INHALTSÜBERSICHT

1.	VORWORT2		2
2.	PER	SONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS	6
3.	LEH	RE	8
	3.1	VORLESUNGEN	8
	3.2	PRAKTIKA	12
	3.3	EXKURSIONEN	13
	3.4	STUDENTISCHE ARBEITEN	14
4.	PRC	MOTIONEN	27
5.	FORSCHUNGSARBEITEN		
	5.1	HOCHSPANNUNGSTECHNIK	
	5.2	ENERGIEÜBERTRAGUNG	
	5.3	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT	
6.	VER	ÖFFENTLICHUNGEN	100
7.	МІТ	ARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE	105
8.	EREIGNISSE UND KONTAKTE 107		
9.	PRÜFEINRICHTUNGEN108		
10.	LAG	LAGEPLÄNE	



1. VORWORT

Liebe Freunde des Institutes für Energieübertragung und Hochspannungstechnik,

mit dem Ihnen vorliegenden Jahresbericht 2010 möchten wir Sie wieder in bewährter Form über neue Entwicklungen in den Bereichen Forschung und Lehre informieren.

In Erwartung des doppelten Abiturjahrganges unterstützt das Land Baden-Württemberg erfreulicherweise die Schaffung neuer Studienplätze. Aus Mitteln, die für den neuen Bachelorstudiengang Erneuerbare Energien bereit gestellt werden, konnten wir dadurch eine Juniorprofessurenstelle am Institut schaffen. Es freut uns besonders, dass Professor Dr.-Ing. Martin Braun den Ruf auf diese Juniorprofessur angenommen hat. Seit dem 1. Oktober vertritt er das Thema Smart Power Grids in Forschung und Lehre. Die Stromversorgung muss sich in den nächsten Jahrzehnten verändern, um einen großen Anteil der Einspeisung aus erneuerbaren Energien zu ermöglichen. Im Rahmen der Juniorprofessur sollen neue Verfahren für den Ausbau und den Betrieb dieses zukünftigen intelligenten Stromversorgungssystems (Smart Grid) entwickelt werden. Auf Basis einer Kooperationsvereinbarung und einer personellen Verknüpfung der Juniorprofessur mit einer Forschungsgruppenleitung am Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik in Kassel haben wir einen exzellenten Forschungspartner im Bereich der Smart Grids gewinnen können. Wir wünschen Herrn Professor Braun viel Erfolg und Freude mit unseren Studenten.

Das Interesse der Studierenden an den erneuerbaren Energien, der Energieübertragung und der Hochspannungstechnik ist weiter ungebrochen. Für den Bachelorstudiengang Erneuerbare Energien konnten wir zum Wintersemester 140 neue Studierende begrüßen. Dieses Jahr war der Studiengang wiederum um ein Vielfaches überzeichnet, so dass wir uns wirklich exzellente Studierende auswählen konnten. Die Hörerzahl der Vorlesung Elektrische Energienetze überstieg zum ersten Mal die Kapazität des Hörsaals, so dass einige Studierende der Vorlesung im Stehen folgen mussten. Um diesem großen Interesse weiter gerecht zu werden, haben wir einen neuen Masterstudiengang "Nachhaltige elektrische Energieversorgung" konzipiert, der an der Universität Stuttgart zum ersten Mal im Wintersemester 2011 angeboten wird. Schwerpunkte sind hier neben den elektrischen Energienetzen die Photovoltaik und die Windenergie.

In wissenschaftlicher Sicht können wir wieder auf ein sehr erfolgreiches Jahr zurückblicken. Neben der Dissertation von Dr.-Ing. Heinz Rebholz zur Modellierung leitungsgebundener Störgrößen in der Komponenten- und Fahrzeugmessung dokumentieren 33 Veröffentlichungen eindrucksvoll unsere Aktivitäten. In diesem Jahr waren wir unter anderem an den Abschlussberichten zweier CIGRE-Arbeitsgruppen beteiligt (*Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment* und *Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings*). Die Veröffentlichungen liegen teilweise auch auf unserer neugestalteten Homepage <u>www.ieh.uni-stuttgart.de</u> zum Download bereit.



Die erfreulich hohe Anzahl von Absolventen des IEH und die zahlreichen Anregungen aus der Industrie erlaubten es uns in diesem Jahr drei neue Mitarbeiter einzustellen, die sich neuer Fragestellungen annehmen werden. Dipl.-Ing. Dennis Burger und Dipl.-Ing. Daniel Schneider werden auf dem Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit von Schaltanlagen bzw. Kraftfahrzeugen arbeiten. M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed wird die neuen Anforderungen an die Schutztechnik und Kommunikationsstrukturen in Smart Grids untersuchen.

Unsere diesjährige "Pfingstexkursion" mit den Studenten der Vertiefungslinie "Elektrische Energiesysteme" führte uns nach Dresden und Bayern. Nach der Besichtigung des Braunkohlekraftwerks "Schwarze Pumpe", besuchten wir in Dresden die "Gläserne Manufaktur" des Autoherstellers Volkswagen und die Firmen Highvolt und Doble Lemke. Den Abschluss bildete ein Besuch des Siemens Transformatorenwerkes in Nürnberg. Durch solche Exkursionen können die Studierenden nicht nur die in der Vorlesung theoretisch vorgestellten Dinge in der Praxis ausgeführt sehen sondern auch die Unternehmen dieser Branche besser kennen lernen. Ich möchte mich daher an dieser Stelle bei den Firmen und Partnern bedanken, die durch ihr Engagement dazu beigetragen haben, diese Exkursionen zu ermöglichen.

Im Frühjahr haben wir zusammen mit verschiedenen Herstellern wieder das Stuttgarter Hochspannungssymposium zum Thema "Modernes Design und zuverlässiger Betrieb von Komponenten des elektrischen Netzes" in der Filderhalle in Leinfelden durchgeführt. Hervorragende Referenten und der traditionell gute Ruf dieser im zweijährigen Turnus stattfindenden Veranstaltung führten 250 Teilnehmer hauptsächlich aus den Bereichen Energieversorger und Hersteller nach Stuttgart. Es ist damit die größte Fachtagung zur Hochspannungstechnik in Deutschland. An zwei Tagen wurden die neuesten Entwicklungen vorgestellt und lebhaft diskutiert. Auf Grund der zahlreichen Nachfragen werden wir das Stuttgarter Hochspannungssymposium am 06. und 07. März 2012 wieder im gleichen Rahmen durchführen.

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

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

Stuttgart, im Dezember 2010

Prof. Stefan Tenbohlen

PREFACE

Dear friends!

As usual, we would like to inform you about our activities with our annual report 2010.

In summer 2012 two school years will finish the Gymnasium at the same time and so the number of students will considerably grow. For this reason the government of Baden-Württemberg increased the financial resources for universities. Due to the support for the Bachelor of Science in Renewable Energies Prof. Dr.-Ing. Martin Braun joined the Institute as Junior Professor on 1st of October. He works as teacher and as well as researcher on "Smart Power Grids". The power supply in Germany has to change during the next decades because otherwise it is impossible to use the growing capacity of renewable energies. In cooperation with "Fraunhofer-Institute for Wind Energy & Energy System Technology" in Kassel, Prof. Braun and his students will develop new methods for the construction and operation of an intelligent power supply system (Smart Grid).

We wish Professor Braun success and pleasure for his work at the University of Stuttgart.

The new Bachelor of Science "Renewable Energies" continues to be very successful. In winter term 2010/2011 we welcome 140 excellent first term students, chosen from a large number of applicants. During my lecture "Electrical Power Networks" the audience was even too numerous for the lecture hall, so that several students couldn't find a seat. To meet this great interest, the University of Stuttgart will introduce a new Master of Science "Sustainable Electrical Power Supply", starting from winter term 2011/2012. This course is focussing on electric power networks, photovoltaics and wind energy.

Concerning our scientific work we look back at a very successful year. The PhDthesis of Heinz Rebholz (Modelling of Conducted Emissions for Component- and Vehicle Measurements) and 33 publications show the large variety of our research activities. In 2010 we contributed to the final reports of two CIGRE-working groups (*Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment* and *Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings*). You can download most of our publications from our homepage www.ieh.uni-stuttgart.de.

In 2010 a high number of qualified IEH-graduates and a lot of industrial encouragements enabled us to employ three new researchers. Dipl.-Ing. Dennis Burger and Dipl.-Ing. Daniel Schneider will work on the field of electromagnetic compatibility of switch gear and motor vehicles. M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed will analyse the new demands for protection and communication in Smart Grids.



During this year's "summer excursion" with students of electrical engineering we went to Dresden and Nuremberg. In the region of Dresden we visited the brown coal fired power plant "Schwarze Pumpe", the "Transparent Factory" of Volkswagen as well as HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH and Doble Lemke GmbH. On the way home we stopped at the Nuremberg transformer plant of Siemens. I would like to thank the enterprises and partners contributing to our excursions with financial help and personal efforts.

In March 2010, we organised again the Stuttgart High Voltage Symposium in the Filderhalle of Leinfelden supported by several manufacturers. This years' presentations focussed on "modern design and reliable service of the network's components". Outstanding speakers and the excellent reputation of this event, taking place every second year, lead 250 participants from utilities and manufacturers to Stuttgart. The Stuttgart symposium is a leading high voltage conference in Germany. For two days, latest developments were presented and discussed. Due to numerous demands I will organise the next Stuttgart High Voltage Symposium on March 6 and 7, 2012.

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 the chapter "diploma thesis", where you can find abstracts of our graduate's work.

My staff and I are looking forward to continued close contact and co-operation with you. Our best wishes accompany you into the next year.

Stuttgart, December 2010 Prof. Stefan Tenbohlen



2. PERSONELLE BESETZUNG DES INSTITUTS

	e-mail:	Telefon / phone:	
	vorname.nachname@ieh.uni-stuttgart.de	+49 (0)711-	
	firstname.surname@ieh.uni-stuttgart.de		
Institutsleiter /			
Head of Instute:	Prof. DrIng. Stefan TENBOHLEN	-685-67871	
Juniorprofessor:	Prof. DrIng. Martin BRAUN (ab 1.10.2010)	-685-67875	
Prof. im Ruhestand:	Prof. DrIng. Dr. h. c. Kurt FESER	-685-67874	
Lehrbeauftragte:	DiplIng. Ulrich SCHERER EnBW Transportnetze AG	-128-2437	
	DiplIng. Thomas RUDOLPH AREVA Energietechnik GmbH		
	DrIng. Markus PÖLLER DIgSILENT GmbH		
Oberingenieure:	DrIng. Wolfgang KÖHLER	-341 2075	
	(Leiter des Hochspannungslabors Nellingen-Zinsholz)		
	DrIng. Ulrich SCHÄRLI	-685-67878	
Akademische Mitarbe	iter /		
Scientific Staff:	M. Sc. Ahmad ABDEL-MAJEED (ab 1.10.2010)	685-69193	
	DiplIng. Michael BELTLE	685-68061	
	DiplIng. Dennis BURGER (ab 1.4.2010)	-341 2075	
	DiplIng. Simon BUROW	-341 2075	
	DiplIng. Sebastian COENEN	-685-67869	
	DiplIng. Markus FISCHER (bis 30.9.2010)		
	DiplIng. Maximilian HEINDL	-685-67857	
	DiplIng. Jens HOHLOCH	-341 2075	
	DiplIng. Mark JOVALEKIC	-685-67858	
		-685-67868	
		-341 2075	
	Dipl. Ing. Alayandar DDOPST	-341 2075	
		-000-09190	



	DiplIng. Heinz REBHOLZ (bis 28.2.2010)	
	DiplIng. Martin REUTER	-685-67817
	DiplIng. Thomas SCHMID (bis 30.6.2010)	
	DiplIng. Nicolas SCHMIDT	-685-67809
	DiplIng. Daniel SCHNEIDER (ab 25.1.2010)	-685-67889
	DiplIng. Franz STREIBL (bis 28.2.2010)	
	DiplIng. Patrick WAJANT (bis 31.8.2010)	
	DiplIng. Andreas WEINLÄDER	-685-67838
	DiplIng. Dejan VUKOVIC	-685-69195
Sekretariat /		
Secretary:	Nicole SCHÄRLI	-685-67870
	(Institutsteil Stuttgart-Vaihingen)	
	Renate KINSKI	-341 2075
	(Hochspannungslabor Nellingen-Zinsholz)	
	Hermine LWOWSKI	-685-67876
Technische Angestellte	e /	
Technical Staff:	Erwin BECK, Zentralwerkstattleiter	-685-67847
	Marija BERGLEZ, <i>Raumpflegerin</i> (bis 31.8.2010)	
	Metin DEMIRHAN, Mechaniker	-685-67847
	Robert HÄBICH, Auszubildender	-685-67847
	Patrick HACKBARTH, <i>Elektrotechniker</i>	-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, <i>Elektromeister</i>	-341 2075
Castuissanashaftlar		
Visiting scientists:	Su SLIWIN Mandalay/Myanmar	
visiting scientists.		
	Dr. Coordi Teopov VELEV, Cobrovo/Bulgarian	
	DAD-Stipendiat (01 10 31 12 2010)	
	David OVEDOKUNI Kapatadt/Südafrika	
	(1229.11.2010)	

IEH

3. LEHRE

3.1 VORLESUNGEN

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Elektrische Energietechnik I

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

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN Hochspannungstechnik I

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

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN

Hochspannungstechnik II

Sommersemester, 2 V, 2 S, für 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

- 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
- Netzrückwirkungen
- HGÜ

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN DR.-ING. W. KÖHLER

Hochspannungsprüf- und -messtechnik

Wintersemester, 2 V, für 7. Semester (Diplom)

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



PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN DR.-ING. W. KÖHLER Elektromagnetische Verträglichkeit

Sommersemester, 2 V, für 8. Semester (Diplom)

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

DIPL.-ING. U. SCHERER

Energiewirtschaft in Verbundsystemen

Sommersemester, 2 V, für 8. Semester (Diplom)

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

PROF. DR.-ING. S. TENBOHLEN DIPL.-ING. T. RUDOLPH

Schutz- und Leittechnik für Hochspannungsnetze

Wintersemester, 2 V, für 7. Semester (Diplom)

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



DR.-ING. M. PÖLLER

Netzintegration von Windenergie

Sommersemester, 2 V, für 8. Semester (Diplom)

- Stromerzeugung mit Windenergie
- Generatoren für Windenergieanlagen
- Netzeinbindung von Windenergienanlagen
- 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



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 nehmen teil. Die Versuche wurden von den elektrotechnischen Instituten der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik speziell für dieses Grundlagenpraktikum entwickelt und eingerichtet. Herr Dr. Schärli hat im Auftrag der Fakultät die Gesamtorganisation des Grundlagenpraktikums inne.

Die Versuche und Veranstaltungen unseres Instituts sind:

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

DR.-ING. W. KÖHLER

Fachpraktikum Hochspannungstechnik

Das Fachpraktikum Hochspannungstechnik wird für Studierende nach dem Grundstudium in der Regel im Sommersemester angeboten. Jeder Versuch wird von einer Gruppe von i.d.R. drei Studierenden an einem Nachmittag bearbeitet.

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

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

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



3.3 EXKURSIONEN

25. – 28. Mai 2010: Besuch mit 25 Hörern der Fachvorlesungen bei

- Vattenfall Europe
- Volkswagen, Dresden
- Highvolt, Dresden
- Doble Lemke, Kesselsdorf
- Siemens, Nürnberg
- Hochspannungs-Prüftechnik Mess- und Diagnosetechnik

Besichtigung des Braunkohlekraftwerks

Führung durch die "Gläserne Manufaktur"

Leistungstransformatoren

"Schwarze Pumpe"



Exkursionsteilnehmer vor dem neuen Gebäude der Highvolt, Dresden

18. Mai 2010 und 1. Juni 2010, jeweils ganztägig

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

15. Juni 2010, 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 1.11.2009 bis 31.10.2010:

Brandl, Ron

Untersuchung resonanter Anordnungen in gasisolierten Schaltanlagen zur Dämpfung von schnellen transienten Überspannungen

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Möglichkeit der Dämpfung von schnellen transienten Überspannungen (VFTOs) in gasisolierten Schaltanlagen mit Hohlraumresonatoren untersucht. Über mehrere Schritte werden durch Messungen und Simulationen die Eigenschaften resonanter Anordnungen untersucht und eine Optimierung entwickelt, um VFTOs zu beeinflussen. Die Studie zeigt, dass die Eigenfrequenz des Resonators im Bereich der Grundfrequenz der VFTOs liegen muss. Es ist möglich den Spannungsverlauf der VFTOs zu verändern, wenn der Resonator mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen wird. Weiteres Forschungspotential im Anschluss an diese Studie bietet die Größenoptimierung des Resonators mittels Permeabilität- bzw. Permitivitätsänderungen sowie die Optimierung des Abschlusses des Resonators.

Investigation of resonant set-ups in gas insolated switchgears to damp very fast transients

The present diploma thesis deals with the possibility of damping very fast transient overvoltage (VFTO) in gas-insulated switchgears (GIS) using a cavity resonator. For this purpose resonant devices were analyzed by measurements and simulations, thus it was possible to design optimizations. The tests show that the eigenfrequency of the cavity resonator should meet the same frequency of the VFTO. In addition, a changing of the voltage curve is only possible, when the resonator is terminated by its characteristic impedance. In reference of further research projects, the optimization of the resonator dimension changing the permeability and permittivity and the termination of the resonator can be investigated.

Burger, Dennis

Simulation von Elektrofahrzeugen im Niederspannungsnetz und deren Beteiligung an Netzdienstleistungen

Das hohe Engagement von Bundesregierung, Automobilbranche und Energieversorgungsunternehmen wird mittelfristig zur ernsthaften Marktetablierung der Elektrofahrzeuge führen. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Elektrifizierung des Straßenverkehrs auf ein innerstädtisches Niederspannungsnetz betrachtet. Konkret wird gezeigt, dass ab 2020 mit Überlastungen der Ortsnetztransformatoren sowie vermehrter Unterspannungszustände im Niederspannungsnetz zu rechnen ist. Voraussichtlich werden langfristig auch die Leitungsstrecken im Netz an ihre thermischen Belastungsgrenzen stoßen. Als viel versprechende Lösungsmöglichkeit wird ein Lastmanagementsystem für Elektrofahrzeuge untersucht. Eine abschließende Potenzialanalyse für die Beteiligung an Netzdienstleistungen hat ergeben, dass Elektrofahrzeuge starke Effekte in der Frequenz – Leistungsregelung erzielen kön-



nen. Die geforderte Spannungsqualität im Niederspannungsnetz kann durch Blindleistungseinsatz aus Elektrofahrzeugen jedoch nicht garantiert werden.

Simulation of battery electric vehicles in a low voltage grid as well as their participation in grid services

The great efforts of the German Government, the automotive and power supply companies will cause a serious establishment of electric vehicles (EV) on this market. In this thesis the effects on an urban low voltage grid caused by the electrification of road traffic are investigated. It is shown that beginning with year 2020 the overloading of substation transformers as well as the appearance of under voltage grid conditions can be expected. The power lines of the grid will also reach their thermal load limits in the long run. A thoroughly investigated load management system for electric vehicles is one promising solution for the expected problems. A final potential analysis for participation in grid services has shown that EV can enhance the frequency-load control. However, it is not possible to ensure the required voltage quality in the low voltage grid by singly using reactive power control.

Chen, Nan

Experimentelle Bestimmung des Einflusses von induktiven Verbrauchern auf das Verhalten von Störlichtbögen

Die Diplomarbeit befasst sich mit dem Vergleich von simulierten und gemessenen seriellen Lichtbögen. Dabei soll der Einfluss von Induktivitäten auf das Frequenzspektrum eines Lichtbogenstromes untersucht werden. Mit PSpice wurde ein einfaches Modell eines seriellen Lichtbogens mit einstellbarer induktiver Last erstellt. Die Simulationsergebnisse wurden später mit gemessenen Werten verglichen. Dazu wurde ein bestehender Messaufbau so erweitert, dass verschiedene induktive Lasten eingebaut werden konnten.

Experimental determination of the influence of inductive loads on the behavior of electric arcs

The paper deals with the comparison of simulated and measured series arc faults. Goal is to analyze the influence of inductive loads on the frequency spectra of arc currents. In PSpice a simple series arc model with adjustable inductive load was built. The results of the simulation were later compared to measured data. Therefore, an existing laboratory setup was expanded to be able to attach various inductive loads.

Ding, Heng

Analyse- und Bewertungsverfahren für Transferfunktionsmessungen an Leistungstransformatoren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Analyse- und Bewertungsverfahren für Übertragungsfunktionen aus SFRA-Messungen untersucht. Die Analyse der Frequenzgangkurven wird durch quantitative Eigenschaftsfaktoren realisiert. Ein vollständiges Bewertungsverfahren wird durch Kombination verschiedener Vergleichsfaktoren und -methoden ermöglicht. Durch statischen Vergleich kann der Zustand eines Transformators grob beurteilt werden. Durch dynamischen Vergleich kann derjenige Fre-



quenzbereich, an dem die Übereinstimmung nicht gut ist, automatisch erkannt werden. Es wurde ein Programm mit einer grafischen Benutzeroberfläche entwickelt, welches die wesentlichen Algorithmen integriert.

