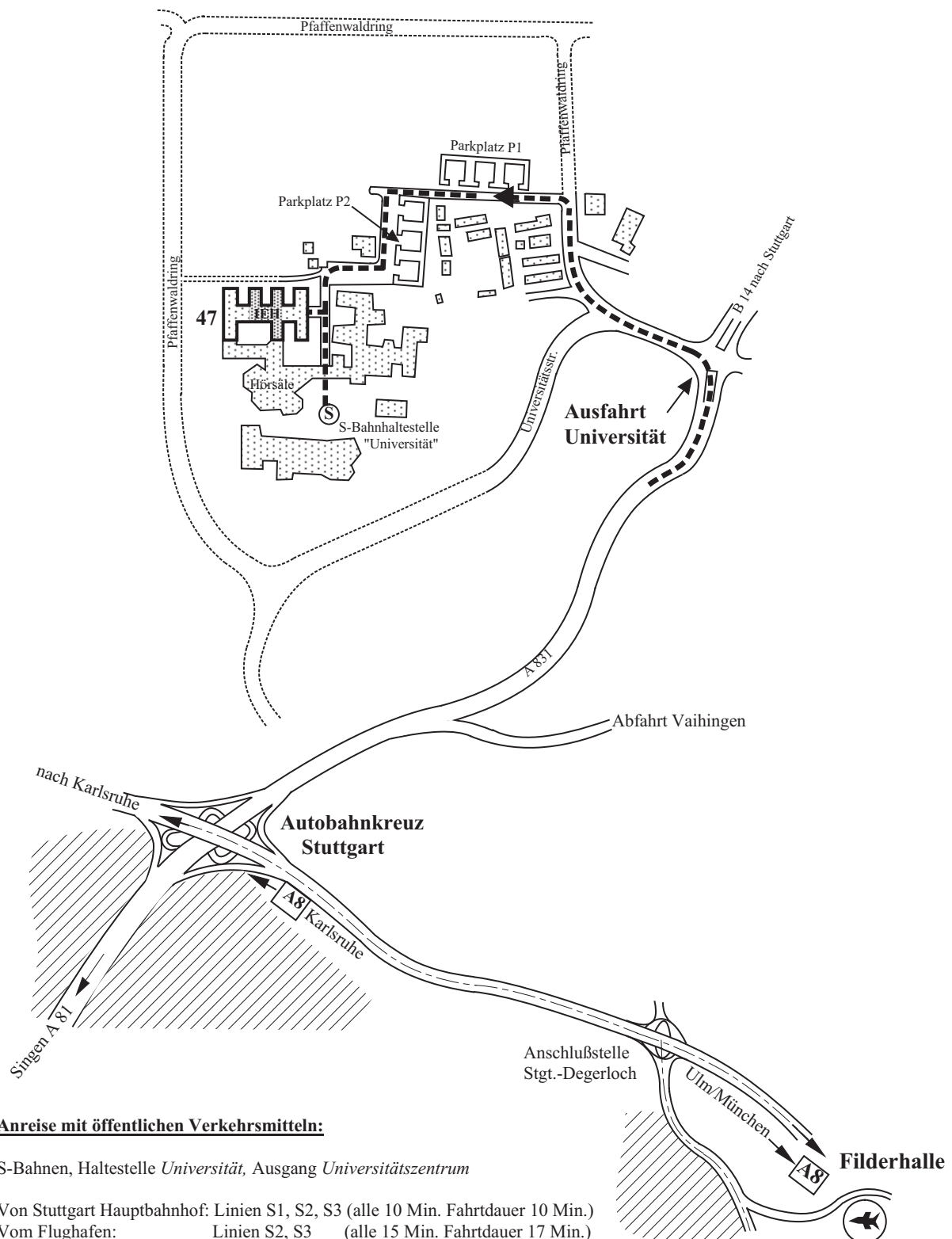
Zum Betriebsausflug am 23. September 2011 fuhren ca. 20 Kollegen mit dem Bus nach Straßburg zum Europaparlament. Eine engagierte Führerin zeigte uns dessen moderne Architektur und erläuterte die Arbeitsweise und Bedeutung des Parlaments. Anschließend besichtigten wir die Altstadt sowie das Münster und genossen die französische Küche. Eine Bootsrundfahrt durch die Kanäle Straßburgs zeigte uns die schöne, alte Stadt vom Wasser aus. Auf der Rückfahrt kehrten wir bei der Affentaler Winzergenossenschaft in Bühl zum Abendessen mit Weinprobe ein. Ein Dankeschön an Dennis Burger für die perfekte Organisation!

