

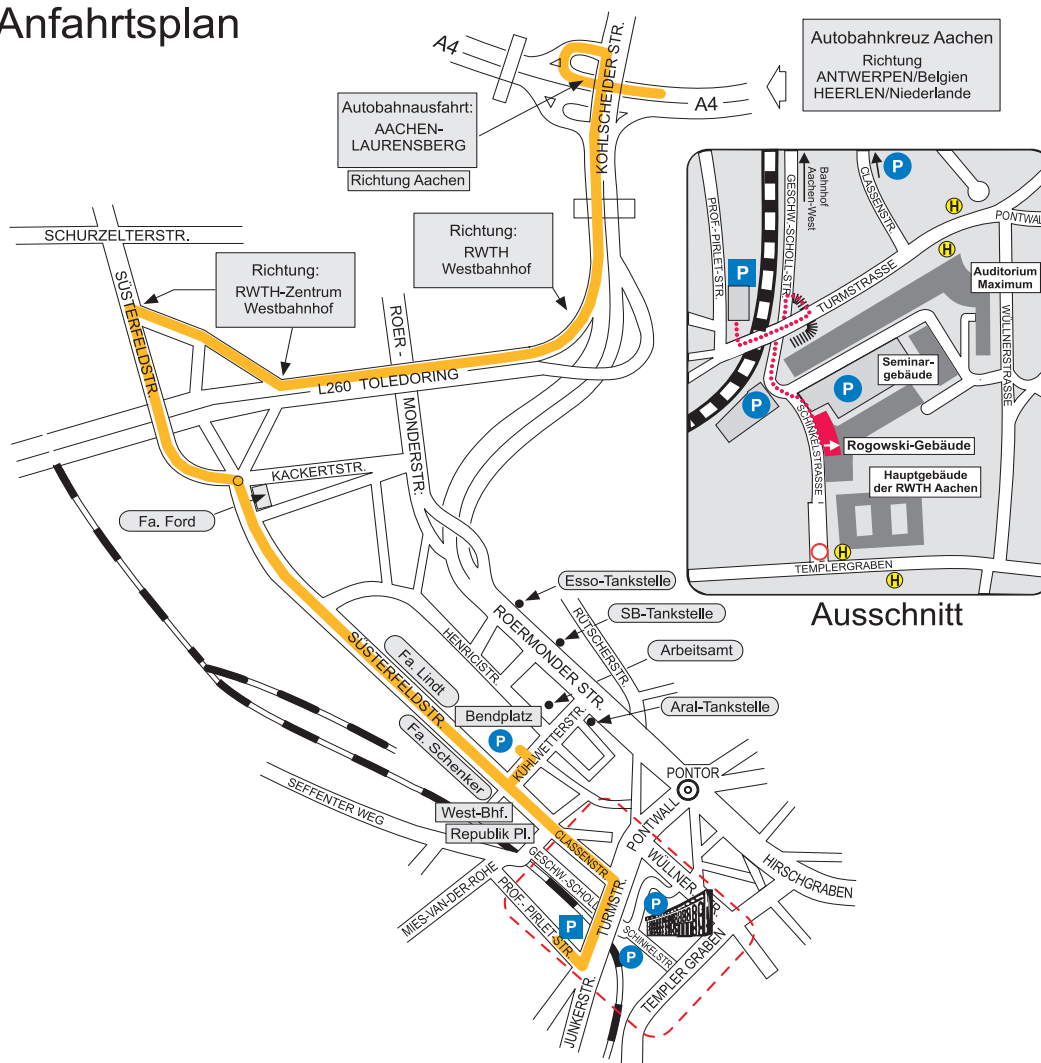


Jahresbericht 2007

Institut für Hochspannungstechnik
Schinkelstraße 2
52056 Aachen

Telefon: +49 241 80-94931
Fax: +49 241 80-92135
e-mail: post@ifht.rwth-aachen.de
Internet: www.ifht.rwth-aachen.de

Anfahrtsplan



Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
Institut für Hochspannungstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen
Redaktion: Dipl.-Ing. Th. Dederichs, Dipl.-Ing. M. Keßler
Redaktionsschluß: 31.12.2007