Analysis and Interpretation Methodologies for Power Transformer Transfer Functions

A new method for analysis and evaluation of SFRA measurements was investigated in this thesis. The analysis of the frequency response curves is realized by quantitative property factors. The evaluation process is realized by combining different comparison factors and comparison methods. The condition of a transformer can be assessed roughly by static comparison. The range where the curves don't match will be recognized automatically by dynamic comparison. Finally, a program with a graphical user interface was developed integrating all relevant algorithms.

Feng, Zhaoliang

Ethernetbasierte High-Speed-Signalerfassung

In dieser Arbeit wird ein Messsystem zur Diagnose von Leistungstransformatoren mit Hilfe der SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) entwickelt. Bisher werden Messsignale über lange Koaxialverbindungen analog übertragen. Um Störeinkopplungen bei der Signalübertragung vom Transformator zum Messsystem gering zu halten, wird eine Datenerfassungseinheit entwickelt, welche die zu messenden Signale direkt digital wandelt und per Ethernet-Verbindung überträgt.

Ethernet-based High Speed Signal Acquisition

A diagnostic measuring system for power transformers is developed according to the SFRA (Sweep Frequency Responses Analysis) principle. For conventional measurement devices the output response signal of a power transformer is transmitted by wire in the analog form. In order to reduce external interferential electromagnetic effects, a digital method is presented, which converts the analog signal into the digital form. It is then processed and transferred to the measurement system via Ethernet connection.

Jelting, Niels

Entwicklung eines Algorithmus für die Puls-Sequenz-Analyse (PSA) unterschiedlicher TE-Quellen

Dauerhafte Einwirkungen von Teilentladungen schädigen das Isoliersystem von elektrischen Betriebsmitteln. Infolge der eingeschränkten Zugänglichkeit und der fortgeschrittenen Lebensdauer von Leistungstransformatoren fällt der Messung und Diagnose von Teilentladungen wesentliche Bedeutung bei der Beurteilung deren Isoliersystemen zu. Die Arbeit untersucht die Darstellung der Daten aus elektrischen TE-Messungen in PSA-Mustern. Für die Verarbeitung der Messdaten wird in MATLAB ein Algorithmus implementiert, der eine Visualisierung in Spannungs- und Phasendifferenzen sowie Spannungsgradienten ermöglicht. Von verschiedenen TE-Fehlerstellen in Ölisolieranordnungen werden PSA-Muster erzeugt, mit denen das Ziel verfolgt wird, in den Darstellungen charakteristische Gruppen der Daten-



punkte zu erkennen. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass Rückschlüsse auf die Geometrie der Fehlerstelle geschlossen werden können.

Development of an algorithm for the Pulse-Sequence Analyses of different artificial partial discharge sources

Permanent partial discharges (PD) damage the insulating system of electrical power equipments. Due to the limited accessibility and the advanced operating hours of power transformers the measurement and diagnosis of partial discharges is a method with importance assessing their insulating system. This diploma thesis deals with a development of an algorithm for PSA-Pattern from PD sources. This MATLAB based software allows a visualisation of the measured datas in diagrams showing voltage differences, phase differences as well as voltage gradients between discharges. Multiple PD sources in oil insulated arrangements generate different PSA pattern. As a result of this study groups of data points were obtained in diagrams that show typical pattern of failure geometries.

Küllmer, Alexander

Entstehung, Ausbreitung und Begrenzung von EMV-Störungen beim Trennerschalten in Mittelspannungsschaltanlagen

In dieser Diplomarbeit wurden Untersuchungen zur Entstehung, Ausbreitung und Bedämpfung von EMV-Störgrößen innerhalb einer gasisolierten Mittelspannungsschaltanlage durchgeführt. Zur Identifizierung der Hauptkoppelpfade wurden zum einen Messungen mit einer Stromzange und zum anderen Messungen mit einer E-Feldsonde durchgeführt. Zur Unterdrückung der Störaussendung wurden unter anderem Versuche mit Schutzbeschaltungen wie Suppressordioden, Varistoren und Kondensatoren sowie geschirmten Leitungen durchgeführt.

Source, propagation and reduction of EMC disturbances during disconnector operations in medium voltage switchgear

This Diploma-Thesis investigated the origin, propagation and reduction of EMC disturbances during disconnector operations in a gas isolated medium voltage switchgear. To identify the main coupling paths measurements have been performed with a coupling clamp and an electric field probe. To eliminate the propagation of EMC disturbances measurements with suppressor diodes, varistors, capacitors and shielded wires took place.

Lübbe, Tobias

Entwicklung eines Softwaresystems zur Bewertung von Leistungstransformatoren mit DGA und Ölkennzahlen

Egen der besonderen Stellung von Leistungstransformatoren in elektrischen Energieversorgungsnetzen wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Verfahren zur Zustandsbeurteilung der Transformatoren für Wartung und Instandhaltung entwickelt. Weit verbreitet sind dabei die Gas-in-Öl-Analyse und die Auswertung der Ölkennzahlen. In dieser Diplomarbeit wurden Routinen zur Ermittlung einer Zustandsbewertung durch Ölkennzahlen in Software entwickelt. Die bereits implementierte Funktionalität der Gas-in-Öl-Analyse wurde zusätzlich erweitert, um eine Betrachtung



der Änderungsraten von Schlüsselgasen einzuschließen. Die bereits vorhandenen Diagnosemethoden wurden zusammen mit den neu erstellten in ein flexibles Java-Softwaresystem integriert, das über verschiedene Schnittstellen für Benutzer und andere Software verfügt und nach modernen Arbeitsweisen der Softwaretechnik entwickelt wurde.

Development of a software system for the condition assessment of power transformers with DGA and oil characteristics

Due to the exceptional status of power transformers in electrical power networks many methods have been developed for assessment of the condition of transformers in view of maintenance and repairs. Among these methods the dissolved gas analysis and the analysis of oil characteristics are widely-used. In this diploma thesis software routines were developed in order to identify transformer conditions by means of oil characteristics analysis. The already implemented functionality of dissolved gas analysis was extended. Dissolved gas analysis now includes the observation of gassing rates and gas levels. The already-developed diagnostic methods and the newly-created ones have been integrated to a flexible Java software system, which provides different interfaces for users and other software. This software system has been developed by working practices of modern software engineering.

Petropolous, Nikolaos

Detektion unterschiedlicher künstlicher Teilentladungsquellen in festen Isolierstoffen mittels mehrerer Mustererkennungsverfahren

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, Defekte und deren Ursachen in festen Isolierstoffen zu detektieren und mit Hilfe unterschiedlicher Mustererkennungsverfahren zu analysieren. Diese Defekte werden künstlich nachgebildet, um die charakteristischen Teilentladungsmuster zu ermitteln. Die Teilentladungen werden elektrisch nach IEC 60270 erfasst und mit den Verfahren der phasenaufgelösten Teilentladung (PRPD) und der Puls Sequenz Analyse (PSA) dargestellt. Je nach Mustererkennungs-verfahren werden unterschiedliche charakteristische Teilentladungsmuster einem Defekt zugeordnet. Es ist somit möglich, aus den ermittelten Mustern den Defekt eindeutig zu bestimmen.

Detection of artificial partial discharge sources in solid insulation material using different pattern recognition methods

Target of this diploma thesis is to detect and analyse defects and their possible causes inside of solid state insulating materials using different pattern recognition methods. These defects are created artificially in order to obtain the characteristic partial discharge patterns. The partial discharges are captured according to IEC 60270 and described through the methods of the phase resolved partial discharge (PRPD) and the pulse sequence analysis (PSA). Depending on the applied pattern recognition method there are various characteristic PRPD patterns corresponding to a given defect. Hence it is possible to clearly determine the defect using the captured patterns.



Schneider, Daniel

Charakterisierungsverfahren von KFZ-Komponenten zur Entstörfilteranpassung

Über das KFZ-Bordnetz versorgte elektrische Komponenten können leitungsgebundene Störungen aussenden. Dies macht den Einsatz von Entstörfiltern nötig. Die Anpassung solcher Filter an ihre Störquellen bedarf Zeit und vieler Anpassungsversuche. Um diesen Prozess zu beschleunigen und aus einer Vielzahl an Filtern den passenden auszuwählen, stellen Computersimulationen ein gutes Werkzeug dar. Für schnelle Simulationen werden daher einfache Modelle des Störers benötigt. Über ein Charakterisierungsverfahren, beruhend auf Zeitbereichsmessungen, kann ein solches Modell auf Grundlage dieser Arbeit ermittelt werden. Mit der entstandenen Soft- und Hardware besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Filteranordnungen für elektrische Komponenten mit periodischen Störungen aus dem Automobilbereich zu berechnen und hinsichtlich ihrer Wirkung zu beurteilen.

Automotive Component Characterization for the adaptation of EMC-Filters

Automotive components connected to the vehicles power supply can cause conducted noise emission. Therefore the use of noise suppressing filters is necessary. The adaptation of filters to its noise source takes time and numerous attempts. Computer simulations are an appropriate tool to accelerate this process and to adjust a filter. Fast simulations need an easy model of the noise source. This work leads to a model by using a characterization method with time domain measurement. The developed hard- and software make it possible to characterize components with periodic noise and to calculate the effect of arbitrary filters.

Seeger, Sabine

Dynamische Modelle von Windenergieanlagen

In dieser Diplomarbeit werden verschiedene Modelle von Windenergieanlagen vorgestellt und anhand dieser Modelle das dynamische Verhalten von Windenergieanlagen untersucht. Dabei werden vorhandene Modelle der Firma DIgSILENT benutzt. Es handelt sich um die Windenergieanlagenmodelle der Typen doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren (DFIG) und Synchrongeneratoren mit Vollumrichtern (CDSG). Das Modell CDSG wird zusätzlich um einen Chopperwiderstand erweitert. Ferner werden Asynchrongeneratoren mit Käfigläufern ohne Regelungsfähigkeit im Fehlerfall nach dem dänischen Konzept nachgebildet. Verschiedene Windparkkonfigurationen werden erstellt und das dynamische Verhalten der Windenergieanlagen wird anhand von 3-poligen Kurzschlüssen am Point of common Coupling mit Fehlerdauern von 150 ms untersucht. Es werden Spannungseinbrüche auf 0% und 60% der Nennspannung ausgewertet. Die Bewertung der Simulationsergebnisse basiert auf der Überprüfung der Einhaltung der Netzanschlussbedingungen der Übertragungsnetzbetreiber und der Analyse des Verhaltens der Windenergieanlagen im Fehlerfall. Die dynamische Modellierung wird mit der Netzberechnungssoftware PowerFactory von DIgSILENT durchgeführt.

FEH

Dynamic Models of Wind Turbines

The thesis deals with simulations of the dynamic behaviour of different types of wind turbines. Therefore models of wind turbines such as doubly fed induction generators (DFIG) and converter driven synchronous generators (CDSG) are used. The model of the CDSG wind turbine is modified by an additional chopper resistance. In addition a model of a squirrel cage asynchronous generator without an included control strategy (DK) is used. All models are taken from the network calculation software PowerFactory from DIgSILENT. Several wind parks are created to investigate the dynamic behaviour of the different wind turbines within different conditions. The general dynamic behaviour is analyzed by the evaluation of 3-phase short-circuits at the Point of Common Coupling with a duration of 150 ms. These fault-cases lead to voltage drops with a voltage of 0 p.u. and 0,6 p.u.. The simulation results are interpreted by a comparison with the given grid codes created by the network operators. In addition the behaviour of the wind turbine control itself is described. The dynamic simulations are realized with PowerFactory from DIgSILENT.

Spindler, Christian

Entwurf und Verifikation der Modellierung neuer AVT-Konzepte in der Sensorentwicklung unter EMV-Gesichtspunkten

Elektronische Systeme gelten seit einigen Jahren als Innovationstreiber im Fahrzeug. Dabei steigt die Anzahl der Sensorik überproportional zum Anstieg der Elektronik an. Durch zunehmende Integration und Miniaturisierung von Sensor-Systemen existieren weniger konventionelle Methoden zur Generierung hoher funktionaler Zuverlässigkeit unter Einfluss elektromagnetischer Feldgrößen. Diese Arbeit beschreibt den Aufbau hochintegrierter Sensoren mit ihren einzelnen Komponenten und ihrem Verhalten unter elektromagnetischer Störbeeinflussung. Die hohen Qualitäts-und Sicherheitsstandards, die im Automotive-Bereich durch Normen festgelegt sind, werden dieser Arbeit zu Grunde gelegt und fordern unkonventionelle, innovative und gleichzeitig schlanke Lösungsmethoden im Hinblick auf die Aufbau-und Verbindungstechnik zur Erhöhung der Störfestigkeit.

Design and verification of new packaging concepts in sensor development considering EMC aspects

Electronical systems are creating most innovation of automotive engineering in recent years. The number of integrated sensor-systems rises to an increasing degree compared to other electronics. Miniaturization and Integration spare less space for conventional methods of robustness against electro-magnetic fields. Thus EMC robustness of highly integrated Sensors-Systems challenges more and more for uncommon composition-and packaging-methods. Based on recently developed and assembled sensor-samples of further generations this thesis describes, analyses and simulates electromagnetical disturbances of each System-Segment. Simulation and Measurement methods for IC-Systems are used to show sensor-sensitivity, interferences and its source.



Viereck, Robert

Schutz von Mittelspannungsnetzen unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen regenerativer Stromerzeugung

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen einer wachsenden Anzahl dezentraler Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf die Schutztechnik in der Mittelspannung untersucht. Dazu werden bereits vorhandene Modelle für Erzeugungsanlagen in ein Beispielnetz eingefügt und Kurzschlüsse im Zeitbereich simuliert. Die Ergebnisse werden grafisch aufgearbeitet und auf negative Beeinflussung der Schutzgeräte überprüft. Zusätzlich werden zukünftige Anforderungen an Erzeugungsanlagen und deren Auswirkungen in Betracht gezogen. Für realistische Ausbauszenarien ist keine schwerwiegende Beeinflussung der Schutztechnik festzustellen.

Concepts for protection systems with increasing distributed generation

This thesis evaluates the side effects of distributed energy generation on protective relaying. In order to obtain profound results, simulations were based on several realistic scenarios of a real world medium voltage grid. As all short circuits were simulated in the time domain, dynamic models for distributed power generation had to be implemented. The results were analyzed graphically and tested for negative influences on the protective devices. Even with future requirements on distributed power generation the side effects on protective relaying were generally mild.

Wang, Yuan

Auswertung von seriellen und parallelen Störlichtbögen im Frequenzbereich

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Programm entwickelt, welches die gemessenen Stromsignale von Störlichtbögen verarbeiten kann. Zur Darstellung und Berechnung der Fouriertransformierten wurde Matlab verwendet. Durch einen optimierten FFT-Algorithmus konnten die Messwerte im Frequenzbereich untersucht werden. Die Auswertung von Stromsignalen beinhaltet einen Algorithmus zur Auswertung der Zwischenharmonischen im Frequenzbereich.

Evaluation of series and parallel arc faults in the frequency domain

In this thesis software for processing the measured current of arcs in low voltage switchgear was developed. Matlab is used to import, process and recombine the results. Through an optimized FFT algorithm, the results of the time domain were transferred into the frequency domain. Finally a graphical user interface shows the results.

Weigel, Stefan

Regelung von Offshore-Windparks mit HGÜ-Netzanbindung

In dieser Arbeit wird die Regelung von Offshore-Windparks mit Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) untersucht. Es werden verschiedene Regelkonzepte für selbstgeführte und netzgeführte HGÜ ausgearbeitet und in dem Simulationsprogramm DIgSILENT PowerFactory simuliert. Neben dem Nennbetrieb zeigt sich besonders das Verhalten bei Kurzschlüssen im Onshore- und Offshore-Netz als eine

FEH

Herausforderung an die Regelung. Untersucht wird ein Windpark (400 MW) mit einer Anbindung über eine selbstgeführte IGBT-HGÜ sowie ein Windpark (1000 MW) mit einer Anbindung über klassische netzgeführte Thyristor-HGÜ. Als Generator-Typen für die Windkraftanlagen werden bei der Untersuchung die doppelt gespeiste Asynchronmaschine und die über Vollumrichter angeschlossene Synchronmaschine berücksichtigt. Abschließend erfolgt ein Vergleich der HGÜ-Technologien in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für Offshore-Windparks.

Control of Offshore Wind Farms with HVDC Grid Connection

Objective of this study is the control of offshore wind farms with a high voltage direct current (HVDC) grid connection. Different control strategies for self-commutated and line-commutated HVDC links are elaborated and simulated with DIgSILENT PowerFactory. Among the normal operation, the behaviour during short circuits in the onshore and off-shore grid appears as a challenge to the control. Investigated is a wind farm (400 MW) with a connection via a self-commutated HVDC link as well as a wind farm (1000 MW) with a connection via a line-commutated thyristor HVDC link. In this study the doubly-fed induction machine and the synchronous machine, connected to the grid via fully rated converter, are considered as generator types for the windmills. Finally a comparison of the HVDC technologies is given with regard to an application for offshore wind farms.

Werner, Dirk

Dynamische Einbindung neuer Knoten in ein vorhandenes IEC 61850 Netzwerk

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten betrachtet, neue Knoten automatisiert in ein vorhandenes IEC 61850 Netzwerk zu integrieren, da diese Norm bisher keine dynamischen Erweiterungen zulässt. Dabei soll die Norm um diesen Dynamisierungsaspekt erweitert werden, ohne dabei die Schutztechnik zu stören. So können neue Komponenten, die zum Planungszeitpunkt nicht bekannt oder benötigt waren, nachträglich ohne Umkonfigurationsaufwand installiert werden. Dies ist insbesondere für temporär oder nachträglich installierte Monitoringanlagen von Bedeutung, da diese meist nicht von Anfang an vollständig eingeplant sind, ersetzt oder erweitert werden sollen. In dieser Arbeit wird eine Möglichkeit zur dynamischen Integration solcher Netzknoten in bestehende Netzwerke vorgestellt und erläutert.

Dynamic Integration of new Logical Devices in an existing IEC 61850 Infrastructure

This thesis evaluates approaches to automatically integrate new devices into an existing IEC 61850 network. The standard does currently not provide a convenient way to add or remove devices without reconfiguring the substation network and components. Therefore the aim of this thesis is to find a way of automated dynamic extension of network elements within the standard without breaking any compatibility rules for the protection elements. With this approach devices which were not considered during the planning phase can be added, upgraded or replaced at any time. This functionality is especially important for the integration of upcoming monitoring systems.



Werner, Falk-Rüdiger

Ortung von Teilentladungen mittels Sensorarrays

Diese Arbeit befasst sich mit der akustischen Ortung von Teilentladungen in Transformatoren durch die Verwendung von Sensorarrays. In diesem Rahmen wurden Methoden entwickelt und untersucht, die es erlauben mehrere Teilentladungsquellen gleichzeitig zu orten, auch wenn die aufgezeichneten akustischen Signale mit Rauschen überlagert sind. Neben einem UHF-akustischen Ortungssystem mit Uniform-Linear-Sensorarrays wurden zudem verschiedene Methoden der Signalverarbeitung implementiert und untersucht, die eine Ortung mehrerer TE-Quellen gleichzeitig ermöglichen. Die vorgestellten Methoden lassen sich auch auf Ortungssysteme mit verteilten Sensoren, zum Zwecke der Ortung mehrerer Quellen, anwenden.

Location of Partial Discharges by means of Sensor Arrays

Knowledge about the presence and the location of partial discharges in transformers at an early stage of PD activity can help to classify the health status of transformers and to eventually initiate disconnection or maintanance to prevent failures and accidents. Traditional measurement techniques on the location of partial discharges have theoretically a common limitation, namely that they are limited to the detection of a single source only. The scope of this work is to develop an UHF-acoustic testing system based on a planar uniform linear array of ultrasonic transducers that provides the possibility to detect multiple PD sources in a transformer. This is achieved by the application of advanced methods of signal processing.

Yang, Zheng

Simulation der Ausbreitung und Dämpfung von schnellen Transienten (VFT) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) mit CST Microwave Studio

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Ausbreitung und Dämpfung von VFTs in gasisolierten Schaltanlagen mit der Simulationssoftware "CST Microwave Studio®" simuliert. Mit den verschiedenen Anordnungen wurden die Eigenschaften der Software untersucht und mit Messergebnissen verglichen. Es wurden 9 Ferrit-Materialien auf ihre Dämpfungseigenschaften hin untersucht und miteinander verglichen. Die Simulationsergebnisse ergaben, dass das Dämpfungsverhalten von der Sättigungsflussdichte, der Anzahl, des Volumens und der Position der Ferritringe abhängt. Effekte, die durch die Sättigung der Ferritringe auftreten, konnten nicht berücksichtigt werden. **Simulation of propagation and damping of VFTs in GIS with CST Microwave Studio**

The thesis deals with the simulation of propagation and damping of VFTs in GIS with "CST Microwave Studio®". The features of the software were analyzed with the different configurations and compared with measurement results. There were examined 9 ferrite materials on its damping characteristics and compared with each other. The simulation results showed that the damping behavior depends on the saturation flux density, the number, the volume and the position of the ferrite. Effects that occur due to the saturation of the ferrite could not be considered.