9. PRÜFEINRICHTUNGEN

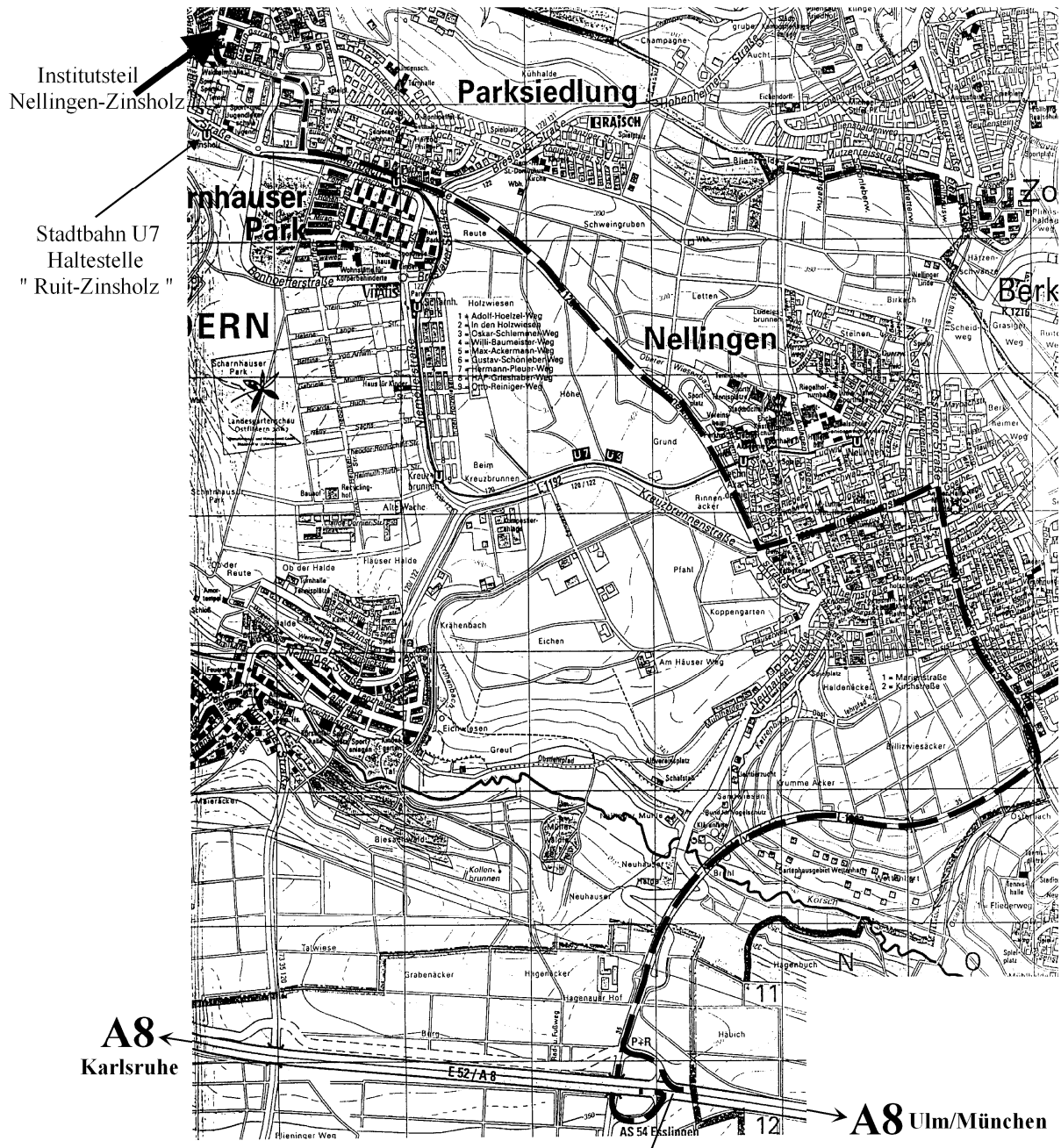
Stoßspannungsanlagen	bis 2000 kV, 100 kJ
Schwingende Blitzstoßspannung	bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ
Wechselspannungskaskade	2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung
Wechselspannungsanlage	300 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz
Gleichspannungsanlage	bis 600 kV, 10 mA
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluft- antenne für Prüflinge bis 5 x 10 x 5 m ³ (B x L x H) mit rechnergeführter Anlagensteuerung und Messwertver- arbeitung
Spannungsteiler	drei gedämpft kapazitive bis 1600 kV (transportable Einheiten für Überspannungsmessungen im Netz)
E/H-Feldmeßsysteme	mehrere, Frequenzbereiche von 5 Hz bis 800 MHz (für Spannungs- und Feldstärkemessungen im Netz)
EMP/ EMV-Prüfgeräte	diverse kleinere für die Nachbildung elektrostatischer Entladungen, Einkopplung von Störspannungsimpulsen ins Netz, Prüfung von Bauteilen und Geräten mit Mikroelektronik-Schaltungen
CW-EMV-Absorberräume	mit Leistungsverstärkern, div. Antennen, Feldmess- system, opto-analoge Messwertübertragungsstrecke bis 3 GHz, Messempfänger bis 3 GHz, TEM-Messzelle
Klimakammer	3 x 3 x 3 m ³ , Spannung bis 650 kV, Temperatur von -20° bis +65°C, rel. Luftfeuchtigkeit von 10 % bis 95 %
Einpolige SF6-Anlage	Un = 525 kV, Länge mit Abzweigen ca. 25 m
Einpolige SF6-Anlage	Un = 245 kV, Länge mit Abzweigen ca. 5 m
Dreipolige SF6-Anlage	Un = 110 kV, Länge ca. 3 m
Digitale und analoge Messgeräte	für periodische und einmalige Vorgänge mit Abtastraten bis über 20 GHz, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren
Teilentladungsmeßgeräte	zur phasenaufgelösten Messung und Interpretation
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und Durchschlag- spannungsmessgerät, Gaschromatographen

10. LAGEPLÄNE

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



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



Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln:

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

**Anschlußstelle
54 Esslingen/Ostfildern**