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Forschung am ifht

Berichte aus der laufenden Forschung

Forschungsgebiete	10
Simulation des Kühlungsverhaltens von Schaltlichtbögen in SF ₆	
Selbstblas-Leistungsschaltern	17
Ermittlung des thermischen Ausschaltvermögens von Gasen für	
Selbstblasleistungsschalter	25
Untersuchung des thermischen Einfluss' auf die Zustandsbewertung von	
Hochspannungskabelmuffen mittels Ultraschall	31
Untersuchungen des Alterungsverhaltens von nanostrukturierten superhydrophoben	
Isolierstoffoberflächen unter Multi-Stress-Bedingungen	35
Parameterstudien zum elektrischen Durchschlag in syntaktischem Schaum	39
Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas - ein ökologischer Vergleich	47
Innovative IKT-Infrastrukturen für Smart Grid Anwendungen	55
Life Management von 123 kV Leistungsschaltern	59
Modellierung von SF ₆ -Luft-Gemischen für die Druckberechnung in	
MS-Schaltanlagen im Störlichtbogenfall mittels eines CFD-Tools	67

Dissertationen

Untersuchungen zum Einsatz von Energieabsorbern in Ringkabelschaltanlagen	
im Störlichtbogenfall	71

Diplom-, Master- und Studienarbeiten - 2007 abgeschlossen

Veröffentlichungen	83
--------------------------	----

Lehre am ifht

Vorlesungen und Praktika	86
--------------------------------	----

Das Institut

Chronik	92
Seminar Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen	98
Aktivitäten 2007	100
Exkursionen	107



Contents

Preface

Research at ifht

Scientific Reports

Fields of Research	14
Simulation of the Cooling Behaviour of Switching Arcs in SF ₆ Self-Blast	
Circuit Breakers	21
Determination of the thermal interruption capability of different gases for self-blast circuit breakers	28
Investigations on the thermal influence on the condition assessment of power cable joints using ultrasound	33
Investigation of the aging performance of nanostructured superhydrophobic insulating surfaces under multi-stress-conditions	37
Parameter Study with Respect to the Electrical Breakdown in Syntactic Foam	43
Power and Heat from Biogas - an Ecological Comparison	51
Innovative ICT-infrastructure for smart grid applications	57
Life Management of 123 kV Circuit Breakers	63
Modelling of SF ₆ -air mixtures for the calculation of the pressure rise in MV substations during internal arcing by applying a CFD tool	69

PhD Theses

Untersuchungen zum Einsatz von Energieabsorbern in Ringkabelschaltanlagen im Störlichtbogenfall	71
---	----

Diploma- and Project Theses 2007	75
---	----

Publications	83
---------------------------	----

Teaching at ifht

Lectures and Laboratories	86
---------------------------------	----

The Institute

Chronicle	92
Technical Seminar on Medium and High Voltage	
Equipment and Substations	98
Activities 2007	100
Technical Excursions	107

Sehr geehrte Freunde des Instituts für Hochspannungstechnik,

mit dem Jahresbericht 2007 wollen wir in bewährter Form über unsere Leistungen, die Forschungsarbeiten und aktuelle Entwicklungen innerhalb und außerhalb unseres Instituts berichten.

Erneut können wir mitteilen, dass sich die elektrische Energietechnik in unserer Fakultät steigender Nachfrage erfreut. Unterstützt durch die angeregte öffentliche Diskussion zum Klimawandel und dessen Interaktion mit einer sicheren und umweltfreundlichen Energieversorgung ist der Anteil der energietechnisch interessierten Studierenden weiter deutlich angestiegen. Dieses drückt sich auch in der hohen Anzahl der Neueinschreibungen im Studiengang „Wirtschaftsingenieur Elektrische Energietechnik“ aus, die erstmals die Grenze von 200 Erst-Immatrikulationen überschritten hat. Auch bei den Absolventen unserer Fakultät liegt die Energietechnik eindeutig vorne. Von über 220 Master- und Diplomarbeiten im Jahr 2007 wurden 40 % an den vier energietechnischen Instituten begonnen, wobei mein Institut mit 29 Abschlussarbeiten (19 Diplom-, 10 Masterarbeiten) einen maßgeblichen Anteil leisten konnte. Wenngleich damit unsere inhaltliche Ausrichtung auf großes Interesse stößt, bedeutet dieses natürlich auch, dass wir uns weiterhin aktuellen Fragestellungen widmen müssen, ohne die klassischen Fragestellungen eines Hochspannungsinstituts zu vernachlässigen.