Zwirlein, Klaus

Entwicklung eines Simulationsmodells für Verteiltransformatoren auf Basis von Designparametern

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines elektrischen Simulationsmodells für Verteiltransformatoren auf Basis von Designparametern beschrieben. Das gesamte elektrische Betriebsverhalten des Transformators bei Nennfrequenz wird dabei einzig aus der Geometrie von Kern und Wicklungen abgeleitet. Die Implementierung des Transformatormodells erfolgt in der Sprache Simscape, welche Bestandteil des Matlab/Simulink-Pakets von MathWorks ist. Zur Validierung des Modells wird ein realer, dreischenkliger Verteiltransformator mit einer Bemessungsleistung von 400 kVA untersucht. Dabei werden das Übersetzungsverhältnis, die relative Kurzschlussspannung und die Phasenverschiebung zwischen der Ober- und Unterspannung gemessen und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Development of a Simulation Model of Distribution Transformers Based on Design Parameters

This thesis presents the development of a simulation model of distribution transformers based on design parameters. The basic electrical behaviour (e.g. resistances, leakage inductances) is thereby derived solely from the geometry of the core and windings. The implementation of the transformer model is made in Simscape, which is part of the Matlab/Simulink package from MathWorks. To validate the model, a real three phase distribution transformer with a rated power of 400 kVA is investigated. The transmission ratio, the relative short-circuit-voltage and the phase shift between the high and low voltage are measured and compared with the results of the simulation.

NAME	ТНЕМА
Ait, Mounir	Interpretationsmethodik durch FRA zur Zustandsdiagnose
	von Leistungstransformatoren.
	Interpretation Methodology by FRA for Condition Diagnosis
	of Power Transformers.
Alberti de Souza,	Softwareentwicklung zur Teilentladungsmessung.
Ricardo	Development of a Software for Partial Discharge
	Measurements.
Ankermann, Tobias	Mikrocontroller gestützte Langzeitdatenerfassung der
	relativen Feuchte mittels kapazitiver Sensoren.
	Development of a microcontroller board for long time data
	logging of relative moisture measurements.
Antic, Radoslav	Untersuchung von Kriechentladungen bei imprägniertem
	Pressboard in natürlichen Esterflüssigkeiten.
	Investigation of creep breakdown of impregnated pressboard
	in natural ester.

Abgeschlossene Studien- und Bachelorarbeiten vom 1.11.2009 bis 31.10.2010:

NAME	THEMA
Arnold, Philipp	Aufbau eines Magnetfeldprüfsystems für EMV-Messungen
	nach IEC 61000-4-8.
	Magnetic Field Test System for EMC Measurements
	according to IEC 61000-4-8.
Ardebili Asl, Pooya	Modellierung von Kfz-Hochvoltkabeln.
	Modeling of automotive High Voltage Cables.
Brandl, Ron	Aufbau einer Messanordnung und Untersuchung
	verschiedener Dämpfungsmethoden von schnellen
	Transienten (VFT) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS).
	Configuration of a test setup and examination of different
	possibilities to damp VFT in GIS.
Eilenberger, Simon	Betrachtung einer ortsveränderlichen Teilentladungsquelle
_	im Frequenz- und Zeitbereich basierend auf der IEC 60270.
	Investigations of a portable partial discharge source in time
	and frequency range according to IEC 60270.
Eisenhardt, Markus	Datengestützter Aufbau von Fuzzy Inferenz-Systemen durch
	Clustering.
	Data based construction of fuzzy inference systems by
	means of clustering.
Gu, Mengtao	IEC und UHF-Messmethode zur Langzeituntersuchung von
	TE.
	IEC and UHF Measuring Method for long-term study of PD.
Haas, Philipp	Untersuchung der Feuchtemigration in Öl-Papier-Isolationen,
	Modellbildung, Simulation und Experiment.
	Moisture migration in paper-oil insulations – simulation and
	experiment.
He, Yu	Untersuchung aktueller Windgeneratorkonzepte.
	Analysis of current wind generator concepts.
Heckel, Marcel	Synthese eines Äquivalenznetzwerkes basierend auf
	Frequenzgangsmessungen bei Leistungstransformatoren.
	Synthesis of Electrical Networks based on Power
	Transformer Transfer Function Measurements.
Heilmeyer, Johannes	Schaltungsentwicklung zur Erkennung von UHF-TE-
	Signalen.
	Development of a trigger system for identification of UHF PD
	signals.
Heyne, Jens	Dielektrische Untersuchungen verschiedener
	Isolierflüssigkeiten.
	Dielectric measurements of different insulating liquids.
Jourdan, Dirk	Gasungsverhalten von Teilentladungen unter Ol.
	Gassing behaviour of partial discharges in oil.
Kocakoyun, Okan	Programmierung eines Matlab-Tools zur Anpassung von
	Messdaten.
	Programming of a Matlab-I ool for the adjustment of
	measurement data.
Kopp, Joachim	Erzeugung von seriellen Lichtbögen in
	Niederspannungsschaltanlagen.
	Generation of series arc faults in low voltage switchgear.



NAME	ТНЕМА
Körner, Christian	Studie zum Sensitivity Check in GIS.
	Study of sensitivity check in GIS.
Lohr, Alexander	Entwicklung und Untersuchung von VFTO-Fallen.
	Development of and research on VFTO-traps.
Matusek, Adrian	Aufbau und Evaluierung einer Hardwareplattform zum
	Einlesen und Verarbeiten von Signaldaten.
	Development and evaluation of a hardware platform for
	importing and processing signal data.
Radev, Ivan	Literaturstudie unterschiedlicher Mustererkennungsverfahren
	von Teilentladungen.
	Different pattern recorgnition methods of partial discharges.
Schmid, Steffen	Gasungsverhalten verschiedener Isolierflüssigkeiten bei
	elektrischen Durchschlägen.
	Gassing behaviour of different insulating liquids with electric
	breakdowns.
Xu, Yaohua	Uberarbeitung des Fachpraktikumsversuchs "Netzschutz in
	Hochspannungsnetzen".
	Redesign of the laboratory course "Power system
	protection".
Zhang, Yuanyuan	Vergleich aktueller Umrichtertechnologien.
	Comparison of current converter technologies.
Zhao, Yi	Software zur graphischen Auswertung von EMV-
	Emissionsmessungen.
	Software for graphical evaluation of EMC emission
	measurements.
Zhong, Shuang	Untersuchung eines Sensorsystems zur online Gas-in-Ol-
	Analyse.
	Verification of a sensor system for online DGA.
Zhou, Ji	Bestimmung der S-Parameter von Kfz-Hochvoltkabeln.
	S-Parameter determination of automotive High Voltage
	Cables.



4. **PROMOTIONEN**

Modellierung leitungsgebundener Störgrößen in der Komponenten- und Fahrzeugmessung

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Hauptberichter:	Prof. DrIng. S. Tenbohlen
Mitberichter:	Prof. DrIng. S. Dickmann
	Universität der Bundeswehr, Hamburg
Tag der mündlichen Prüfung	: 13.10.2010

Sinkende Entwicklungszeiten und die steigende Anzahl an elektronischen Komponenten in modernen Kraftfahrzeugen erfordern eine genaue Betrachtung der von den eingesetzten Komponenten ausgehenden elektromagnetischen Störgrößen. Nur so ist eine reibungslose Funktion aller Systeme im Fahrzeug gewährleistet. Während der EMV-Bewertung werden die Komponenten einer Reihe von Prüfungen hinsichtlich der Störfestigkeit und der Störaussendung unterzogen. Erst wenn die Systeme den Anforderungen der Komponentenprüfung genügen erfolgt der Übergang in die Fahrzeugumgebung.

Neben der Unterteilung der Prüfungen in Störfestigkeit- und Störaussendungsprüfungen wird in beiden Methoden zwischen feld- und leitungsgebundenen Störgrößen unterschieden. Feldgebundene Störungen breiten sich als elektromagnetische Wellen aus, wobei die Bewertung über die vorhandene elektrische Feldstärke vorgenommen wird. Leitungsgebundene Störgrößen hingegen sind an das Leitungssystem im Fahrzeug als Verbreitungsmedium gebunden und breiten sich daher entlang der Fahrzeugkabelbäume aus. Aufgrund der hohen Vernetzung moderner Kraftfahrzeuge wird es den Störungen ermöglicht, sich im gesamten Fahrzeug zu verteilen. Besonders Empfangseinrichtungen für Funkdienste werden durch die Störgrößen beeinflusst, da sie zur Detektion von Signalen in der Größenordnung der Störungen optimiert sind. Eine Beeinflussung kann sich durch eine Erhöhung des Rauschpegels bemerkbar machen, bis hin zum vollständigen Ausfall des Dienstes bei Funktion der störenden Komponente.

Die Bewertung leitungsgebundener Störgrößen erfolgt in der Komponentenprüfung über den auf den Versorgungsleitungen fließenden Störstrom. In der Fahrzeugmessung darf die Störspannung an den Empfangseinrichtungen des Fahrzeugs die Grenzwerte nicht überschreiten.

Gegenstand der Arbeit ist die Beschreibung und Modellierung der emittierten leitungsgebundenen Störgrößen mit verschiedenen Methoden in Messung und Simulation. Dazu erfolgt eine Modellierung der einzelnen Teilsysteme, wodurch es ermöglicht wird, das Verhalten der Störquelle im Frequenzbereich abzubilden. Da-



durch lassen sich auftretende Störgrößen im System abschätzen und die für eine zielgerichtete Entstörung notwendigen Schritte ableiten.

Eine verbreitete Methode zur Unterdrückung leitungsgebundener Störgrößen ist der Einsatz von Filterschaltungen. Sie verhindern, dass die Störungen von der Komponente in das Bordnetz übertragen werden. Die erzielte Einfügedämpfung der Filter ist jedoch stets abhängig von der vorhandenen Impedanz der Störquelle sowie der Impedanz des Versorgungssystems im Fahrzeug.

Zur Charakterisierung der Störquelle erfolgt eine Unterteilung in Gleich- und Gegentaktanteile. Dadurch ist es möglich, eine Entscheidung über die dominierende Störgröße im System zu treffen. Weiterhin können die Impedanzen der Gleich- und Gegentaktstörquelle im Messaufbau ermittelt werden.

Mit der vorgestellten Methode lässt sich somit die erreichbare Filterdämpfung verschiedener Anordnungen in Abhängigkeit der Eigenschaften der Komponente berechnen, ohne dass eine aufwendige Iteration der Filterelemente notwendig ist.

Die Zerlegung in Gleich- und Gegentaktstörungen ist jedoch nur für symmetrische Filteranordnungen anwendbar. Unsymmetrische Filter erzwingen eine Modenwandlung zwischen Gleich- und Gegentaktgrößen, wodurch eine unabhängige Beschreibung der einzelnen Störungen nicht mehr möglich ist.

Eine umfassende Störquellenbeschreibung wird durch die vorgestellte Charakterisierung aktiver Quellen in Matrixschreibweise erreicht. Dabei werden durch eine gezielte Belastung der Störquelle die einzelnen Matrixeinträge ermittelt. Als Ergebnis erhält man die Impedanzmatrix der Schaltung und die Störgrößen der Komponente in komplexer Darstellung. Wird das gesamte Komponentensystem, bestehend aus funktionalem Teil der Schaltung, Filter und Netznachbildung in Matrixschreibweise abgebildet, ist eine Berechnung der auftretenden Störgrößen selbst mit unsymmetrischen Filterelementen möglich.

Beim Übergang von der Komponentenprüfung im Labor zum Einsatz im Fahrzeug ändern sich die elektrischen Randbedingungen im Umfeld der Komponente. Während bei der Prüfung im Labor eine resonanzfreie Bordnetznachbildung zum Einsatz kommt, kann im Fahrzeug eine Rückwirkung der Leiterverbindungen auf die Störungen eintreten. Je nach Störungsart ergibt sich durch den eingesetzten Kabelbaum im Versorgungssystem eine deutliche Überhöhung der Störströme im Fahrzeug.

Zur Untersuchung realer Fahrzeugkabelbäume werden im Labor verschiedene Arten von Leiterverbindungen in einer Labornachbildung aufgebaut und hinsichtlich ihrer Impedanzverhältnisse bewertet. Dabei zeigen kurze Kabelbaumanordnungen mit einer geringen Anzahl an Adern im Bündel die höchste Resonanzgüte und damit eine hohe Beeinflussung der vorhandenen Störströme.



Die Aufteilung der Störgrößen in Gleich- und Gegentaktanteile ist nicht nur hilfreich bei der Auswahl geeigneter Filterelemente. Über die erarbeiteten Zusammenhänge zwischen der Impedanz des Versorgungssystems im Fahrzeug und dem dominierenden Störmodus kann eine Abschätzung des Einflusses der Fahrzeugumgebung auf die emittierten Störungen der Fahrzeugkomponente bereits während der Komponentenprüfung im Labor erfolgen.

Modelling of Conducted Emissions for Componentand Vehicle Measurements

Dipl.-Ing. Heinz Rebholz

Given limit values for conducted emissions ensure, that every component within a vehicle can operate at the desired function and is not disturbed by external high frequency noise sources. Especially due to the increasing level of electronic equipment the EMC (electromagnetic compatibility) gains significance. To reduce conducted emissions, line filters are employed which are improved until the limit values are reached. Up to now, the filter development process is carried out by trial and error procedures in dependence of the given housing and nominal current values. The design of filters in the frequency domain is well-known in signal processing tasks. However, the methods are not directly applicable to reduce conducted emissions with line filters, due to the unknown behaviour of the device under test (DUT). Only if the input impedance of the DUT is known, the resulting filter attenuation can be exactly predicted.

To characterise conducted emissions, every part of the system has to be described as a mathematical model or an equivalent network model. The component system is build up considering the DUT, the line filter, and the line impedance stabilisation network (LISN). The LISN is used to simulate a vehicle harness between the battery supply and the DUT as well as to uncouple the noise currents at the power lines to the measurement receiver. Filter circuits can be easily described by characterising the single filter elements which are assembled to a filter system for network simulations.

After the successful reduction of the conducted noise currents within the frequency range from 0.15 -108 MHz, the DUT is deployed within the vehicle. Compared to the component test method in the laboratory, the DUT is now connected by the vehicle harness to the vehicle's power supply. The connecting wires are mainly part of a harness system which can consist of simple double wires or an assembly of up to 100 wires, building the cable harness. Existing wire resonances are influencing the noise currents, generated by the DUT. Thus, a behavioural model of the harness is needed to estimate the influence of the wire impedance on conducted emissions.

FEH

To characterise active circuits two different methods are presented. Both techniques are using the voltage drop method, which means, that the noise sources are loaded with a known impedance value to characterise the system. The first method provides a model which differentiates between common- and differential-mode sources and impedances. Every arbitrary system can be characterised with this method. However, the procedure is only capable to handle symmetric filters connected to the DUT. The symmetry is defined as the symmetry in respect to the reference ground. Thus, a fully mathematical description of the noise source is needed which can connect even non-symmetric structures to the DUT.

The description is based on Thevenin's law which states, that every active and linear network can be characterised with a passive impedance matrix and additional voltage sources for every considered network port. This statement is true, as long as the filter element is not influencing the noise source. For the filter development process this statement should be always valid anyway, otherwise the filter circuit can be seen as part of the functional circuit of the component. The presented method can be employed for periodic and stable noise sources as switched mode power supplies (SMPS).

Automotive harnesses are designed to distribute DC power to every component within the vehicle or to interconnect communication systems like the CAN bus. Anyway, the harness is not desired to transmit or reject high frequency noise currents. Due to the resonant behaviour of the harness, the noise currents emitted by the DUT are influenced by the harness. Thus, a description for the harness connections within the vehicle is essential to consider the transition from the component test system within the laboratory to the vehicle set-up.

To characterise different harness systems, a complete vehicle harness is built up within the laboratory. Measurements of the input impedance show the behaviour of different harness classes. Very high resonant structures can be recognised for short wire connections for harness systems with less than ten wires within the bundle. As for the filter development process, a separation into common- and differential-mode input impedance values shows the influence to the modal noise system.





5. FORSCHUNGSARBEITEN

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

Hochspannungstechnik

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

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

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



RESEARCH ACTIVITIES

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

High Voltage Engineering

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

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

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



Energieübertragung

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

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

Elektromagnetische Verträglichkeit

Das Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist am Institut seit vielen Jahren ein wichtiger Schwerpunkt. Begonnen haben diese Aktivitäten mit der Erzeugung und Messung elektromagnetischer Feldimpulse mit extrem hohen Amplituden und sehr kurzen Anstiegszeiten. Dabei stand die Nachbildung von NEMP, LEMP und die Simulation von Trennerschaltungen in SF6-Anlagen im Vordergrund. Neuere EMV-Forschungsarbeiten befassten sich mit schnellen Emissionsmessverfahren im Zeitbereich (FEMIT: Fast Emission Measurement in Time Domain) und mit der Modellierung und messtechnischen Untersuchung von elektrostatischen Entladungen von Kunststoffoberflächen.

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

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



Power Transmission

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

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

Electromagnetic Compatibility

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

Newer research work in this field has dealt with fast emission measurement procedures in time domain (FEMIT: Fast Emission Measurement in Time Domain) and with the modelling and measurement of discharge currents of electrostatically charged plastic surfaces.

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

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



5.1 HOCHSPANNUNGSTECHNIK

Vibrationen von Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Michael Beltle

In der elektrischen Energieversorgung ist die Versorgungssicherheit von zentraler Bedeutung. Ausfälle können der Volkswirtschaft erheblichen Schaden zufügen. Daher müssen die Betriebsmittel elektrischer Energienetze sehr zuverlässig sein. Besonders Leistungstransformatoren stehen im Fokus dieser Betrachtung, da sie die Schnittpunkte der Netze darstellen. Ein neuer Ansatz zur Zustandsbeurteilung dieser Betriebsmittel wird im Folgenden vorgestellt.

Im Rahmen dieser Forschungstätigkeit wird die Charakterisierbarkeit und Quantifizierbarkeit des Vibrationsverhaltens von Leistungstransformatoren betrachtet. Es wird untersucht, wie aus dem Vibrationsverhalten von Transformatoren Rückschlüsse auf Beschädigungen des Aktivteils gezogen werden können und welche Zusammenhänge zwischen der Belastung 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. Die Weiß'schen Bezirke richten sich sowohl bei positivem wie negativem maximalen Fluss in gleicher Richtung aus. Daher führt eine elektrische Periode zu zwei Maxima der Materialausdehnung. Die mechanische Schwingung ist somit mindestens um Faktor zwei größer als die elektrische Netzfrequenz. Allerdings schwingt ein Kern typischerweise nicht nur mit der doppelten Netzfrequenz, in Europa also 100 Hz, sondern meist mit der dritten Harmonischen bei 300 Hz. Grund hierfür sind unter anderem Nichtlinearitäten in der Magnetisierungskennlinie, die zu höheren Frequenzen des magnetischen Flusses führen. Die Magnetostriktion ist im Leerlaufbetrieb die dominante Vibrationsquelle.

Unter Last überlagern stromabhängige Effekte die Magnetostriktion. Zum einen wirken auf die von Strom durchflossenen Leiter der Wicklungen im magnetischen Wechselfeld Kräfte, die ebenfalls zu einer Schwingung mit doppelter elektrischer Frequenz führen. Zum anderen erhöht sich im Lastfall der magnetische Streufluss. Flussfallen, die typischerweise in Leistungstransformatoren verbaut sind, werden dadurch zu mechanischen Schwingungen angeregt. Im Gegensatz zur Kernvibration im Leerlauf ist die dominante Lastfrequenz die doppelte Netzfrequenz, also 100 Hz. Im Betrieb ergibt sich das gesamte Vibrationsverhalten eines Leistungstransformators aus der Überlagerung beider Effekte. Das gesamte Schwingungsverhalten eines Leistungstransformators ist in Fig. 2 dargestellt.


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. Therefore, the resources of electrical energy networks must be reliable. Especially power transformers have to be considered, since they are the intersections of energy networks. A new approach of site evaluation of these resources will be presented.

Current research activity is trying to quantify and characterize the vibration behaviour of power transformers. The correlation of vibrations and the mechanical condition of the active part is being analysed. Key issues of this investigation are the dependencies between vibrations and the actual loading rate of a power transformer as well as the influence of mechanical damages on vibrations.



Fig 1: 120-MVA-Maschinentransformator eines Kohlekraftwerks 120 MVA Generator step-up-unit at coal fired power plant

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 lamination 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 lamination sheets and thus to vibrations. The mechanical orientation of the Weiss domains at the positive and negative maximum of the magnetic flux is the same. Therefore, an electrical period leads to two maxima of the material expansion. However, a core typically does not oscillate with double electric frequency- 100 Hz in Europe- but mostly with the third harmonic at 300 Hz. This is caused by nonlinearities in the magnetization and other effects leading to higher frequencies of the magnetic flux and therefore higher mechanical oscillations. Magnetostriction is the dominant source of vibration in no-load operation of a power transformer.