Nach nunmehr sieben Jahren in der Leitung des Instituts möchte ich in 2008 die positive Geschäftsentwicklung in der Energietechnik und die Umstellung auf die Bachelor- und Masterausbildung nutzen, das Institut strategisch auf die zukünftigen Herausforderungen in Forschung und Lehre auszurichten. Dieses Vorhaben wird bedingen, sowohl neue Fragestellungen in Forschung und Lehre aufzugreifen als auch eine Konsolidierung im Hinblick auf den Einsatz eigener Ressourcen vorzunehmen.

In diesem Zusammenhang ist es mir eine besondere Freude mitzuteilen, dass wir

Herrn Dr.-Ing. Joachim Schneider, Mitglied des Vorstands der ABB AG, Mannheim, als Lehrbeauftragten haben gewinnen können. Er wird ab dem Sommersemester 2008 die neue Vorlesung „Unternehmensführung für Ingenieure“ anbieten, die besonders auf die Studierenden der Elektrotechnik und Informationstechnik aber auch des Wirtschaftsingenieur-Studiengangs ausgerichtet ist. Zudem kann ich mitteilen, dass ich 95 Jahre nach Erstherausgabe der wissenschaftlichen Zeitschrift „Archiv für Elektrotechnik - Electrical Engineering“ durch Herrn Prof. Rogowski, RWTH Aachen, die Funktion als Herausgeber dieser Zeitschrift (Springer Verlag) von Herrn Prof. Prechtel, TU Wien, übernommen habe. Auch hier gilt es, dieses renommierte Publikationsorgan in den nächsten Jahren weiterhin erfolgreich zu positionieren.

Die für die RWTH Aachen erfolgreich verlaufende Bewerbung bei der Exzellenzinitiative hat auch für uns positive Auswirkungen. Im Rahmen der strategischen Ausrichtung „RWTH 2020: Meeting Global Challenges“ sind wir aktiv in das sog. „Project House Human Technologies (HumTec)“, dem Versuch einer engen wissenschaftlichen Kooperation mit den Geisteswissenschaften, mit verschiedenen Energie-Forschungsprojekten eingebunden. Zudem erwarten wir Synergieeffekte aus der engeren Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich, die sich bereits in der Gründung der „JARA Energy“ (Jülich-Aachen Research Alliance Energy) zeigt. Hier entwickelt sich in der Region eine deutliche Schwerpunktbildung zur Forschung, Entwicklung, Aus-/Weiterbildung und Lehre in der Energietechnik. Mit über 600 Wissenschaftlern, die sich an der RWTH Aachen, dem Forschungszentrum Jülich und eng verbundenen Abteilungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt DLR, Köln, mit Energieforschung befassen, sind wir bereit, uns den Herausforderungen und den Möglichkeiten unserer Zeit zu stellen.

Auch im Jahr 2007 haben sich das Institut und die mit uns eng verbundene Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft FGH e.V. personell deutlich verändert. Den Absolventen unseres Instituts wünsche ich viel Erfolg und Glück auf Ihrem weiteren persönlichen wie beruflichen Lebensweg, verbunden mit dem Dank für die erfolgreiche Arbeit, die uns zuteil kam. Den neuen Mitarbeitern gilt unsere besondere Aufmerksamkeit, um sie schnell und erfolgreich in die Familie „IfHT“ zu integrieren.

Weitere Informationen über „unser Jahr 2007“ entnehmen Sie bitte diesem Jahresbericht oder unser Homepage (www.ifht.rwth-aachen.de), die wir kontinuierlich zu pflegen versuchen. Ich bedanke

mich für Ihre Rückmeldungen, Anregungen und Beiträge, die uns helfen, uns auch zukünftig in Forschung und Lehre weiter zu entwickeln.

Abschließend gebührt Ihnen allen, den Mitarbeitern, Freunden und Partnern für den Einsatz, das Vertrauen und die außerordentlich angenehme Zusammenarbeit, mein besonderer Dank.

Ich freue mich auf die weitere Zusammenarbeit und grüße herzlich

Ihr



Aachen, im Januar 2008

Dear partners and friends,

I am pleased to present our Annual Report 2007 which will show some major aspects of our activities and our research work. In addition further information about recent developments inside and outside our Institute for High Voltage Technology is given.

Following the trend of the previous years we can again report an increasing interest in all power engineering topics. Based on intensive public discussions on climate change and its interaction with a safe, reliable and sustainable energy supply for the future we see a significantly increased interest in these topics. This trend is demonstrated by the huge number of new students which have started their studies in the combined commercial-technical program "Wirtschaftsingenieur Electrical Power Engineering" (a combination of MBA and M.Sc. program). In October 2007 more than 200 students started their studies here. In addition, electrical power engineering topics are again ranked first in total number of students finishing their Master resp. Diploma thesis in our faculty. More than 40 % of all of our 220 finishing students started their final thesis in power engineering. It is my pleasure to report that for the first time my institute attracted more students than any other chair resp. institute of our faculty (19 diploma, 10 master theses). Although this pleasant result indicates that we are offering interesting topics we do see the need to more and more focus our research activities on future power system topics without disregarding classic high voltage engineering topics.

Looking forward after already seven year heading the institute and considering the booming energy industry as well as the transformation of the diploma programs into Bachelor and Master programs I would like to take the opportunity in 2008 to develop and prepare our new respectively updated strategic direction both in research and education. Here, I have in mind to start new topics in research and teaching

but also to consolidate our activities after evaluating what we have done and reached so far and after a benchmark with other research institutions.

As a first result I am very pleased to report that we could convince Dr.-Ing. Joachim Schneider, member of the board of directors of ABB AG, Mannheim, to capitalize on his industrial expertise and know how as invited lecturer beginning in the summer term 2008. He will talk about "Business Administration for Engineers", a lecture which is specially designed for all students of the electrical engineering program but also for our MBA program. Additionally, I am glad to say that I took over the Chief Editor position of the scientific journal "Archiv für Elektrotechnik - Electrical Engineering" which is published by Springer. This journal has been published first in 1912 by Professor Rogowski, RWTH Aachen and it is a great honour to become one of his successors. In close cooperation with our editorial team and the publishing house we would like to position this traditional journal for the future needs while facing stronger competition between different journals.

As you may have heard RWTH Aachen University has been awarded with the title "Exzellenzhochschule" which has been the final result of the German excellence initiative. We are founding members of the so called "Project House Human Technologies (HumTec)" which is a significant part of the new strategic direction of Aachen University "RWTH 2020: Meeting Global Challenges". Main aim of this project is to foster the scientific collaboration between engineering sciences (here: energy) and our philosophical faculty. We do see a real chance for advantages out of this initiative regarding a more intensive ethic treatment of many technical challenges we are facing today, e.g. impact of climate change on human lives and the interaction with energy topics. In addition we expect significant synergy effects out of the close cooperation



with the nearby located Jülich Research Center. As a first result, the founding of "JARA Energy" (Jülich-Aachen-Research-Alliance) can be reported. This will become another step towards our targeted regional center of energy engineering with a strong basis in research, development, education and training. More than 600 scientists at RWTH Aachen University, Research Center Jülich as well as some closely collaborating departments of the German Aerospace Center, Cologne, are striving towards sustainable solutions for all the challenges and opportunities in the field of energy.

With respect to our staff, both the institute as well as the Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft (FGH) e.V. have changed significantly. I wish our alumni all the best for their further career and want to thank all of them for successfully contributing to our results. All new members I like to welcome in our team - here, our focus will be to quickly and successfully integrate them into the IfHT-family.

You will find more information about our activities in this report and by visiting

our homepage (www.ifht.rwth-aachen.de) which we try to continuously update with news and up to date results. Here, I would like to thank all of you for your valuable remarks, feedback and contributions helping us to steadily improve our research, our style, our contributions and services in the field of energy.

Finally, I thank all of you, our staff, our friends and partners for your commitment, your trust and your engagement during a successful year 2007.

With great enthusiasm I look forward to cooperating with you in the future.

With kind regards from Aachen

Sincerely yours

Aachen, January 2008

Berichte aus der Forschung

Dissertationen

Diplom-, Master- und Studienarbeiten

Veröffentlichungen



9

Research at ifht

PhD Theses

Diploma-, Master and Project Theses

Publications

Forschungsgebiete

Forschungsgruppe “Leistungsschalter”

Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Jan Christoph Kahlen

Kurzbeschreibung:

Leistungsschalter arbeiten als Schalt- und Sicherheitselemente in elektrischen Energieversorgungsnetzen. In der Forschungsgruppe werden die physikalischen Grundlagen dieser Schalter eingehend untersucht. Im Forschungsgebiet Selbstblas-Leistungsschalter werden grundlegende experimentelle Untersuchungen wie Druckmessung, Bestimmung der Grenzausschaltleistung, optische Untersuchungen und Messung der Gasströmung in der Druckkammer durchgeführt. Dabei wird sowohl das bislang bevorzugt eingesetzte SF₆ als auch mögliche Alternativen wie z.B. CO₂ untersucht. Ein weiteres Forschungsgebiet ist die Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von Heißgas-Strömungen, wozu in diesem Jahr ein neues Labor aufgebaut wurde. Die experimentell gewonnenen Daten werden zur Verifikation von MHD-Simulationen eingesetzt. Die Schwerpunkte im Simulationsbereich liegen in der Berechnung der Hochstromphase (abbrandbestimmter Lichtbogen), des Stromnull- und Nachstrombereichs und in der Entwicklung leistungsfähiger Strahlungsmodelle. Durch die enge Kopplung zwischen Experiment und Simulation ist es möglich, Simulationen zu verifizieren und auch Experimente am Computer zu konzipieren.

Gruppenmitglieder:

Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker (seit 01.11.2007) * Dipl.-Ing. Jan Christoph Kahlen * Dipl.-Ing. Andreas Kurz * M. Sc. Piotr Margiel * Dipl.-Ing. Michael Schwinne (bis 30.06.2007) * Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

Studentische Hilfskräfte:

Daniel Eichhoff * Arne Güttler * Andreas Mannebach * Gregor Nikolic * Stefan Post * Tilman Schmidt * Anja Strauchs * Til Vrana

Forschungsgruppe “Isoliersysteme und Diagnostik”

Gruppenleiter: Dr.-Ing. Bernhard Heil

Kurzbeschreibung:

Die Forschungsgruppe bearbeitet ein weites Themengebiet von der Entwicklung neuartiger Isolierstoffe über die Zustandsbewertung von Isoliersystemen mittels verschiedener Diagnostikmethoden bis hin zu nanostrukturierten Isolierstoffoberflächen. Bei den Untersuchungen zu syntaktischen Schäumen als neuartige Isolierstoffe mit niedriger spezifischer Dichte stehen derzeit die Modellbildung des Durchschlagsverhaltens im Vordergrund. In einem Pro-

jekt zur Einsetzbarkeit von nanostrukturierter Silanbeschichtungen zur dauerhaften Erzeugung einer Superhydrophobie auf Isolatoroberflächen wird das beschleunigte Alterungsverhalten unter unterschiedlichen Belastungstests untersucht. Auf dem Gebiet der Diagnostik steht die Zustandsbewertung polymerer Isoliersysteme mittels Ultraschall im Mittelpunkt. Neben der Detektion von eingeschlossenen Fehlstellen in verschiedenen Materialien wie Elastomeren (z.B. Muffenkörper) können zudem Grenzflächen- und Vernetzungsprobleme nachgewiesen werden. Die entwickelten Mess- und Auswertungsalgorithmen werden weiterentwickelt, um eine detaillierte Analyse der Prüfobjekte hinsichtlich der eingeschlossenen Fehlstellen zu ermöglichen.

Gruppenmitglieder:

Dr.-Ing. Bernhard Heil * Dipl.-Ing. Michael Keßler * M. Sc. Andrey Mashkin * Dipl.-Ing. Sascha Schulte (Daimler AG) * Dipl.-Ing. Alexander Tröger * Dipl.-Ing. Torsten Wirz * M. Sc. Junliang Wu

Studentische Hilfskräfte:

Markus Ethen * Regina Göwe * Achim Mester * Thomas Nemeth * Sven Rüberg * Thorsten Weber * Sebastian Winter * David Vergossen * Alexis Kamewe * Daniel Winkel

Forschungsgruppe “Nachhaltige Energieversorgung”

11

Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Kurzbeschreibung:

Die Struktur der Energieversorgungssysteme wird sich durch den internationalen Stromhandel, regional und überregional durch Windenergieeinspeisung, sowie durch vermehrte Leistungseinspeisung aus (dezentralen) regenerativen Energiewandlungseinheiten (DEA) verändern. Einen entscheidenden Beitrag können dazu in Zukunft dezentrale BlockHeiz-KraftWerke (BHKW) durch eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung leisten. Bislang ist allerdings nicht ergründet, für welche Gebiete und Lastflussdichten solche Systeme am (öko-)effizientesten eingesetzt werden können.