Die Messungen stammen von einem 120-MVA-Maschinentransformator eines Kohlekraftwerks, siehe Fig. 1. Aufgezeichnet ist der zeitliche Verlauf des Laststroms sowie der mechanischen Grundschwingung bis zur 5. Harmonischen. Wird der Transformator zugeschaltet, dauert es ca. einen Tag bis ein eingeschwungener Zustand erreicht ist. Grund hierfür ist hauptsächlich die Restmagnetisierung des Kerns (Remanenz). Im eingeschwungenen Betrieb wird die Lastabhängigkeit erkennbar. Die 100 -Hz-Komponente der Windungen und Flussfallen folgen dem Laststrom. Die Magnetostriktion des Kerns (300 Hz) zeigt ein inverses Verhalten.





Zur Klassifizierung der Frequenzanteile werden statistische Auswertemethoden eingesetzt. Hierzu werden die Messdaten geclustert, siehe Fig 3. Für jede Messung wird die Amplitude der Frequenz gegen den gemessenen Laststrom aufgetragen. Als Mittelpunkt der Cluster dient der statistische Medianwert. Theoretisch bleibt der Medianwert bei einer bestimmten Last in etwa gleich, solange keine mechanischen Veränderungen auftreten. Um das Verfahren zu guantifizieren, müssen weitere Messungen verglichen werden. Im nächsten Schritt wird untersucht, ob sich mechanische Änderungen von Kern, Wicklungen und Flussfallen mit diesem Verfahren detektieren lassen. Die weitergehende Forschungsarbeit beschäftigt sich neben der statistischen Auswertung von Leistungstransformatoren im Betrieb mit der Optimierung der Messverfahren. Untersucht wird, an welchen Stellen des Kessels Vibrationen möglichst gut, also mit geringer Dämpfung, gemessen werden können. Auch wird untersucht, ob durch eine geeignete Wahl von Messstellen eine selektive Messung von Kern, Wicklung und Flussfallen möglich ist. Zusätzlich werden alternative Sensortechniken betrachtet, um Vibrationen nicht nur auf dem Kessel, sondern auch im Inneren von Transformatoren direkt messen zu können.



In load operation, current-related effects superimpose magnetostriction. Forces of the alternating magnetic field affect current-carrying windings leading to an oscillation with double electrical frequency. Also the magnetic leakage flux increases which causes magnetostriction in leakage flux traps. These traps also vibrate. In contrast to core vibrations in no-load condition the dominant frequency in load condition is at 100 Hz. The overall frequency spectrum of a power transformer during service consists of both effects. An example of the actual frequency spectrum of a power transformer can be seen in Fig 3. The vibrations are measured at a 120 MVA generator step-up unit of a coal-fired power plant, see Fig 1.



Fig 3: Medianwerte von sechs Messtagen bei Nennbetrieb des Transformators Median values from six days at nominal load of the power transformer

Fig. 1 shows time dependent load current and mechanical frequencies up to the fifth harmonic. Higher harmonics are not considered because of their small amplitudes. If the transformer goes online it will take about one day until a steady state is reached. The reason for this behaviour is the remanence of the core. In steady state the frequency spectrum changes are depending on the load current. The basic frequency is driven by windings and leakage flux traps. It changes proportional to the load current. The third harmonic frequency emitted by the core changes inversely proportional to the load current. The measurement data is clustered to determine the vibration behaviour, see Fig. 3. The amplitude of a specific frequency vs. the load current is plotted for each measurement. The center of a cluster is the statistical median value. Theoretically, the median value at a certain load remains roughly the same, as long as there are no mechanical changes. Further measurements are needed to evaluate this method. The next step is to investigate whether mechanical changes of the core, windings and flux traps can be detected by using this approach. The ongoing research will additionally examine the optimization of measurement methods. Positions on the tank surface with low damping for vibrations will be determined. It is also of to measure vibrations of parts of the core, windings and leakage flux traps separately by an adequate choice of sensor positions. Furthermore, different sensor techniques for inside tank measurements are tested.



Entwicklung von Konzepten zur Dämpfung von "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTO) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS)

Dipl.-Ing. Simon Burow

Gasisolierte Schaltanlagen sind in elektrischen Energieverteilungssystemen weit verbreitet. 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.

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

Eine Dämpfung dieser Überspannungen soll mit einfachen Möglichkeiten, die die Zuverlässigkeit einer GIS nicht herabsetzen, erreicht werden. Dazu werden zwei komplett unterschiedliche Ansätze verfolgt. Für einen Einsatz von Ferritringen, die auf dem Innenleiter der GIS angeordnet werden (Fig. 1), sind extreme Eigenschaften des Ferritmaterials nötig. Um eine effektive Dämpfung zu erreichen, dürfen die Ferritringe auch bei sehr hohen magnetischen Feldern nicht in Sättigung geraten. Materialien, die für die in einer GIS auftretenden Felder geeignet wären, werden gesucht und im Versuchsaufbau getestet.



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

Beim zweiten Ansatz wird ein abgestimmter Hohlraum innerhalb der GIS durch die VFTOs zum Schwingen angeregt. Den VFTOs soll Energie entzogen und eine Dämpfung erzielt werden. Fig. 2 zeigt einen Versuchsaufbau, an dem die Eigenschaften eines Hohlraums untersucht werden können. Erste Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften des Hohlraums wurden durchgeführt. Zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften werden weitere Untersuchungen folgen.



Development of conceptions to damp "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTOs) 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 was engineered.

Switching operations and failures in GIS could cause transient equalisation effects. These high frequent overvoltages are called "Very Fast Transient Overvoltages" (VFTOs) and could reach a multiple of the rated voltage. Isolating 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 VFTOs.

With simple methods and without a loss of reliability a decline of these overvoltages should be achieved. Therefore two completely different options are persecuted. The application of ferrite rings, which are arranged on the inner conductor of GIS (Fig. 1), demands very high requirements on the ferrite material. To damp the overvoltage effectively, the ferrite rings must not go into saturation. Therefore materials, which are suitable for the high magnetic fields in a GIS, are searched and tested in the GIS-test setup.



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

The other approach uses a cavity in the GIS. VFTOs, 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. First tests to estimate the characteristics of the cavity are done. Investigations of damping possibilities are planned.



Elektromagnetische Teilentladungsmessung im ultrahohen Frequenzbereich (UHF) an Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Sebastian Coenen

In zunehmendem Maße entsteht der Bedarf, die bestehende Isolationsqualität von öl/papierisolierten Transformatoren vor Ort und im Betrieb zu überprüfen, 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 unter Öl sind sehr schnelle elektrische Prozesse, die elektromagnetische Wellen mit Frequenzen bis in den ultrahohen Bereich (UHF: 300 – 3000 MHz) abstrahlen. Ausgekoppelt werden diese elektromagnetischen Wellen durch UHF-Sensoren, wie beispielsweise in Fig. 1 zu sehen.



Fig. 1: UHF-Sensor für Standard-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. Dadurch kann 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, wie im Folgenden gezeigt, zusätzlich akustische Sensoren am Transformator angebracht.

Wegen steigender Konzentration von gelöstem Wasserstoff (H₂) in den Routineölproben wurde ein 333-MVA-Netzkuppelspartransformator während des Betriebes auf TE getestet. Hohe Störpegel vor Ort verhinderten eine erfolgreiche elektrische Messung nach IEC 60270 bei Messfrequenzen unter 1 MHz. Demzufolge wurden UHF-Messungen in Kombination mit akustischen Messungen zur Detektion und Ortung von TE-Quellen eingesetzt. Der Transformator verfügte über drei Ölschieber, an denen je ein UHF-Sensor installiert wurde. Fig. 2 zeigt die Position dieser UHF-Sensoren (UHF 1-3) sowie die weiterhin verwendeten akustischen Sensoren (A1-A6).



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

Dipl.-Ing. Sebastian Coenen

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



Fig. 2: Geortete TE-Quelle im Bereich des Stufenschalters, Positionen der UHF-Sensoren (UHF 1-3) sowie der akustischen Sensoren (A1-A6) Location of PD source with position of UHF probes (UHF 1-3) and acoustic sensors (A1-A6)

The probes can be inserted into the transformer during full operation using the 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. When electrical or UHF PD measurements confirm PD activity, a three dimensional localisation of PD sources is the next step for risk evaluation of PD phenomena. Therefore acoustic measurements are combined with UHF measurements, as described in the following.

Because of increasing dissolved gas values, a 333 MVA grid coupled single-phase autotransformer was tested on-site and on-line for PD. The high noise level at site strongly disturbed the conventional PD measurements made according to IEC 60270. Consequently, UHF PD measurements for PD detection in combination with acoustic measurements for PD localisation were performed in order to get reliable results. In that case the transformer possessed three oil filling valves and three identical UHF Sensors were installed. Fig. 2 shows the positions of the UHF probes.



Zwei UHF-Sensoren sind dabei an den gegenüberliegenden Stirnseiten angebracht und ein dritter Sensor unten in der Mitte der Seite, siehe Fig. 2. Bei Nennspannung konnten UHF-Signale von einer internen TE-Quelle an allen drei Sensoren erfasst werden. Fig. 3 zeigt beispielhaft die Signale der Sensoren UHF 1 und UHF 2, beide gemessen ohne Vorverstärkung. Eine Analyse der Signale, siehe Fig. 4, ergibt das für TE typische breitbandige Frequenzspektrum (Fig. 4, links) sowie das zur Prüfspannung korrelierte Auftreten der Signale (Fig. 4, rechts).

Für die folgende Ortung ist in Fig. 3 der Laufzeitunterschied zwischen den Signalen im Bereich von Nanosekunden (ns) zu erkennen, hier ca. 40 ns. Unter Berücksichtigung von Laufzeitunterschieden, verursacht durch unterschiedliche Kabellängen, ergibt sich eine Abschätzung des Ortes der TE-Quelle im Bereich des Stufenschalters. Aus dieser Information ergibt sich die Anordnung der akustischen Sensoren auf der Tankwand, siehe Fig. 2.



Fig. 3: Laufzeitunterschied (hier ca. 40 ns) zwischen den UHF-Sensoren 1 und 2 Time of flight difference (here approx. 40 ns) between UHF probes 1 and 2

In Fig. 2 ist zudem der errechnete Ort der TE-Quelle in der Nähe des Stufenschalters eingezeichnet. Die geometrische Ungenauigkeit liegt hier im Bereich von ca. 40 cm in allen drei Raumachsen. Diese Ungenauigkeit begründet sich durch die Verwendung von verschiedenen Sensorkonfigurationen zur Berechnung des Ortes. Die verschiedenen Konfigurationen können durch sechs verschiedene Laufzeitinformationen erreicht werden, drei UHF- (UHF 1 – UHF 3) und drei akustische Laufzeitunterschiede (A2, A5, A6).

Nach dem Transport des Transformators zum Hersteller wurden die Ortungsergebnisse durch eine elektrische Messung und eine erneute akustische Ortung im Prüffeld bestätigt. Danach wurde der Transformator geöffnet und eine optische Inspektion des Aktivteils im Bereich des Stufenschalters führte zu der gesuchten TE-Quelle und ermöglichte so eine Reparatur.

Nach der Reparatur durchlief der Transformator erfolgreich die erneuten Abnahmeprüfungen ohne weitere Anzeichen auf TE-Aktivitäten und befindet sich wieder im Einsatz.



Two probes (UHF 1 and 2) are opposite each other at the top of both front ends of the tank. The third one (UHF 3) is located at the bottom in the middle of the transformer side, see Figure 2. At nominal voltage, UHF signals from an internal source were detectable with all three probes. In Fig. 3 the exemplarily measured signals of two UHF probes (UHF 1 and 2) are shown, measured without amplification. Analysing the signals, see Fig. 4, result in the typical broad-band frequency spectrum (Fig. 4 left) and the phase correlated occurance of PD signals (Fig 4 right).

For localisation the time of flight differences in the range of nano seconds (ns) between the signals, here approx. 40 ns, can be seen in Fig. 3. Taking into account time of flight differences caused by different lengths of measuring lines, a first estimation of the geometric PD location led to the transformer side of the tap changer. Due to that information six acoustic sensors (A1 – A6) are placed on the tank as presented in Fig. 2.



- Fig. 4: links) Frequenzspektrum der UHF-Signale von Sensor UHF 2 rechts) Phasenaufgelöste Aufzeichnung der UHF-Signale von Sensor UHF 2 left) Frequency spectrum of UHF signals of probe UHF 2
 - right) Phased Resolved Partial Discharge Pattern (PRPD) of probe UHF 2

As also illustrated in Fig. 2, the supposed position of the PD source is in the vicinity of the tap changer. Geometrical deviation is thereby within the range of approx. 40 cm on all space axes. This deviation is caused by using different combinations of time of flight differences and different localisation methods. The different time of flight differences is measured with six different sensors which are three UHF Sensors (UHF 1 – UHF 3) and three acoustic sensors placed near to the PD source (A2, A5, A6).

After transportation of the transformer to the manufacturer site the localisation result was proofed by an IEC triggered acoustic measurement in the test field and the transformer was detanked. The optical inspection of the active part at the tap changer confirmed the localisation results.

After repair procedure the transformer passed the acceptance test without any indication of PD activity and was put back into service.



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 ca. 2 MHz wird maßgeblich durch die kapazitiven Kopplungen zwischen Wicklungen, Kern und Kessel bestimmt. Die frequenzabhängige Übertra-gungsfunktion TF(f) bildet diese geometrischen Gegebenheiten gleich einem Fingerabdruck ab. Verändern sich geometrische Abstände im Innern des Transformators, so hat dies unmittelbaren Einfluss auf die Streukapazitäten, welche für das Resonanzverhalten der Anordnung mitbestimmend sind. Die Folge sind Veränderungen der frequenzabhängigen Wicklungsimpedanz und damit der Übertragunsfunktionen 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 Leistungs-transformators zu detektieren. Auf Erfahrungswerten basierend werden die Fehlerarten Windungskurzschluss, radiale Wicklungsdeformation, axiale Wicklungs-verschiebung, Leiterverkippung, Leiterbruch sowie Beschädigungen der Wicklungs-ausleitungen und des Kerns unterschieden. Die Beschädigungen sind oftmals Folge elektrischer Fehler wie Kurzschlüsse und können je nach Schwere ein Weiterbetreiben des Trafos verbieten, erhöhen mindestens jedoch das Ausfallrisiko. Beispielhaft für einen Wicklungsschaden zeigt Fig. 1 den durch einen Kurzschluss in einem 110kV-Netz verursachten Schaden an Phase U eines 220kV/110kV-Transformators.

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. Das Übertragungsverhalten von Transformatoren kann stückweise durch ein lineares elektrisches Netzwerk beschrieben werden. Jede messbare Übertragungsfunktion entspricht einer Kombination von Signalen am Eingangs- und Ausgangstor des Netzwerks, dargestellt in Fig. 2. Bekannte Fehlerarten wie Deformationen wirken sich in Form von Verschiebung, Erzeugung oder Verschwinden von Resonanzstellen in einer Übertragungsfunktion aus. Zur näheren Untersuchung der Zusammenhänge zwischen physikalischer Veränderung am Aktivteil und zugehöriger Abweichung der Transferfunktion werden die gemessenen Übertragungsfunktionen mit Hilfe des



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 with different types of defects of the active part.

Frequency Response Analysis (FRA) as method for condition monitoring

The electrical transfer behaviour of power transformers in the frequency range up to approx. 2 MHz is mainly determined by the capacitive coupling amongst windings, core and transformer tank. The frequency dependent complex transfer function $\underline{TF}(f)$ represents and displays the geometric structural condition like a finger print. If the geometric clearances inside the transformer change, stray capacitances are affected inherently and therewith the transfer function changes, too. Investigations in the past revealed the FRA as being a highly sensitive method to diagnose electrical and mechanical failures of a power transformer's active part. Changes are very 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 risc of outage.



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

Fig. 1. shows a winding damage on Phase U of a 220 kV/110 kV power transformer caused by a short circuit within the 110 kV grid. Until now, objective criteria for comparison and assessment of transfer function measurements are missing. Emphasis of this research is the interpretation of transfer functions changes in relation to different failure types. The transfer behaviour of power transformers can be described by a linear electrical network.



Vector-Fitting-Approximationsverfahrens in eine analytische Form überführt. Die in einer gemessenen Transferfunktion enthaltene Information über ihr frequenzabhängiges Resonanzverhalten wird im Ergebnis vollständig durch die Pol- und Nullstellen der analytischen Form beschrieben. Diese Darstellung ermöglicht einen algorithmisch gestützten, automatisierten Vergleich zweier Transferfunktionen nach objektiven Kriterien.



$$\underline{H}(s)\Big|_{s=j\omega} = \underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{U}_{out}(j2\pi f)}{\underline{U}_{in}(j2\pi f)} = \underline{TF}(f)$$

Fig. 2: Transformator: Lineares Mehrtor-Modell in RLC-Netzwerk-Darstellung Transformer: Linear model with multiple inputs and outputs as RLC network

Abweichungen im Resonanzverhalten lassen sich im Pol-/Nullstellendiagramm direkt bestimmen und sind somit automatisch quantifizierbar.

Eine weitere Anwendung der Pol-/Nullstellenform von Transferfunktionen ist die Synthese elektrisch äquivalenter Hochfrequenzmodelle von Transformatoren. Aus der gemessenen frequenzabhängigen Impedanzfunktion eines Transformators kann ein Blackbox-Modell erstellt werden, welches bezüglich seines elektrischen Klemmenverhaltens vollständig mit diesem übereinstimmt. Eine Übersicht der einzelnen Schritte des Verfahrens zeigt Fig. 3. In der konkreten Realisierung wird eine Transformatorimpedanz dabei durch einzelne Resonanzkreise nachgebildet. Die Genauigkeit der Modellbildung kann theoretisch beliebig gewählt werden, praktisch ist eine obere Grenze der Modellkomplexität sinnvoll und dem Algorithmus als Eingabeparameter vorgebbar.

Genutzt werden können derartige Modelle zur Vorausberechnung des transienten Verhaltens zwischen Betriebsmitteln (Freileitungen, GIS, Leistungsschalter, Transformatoren) innerhalb von Hochspannungsnetzen mittels Simulationen. Da die Übertragungsfunktionsmessungen mittlerweile zum Standardprogramm bei Abnahmeprüfungen von Großtransformatoren gehören, wird es zukünftig möglich sein, (Blackbox-)Hochfrequenzmodelle auf Basis dieser Messungen in den Lieferumfang von Transformatoren standardmäßig miteinzubeziehen.



Each measurable transfer function equals to a pair of input and output terminals of the network shown in Fig. 2. 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 changes of the active part and corresponding deviations of a transfer function, the measured frequency responses are converted into an analytical representation, i.e. a complex rational polynomial, by the so-called vector fitting algorithm. The information contained in a measured frequency response is fully described by the pole-zero representation. This form enables algorithmic based, automized comparison between two transfer functions according to objective quantifiable criteria.



Fig. 3: Verfahren zur Synthese elektrisch äquivalenter Impedanzmodelle (Blackbox) Synthesis of electrical equivalent impedance models (blackbox)

An additional application of the analytical representation of transfer functions is the synthesis of electrical equivalent high frequency models of transformers. A black box model, showing completely the same electrical behavior at its terminals as the real transformer, can be derived from the analytical form of a measured impedance function. An overview about the required steps of the algorithm is shown in Fig. 3. The accuracy of the model is theoretically not limited; however, an upper limit for the model complexity is suggested from a practical point of view.

These models can be used for prediction of the transient behavior between operating components (like overhead lines, GIS, circuit breakers, transformers) within the high voltage power grid by means of software simulation tools. Due to the fact that, nowadays, transfer function measurements are done during the routine factory testing of most large power transformers, it seems to be possible that black box high frequency models based on these measurements are delivered to utilities together with the transformers by default in the future.



Physikalisch-chemische Charakterisierung natürlicher Ester und Diagnose estergefüllter Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Die Umweltfreundlichkeit und ihr hoher Flammpunkt (>300°C) machen den Einsatz der natürlichen Ester als alternative Elektroisolier- und Kühlflüssigkeit interessant. Für den Betrieb sind die Kenntnis des Alterungsverhaltens und die Entwicklung bzw. Anpassung der Diagnoseverfahren wichtig. Metriken der klassischen Öldiagnose sind die Ölkennzahlen (Durchschlagspannung, Farbe, Wassergehalt, Säurezahl, Verlustfaktor uvm.) und die Spaltgaskonzentrationen (DGA – dissolved gas analysis).

Im vergangenen Jahr wurde an die Ergebnisse von 2009 angeknüpft. Alterungsexperimente wurden fortgeführt und detaillierte Untersuchungen des Gasungsverhaltens mit verbesserten Experimenten wurden auf verschiedene Isolieröle ausgeweitet. Die Anwendung der DGA-Interpretationsverfahren wurde ebenfalls überprüft. Bei den thermisch-oxidativen Alterungsuntersuchungen wurde Ethan (C₂H₆) in großen Mengen und Wasserstoff in kleinen Konzentrationen als Stray Gas identifiziert, d.h. im Öl entstehen Gase durch chemische Prozesse, die unterhalb einer bestimmten Schwelle nicht indikativ für einen technischen Fehler im Transformator sind. Dies konnte bei mehreren estergefüllten Transformatoren im Betrieb und auch von unabhängigen Labors bestätigt werden.