Zukünftig sind unter Berücksichtigung der geplanten Offshore Windparks in Deutschland verstärkt Netzengpässe zu erwarten. Deshalb werden Maßnahmen zur Steigerung der Übertragungskapazität wie das Freileitungsmonitoring oder der Austausch von konventionellen Leiterseilen durch Hochtemperaturfreileitungsseile vor dem Hintergrund der technischen-wirtschaftlichen Machbarkeit auf ihre Umweltwirkungen untersucht.

Mit Hilfe von selbst entwickelten Bewertungsmethoden und Systemmodellen (inkl. einer Ökobilanzierung nach ISO Norm 14040/14044) werden Energieversorgungsnetze sowie deren Betriebsmittel und Anlagen unter technisch-ökologisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen untersucht und ihre Ökoeffizienz optimiert.

Gruppenmitglieder:

Dipl.-Ing. Thomas Dederichs * Dipl.-Ing. Uwe Macharey * Dipl.-Ing. Thomas Smolka *
Dipl.-Phys. Bernhard Schowe von der Brelie

Studentische Hilfskräfte:

Stefan Krengel * Cora Sophie Petino * Martin Scheufen * Bartholomäus Wasowicz

Forschungsgruppe “Anlagentechnik und Asset Management”

Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

Kurzbeschreibung:

Asset Management, dessen wesentliches Ziel die optimale Ausnutzung von Betriebsmitteln bei gleichzeitig optimierten Instandhaltungszyklen darstellt, ist eines der Themen in diesem Forschungsbereich. Zur Optimierung des Betriebes von elektrischen Energieversorgungsnetzen ist es notwendig, die Systemzustände sowie den technischen Zustand von Hochspannungs-Betriebsmitteln zu bewerten, damit eine gesamtkostenoptimale Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategie realisiert werden kann. Durch die Entwicklung von Alterungs- und Zustandsmodellen soll das zukünftige Störungsverhalten von Betriebsmitteln und das Ende deren Lebensdauer ermittelt werden, wobei die betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Weiterhin wird der Einfluss verschiedener Instandhaltungsmaßnahmen sowie einer veränderten Instandhaltungsstrategie auf das Betriebsmittelverhalten untersucht. Um auch die ökonomischen Aspekte des Asset Managements zu integrieren, werden zusätzlich verschiedene Szenarien unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Im Bereich der Anlagentechnik stehen derzeit Energiekabel und Freileitungen im Mittelpunkt. Mit verschiedenen Industriepartnern wird an Hand von Machbarkeits-Studien an Lösungen komplexer Problemstellungen, wie z.B. der Minimierung von Leitungsgeräuschen oder der Entwicklung von Spezialkabeln, gearbeitet.

Gruppenmitglieder:

Dipl.-Ing. Stefan Federlein * M. Sc. Tirinya Cheumchit * Dipl.-Ing. Christian Hille *
M. Sc. Rattanakorn Phadungthin * Dipl.-Ing. Michael Rösner (Areva Schorch GmbH) *
Dipl.-Ing. Uwe Zickler (FGH e.V.)

Studentische Hilfskräfte:

Michael Kippen * Klaus Düren

Lehrgebiet “Gasentladungstechnik”

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Pietsch

Kurzbeschreibung:

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen bewirken einen Temperatur- und Druckanstieg in Schaltanlagen und -gebäuden. Die Störlichtbogensicherheit kann im Prinzip auf zwei Wegen nachgewiesen werden, experimentell durch Störlichtbogenprüfungen und theoretisch über Druckberechnungen. Druckberechnungen haben den Vorteil, dass sie auch für solche

Anwendungen durchgeführt werden können, für die keine experimentelle Möglichkeiten vorliegen z.B. wenn bereits im Planungsstadium Auswirkungen auf Gebäude zu ermitteln sind. Die vorhandenen Berechnungsverfahren sollen u.a. im Hinblick auf SF₆-isolierte Anlage erweitert werden. Hierbei treten veränderliche SF₆-Luft-Gemische im Entlastungsraum auf. Durch Vergleich mit vorhandenen Messergebnissen kann das erweiterte Berechnungsverfahren evaluiert werden. Eine weitere Problematik betrifft den Ersatz von SF₆ durch Luft aus Gründen des Umweltschutzes bei der Prüfung von SF₆-isolierten Schaltanlagen. Hier soll herausgefunden werden, ob Bedingungen angebbbar sind, unter denen Prüfungen mit Luft solche mit SF₆ ersetzen können.