Um Aussagen über den Fortschritt der Alterung des Öls treffen zu können, ist der zeitliche Verlauf der Farb- und Säurezahl der Ester im Vergleich zu klassischen Mineralölen sehr interessant (Fig. 1). Bei den gewählten Randbedingungen (110°C im Konvektionsofen ohne Luftabschluss) verhält sich ein Ester (hier FR3 von Cooper Power Systems) sehr ähnlich zu inhibierten Mineralölen. Weitere Untersuchungen mit Parametervariationen sind notwendig, da z.B. beim Abschluss von Luft oder bei anderen Temperaturen Unterschiede erwartet werden.



Fig. 1: Farb- und Säurezahländerung von Mineralöl (oben) und FR3 (unten) Change of colour and acidity number for mineral oil (upper) and FR3 (lower)



Physico-chemical characterisation of natural esters and diagnosis of ester filled transformers

Dipl.-Ing. Mark Jovalekic

Due to their biodegradability and the high flash point (> 300° C) natural esters are promising insulating and cooling fluids for power transformers. For transformers in service the understanding of the ageing processes and the usage of adequate diagnostic methods is essential. Metrics of the classical oil diagnosis are oil characteristics of state (breakdown voltage, colour number, water content, total acidity number, loss factor etc.) and the concentration of fault gases (DGA – dissolved gas analysis)

The experiments of this year followed up the results from 2009. Ageing experiments were continued and a more detailed observation of the gassing behaviour with improved experiments has been extended to different insulating liquids. The applicability of several DGA interpretation methods has also been checked. As a by-product of the ageing experiments, ethane (C_2H_6) in high amounts and hydrogen in quite low concentrations was identified as stray gas. That means gases are produced in the oil through chemical processes, even though no actual fault is present in the transformer. This has been confirmed in several cases of ester filled transformers and from independent laboratories.

For a better quantification of a transformer oil's ageing state a temporal gradient for the colour and total acidity number is very interesting compared to mineral oil (Fig. 1).



Fig. 2: Duval Dreieck bei elektrischen Durchschlägen in verschiedenen Ölen (links) und verschiedenen Hotspot Temperaturen bei FR3 (rechts) Duval triangle for different oils at impulse breakdown (left) and for different hotspot temperatures in FR3 (right)



Die Gas-in-Öl-Analyse ist ein seit Jahrzehnten erfolgreich und zuverlässig eingesetztes Verfahren zur Zustandsbeurteilung und Fehlerbestimmung bei Transformatoren. Zum Einsatz kommt ein Gaschromatograph mit Headspacetechnik und Autosampler. Detektiert werden können die Luftgase (Stickstoff, Sauerstoff, CO₂) sowie Kohlenwasserstoffe (Methan bis Propen) und reiner Wasserstoff.

Im Labor werden typische Fehler nachgebildet und die dabei entstehenden Spaltgase untersucht. Verschiedene Öle wurden mit elektrischen Durchschlägen mit Hilfe eines Marxgenerators beansprucht. Bei der Bewertung der Ergebnisse wird klar, dass sich Mineralöl, synthetische und natürliche Ester für diesen elektrischen Fehler sehr ähnlich verhalten (Fig. 2a). Für Hotspot Fehler verhält sich FR3 anders als Mineralöl (Fig. 2b). Man erkennt, dass schon bei niedrigen Temperaturen relativ zur Gesamtgasmenge mehr Ethen entstanden ist und darum die Punkte nicht im Zielbereich T1 und T2 liegen. Auch das Phänomen des Stray Gassings spielt hier vermutlich eine Rolle. Neue Grenzwerte werden notwendig und sind durch diese Ergebnisse definierbar.

Ein weiterer Punkt der Transformatoröldiagnose ist der Wassergehalt, der nicht nur Aufschluss über den Ölzustand, sondern auch über die Gewichtsfeuchte der Feststoffisolation liefert. So wurden für eine Vielzahl von Ölen und Materialien die Sorptionskurven (Fig. 3) für verschiedene Feuchten und Temperaturen bestimmt und daraus Gleichgewichtsdiagramme nach dem Vorbild von Fabre-Pichon, Oommen oder Koch konstruiert (Fig. 4).



Zellulose (Pressboard)

Fig. 3: Sorptionsisothermen für 1mm dickes HD-Transformerboard Sorption isotherms for 1mm thick HD transformerboard



In this specific experiment (110°C in a convection oven with air contact) natural ester (FR3) behaves very similar to inhibited mineral oil. For other boundary conditions like absence of air and other temperatures differences are expected.

The dissolved gas-in-oil analysis (DGA) is a well-known and accepted diagnostic method since decades. As measurement device a gas chromatograph with head-space technology and automatic sampler is utilized, which is sensitive to combustible and air gases (H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 , methane up to propane).

Under laboratory conditions typical faults are generated and the fault-gases are analysed. Different transformer oils were stressed by impulse breakdowns. When applying the DGA interpretation schemes one can observe that mineral oil, synthetic and natural ester lead to the same result for this specific electrical stress (Fig. 2a). For different hotspot temperatures FR3 behaves different as expected for mineral oil (see Fig. 2b). It is obvious that even for low temperature faults relatively to the total combustible gas content more ethene (C_2H_4) is produced and therefore the results are not in the area of T1 and T2. Also the previously mentioned stray gassing could have an influence on the interpretation results. New limits are necessary and could be defined through these findings.

Another point for transformer diagnosis is the water content, which doesn't only give information about the oil condition, but also about the moisture content of the solid insulation. Therefore a multitude of oils and materials have been characterised by sorption isotherms (Fig. 3) for different moisture and temperature levels. With these diagrams it is possible to construct new equilibrium diagrams like Fabre-Pichon, Oommen or Koch-curves (Fig. 4).



Fig. 4: Klassisches Gleichgewichtsdiagramm für eine FR3-Pressboardisolation Classical moisture equilibrium diagram for FR3-pressboard combination



Gaslöslichkeiten bei der Gas-in-Öl-Analyse für Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Andreas Müller

Die Gas-in-Öl-Analyse 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 in einem Transformator bei der Zersetzung des Isolieröls 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. Die eigentliche Zustandsdiagnose des Transformators erfordert allerdings viel Erfahrung und Expertenwissen, da allgemeine Daten des Transformators nicht berücksichtigt werden. So werden zum Beispiel Temperatur, Ölmenge, Gaslöslichkeit und –sättigung von den Interpretationsverfahren nicht beachtet.

Im Folgenden sollen die Gaslöslichkeiten sowie die Sättigungsgrenzen einzelner Gase und Gasmischungen näher betrachtet werden. Die Löslichkeit von Gasen in Mineralöl ist sehr unterschiedlich und hängt unter anderem von der Dichte des Öls und der Temperatur ab. Bei der Headspace-Methode zur gaschromatographischen Untersuchung der im Öl gelösten Gase spielt die Löslichkeit eine wichtige Rolle. Dabei wird ein Ölvolumen bei einer bestimmten Temperatur ins Gleichgewicht mit einem Gasvolumen gebracht. Ein Teil der im Öl gelösten Gase verteilt sich zwischen Öl- und Gasvolumen. Dieses Gasvolumen kann dann in einem Gaschromatographen analysiert werden. Mit den sogenannten Ostwaldkoeffizienten und den bekannten Volumina kann die Konzentration der ursprünglich im Öl gelösten Gase berechnet werden. Diese Koeffizienten sind für jeden Gastyp unterschiedlich. Sie unterscheiden sich je nach Ölsorte und sind zusätzlich temperaturabhängig.

In Fig. 1 ist diese Temperaturabhängigkeit für vier Gase beispielhaft dargestellt. Dabei bedeutet ein größerer Ostwaldkoeffizient eine bessere Löslichkeit für dieses Gas. Manche Gase lösen sich bei steigender Temperatur besser im Öl, andere schlechter.

Die maximale Löslichkeit einzelner Gase in Mineralöl ist wichtig, wenn Sättigungsgrenzen betrachtet werden. Wird diese überschritten, perlt das enthaltene Gas aus und verringert evtl. die elektrische Festigkeit des Öls unzulässig. Bei Raumtemperatur (RT) ergeben sich folgende maximale Löslichkeiten:

Gas	H ₂	O ₂	N ₂
max. Löslichkeit in ml/l bei RT	48	161	78

Auffällig dabei ist der weite Bereich, in dem die maximalen Löslichkeiten variieren.



Gas solubility concerning dissolved gas analysis for power transformers

Dipl.-Ing. Andreas Müller

The dissolved gas analysis 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 in transformers generate specific gases during the decomposition of the insulating oil, 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. The actual diagnosis of the transformer, however, requires a lot of experience and expertise because general information of the transformer is not considered. For example interpretation schemes do not take into account boundary conditions like temperature, the amount of oil, gas solubility and saturation limits of different gases.

In the following, gas solubility and saturation limits of gases and gas mixtures will be discussed. The solubility of different gases in mineral oil is variable, for example depending on the density of the oil and the temperature. The solubility of gases plays a major role if the headspace method for DGA is used. In this case a volume of oil at a certain temperature is brought into equilibrium with a gas volume. Parts of the gases dissolved in the oil are distributed between the oil and gas volumes. The gas volume can then be analyzed using a gas chromatograph.



Fig. 1: Temperaturabhängigkeit des Ostwaldkoeffizienten Temperatur dependency of the Ostwald coefficient



Die hier bestimmten Werte gelten nur für einzelne Gase. Bei Gasgemischen beeinflussen sich die verschiedenen Gase in ihrer Löslichkeit. Dies soll im weiteren Verlauf beschrieben werden. Dazu wird eine einfache Gasmischung bestehend aus Wasserstoff als Fehlergas und den Gasen Sauerstoff und Stickstoff aus der Umgebungsluft untersucht.

Für den Versuch wird entgastes und getrocknetes Transformatorenöl verwendet. Die Proben werden in gasdichten Glasspritzen vorbereitet. Dazu wird das Gasgemisch in unterschiedlichen Mengen in die Ölproben eingespritzt. Im Anschluss werden diese Proben für mindestens zwei Stunden geschüttelt, um ein Gleichgewicht zu erreichen.

Die Ergebnisse sind in Fig. 2 dargestellt. Die Konzentration des gelösten Wasserstoffs in Prozent ist über der Konzentration der gelösten Luftgase aufgetragen.



Fig. 2: Gaslöslichkeiten in einer Gasmischung Gas solubilities in a gas mixture

Der Verlauf der Wasserstoff-Konzentration wird durch eine quadratische Ausgleichsgerade angenähert. Hervorzuheben sind die beiden Messpunkte am linken und rechten Rand des Diagramms. Der linke Punkt stellt die maximale Löslichkeit von Wasserstoff in Abwesenheit von anderen Gasen dar. Am Punkt rechts kann die maximale Löslichkeit von Umgebungsluft in diesem Öl abgelesen werden. Für einen Transformator mit derselben Ölfüllung und Temperatur bedeutet dies, dass es unterhalb der Kurve noch möglich ist, weiteren Wasserstoff im Öl zu lösen. Oberhalb der Kurve kann kein Wasserstoff mehr gelöst werden und er würde ausperlen, was einen unzulässigen Festigkeitsverlust des Isolieröls zur Folge hätte. Das bedeutet, dass Öl von Transformatoren der Hermetikbauweise deutlich mehr Wasserstoff lösen kann, als das luftgesättigte Öl in frei-atmenden Transformatoren.

Diese Gegebenheiten werden in bestehenden Interpretationsverfahren nicht berücksichtigt. Die weitergehende Forschungsarbeit untersucht, wie sich diese Erkenntnisse in die Analyse und Interpretation integrieren lassen.



With the Ostwald coefficients and the known volumes, the concentration of gases originally dissolved in the oil can be calculated. These coefficients are different for each gas type. They also differ depending on the type of the oil and are temperature dependent.

In Fig. 1 the temperature dependency for four gases is presented. Here, a larger Ostwald coefficient means a better solubility for this gas. Some gases dissolve better when the oil temperature raises, others vice versa.

The maximum solubility of individual gases in mineral oil is important for saturation levels: If the contained gas forms bubbles the breakdown voltage of the insulation oil might be reduced to unacceptable levels. At room temperature (RT), the following maximum solubility can be calculated:

Gas	H ₂	O ₂	N ₂
max. solubility in ml/l at RT	48	161	78

Remarkable is the wide range in which the maximum solubility varies.

The values given here only correspond to individual gases. For a gas mixture the solubility of one gas depends on the other gases. That fact will be described below. For that purpose a simple gas mixture is investigated consisting of hydrogen as fault gas and oxygen and nitrogen from the ambient air.

For the experiment degassed and dried transformer oil is used. The actual samples are prepared in gas-tight glass syringes. Gas (hydrogen and air) is injected in different concentrations in the oil samples. After that the samples are shaken for at least two hours to reach equilibrium.

The concentration of dissolved hydrogen in percent versus the concentration of dissolved air is plotted in Fig. 2.

The trend of the hydrogen concentration is approximated by a quadratic regression line. Notable are the two measuring points on the left and right points of the line. The left point is the maximum solubility of hydrogen in absence of other gases. At the right point the maximum solubility of ambient air in this particular oil can be seen. That means for a transformer with the same oil type and temperature that below the curve it is still possible to dissolve more hydrogen in the oil. Above the curve no more hydrogen would be dissolved and it could form bubbles, which can result in a loss of insulation strength of the oil. That means, oil from hermetic transformers can dissolve significantly more hydrogen than air saturated oil from free-breathing transformers.

These circumstances are not considered in existing interpretation methods. The ongoing research will investigate how these findings can be integrated into analysis and interpretation.



Frequenzanalyse zur Detektion von Störlichtbögen in gemessenen Stromverläufen

Dipl.-Ing. Peter Müller

Störlichtbögen sind unabhängig von der Spannungsebene eine der größten Gefahren für Schaltanlagen. Nicht nur dass dadurch die Stromversorgung unterbrochen wird, auch die Personengefährdung der durch den Lichtbogen entstehenden heißen Gase und giftigen Dämpfe ist enorm. Zudem können Schaltanlagen, in denen ein Störlichtbogen aufgetreten ist, nicht ohne weiteres sofort wieder in Betrieb genommen werden. Je nach Stromstärke und Brenndauer des Lichtbogens können nur einzelne Felder betroffen sein oder auch die ganze Schaltanlage. Dabei kann es auch vorkommen, dass durch die starke Hitze die komplette Schaltanlage irreparabel zerstört ist und komplett ersetzt werden muss (siehe Fig. 1). Es fallen dadurch nicht nur die Kosten für den Austausch der Schaltanlage ins Gewicht, sondern vor allem der Ausfall der Stromversorgung kann beträchtliche Kosten nach sich ziehen. Insbesondere durch die gesteigerte Nachfrage nach Versorgungssicherheit im Niederspannungsbereich sind neue Anstrengungen zur Verbesserung der Störlichtbogenerkennung nötig.



Fig. 1: Niederspannungsschaltanlage, unbeschädigt und nach Lichtbogeneinwirkung Low voltage switchgear, undamaged and after arc exposure

In den letzten Jahren wurde durch kürzere Abschaltzeiten und neue Ansätze zur Kurzschlusserkennung die Sicherheit gegenüber stromstarken Fehlern, wie beispielsweise Kurzschlüssen, weiter verbessert. Ein Feld, das derzeit jedoch nur selten Beachtung findet, ist die Lichtbogenfrüherkennung und insbesondere hier die Detektion stromschwacher Störlichtbögen. Um größere Ausfälle zu vermeiden ist es notwendig, diese anfänglich stromschwachen Störlichtbögen zuverlässig zu erkennen. Um Lichtbögen sicher von anderen Verbrauchern unterscheiden zu können, müssen Merkmale gefunden werden, die ausschließlich beim Lichtbogen-Fehlerfall auftreten können. Dazu wurden bereits verschiedene Fehler nachgestellt (siehe Fig. 2) und die auftretenden Lichtbogenströme aufgezeichnet.



Spectra analysis for arc fault detection in low voltage switchgear

Dipl.-Ing. Peter Müller

Arc faults can be one of the most hazardous events for switchgear, no matter if low voltage, medium voltage or high voltage level. Not only the power supply can be interrupted; also the hot gases and toxic fumes can endanger operating personal. Moreover, switchgear in which an arc fault has occurred cannot be put into service offhand. Depending on the strength and duration of the arc only one field or the entire substation can be affected. It may also happen, that because of the strong heat the entire substation is irreparably damaged and has to be replaced completely (see Fig. 1). It is thus not only the cost for the replacement of the switchgear, but especially the failure of the power supply can cause significant costs. In particular, because of the increased demand for security of supply in low voltage range, new efforts to improve the detection of arc faults are required.





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

To be able to reliably distinguish arc faults from other loads characteristics have to be found, which are only present in case of an arc fault. Therefore, several test setups were assembled to measure real arc fault currents (see Fig. 2). The frequency spectra of arc faults and normal loads were compared using Fourier transformation. In the end it is the goal to identify several characteristics which enables to detect an arc on the measured current of the switchgear.



Mittels Fouriertransformation wurden die Frequenzspektren von gemessenen Lichtbögen mit normalen Verbrauchern verglichen. Ziel ist es, Besonderheiten im Frequenzspektrum zu finden, die es ermöglichen, das Auftreten eines Störlichtbogens im gemessenen Schaltanlagenstrom zu detektieren.

In Fig. 3 ist der Vergleich von zwei Frequenzspektren zu sehen. Zum einen ein ohmscher Verbraucher im ungestörten, störlichtbogenfreien Betrieb (blaue Kurve). Zum anderen derselbe Verbraucher mit einem seriellen Störlichtbogen (grüne Kurve). Dazu wurde eine sich lösende Schraubverbindung in einer Sammelschiene simuliert. Auffallend sind die großen Unterschiede, insbesondere im niedrigen Frequenzbereich (100 - 1000 Hz). Auch Vergleiche mit anderen, nicht ohmschen Verbrauchern haben ergeben, dass dieser Bereich des Spektrums deutlich höhere Amplituden aufweist, wenn ein Störlichtbogen brennt (siehe Fig. 4).



Fig. 3: Strom eines ohmschen Verbrauchers im ungestörten Betrieb (Dreiecke) und mit einem seriellen Lichtbogenfehler (Kreuze). Deutliche Anhebung des Spektrums im unteren Frequenzbereich. Current of an ohmic load in undisturbed operation (triangle) and with arc in series (cross). Remarkable increase in the lower spectra.

Durch die hier gezeigten Unterschiede im den Frequenzspektren können nun Algorithmen entwickelt werden, welche einen Lichtbogen von einem normalen Verbraucher unterscheiden sollen.



In Fig. 3 you can see two frequency spectra in comparison. The blue line represents an ohmic load in an undisturbed operation mode. The green line represents the same load with a series arc fault. Therefore a loose screw rivet connection was simulated in a test setup in the laboratory. There substantial differences in the amplitude, especially in the lower frequency spectra (100 - 1000 Hz). Comparisons of the series arc current with other, non ohmic loads came to the same result. This special range of the spectra has significantly higher amplitudes during an arc fault (see Fig. 4).



Fig. 4: Vergleich des seriellen Lichtbogenstromes (schwarz) mit normalen Verbraucherströmen. Links 2 Phasen einer Werkshalle (grau mit Kreisen und Kreuzen) und rechts ein Aufzug (Kreise).
Comparison of a series arc current with regular load currents. To the left two phases of a production hall (gray with circles and crosses). To the right an elevator (circles).

The shown differences in the frequency spectra can be used to develop algorithms, which are able to distinguish an arc from normal loads.



Mustererkennungsverfahren zur Darstellung von Teilentladungen für Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer

Die Zuverlässigkeit elektrischer Energienetze hängt von der Qualität und der Verfügbarkeit elektrischer Betriebsmittel, wie z. B. Transformatoren, ab. Defekte in der Isolierung können Teilentladungen (TE) hervorrufen, die das Isoliermaterial beschädigen und zu einem elektrischen Durchschlag führen können. Deshalb ist eine frühe Detektion von Teilentladungen wichtig. TE-Messungen können Informationen über den Zustand des Transformators geben und einen Rückschluss auf die Lebensdauer des Betriebsmittels ermöglichen. Der TE-Messkreis nach IEC 60270 wird in Hochspannungslabors verwendet und Mustererkennungsverfahren können angewendet werden, um Fehlertyp und Ort der TE zu identifizieren. Die meist verwendete Darstellung von TE-Messungen ist das phasenaufgelöste Muster, das sogenannte PRPD-Pattern. Zur Bewertung der PRPD-Pattern stehen drei Parameter zur Verfügung, die Phase und Spannungswerte der angelegten synchronen Spannung und der TE-Pegel in pC der scheinbaren Ladung. Das entstehende Muster kann von einem Experten interpretiert werden. In Fig. 1 ist ein Lufteinschluss im Mineralöl zu sehen.



Fig. 1: PRPD-Pattern eines Lufteinschlusses im Mineralöl PRPD Pattern of a void in mineral oil

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.



Pattern recognition methods for presenting partial discharge measurements of power transformers

Dipl.-Ing. Anne Pfeffer

The reliability of electrical energy networks depends on the quality and availability of electrical equipment like power transformers. Defects in transformer insulation cause partial discharges (PD), which can progressively degrade the insulating material and can possibly lead to electrical breakdown. Therefore, early detection of partial discharges is important. PD measurements can also provide information about the ageing condition of transformers and thus enable conclusions about their lifetime. The basic PD measurement circuit is in common use in high voltage labs according to IEC 60270 and different pattern recognition methods of the electrical measurements can assist to identify the fault type and a more precise localization of the fault. The most common presentation of PD measurements are the phase-resolved partial discharge pattern (PRPD). To evaluate the PRPD patterns three parameters are necessary, the phase and voltage values of the applied voltage and the synchronous PD level in pC of apparent charge. The resulting pattern can be interpreted by an expert. Figure 1 shows a characterstic pattern of a void in mineral oil.



Pulse-Sequence-Analysis

Another pattern recognition method, which was investigated in solid insulation materials, is the Pulse Sequence Analysis. 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 and their phase angle within one period. The PD value of apparent charge in pico Coulomb (pC) is not considered in the PSA.



In Fig. 2 ist die PSA schematisch dargestellt. Die Differenzen für das $\Delta u_n/\Delta u_{n-1}$ bzw. $\Delta \phi_n/\Delta \phi_{n-1}$ Pattern werden nach den Gleichungen (1.1), (1.2), (2.1) und (2.2) gebildet.

$$\Delta u_{n} = u_{n+1} - u_{n} \quad (1.1) \qquad \Delta u_{n-1} = u_{n} - u_{n-1} \quad (1.2)$$

 $\Delta \phi_n = \phi_{n+1} - \phi_n$ (2.1) $\Delta \phi_{n-1} = \phi_n - \phi_{n-1}$ (2.2)

Der Spannungsgradient (3.1) und (3.2) wird ebenfalls für die PSA betrachtet.

Jede TE-Fehlerstelle weist unterschiedlich charakteristische, lokale Feldänderungen auf, die zur Zündung einer Teilentladung führen. Da die gewählten Analyseparameter Δu und $\Delta \phi$, somit auch der Gradient m, von diesen Parametern abhängig sind, können typische Muster für unterschiedliche TE-Quellen erwartet werden. Die Darstellungsart des TE-Verhaltens gibt die Möglichkeit, physikalisch wirksame Mechanismen zu erkennen und eignet sich für eine TE-Mustererkennung bzw. für eine TE-Fehlerstellen-Identifikation.



Fig. 3: PSA $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$, $\Delta \phi_n / \Delta \phi_{n-1}$ und m_n / m_{n-1} Pattern einer Luftblase in Öl PSA $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$, $\Delta \phi_n / \Delta \phi_{n-1}$ and m_n / m_{n-1} Pattern of a void in mineral oil

In Fig. 3 sind die unterschiedlichen PSA-Muster einer Luftblase in Öl dargestellt. Erkennbar sind verschiedene Punkteansammlungen in den jeweiligen Mustern. Um einen Vergleich zu erlangen, ob man verschiedene TE-Quellen mit Hilfe der PSA beschreiben kann, sind in Fig. 4 die PSA-Pattern einer Gleitentladung zu sehen. Auch hier bilden sich Ansammlungen in den Mustern aus, die jedoch im Vergleich zu Fig. 3 eine größere Streuung der Datenpunkte aufweisen. Das Gradientenmuster zeigt die markantesten Unterschiede in den Mustern. Während sich bei der Luftblase zwei Linien ausbilden, kann man bei der Gleitentladung vier Cluster erkennen.

Zusammenfassend sind unterschiedliche Ansammlungen in den Mustern erkennbar, jedoch muss man noch weitere Untersuchungen durchführen, ob mehrere TE-Stellen oder eine Steigerung der externen Prüfspannung, und somit auf die TE-Aktivität, einen großen Einfluss auf das Ergebnis des PSA-Musters haben.



In Fig. 2, the PSA is shown schematically. The differences for the $\Delta u_n/\Delta u_{n-1}$ or rather $\Delta \phi_n/\Delta \phi_{n-1}$ patterns are calculated according to equations (1.1) (1.2) (2.1) and (2.2). The voltage gradient, equations (3.1) and (3.2), is also considered for the PSA.

$$\mathbf{m}_{n} = \frac{\Delta \mathbf{u}_{n}}{\Delta \phi_{n}} \qquad (3.1) \qquad \qquad \mathbf{m}_{n-1} = \frac{\Delta \mathbf{u}_{n-1}}{\Delta \phi_{n-1}} \quad (3.2)$$

Each PD fault has different characteristic local field changes that lead to the ignition of a partial discharge. Since the chosen analysis parameters Δu and $\Delta \phi$, thus the gradient m, depending on these parameters, typical pattern for different PD sources are expected. The representation in a PSA diagram is the ability to physically identify these effective mechanisms of the PD behavior. The PSA should be suitable for a PD pattern recognition or rather identification of the PD source.



Fig. 4: PSA - $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$, $\Delta \phi_n / \Delta \phi_{n-1}$ und m_n / m_{n-1} Pattern einer Gleitentladung PSA - $\Delta u_n / \Delta u_{n-1}$, $\Delta \phi_n / \Delta \phi_{n-1}$ and m_n / m_{n-1} Pattern of a creeping discharge

In Fig. 3 the different PSA pattern, $\Delta u_n/\Delta u_{n-1}$, $\Delta \phi_n/\Delta \phi_{n-1}$ und m_n/m_{n-1} , of a void in mineral oil are shown. Different clusters are generated in the diagram – e.g. cluster in Fig.3 $\Delta u_n/\Delta u_{n-1}$ (–2/2). The clusters of the void are distinct points in the respective patterns. Fig. 4 shows the PSA patterns of a creeping discharge to compare different PD sources with each other. Also several clusters are formed in the PSA patterns. Compared to Fig.3 the clusters scatter in the patterns. The gradient patterns show the most striking difference in the patterns. While the PSA m_n/m_{n-1} of the void has 2 clusters formed as a line, the PSA of the creeping discharge forms four different clusters.

In summary, different collections in the patterns are recognizable, but further investigations have to be made whether multiple PD sources or an increase in the external test voltage, and thus on the PD activity, have a major influence on the clustering of the PSA diagram.



Beurteilung der Überlastbarkeit von ON-gekühlten Leistungstransformatoren mittels thermischer Modellierung

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 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 ist es möglich, dieses Verhalten ausreichend genau abbilden zu können. Für die Gewinnung der nachfolgend dargestellten Berechnungsergebnisse 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. Der Umfang der verwendeten Messdaten und die Vielfalt der darin verzeichneten Betriebszustände bestimmen dabei die Qualität der empirisch gestützten Beschreibung des Kühlsystems. Fig. 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen und der mittels thermischer Modellierung berechneten Öltemperatur eines 40 MVA ONAN-gekühlten Leistungstransformators. Der Lastfaktor, die Umgebungstemperatur und der Berechnungsfehler sind dort ebenfalls abgebildet.



Evaluation of the overload capabilities of ON-cooled power transformers using thermal modeling

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 Modeling results of a 40 MVA ONAN-cooled transformer

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



Um eine unkritische und von der Umgebungstemperatur abhängige Überlastung abschätzen zu können, kann auf Normen zurückgegriffen werden. Die IEC 60354 ermöglicht eine Berechnung der maximal auftretenden Temperatur im Transformator in Abhängigkeit von der Öltemperatur und der Bauart. Durch Vorgabe eines Grenzwertes kann mit Hilfe der Norm ein maximaler Lastfaktor ermittelt werden, welcher die Lebensdauer des Betriebsmittels nicht beeinträchtigt. Fig. 2 zeigt beispielhaft Ergebnisse einer solchen Überlastungsmöglichkeit in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für einen 40 MVA ONAN-gekühlten Transformator. Dabei wurde eine Heißpunkttemperatur von 98°C angesetzt.





Die vorgestellten Ergebnisse zeigen die Eignung der thermischen Modellierung für die Beschreibung des thermischen Verhaltens von Transformatoren. Sie bescheinigen dem untersuchten Transformator außerdem bereits bei Umgebungstemperaturen von ca. 20°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. The amount of measuring data and the variety of recorded operating states thereby determine the quality of such an empirical approach. Fig. 1 shows the time dependent progression of the oil temperature in a 40 MVA ONAN-cooled transformer obtained by measurements and calculations. Furthermore, the loading rate, ambient temperature and arithmetic error are displayed.

The application of available standards enables the estimation of a constant noncritical 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, as a function of the top-oil temperature. To determine a maximum constant loading rate, that isn't corrupting the life time performance of the transformer, a limiting value of the hot-spot temperature can be specified. Fig. 2 exemplifies the results of such a non-critical overload regarding a 40 MVA ONAN-cooled transformer. The underlying calculations implied an acceptable hot-spot temperature of 98°C.

The displayed results proof the abilities of thermal modeling concerning the prognosis of a transformer's thermal behavior. In addition, they certify a noteworthy overload potential for the analyzed transformer at only 20°C. Nevertheless, limitations concerning accessories like bushings or the on-load tap-charger have to be kept in mind.



Dielektrische Festigkeit von pflanzlichen Ölen für die Verwendung in Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

Heute wird es zunehmend wichtig, dass dielektrische Flüssigkeiten eine bessere Balance zwischen hoch funktionellen Eigenschaften und Umwelteinflüssen zeigen. In diesem Zusammenhang muss die Suche nach "grünen Produkten" als eine Alternative zu mineralischen Ölen erfolgen. Auf Grund seiner nicht-fossilen Herkunft könnten pflanzliche Öle eine geeignete Antwort für Umwelt- und Sicherheitsprobleme darstellen. Darüberhinaus könnten sie die Abnutzungs- und "end-life"-Kosten von Transformatoren reduzieren (Tab. 1).

Advantages	Limitations
 Renewable resources Much higher flash and fire point Environmentally friendlier (higher biodegradability, non-toxic) High hygroscopicity Improved cellulose End-of-Life time 	 Inferior oxidation stability Poorer low temperature properties Higher viscosity Higher production costs

Tab.1: Vor- und Nachteile von Flüssigkeiten auf Pflanzenölbasis gegenüber Mineralölen

Vegetable oil-based fluids vs. mineral oil

Die große Absorptionsfähigkeit von Wasser der natürlichen Esterflüssigkeiten kann auch für die Dehydration von Zellulosebestandteilen des Isolationssystems eingesetzt werden. Das Öl ist in Bezug auf eine elektrische Beanspruchung für gewöhnlich die Schwachstelle im Isolationssystem. Die elektrische Beanspruchung ist dabei umgekehrt proportional zur Dielektrizitätskonstanten ε_r . Da Flüssigkeiten auf Pflanzenölbasis eine höhere Dielektrizitätskonstante ε_r als Mineralöle haben (ε_r Mineralöle = 2,2 ; ε_r natürliche Ester = 3,2) - ε_r für natürliche Ester ist näher am ε_r für Papier (ε_r Papier = 4,4) - hat die elektrische Beanspruchung vornehmlich Auswirkungen auf das feste Material. Dies bedeutet, dass dadurch Kriechentladungen verhindert werden können und – als weiteren Vorteil – auf Grund der größeren Dielektrizitätskonstanten eine höhere elektrische Beanspruchung der Flüssigkeit möglich wird, die grundsätzlich die maximale Beanspruchbarkeit begrenzt.

Die dielektrische Festigkeit ist die wichtigste Eigenschaft von Isolieröl. Der Einfluss von Feuchte und Partikeln, Alterung, elektrischem und thermischem Stress auf die dielektrische Festigkeit wurde intensiv untersucht. Die Durchschlagspannung beider Isolationsflüssigkeiten im nicht-homogenen elektrischen Feld zeigt Fig. 1.



Dielectric strength of vegetable-based oil for application in power transformers

Dipl.-Ing. Dejan Vuković

Nowadays, it is increasingly important that dielectric fluids provide a better balance between high functional performances *versus* low environmental impacts. In this frame, the search for "green products" as an alternative to mineral oils has to be carried out. Because of its non fossil origin, vegetable oil could be an appropriated response to environmental and safety problems, and could reduce the exploitation and end-life costs of power transformers (Tab.1).



Fig. 1: Festigkeit von Mineralöl (NN3000X) und natürlichen Estern (FR3) im inhomogenen elektrischen Feld bei 30 mm Abstand Breakdown voltage values for mineral oil and natural esters in non-uniform AC electrical field for 30 mm gap

The high capacity of natural ester fluid to absorb water can also be used for the dehydration of the cellulose component of the insulation system. Regarding electrical stress, the oil is normally the weakest point in the insulation system. The electrical stress in the insulation system is opposite proportional to the relative permittivity ε_r . Since vegetable oil-based fluids have higher ε_r than mineral oil (ε_r mineral oil = 2.2, ε_r natural ester = 3.2), which is closer to the relative permittivity of paper (ε_r paper = 4.4), more of the electrical stress will be distributed in the solid material. It means prevention of creep discharge and an advantage in insulation systems where the stress in the fluid limits the average stress.

The main characteristic of insuilating fluid 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 non- uniform electrical field are given in Figure 1. These data confirm suitability of natural ester for application in distribution transformers were the distances and stresses are lower.



Die Designmethoden für Mineralöle müssen überprüft und neue Kurvenverläufe für natürliche Esterflüssigkeiten aufgezeichnet werden. Um die Unterschiede in den Durchschlagmechanismen der beiden Flüssigkeiten verstehen zu können, bedarf es der Beobachtung und Analyse von den Durchschlägen vorgelagerten Prozessen. Die Vielfalt der physikalischen Prozesse, welche beim Beginn der Streamerentladung sowie deren Ausbreitung beteiligt sind, verlangt eine Hochgeschwindigkeitsvisualisierung und die Aufzeichnung transienter Ströme und Lichtemissionen.

Da sie eine höhere Dielektrizitätskonstante ($\varepsilon_r = 3.2$) als Mineralöl ($\varepsilon_r = 2.2$) haben, verteilt sich die elektrische Beanspruchung anders. Die Kriechentladungen über imprägniertes Pressboard ($\varepsilon_r \ge 4.2$) könnten reduziert werden (Fig. 2). Alle diese Unterschiede im dielektrischen Verhalten verlangen nach weiteren Verbesserungen des Isolationsdesigns von Leistungstransformatoren.


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



Fig. 2: Test-Objekt zur Untersuchung von Kriechentladungen Test object for the investigation of creep breakdown strength

Because of the natural ester higher relative permittivity ($\varepsilon_r = 3.2$) the electrical stress distribution will be different from mineral oil ($\varepsilon_r = 3.2$). The creep electrical stress over impregnated pressboard ($\varepsilon_r \ge 4.2$) can be reduced (Fig. 2). All these differences in dielectric behavior of these two fluids call for further optimization of power transformer insulation design.



Bestimmung der Temperaturverteilung einer Wicklungsscheibe entlang ihres Umfangs

Dipl.-Ing. Andreas Weinläder

Die Temperaturverteilung in ölgekühlten Transformatorwicklungen wird bei der Auslegung eines Transformators üblicherweise anhand empirischer 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.

Als Beispiel soll die Berechnung der Temperaturverteilung innerhalb einer Wicklungsscheibe entlang des Wicklungsumfangs gezeigt werden. Prinzipiell gibt es eine Abhängigkeit der Temperatur von dieser Koordinate, da das magnetische Streufeld innerhalb und außerhalb des Kernfensters unterschiedlich ist. Außerhalb des Kernfensters, insbesondere im Kopfbereich der Wicklung, besitzt der Streufluss eine starke radiale Komponente, welche starke Wirbelströme in den Leitern induziert. Deshalb ist die Wicklungstemperatur - insbesondere im ohnehin kritischen Kopfbereich der Wicklung - abhängig von der Umfangskoordinate.

Da gewöhnlich eine Wicklung in 2D - unter Vernachlässigung der Umfangsrichtung modelliert wird, wird diese Abhängigkeit von diesen Modellen nicht berücksichtigt. Andererseits ist eine Modellierung in 2D gerechtfertigt, da die Abhängigkeit der Temperaturverteilung von der Umfangskoordinate meist nur schwach ausgeprägt ist, mit Ausnahme der Endbereiche der Wicklung. Eine weitere Rechtfertigung liefert der Umstand, dass eine volle 3D-Modellierung eines Viertels des Wicklungsumfanges ca. den hundertfachen Rechenaufwand im Vergleich zu einem 2D-Modell verursachen würde. Folglich mussten andere Ansätze entwickelt werden, welche eine hinreichende Genauigkeit bei angemessenem Aufwand ermöglichen.



Calculation of the circumferential temperature distribution of a winding disc

Dipl.-Ing. Andreas Weinläder

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

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

As an example the calculation of the temperature distribution within a winding disc along the circumference of the winding is shown here. In principal there is a dependency of the temperature from this coordinate, since the magnetic stray field is different inside and outside the core window. Outside the core window, especially at the top region, the stray flux gets a strong radial component, causing large eddy currents in the conductors. Therefore the temperature is –especially within the mostly critical top region- dependent from the circumferential coordinate.

Since we are using to model the winding in 2D -under neglect of the circumferential direction- this dependency is not captured by these models. On the other hand a modelling in 2D is justified by the mostly weak dependency of the temperature from the circumferential coordinate, with exception of the end parts of the winding. Also it is justified by the fact that a full 3D model of a quarter of the circumference of a winding would have about the hundred fold size of the mentioned 2D models with the resulting huge effort in computation. So we had to develop other approaches which combine reasonable effort with sufficient accuracy.

Since in the most cases, only the disc with the hot spot conuctor is of further interest, which is identified by a previous 2D simulation of the whole winding, it makes sense to try to model only this single disc in 3D. Therefore a proper physical boundary with



Da in den meisten Fällen nur die Wicklungsscheibe mit dem Hot Spot Leiter von weiterem Interesse ist, welcher in der vorangehenden 2D-Simulation der gesamten Wicklung identifiziert wird, macht es Sinn zu versuchen, nur diese eine Scheibe in 3D zu modellieren. Hierfür muss ein passender physikalischer Rand gefunden werden, entlang dem diese Wicklungsscheibe aus der gesamten Wicklung herausgeschnitten werden kann. Da aus der vorhergehenden 2D-Simulation das Profil des Wärmeübergangskoeffizients zwischen Öl und Festisolation (htc) und der mittleren Öltemperatur um den Leiter extrahiert werden können, ist es möglich, ein 3D-Modell dieser Wicklungsscheibe ganz ohne Fluid-Bereich zu erstellen. Der Einfluss des umgebenden Öls wird alleine durch das Profil des Wärmeübergangskoeffizients und der mittleren Öltemperatur - welche auf die Leiteroberfläche angewendet werden - repräsentiert. In die Leiter wird eine variable Verlustleistungsdichte eingeprägt, welche in der Zone außerhalb des Joches zunimmt. Die resultierende Temperaturverteilung ist in Fig. 1 und 2 dargestellt. Somit ist es möglich, den Einfluss der entlang des Wicklungsumfangs veränderlichen Verlustleistungsdichte auf die Leitertemperatur zu erkennen. Die kleinen Wellen im Temperaturverlauf resultieren von den Distanzstücken zwischen den aufeinanderliegenden Spulen.



Fig. 1: Resultierende Temperaturverteilung auf der Isolationsoberfläche Resulting temperature distribution on insulation surface



known boundary conditions has to be found, to cut out this single disc out of the whole winding. Since we got the heat transfer coeffizient (htc) profile between the solid insulation surface of the disc and the surrounding oil and the bulk oil temperature from the previous 2D simulation, we can build a 3D model of this disc without any fluid region. The influence of the fluid region on the disc is simply represented by the htc profile and the bulk oil temperature applied to the disc surface. Into the conductors, a variable loss density –increasing for the zone outside the yoke region- is assumed. The resulting temperature distribution is plotted in Fig.1 and 2. It is now possible to see the influence of the varying loss distribution along the circumference on the conductor temperature. The small waves in the temperature distribution are a result of the spacers between adiacent winding discs.



Fig. 2: Resultierende Temperatur innerhalb jedes Leiters entlang der Leiterlänge Resulting temperature within each conductor along conductor length



5.2 ENERGIEÜBERTRAGUNG

Zukünftige intelligente Energieversorgungssysteme

Prof. Dr.-Ing. Martin Braun, M. Sc. Ahmad Abdel-Majeed

Der Begriff "Smart Grid" (Intelligentes Energieversorgungssystem) umfasst die Vernetzung und Steuerung von intelligenten Erzeugern, Speichern, Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und –verteilungsnetzen mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Ziel ist auf Basis eines transparenten energie- und kosteneffizienten sowie sicheren und zuverlässigen Systembetriebs die nachhaltige und umweltverträgliche Sicherstellung der Energieversorgung (Quelle: DKE Normungsroadmap 2010).

Verteilnetze stehen unter hohem Druck, die Anforderungen für die Änderung von konventionellen statischen Netzen in moderne und dynamische Smart Grids zu erfüllen. Besondere Anforderungen stellt die zunehmende Integration der dezentralen Erzeugung in Nieder- und Mittelspannungsnetzen. Die Eigenschaften des Übergangs von der traditionellen Stromversorgung zu einem Smart Grid sind in Fig. 1 dargestellt. Ein Beispiel für ein entwickeltes Modell, welches Smart Grid Funktionalitäten definiert, ist in Fig. 2 zu sehen.