Gruppenmitglieder:

M. Sc. Kittipong Anantavanich * Dr.-Ing. Mikimasa Iwata (bis 09.11.)

Studentische Hilfskräfte:

Polson Keeratibumrungpong



Fields of Research

Research Group “Circuit Breakers”

Manager: Dipl.-Ing. Jan Christoph Kahlen

Short description of the research topics:

Circuit breakers serve as important switching and protection devices in electrical power systems. Experimental investigations and numeric simulations are performed to analyse their switching performance. Basic investigations of self-blast circuit breakers such as measurement of the pressure build up, determination of the thermal performance, optical investigations of the electric arc and the gas flow inside the pressure chamber are performed. Both SF₆ which is mostly used today and CO₂ which might be an alternative to SF₆ are investigated. A new field of research is the investigation of the dielectric properties of hot gases. In 2007 a new laboratory has been built for these investigations. The results taken from the experiments are used for the verification of the MHD-simulations. Both simulations of the high current phase (ablation controlled arcs) and the current zero and post arc current are performed. Due to the link between simulations and experiments, simulations can be verified but also experiments can be designed by using the simulations.

Members of the group:

Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker (since 01.11.2007) * Dipl.-Ing. Jan Christoph Kahlen * Dipl.-Ing. Andreas Kurz * M. Sc. Piotr Margiel * Dipl.-Ing. Michael Schwinne (until 30.06.2007) * Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

Student assistants:

Daniel Eichhoff * Arne Güttler * Andreas Mannebach * Gregor Nikolic * Stefan Post * Tilman Schmidt * Anja Strauchs * Til Vrana

Research Group “Insulation Systems and Diagnosis”

Manager: Dr.-Ing. Bernhard Heil

Short description of the research topics:

The research group covers a wide variety of technical challenges: ranging from the development of new insulating materials, condition assessment of insulating systems by means of different diagnostic methods up to nano-structured silane coatings of insulation surfaces. In the field of syntactic foam, as a new insulating material with low specific density, the modeling of the discharge behavior is in the main focus. In a project to investigate the applicability of nano-structured silane coatings for an enduring superhydrophobicity of insulation surfaces the accelerated aging behavior by using different conditions is investigated. In the field of diagnosis, the assessment of polymeric insulation systems by using ultra sound is in focus. Besides the detection of small impurities in different materials like elastomers (e.g. cable joints), boundary layers between two different materials and inhomogeneous cross-

linking are detectable. Software analysis tools are enhanced to improve the assessment of the devices under.

Members of the group:

Dr.-Ing. Bernhard Heil * Dipl.-Ing. Michael Keßler * M. Sc. Andrey Mashkin * Dipl.-Ing. Sascha Schulte (Daimler AG) * Dipl.-Ing. Alexander Tröger * Dipl.-Ing. Torsten Wirz * M. Sc. Junliang Wu

Student assistants:

Markus Ethen * Regina Göwe * Achim Mester * Thomas Nemeth * Sven Rüberg * Thorsten Weber * Sebastian Winter * David Vergossen * Alexis Kamewe * Daniel Winkel

Research Group “Sustainable Power Systems”

Manager: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Short description of the research topics:

The structure of future power grids will be modified by international power trading, by local and national wind energy supply as well as by integrating more decentralized, renewable power supply units. However, it is not yet fully understood in which areas and under which preconditions, such as power flow heat demand, these systems shall be installed and could be efficiently used with minimum impact on the environment.

Additionally, taking into account the planned offshore windparks, in the future bottle-necks will occur more often. Thus, approaches come up to increase the transmission line capacity. Environmental impacts of these approaches like transmission line monitoring or conductor replacement with high temperature conductors are assessed against the background of technical-economical feasibility.

With new assessment methods and system models for evaluating power grids (including Life Cycle Assessment according to ISO 14040/14044), future power grids and their components are analysed under technical-economical and ecological conditions with the aim to increase the eco-efficiency of these systems.