Fig. 1: Eigenschaften des Übergangs zu einem intelligenten Stromversorgungsnetz Properties of the transition from traditional power system to a Smart Grid



Future Smart Grids

Prof. Dr.-Ing. Martin Braun, M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

The term "Smart Grid" (Intelligent Power Supply System) describes the networking and control of intelligent generation, storage, consumers and network equipment in power transmission and distribution networks by using information and communication technology (ICT). The goal is to ensure a sustainable and environmentally friendly energy supply based on transparent, cost-efficient, safe and reliable system (Source: DKE Normungsroadmap 2010).

Distribution networks are under high pressure to meet requirements for the change from their conventional static grids into modern and dynamic smart grids. In particular, the increasing integration of decentralized generation in medium and low voltage networks demands improved monitoring and automation. The properties of transition from traditional power system to a Smart Grid are illustrated by Fig. 1. An example of a developed Smart Grid model is shown in Fig. 2. It provides different levels of smart grid functionalities.



Fig. 2: Modell eines Smart Grids mit verschiedenen Funktionsebenen (Quelle: IEEE power & energy magazine march/april 2010)
 Model of a Smart Grid with different functional levels (Source: IEEE power & energy magazine march/april 2010)



Kommunikations- und Schutztechnik f ür Smart Grids

M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

Es entstehen neue Anforderungen an die Automatisierung, Überwachung und Schutz zukünftiger aktiver Verteilnetze (Smart Grids). Diese Anforderungen sollten durch flexible Systemlösungen, die für verschiedene Anwendungen skalierbar sind, unterstützt werden. Der konsequente Einsatz von Standards, z. B. in der Kommunikation, sorgt für reibungslose und interoperable Systeme.

Das Smart Grid verspricht eine effizientere Art und Weise der Versorgung und des Verbrauchs von Energie. Im Wesentlichen ist das intelligente Netz ein Daten-Kommunikationsnetz kombiniert mit dem Stromnetz, das Daten über Stromübertragung, Verteilung und Verbrauch sammelt und analysiert (siehe Fig. 1). Basierend auf diesen Daten liefern Smart-Grid-Technologien dann Informationen und Empfehlungen für Versorgungsunternehmen, Lieferanten und Kunden zum bestmöglichen Betrieb des Stromversorgungssystems.

Wesentliche Entwicklungen in der zukünftigen Informations- und Kommunikationsarchitektur sind:

- 1. Die Durchdringung des Netzes mit Kommunikationstechnologien bis hin zum Endkunden, bspw. durch dezentrales Energiemanagement, Smart Metering, Automatisierung.
- 2. Standardisierte Datenmodelle und Services im gesamten System, bspw. zur Bereitstellung von Plug&Play-Lösungen und der Sicherstellung des Zusammenspiels der verschiedenen Elemente (Interoperabilität).
- 3. Nutzung bestehender Infrastrukturen, bspw. von Telekommunikationsanbietern und Einsatz von Webservices.

Basierend auf dem Wissen über nötige Dienstleistungen ist es möglich, die erforderlichen Kommunikationsstrukturen für das zukünftige Smart Grid durch Schätzung der minimal notwendigen Bandbreite für jeden Dienst zwischen Endpunkten zu definieren. Der Gesamtbetrag der Daten kann einfach durch die Kombination aller Datenflüsse zwischen den Endpunkten berechnet werden.

Schließlich gibt es eine große Vielfalt und Unterschiede im Alter von Betriebsmitteln, die für eine fortgeschrittene Automatisierung und Kommunikation nicht vorbereitet sind, wie z.B. Sicherungen für Schutz, die zukünftig aber auch als Leistungsschalter gebraucht werden könnten. Daher erfordert die Entwicklung eines Smart Grids bei den Netzbetreibern eine individuelle Modernisierungsstrategie für eine zukunftsorientierte Verteilungs- und Automatisierungslösung.



Smart Grid Communication and Protection

M.Sc. Ahmad Abdel-Majeed

New requirements arise for automation, monitoring, control and protection of smart distribution grids. These requirements should be supported by flexible system solutions, which are scalable for different applications. Consistent use of standards, e.g. in communication, ensure smooth and interoperable systems.

The Smart Grid promises a more efficient way of supplying and consuming energy. In essence, the Smart Grid is a data communications network integrated with the power grid that collects and analyzes data about power transmission, distribution and consumption as shown in Fig. 1. Based on this data, smart grid technology then provides predictive information and recommendations to utilities, suppliers, and customers on how best to manage the system.



Fig. 1: Zukünftige Informations- und Kommunikationsarchitektur (Quelle: ETP SmartGrids "Strategic Deployment Document", April 2010) Furture Information and Communication Architecture (Source: ETP SmartGrids "Strategic Deployment Document", April 2010)

Finally, there exists a large variety and differences in age of primary equipment, which is not prepared for advanced automation and communication, e.g. a fuse is used for protection purposes instead of a circuit breaker. Therefore, the smart grid policy of the utility companies requires an individual migration and modernization strategy for a future distribution automation and protection solution.



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 Dieselmodellen 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 Energiepreise und insbesondere die Rohölpreise rapide steigen werden. Dadurch können die Betriebskosten 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: Darstellung des städtischen Niederspannungsnetzes Representation of the urban low voltage grid

Für die Simulation wird ein reales innerstädtisches Niederspannungsteilnetz von Stuttgart-Vaihingen verwendet (siehe Fig. 1).



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 assumtion, such as the environmental friendliness of electric cars and the associated reduction of CO_2 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 quiter 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 rases 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 operating costs for electic 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: Standardlast und zusätzliche angenommene Last durch Elektromobilität Standard load and assumed additional load by electric mobility

For the simulation a real urban low voltage grid of Stuttgart Vaihingen is used. Fig. 1 shows the grid modelled in PowerFactory. There are five urban power transformers



In dem Netz gibt es fünf Ortsnetztransformatoren (in grün dargestellt), die an drei Stellen (rot markiert) das 400 V-Niederspannungsnetz aus der darüber gelegenen 10 kV – Ebene speisen. Die Lasten, die als Dreiecke dargestellt werden, sind in der Netzberechnungssoftware über Standardlastprofile eingebunden.

Fig. 2 zeigt das Ladeprofil der Fahrzeuge unter der Annahme, dass diese in den Privathaushalten in den Abendstunden nach der Arbeit geladen werden, da zuerst die Ladestationen im öffentlichen Raum und auf der Arbeit begrenzt sein werden. Mit dieser Annahme fällt die Lastspitze der Fahrzeuge mit der ohnehin vorhandenen abendlichen Lastspitze zusammen. Die Simulation des städtischen Netzes prognostiziert Probleme hauptsächlich im Spannungsband. Erst ab hohen Elektrifizierungsgraden und Ladeleistungen um 10 kW, was flächendeckend erst 2030 zu erwarten ist, treten Überlastungen von Ortsnetztransformatoren und Leitungen auf. Es kann jedoch bereits vor 2020 zu Problemen des Spannungsbands kommen, wie Fig. 3 zeigt.



Fig. 3: Spannungseinbruch bei 5 Fahrzeugen an einer Leitung und 10 kW Ladeleistung

Voltage drop with 5 vehicles at a line with 10 kW charging power

Eine kleine Anzahl von Elektrofahrzeugen an einer Leitung reichen bereits aus, das Spannungsband empfindlich zu beanspruchen. Diese lokalen Häufungen können bereits frühzeitig ohne einen absolut großen Anteil von Elektrofahrzeugen auftreten. Fünf Fahrzeuge an dieser Leitung sind bereits kritisch.

Entschärft werden kann dieses Problem durch Einführung eines Lademanagementsystems, welches die Fahrzeuge kontrolliert lädt. Ein solches Lademanagement kann dezentral oder auch zentral mit Kommunikation zu den Fahrzeugen und zum Ortsnetztransformator ausgeführt sein, was exemplarisch in Fig. 4 dargestellt ist.

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.



(shown in green), which connect the low voltage grid with the medium voltage layer at three entry points (marked in red). The loads, which are represented by triangles, are implemented into the grid calculation software as standard load profiles. Fig. 2 shows the charging profile of the vehicles under the assumption that they are charged in the evening hours after work at home, because charging stations in public places and at work will be limited in the beginning. Thus, the peak load of vehicles coincides with the already existing peak load in the evening. With this assumption the simulation leads to the result that most problems are caused in the voltage band. Only with high degrees of electrification and charging power at 10 kW, which is not expected before 2030, transformers and lines may be overloaded. However, problems with under voltage may arise before 2020 as fig. 3 shows. A small number of vehicles on a line is already sufficient to cause under voltage situations. These local clusters may even occur in early stages and near future without an absolute large share of electric vehicles.



Fig. 4: Beispielhaftes Lademanagement mit Kommunikationskanälen Exemplary load management with communication channels

This problem can be mitigated by introducing a load management system, which charges the vehicles in a controlled way. This load management system can act locally or centrally with communication to the vehicles like depicted in Fig. 4 and decide when and which vehicle to charge.

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 kontrollierten 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 (SF₆) als Isolationsmedium für Mittelspannungsschaltanlagen bringt eine deutliche Verringerung des Platzbedarfs und des Wartungsaufwandes gegenüber luftisolierten Anlagen (AIS) mit sich.

Aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit bringt der Einzug von SF₆ als Isolationsmedium neue Herausforderungen in der Schaltanlagentechnik mit sich:

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 SF₆ aufgrund der höheren Durchschlagfeldstärke breitbandigere transiente Störgrößen. Höhere Amplituden sowie höhere Frequenzgehalte der sekundärseitigen Störgrößenbeaufschlagung folgen der frequenzbedingt stärkeren Kopplung von der Primär- auf die Sekundärseite (z.B. auf Stromwandlerleitungen).



Zur Untersuchung des EMV-Verhaltens wurde eine dreipolig gekapselte, SF_6 -isolierte Test - Schaltanlage 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 (SF₆) 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 has moved primary and secondary equipment close 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 a broader 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:

Elektrisches Feld in der Nähe des Einspeisekabels

Electric field nearby the feeding cable

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. 3:

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 solange, 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 in Matlab weiterverarbeitet, um eine detaillierte Analyse im Frequenz- und Zeitbereich zu ermöglichen.

Ziel der Forschungsarbeit ist umfassende Klarheit über die elektromagnetischen Vorgänge 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, 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 electrical 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 Matlab 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

Der Einsatz von elektrischen Fahrantrieben in Kraftfahrzeugen erfordert die Auslegung des Bordnetzes für die Übertragung höherer elektrischer Leistungen und die Verwendung größerer Energiespeicher (Akkus). Im Vergleich zu herkömmlichen KFZ-Bordnetzen werden deshalb für permanent oder temporär elektrisch angetriebene Fahrzeuge höhere Bordnetzspannungen im Bereich von 120 bis 1100 V verwendet. Zur Versorgung von weiteren elektronischen Baugruppen, wie sicherheitstechnischen Komponenten oder komfortsteigernde Einrichtungen, ist ein konventionelles 12 V - Bordnetz ebenfalls erforderlich. Die beiden Bordnetzteile sind in der Regel über einen vom Batteriemanagementsystem gesteuerten Konverter gekoppelt, so dass Energie zwischen beiden Systemen ausgetauscht werden kann.

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 taktende Leistungshalbleiter im HV-Bordnetz verursacht werden. Um eine Beeinflussung verschiedener Fahrzeugkomponenten zu verhindern, müssen diverse Entstörmaßnahmen ergriffen werden. Die Ausbreitung von elektromagnetischen Störungen erfolgt unter anderem über die im Fahrzeug verlegten HV-Leitungen und deren Steckverbinder sowie Komponentengehäuse, die aufgrund der hohen EMV-Anforderungen geschirmt ausgeführt werden müssen.

Für die Charakterisierung der Schirmwirkung und des elektromagnetischen Verhaltens von Komponenten des HV-Bordnetzes, wie Leitungen und Steckverbindungen, werden 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 beider Systeme mit Hilfe eines Netzwerkanalysators (VNA), die aus den Kabelinnenleitern, einem äußeren Leiter der Messvorrichtung und dem Kabelschirm als gemeinsame Impedanz gebildet werden.



Fig. 1: Messaufbau zur Untersuchung der Schirmwirkung an einem Steckverbinder Measurement setup for investigation of the shielding effectiveness of a connector assembly



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 disigned for the transmission of higher power and the use of larger energy storages (for example lithium ion batteries). Compared to conventional automotive electrical systems, there are used higher voltages in the range of 120 to 1100 V for vehicles which a powered electrically in a permanent or intermttend way.

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 which result in an increase of electromagnetic interference. Several measures must be taken to avoid those interferences between different devices of the electrical system. Among other things the propagation of electromagnetic disturbances is mainly caused by high-voltage cables and their connectors. For this reason HV-cables, connector assemblies and enclosures of components are usually shielded.

For the qualification of the screening effectiveness and the 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 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.



Fig. 2: Kopplungsverhalten von innerem und äußerem System Coupling behaviour for inner and external system



In Fig. 2 ist die gemessene Kopplungsübertragungsfunktion eines Leitungsstücks und eines Steckverbinders dargestellt. Dabei besteht das bei der Messung verwendete äußere System aus einem am Prüfling angebrachten Speisedraht. Bei niedrigen Frequenzen verlaufen die Kurven annähernd konstant. Mit steigender Frequenz nimmt die Schirmwirkung aufgrund des Skineffekts bei der Leitung zunächst zu. Im mittleren Frequenzbereich erfolgt ein linearer Anstieg der Kurven bevor bei höheren Frequenzen Wellenausbreitungsvorgänge durch Resonanzen sichtbar werden.

Zur Untersuchung der Strom- und Spannungsverhältnisse an einem Fahrzeug-Gesamsystem wird ein Messsystem entwickelt, das Strom- und Spannungsverläufe am HV-Bordnetz im Frequenzbereich von DC bis 40 MHz erfassen kann. Für die Spannungsmessung kommen hochohmige, in ihrem Frequenzverhalten optimierte Spannungsteiler zum Einsatz. Die Erfassung der Ströme erfolgt je nach Frequenzbereich über Wandlermodule mit Hallsensoren oder mittels spezieller Rogowskispulen. Die benötigte Messtechnik wird in einem Fahrzeug mit Mild-Hybridsystem installiert, bei dem der elektrische Anrieb den Verbrennungsmotor bei Beschleunigungsvorgängen unterstützt. Bei Bremsvorgängen wird Energie zurück in die HV-Batterie gespeist. Die Strom- und Spannungssensoren sind an verschiedenen Stellen im HV-Bordnetz platziert sind, um die Ausbreitung von Störgrößen näher untersuchen zu können. Die Auswertung der Messsignale erfolgt mittels Oszilloskop im Fahrzeuginnenraum.



Fig. 3: Überblick über die Komponenten des Messsystems General view of the components of the measuring system

Den beispielhaften Verlauf von Strom und Spannung bei einem Beschleunigungsvorgang von 40 auf 70 km/h zeigt Fig. 4. Der auf der DC-Seite des Umrichters gemessene Strom steigt vorrübergehend auf 150 A an. Dabei kann ein Einbruch der Spannung des HV-Bordnetzes (Nennspannung 126 V) auf ca. 110 V festgestellt werden.



The coupling transfer function of a cabel section and a connector assembly is shown in Fig. 2. The external system is built up with a wire routed in parallel to the screen to be analyzed at the DUT. Especially at lower frequencies the curve proceeds constantly. With increasing frequencies the screen effectiveness of the cable also increases at first because of the skin effect. In the mid-frequency range there is a linear rise off the curves before wave propagation processes become visible due to resonances.

For the investigation of the electical characteristcs of the high-voltage power train in an overall system, a special measuring system was developed. It can be used to measure current and voltage profiles in a frequency range from DC to 40 MHz. For voltage measurement a high-impedance RC voltage divider is used. Its frequency behaviour is optimized by a capacitive compensation. The measurement of currents in the lower frequency range is done with transducer moduls containing Hall sensors or with special Rogowski sensors for higher frequencies. The measuring system is installed in a vehicle with a mild hybrid system. This means that the combustion engine can be assisted by the electrical drive during acceleration. During breaking events energy can be regained and used for charging the HV battery. 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 pessenger compartment (Fig. 3).



Fig. 4: Strom- und Spannungsverlauf bei einem Beschleunigungsvorgang Current and voltage profile during an acceleration event

An examplary current and voltage profile measured on the DC site of the converter during an acceleration procedure from 40 to 70 km/h is shown in Fig. 4. The current reaches 150 A temporarily and a voltage drop to 110 V is noticeable at the HV network (nominal voltage 126 V).



Charakterisierung von Kfz-Hochvoltbordnetzen für EMV-Messungen

Dipl.-Ing. Martin Reuter

Die elektromagnetische Verträglichkeit bei elektrischen Kfz-Antrieben stellt eine besondere Herausforderung dar: Schnelle Taktflanken in der Leistungselektronik werden für eine möglichst große Effizienz benötigt, sie bewirken aber gleichzeitig elektromagnetische Beeinflussungen benachbarter Steuergeräte. starke Ein Lösungsansatz besteht in der vollständigen Schirmung des Hochvoltbordnetzes. Dieser Schirm verändert aber den heute üblichen Kabelbaum aus ungeschirmten Einzeladern zu einer geschirmten Koaxialanordnung und damit auch die Eingangsimpedanz des Leistungsbordnetzes. Die für Hochvoltbordnetze eingesetzten Koaxialkabel besitzen einen Wellenwiderstand, welcher deutlich niedriger als 50 Ω ist. Das bedeutet, dass derzeit eingesetzte Bordnetznachbildungen (BNN) eine Fehlanpassung der Eingangsimpedanzen darstellen. Deswegen könnten Optimierungen auf Komponentenebene im Fahrzeug nicht dargestellt werden und somit zu Grenzwertüberschreitungen bei Fahrzeugmessungen führen. Um dies zu vermeiden wird eine Nachbildung des Hochvoltbordnetzes entwickelt, welche die elektromagnetische Umgebung im Inneren eines elektrisch angetriebenen Kfz näher beschreibt. Dafür wird eine genauere Kenntnis der hochfrequenten Eigenschaften von eingesetzten Kabeln, Batterien und Komponenten benötigt. Diese Nachbildung würde es erlauben, Komponenten bereits so zu optimieren, dass das erwünschte Zusammenspiel der Steuergeräte auf Fahrzeugebene gewährleistet ist und gleichzeitig unerwünschte elektromagnetische Beeinflussungen so weit wie möglich ausgeschlossen werden können.



Fig. 1: Beispiel eines aktuellen, elektrisch angetriebenen Kfz (www.hybrid-elektrofahrzeuge.de) Schematic of an example for a recent electric driven car



Characterization of automotive High Voltage Networks for EMI Measurements

Dipl.-Ing. Martin Reuter

A major task in developing electric cars is to control electromagnetic interferences (EMI) of their power train. Fast slew rates in power electronics increase efficiency, but also emitted radio frequency (RF) disturbances. Main approach to reduce EMI within automotive systems is a complete shielding of its high voltage (HV) power network. The shielding of HV power networks changes the system configuration from the used unshielded single core multi wire harness into a coaxial three conductor layout, and therefore the characteristic impedances of the entire power network. HV network cables have characteristic impedances considerably lower than 50 Ω . This leads to the perception that recently used low voltage (LV) LISNs for EMI testing of HV components imply a mismatch of input impedances. Optimized EMI performance of HV components using LV LISNs may not be reproduced mounted in a car and could induce failed vehicle EMC tests. Thus further investigation about EMI testing of HV component conducted emissions is necessary. An artificial network (AN) is in development, which matches closer the electromagnetic environment of HV components to achieve an estimation of EMI performance on vehicle level. Knowledge of high frequency behaviour of HV cables and batteries can be used to determine an electronic circuit, representing a minimum HV power network. This network, emulating the electromagnetic environment inside an electric car, can be used to optimize intended interaction or reduce unintended interferences of electronic modules mounted in electric vehicles.



Fig. 2: Messaufbau für die Messung der hochfrequenten Eigenschaften von Leistungskabeln, die in elektrischen Kfz eingesetzt werden. Measurement setup for determining high frequency behavior of automotive high voltage cables



Messverfahren zur Vorhersage der Abstrahlung von Kabelbäumen

Dipl.-Ing. Daniel Schneider

Die zunehmende Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen stellt eine hohe Anforderung im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) dar. Jede elektrische Komponente, die in einem Automobil eingesetzt werden soll, muss bezüglich ihrer Störfestigkeit und Störaussendung Grenzwerte einhalten und in Messungen bestätigen. Diese Prüfungen erfolgen nach CISPR 25 Norm in einer Absorberhalle. Um im Bereich der Störaussendungsmessung Kosten während des Entwicklungsprozesses zu reduzieren, wird ein Messverfahren entwickelt, welches die Störaussendung auf Grundlage von Störströmen berechnet.

Der für den Komponententest bestimmte Aufbau gemäß CISPR 25 ist in Fig. 1 dargestellt. Hierbei befindet sich die zu prüfende Komponente auf einem Metalltisch in einer Absorberkabine mit geerdetem Boden. Die Komponente wird über einen Kabelbaum mit der Netznachbildung verbunden. In gleicher Höhe zum Aufbau befindet sich in 1 m Abstand die Messantenne.



Fig. 1: CISPR 25 konformer Messaufbau für Störaussendung Test setup for radiated emissions according to CISPR 25



Measurement procedure for vehicle harness radiation prediction

Dipl.-Ing. Daniel Schneider

The ongoing electrification in the automotive sector is a high challenge to the electromagnetic compatibility (EMC) area. Each electrical component supposed to be used in a vehicle has to show its compatibility regarding the limits. This is proofed by cost intensive CISPR 25 conform measurements in a semi anechoic chamber. A low cost measurement procedure is going to be developed which calculates the radiated emissions on base of the radio frequency interference currents.

The test setup according to CISPR 25 is shown in Fig. 1. The device under test (DUT) is mounted on a metallic table in a semi anechoic chamber. The device is connected via a harness to an artificial network. There is a measurement antenna in 1 m distance in the same height as the test setup.

The intention of the measurement procedure is to predict the radiated field without an anechoic chamber. I.e. switching from a measurement environment according to CISPR 25 to a normal laboratory environment like shown in Fig. 2 and calculate the electrical field on base of less cost intense measurement methods.



Fig. 2: Problemstellung, Übergang von Absorberhalle zu Laborumgebung Task, switching from anechoic chamber to laboratory environment

In the lower frequency range up to approximately 200 MHz radiated emissions are mainly due to the harness between device and the artificial network. This leads to a Hertzian dipole model of the harness depending on the length of harness and the observed frequency. Common mode currents dominate the radiated emissions. Therefore the main source of the emission can be determined by current clamp measurements along the harness.



Ziel des Messverfahrens ist es, das abgestrahlte elektrische Feld ohne eine Absorberkabine vorhersagen zu können, d.h. von der CISPR 25-konformen Messumgebung auf eine Laborumgebung auszuweichen und das elektrische Feld über kostengünstigere Messmethoden zu berechnen. Fig. 2 verdeutlicht die Problemstellung.

Im niederen Frequenzbereich bis ca. 200 MHz kann davon ausgegangen werden, dass die zu messenden Störemissionen über den Kabelbaum zwischen Komponente und Netznachbildung abgestrahlt werden. Aus dieser Annahme heraus kann der Kabelbaum vereinfacht, je nach Länge und betrachteter Frequenz, mit Hertzschen Dipolen modelliert werden, welche jeweils einen konstanten Strom tragen. Aus der Dominanz der Gleichtaktströme in Bezug auf die Abstrahlung werden diese mittels Stromzangenmessung entlang der Leitungen ermittelt. Über das Modell des Hertzschen Dipols in Verbindung mit der ermittelten Stromverteilung erfolgt die Vorhersage des abgestrahlten Feldes im Freiraum. Um eine Korrelation der Vorhersage mit einer realen Messung zu erreichen, müssen im Weiteren Effekte des Messaufbaus und der Messumgebung berücksichtigt werden. Eine wichtige Rolle auf das Ergebnis spielt der Einfluss der Ground Plane sowie der Absorberhalle. Dieser Einfluss kann messtechnisch erfasst und dem Berechnungsmodell zur Verfügung gestellt werden.

Fig. 3 zeigt das gemessene und berechnete Feld sowie die Differenz beider Kurven für einen breitbandigen Störer. Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen im Bereich von 20 bis 60 MHz und im Bereich von 190 bis 220 MHz für den Einsatz in der Industrie zu groß sind. An dieser Stelle stehen Erweiterungen des Dipol-Modells sowie Zeitbereichsmessungen zur Bestimmung der Phasenlage der einzelnen Dipolströme an.



The combination of Hertzian dipole model and measured current distribution allows to predict the radiated electrical field in free space. The correlation of prediction and real measurement needs some more effects taken in to account. Main effects like the ground plane and the anechoic chamber characteristics can be determined by measurements. Those characteristics can be provided in the calculation model.

Fig. 3 shows measured and calculated electrical field as well as the difference of both curves caused by a broadband pulse generator. Thus it appears that the deviation in the range from 20 to 60 MHz and in the range from 190 to 220 MHz is too high for engineering purpose. Therefore an upgrade of the dipole model in combination with time domain measurement is in work. Time domain measurements of the common mode currents lead to needed phase information which will improve the models accuracy.



Fig. 3: Gemessenes und berechnetes E-Feld, Differenz beider Kurven Measured and calculated E-Field, difference of both curves

.**ĩEH**.

6. VERÖFFENTLICHUNGEN

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

M. Koch, W. Koltunowicz, M. Fischer *Condition Monitoring as a Basis for Effective Asset Management.* 8th International Conference on Transformers, Mumbai, India, January 18-19, 2010, Proceedings of Trafotech, Paper No. VI-03

M. Duval, I. Atanasova-Hoehlein, M. Cyr, M. Grisaru, K. Carrander, F. Scatiggio, S. Tenbohlen, J. Dukarm, L. Arvidsson, P. Boman, A. Hall *Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment.* Electra No. 248, February 2010, page 74-79; see also Technical Brochure No. 409

S. Coenen, A. Pfeffer, S. Tenbohlen, A. Wilson, S. Markalous *Möglichkeiten und Grenzen der Vor-Ort-Teilentladungsmesstechnik.* Stuttgarter Hochspannungssymposium 2010, 9.-10. März 2010, Tagungsband (ISBN 978-3-00-030454-5), S. 117-128

M. Fischer, T. Lübbe, S. Tenbohlen, M. Schäfer, R. Haug Effiziente Zuteilung knapper Wartungs- und Instandsetzungsresourcen an Leistungstransformatoren.

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2010, 9.-10. März 2010, Tagungsband (ISBN 978-3-00-030454-5), S. 73-82

M. Heindl, R. Wimmer, J. Christian FRA – Ein neuer Standard zur Wicklungsdiagnose. Stuttgarter Hochspannungssymposium 2010, 9.-10. März 2010, Tagungsband (ISBN 978-3-00-030454-5), S. 143-152

J. Hohloch, W. Köhler, S. Tenbohlen, M. Aidam, T. Krauß Messverfahren zur Beurteilung des Emissionsverhaltens von geschirmten Energiekabeln für KFZ-Hochvoltbordnetze.

EMV 2010, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 9.-11. März 2010, Tagungsband, Seite 273

S. Tenbohlen, F. Streibl, C. Pratler, J. Hartmann

Leiterplatten-EMV-Filter.

VDE-GMM-Fachtagung AmE 2010 – Automotive meets Electronics, Dortmund, 15.-16. April 2010, GMM Fachbericht Band 64, Paper Nr. 6

M. Koch, M. Krueger, S. Tenbohlen

On-site Methods for Reliable Moisture Determination in Power Transformers. Transmission and Distribution Conference 2010 IEEE PES, New Orleans, April 19-22, 2010, P 1-6



M. Koch, S. Raetzke, M. Krueger, S. Tenbohlen

Moisture Diagnostics of Power Transformers by a Fast and Reliable Dielectric Response Method.

CIGRE VI Workspot – Int. Workshop on Power Transformers, Foz do Iguacu, Brasil, April 25-28, 2010, Paper No. TP1-12

S. Tenbohlen

On site Measurement of Partial Discharges – Experiences with multi-Terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and Acoustic PD Localisation.

CIGRE VI Workspot – Int. Workshop on Power Transformers, Foz do Iguacu, Brasil, April 25-28, 2010, Tutorials

S. Tenbohlen, M. Koch

Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, April 2010, page 825-830

S.M. Gubanski, J. Blennow, B. Holmgren, M. Koch, A. Kuechler, R. Kutzner, J. Lapworth, D. Linhjell, S. Tenbohlen, P. Werelius *Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings.* Electra No. 249, April 2010, S. 64-71; see also Technical Brochure No. 414

Su Su Win, S. Coenen, S. Tenbohlen

Localization of Partial Discharges in Power Transformer by Acoustic Method. Second IEEE Student Conference 2010, Hamburg, May 20-21, 2010, Session 5

M. Fischer, S. Tenbohlen, M. Schäfer, R. Haug

Determining Power Transformers' Sequence of Maintenance and Repair in Power Grids.

2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, California, USA, June 6-10, 2010, Proceedings of the ISEI, Paper No. 067

S. Tenbohlen, A. Pfeffer, S. Coenen

On-site Experiences with Multi-Terminal IEC PD Measurements, UHF PD Measurements and Acoustic PD Localisation.

2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, California, USA, June 6-10, 2010, Proceedings of the ISEI, Paper No. 095

A. Pfeffer, S. Tenbohlen

Evaluation of Parameters of Lightning Impulse Voltages from Transformer Tests Using the New k-factor Approach.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, June 2010, Paper No. 2435, Vol. 17, Issue 3, pp. 953-958



E. Rahimpour, S. Tenbohlen

Experimental and Theoretical Investigation of Disc Space Variation in real High-Voltage Windings using Transfer Function Method.

IET Electr. Power Appl., July 2010, Vol. 4, Iss. 6, pp. 451-461

S. Coenen, S. Tenbohlen, A. Pfeffer, A. Wilson, S. Markalous Combination of Different Techniques for Improved Interpretation of PD Measurements.

CIGRE Session, Paris, France, August 22-27, 2010, SC D1, PS2: Challenges for testing and diagnostics, Paper No. D1-207

A. Weinläder, S. Tenbohlen, R. Wittmaack

Prediction of the Oil Flow and Temperature Distribution in Power Transformers by CFD.

CIGRE Session, Paris, France, August 22-27, 2010, SC A2, PS3: Transformer Modelling, Paper No. A2-301

S. Coenen, M. Reuter, S. Tenbohlen, S. Markalous

Influence of PD Location in Transformer windings on IEC60270- and UHF-Measurements.

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, September 6-11, 2010, Proceedings of the CMD, Paper No. A3-5, page 97-100

S. Coenen, S. Tenbohlen, F. Werner, S. Markalous

Localization of PD Sources inside Transformers by Acoustic Sensor Array and UHF Measurements.

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, September 6-11, 2010, Proceedings of the CMD, Paper No. A8-4, page 235-238

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

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

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, September 6-11, 2010, Proceedings of the CMD, Paper No. C2-2, page 481-484

M. Heindl, S. Tenbohlen, J. Velásquez, A. Kraetge, R. Wimmer

Transformer Modelling Based On Frequency Response Measurements For Winding Failure Detection.

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, September 6-11, 2010, Proceedings of the CMD, Paper No. A7-3, page 201-204



J.L. Velásquez Contreras, M.A. Sanz-Bobi, W. Koltunowicz, A. Kraetge, M. Heindl *Pattern Recognition of the Factors affecting the Reproducibility of FRA Measurements in Power Transformers.*

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, September 6-11, 2010, Proceedings of the CMD, Paper No. P2-52, page 1183-1186

A. Troeger, U. Riechert, S. Burow, S. Tenbohlen

Sensitivity Evaluation of Different Types of PD Sensors for UHF-PD-Measurements. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Tokyo, Japan, September 6-11, 2010, Proceedings of the CMD, Paper No. P1-49, page 839-842

M. Koch, S. Rätzke, S. Tenbohlen

Die Leitfähigkeit von Isolierflüssigkeiten bei niedrigen Frequenzen und Gleichspannung.

ETG-Fachtagung Isoliersysteme bei Gleich und Mischfeldbeanspruchung, Köln, 27.-28.9.2010, Paper No. 5.6

M. Koch, S. Tenbohlen, T. Stirl

Diagnostic Application of Moisture Equilibrium for Power Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, October 2010, page 2574-2581

A. Weinläder, S. Tenbohlen

Investigation of the Thermal Behaviour of Transformers by CFD and Validation by Measurements.

3rd International Advanced Research Workshop on Transformers, Santiago de Compostela, Spain, October 4-6, 2010, Proceedings of ARWtr 2010, Paper No. 46, page 382-387

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

Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency.

25th ICEC & 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston SC, USA, October 4-7, 2010, Proceedings of the 56th Holm Conference, Paper No. 7.5, page 223-229

K.J. Rapp, C.P. McShane, J. Vandermaar, D. Vukovic, S. Tenbohlen Long Gap Breakdown of Natural Ester Fluid

International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, USA, October 11-14, 2010, Paper No. 7145



E. Rahimpour, M. Jabbari, S. Tenbohlen *Mathematical Comparison Methods to Assess Transfer Functions of Transformers to Detect Different Types of Mechanical Faults.*IEEE Transactions on Power Delivery, October 2010, Vol. 25, No. 4, pp. 2544-2555

J. Hohloch, W. Köhler, S. Tenbohlen, M. Aidam, T. Krauß *Measurement of Transient Pulses on High-Voltage Automotive Power Networks.* VDE-Kongress 2010, E-Mobility, Leipzig, 8. - 9. November 2010, Paper FZT 1.1.3

M. Reuter, W. Köhler, S. Tenbohlen

Characterization of automotive High Voltage Networks for EMI Measurements. VDE-Kongess 2010, E-Mobility, Leipzig, 8. - 9. November 2010, Paper FZT 1.2.4



7. MITARBEIT IN FACHGREMIEN / VORTRÄGE

29.01.10	Deutscher Arbeitskreis Cigre D1, Karlsruhe, Prof. Tenbohlen
0104.03.10	VDE-Seminare "Klassische Diagnoseverfahren" bzw. "Moderne Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren" am Institut, Prof. Tenbohlen, S. Coenen, M. Heindl, M. Jovalekic, A. Müller (Vorträge und Laborübungen)
08.03.10	CIGRE WG D1.29, Partial Discharges in Transformers, Meeting in Stuttgart, Vortrag S. Coenen
0910.03.10	Stuttgarter Hochspannungssymposium "Modernes Design und zuverlässiger Betrieb von Komponenten des elektrischen Netzes", Filderhalle Leinfelden-Echterdingen, Vorträge von Prof. Tenbohlen, S. Coenen, M. Heindl, M. Fischer
0911.03.10	EMV 2010, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, W. Köhler, M. Reuter, D. Schneider, Vortrag von J. Hohloch
13.04.10	Sitzung des DAK CIGRE A2 bei ABB in Bad Honnef, Prof. Tenbohlen
23.41.5.10	International Workshop on Power Transformers, Foz du Iguacu/Brasilien, Prof. Tenbohlen, Tutorial: On-site PD Measurement
2829.04.10	Sitzung der CIGRE WG D1.31 "Dielectric performance of insulating liquids for transformers" in Manchester, D. Vukovic
0304.05.10	KIC InnoEnergy-Besprechung in Stockholm, Prof. Tenbohlen
18.05.10	CIGRE Working Group D1.25 "Application Guide for PD Detection in GIS using UHF or Acoustic Methods", Lyon, S. Burow
0411.06.10	Beiträge bei der Konferenz IEEE International Symposium on Electrical Insulation in San Diego, USA, Prof. Tenbohlen, M. Fischer
21.06.10	Sitzung des ETG-Vorstandes in Frankfurt, Prof. Tenbohlen
07.07.10	Eröffnungsveranstaltung KIC InnoEnergy in Karlsruhe, Prof. Tenbohlen
22.08.10	CIGRE WG D1.29 "Partial Discharges in Transformers", Meeting in Paris, Vortrag S. Coenen
2227.08.10	CIGRE-Session 2010 in Paris, Prof. Tenbohlen, Key Note Speech: Transformer Modelling – Looking Inside to Access the Key Data
28.84.9.10	Meeting der CIGRE-Arbeitsgruppen D1.35 und D1.37 auf Madeira, Prof. Tenbohlen
0611.09.10	International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), September 6-11, 2010, Tokyo, Japan, Vorträge von S. Coenen und M. Heindl



- 16.-17.09.10 DAAD-geförderter Workshop am Institut mit der Universität Manchester zum Thema "*Umweltfreundliche Transformatoren*", Teilnehmer/Beiträge: Prof. Tenbohlen, M. Beltle, S. Coenen, M. Heindl, M. Jovalekic, A. Müller, A. Pfeffer, N. Schmidt, D. Vukovic, A. Weinläder
- 20.-24.09.10 15th Int. Workshop on High Voltage Engineering, Allgäuhaus/Wertach, Prof. Tenbohlen, Vorträge von M. Beltle, S. Burow, M. Jovalekic, A. Müller, Su Su Win und D. Vukovic
- 27.-28.09.10 VDE-Veranstaltung "Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung", Köln, Prof. Tenbohlen, M. Jovalekic, D. Vukovic
- 18.10.10 Sitzung des ETG-Vorstandes, Frankfurt, Prof. Tenbohlen
- 18.-19.10.10 Eurodoble 2010, Birmingham, UK, Vortrag S. Coenen
- 20.10.10 Kooperationstreffen an der Uni Manchester, UK, Teilnehmer S. Coenen
- 02.-11.11.10 DAAD-geförderter Forschungsaustausch mit der Universität Manchester zum Thema "*Umweltfreundliche Transformatoren*" Teilnehmer: M. Jovalekic, D. Vukovic
- 08.-11.11.10 VDE-Kongress 2010 "eMobility Electrical Power Train", Leipzig, Prof. Tenbohlen, M. Heindl, S. Coenen; Vortrag von J. Hohloch, Posterbeitrag von A. Probst und M. Reuter
- 09.-16.11.10 Prof. Tenbohlen reist als Invited Speaker zur Konferenz "International Workshop on High Voltage Engineering" nach Kitakyushu in Japan und hält weitere Vorträge bei Mitsubishi und bei japanischen Forschungseinrichtungen
- 25.11.10 CIGRE/CIRED-Informationsveranstaltung "Smart Grids: Hype oder Vision?", Mannheim, Prof. Tenbohlen, A. Abdel Majeed, A. Probst
- ab 29.11.10 Forschungsaustausch mit Universität Südafrika, Prof. Tenbohlen, M. Heindl, A. Probst und 2 Studierende aus der Crossing Borders-Gruppe der Erneuerbaren Energien
- 13.12.10 Sitzung des ETG-Vorstandes in Frankfurt, Prof. Tenbohlen



8. EREIGNISSE UND KONTAKTE

Von Anfang Oktober bis zum Jahresende 2010 arbeitete Herr Dr. Georgi Tsonev VELEV aus Gabrovo/Bulgarien mit einem Stipendium des DAAD am Institut, und vom 12.-29.11.2010 besuchte uns Herr David OYEDOKUN von der University of Cape Town/Südafrika.

Traditionell fand auf dem Söllerhaus vom 07.-09. April 2010 der Workshop der akademischen Mitarbeiter statt. Sie berichteten über den Stand ihrer Arbeit und nutzten die Möglichkeit zu Diskussionen.

Der Oktober-Workshop (6.-8.10.2010) auf dem Söllerhaus wurde im Rahmen eines BMBF-Projekts gemeinsam mit den Wissenschaftlern der University of Cape Town/Südafrika durchgeführt.

Zum Betriebsausflug am 23. Juli 2010 trafen sich zahlreiche Kolleginnen und Kollegen trotz unsicherer Wetterlage am Bahnhof Obertürkheim und wanderten unter ortskundiger Führung von Daniel Schneider durch die Weinberge zur Grabkapelle Württemberg. Einige ließen sich auch die Besichtigung der letzten Ruhestätte von Königin Katharina nicht entgehen. Zur Stärkung kehrten wir anschließend im "Rotenberger Weingärtle" ein. Danach ging es zügig zu Fuß zum Weinbaumuseum nach Uhlbach hinunter, wo bereits der engagierte und fachkundige Führer auf uns wartete. Der Tag klang zünftig mit einer Weinprobe im "Löwen" aus. Ein Dankeschön an Daniel Schneider für die Organsisation!



9. PRÜFEINRICHTUNGEN

Stoßspannungsanlagen	bis 2000 kV, 100 kJ		
Generator für schwingende S	Schaltstoßspannung bis 1300 kV		
Schwingende Blitzstoßspann	ung bis 1200 kV (transportable Anlage für Vor-Ort-Prüfungen)		
Stoßstromanlage	bis 200 kA, 100 kV, 80 kJ		
Stoßstromanlage	bis zu 6 Impulse wechselnder Polarität, 80 kV, 150 kJ		
Wechselspannungskaskade	2 x 400 kV/2 A, 1500 kVA Speiseleistung		
Wechselspannungsanlage	300 kV, 0,2 A mit Teilentladungsmessplatz		
Gleichspannungsanlage	bis 600 kV, 10 mA		
EMP-Generator	bis 800 kV, 5 ns/200 ns bzw. 2,3 ns/23 ns mit Freiluft- antenne für Prüflinge bis $5 \times 10 \times 5 \text{ m3}$ (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 %		
Verschmutzungskammer	$5 \times 5 \times 5 m^3$, Spannung bis 150 kV		
Einpolige SF6-Anlage	Un = 525 kV, Länge mit Abzweigen ca. 25 m		
Dreipolige SF6-Anlage	Un = 110 kV, Länge ca. 3 m		
Digitale und analoge Mess	sgeräte für periodische und einmalige Vorgänge mit Abtastraten bis über 4 GHz, Netzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren, Signalgeneratoren		
Teilentladungsmeßgeräte zur phasenaufgelösten Messung und Interpretation			
Öllabor	Karl Fischer-Titrator, Säuregehalts- und 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