Members of the group:

Dipl.-Ing. Thomas Dederichs * Dipl.-Ing. Uwe Macharey * Dipl.-Ing. Thomas Smolka * Dipl.-Phys. Bernhard Schowe von der Brelie

Student assistants:

Stefan Krengel * Cora Sophie Petino * Martin Scheufen * Bartholomäus Wasowicz

Research Group “Systems Engineering and Asset Management”

Manager: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

Short description of the research topics:

Asset Management is one of the main topics in this research group. Its basic aim is the optimum utilisation of assets combined with a good compromise in terms of maintenance

strategies. For that kind of improvement in servicing electrical power systems, an evaluation of the system and the technical status of its equipments are required. By using new strategies for maintenance and replacement, we strive to achieve a minimum value of total costs. The prospective failure behaviour of equipment and the end of its lifetime could be determined by the development of ageing and status model with considering the influencing factors of specific equipment. Furthermore, the influences of different maintenance measures as well as a modified maintenance strategy on the equipment are investigated. In order to integrate the economic aspects of asset management, additional scenarios are considered under economic points of view. Additionally, in the scope of systems engineering, energy cables and overhead lines are currently emphasized. Together with various industrial partners, we strive for solutions of complex problems, e.g. the minimum of line noise or the development of special power cables.

Members of the group:

Dipl.-Ing. Stefan Federlein * M. Sc. Tirinya Cheumchit * Dipl.-Ing. Christian Hille *
M. Sc. Rattanakorn Phadungthin * Dipl.-Ing. Michael Rösner (Areva Schorch GmbH) *
Dipl.-Ing. Uwe Zickler (FGH e.V.)

Student assistants:

Michael Kippen * Klaus Düren

Field of Instruction and Research

“Gas Discharge Engineering”

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Pietsch

Short description of the research topics:

Fault arcs in electrical installations cause temperature and pressure rise in switchgears and switchgear buildings. In principle, fault arc safety can be proved experimentally by fault arc tests and theoretically by pressure rise calculations. The advantage of pressure rise calculation is that it can be performed with applications, for which no experimental possibilities are available, e.g. when the influence of pressure rise on buildings is investigated during the design of a substation. The existing pressure calculation methods will be extended particularly for SF₆-insulated installations. In this case, changing SF₆-air mixtures in the relief room have to be taken into account. The extended calculation method can be evaluated by comparing calculated with experimental results. A further problem is related to the replacement of SF₆ by air for tests of SF₆-insulated switchgear due to environmental concern. This task is to find out, whether there exist possibilities to replace tests with SF₆ by those with air.

Members of the group:

M. Sc. Kittipong Anantavanich * Dr.-Ing. Mikimasa Iwata (until 09.11.)

Student assistants:

Polson Keeratibumrunpong

Simulation des Kühlungsverhaltens von Schaltlichtbögen in SF₆ Selbstblas-Leistungsschaltern

Das Ausschaltverhalten von Selbstblas-Leistungsschaltern wird durch die physikalischen Vorgänge unmittelbar vor dem Stromnulldurchgang bestimmt. Während dieser Zeit ist der Druck in der Heizkammer höher als der Druck in der Lichtbogenzone. Dies führt zu einer Rückströmung vom Löschgas in die Lichtbogenzone und folglich zur Kühlung des Schaltlichtbogens. Nur wenn die Kühlleistung höher ist als die durch den Lichtbogen eingespeiste Leistung, kann eine Unterbrechung des Stromes erfolgen. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der Kühlmechanismen unmittelbar vor dem Stromnulldurchgang besonders wichtig um Leistungsschalter zu optimieren. Mit Hilfe eines Simulationsmodells werden diese Kühlmechanismen analysiert und anhand einer Variation der Düsengeometrie diskutiert.

Einleitung

Um Schäden in elektrischen Netzen zu vermeiden, müssen Kurzschlussströme durch Leistungsschalter zuverlässig abgeschaltet werden. Während des Abschaltvorgangs in einem Selbstblas-Leistungsschalter wird von den Düsen PTFE abgebrannt. Es tritt eine Gasströmung aus der Lichtbogenzone in die Heizkammer auf, in der ein hoher Druck aufgebaut wird. Wenn der sinusförmige Strom zum Nulldurchgang hin abnimmt, wird dem Lichtbogen weniger Energie zugeführt und der Druck in der Lichtbogenzone fällt unter den Druck in der Heizkammer. Eine Rückströmung setzt ein, durch die der Schaltlichtbogen gekühlt wird. Um die physikalischen Vorgänge in Leistungsschaltern zu simulieren, können Computational Fluid Dynamics (CFD) Tools eingesetzt werden [1]. Zur Analyse des Kühlungsverhaltens werden Stromnull-Simulationsmodelle verwendet.

Simulationsmodell

Das numerische Modell des Lichtbogens basiert auf den Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik, den Maxwell-Gleichungen und der Strahlungstransport-Gleichung. Turbulenz-Effekte werden

durch das Kato-Launder $k-\epsilon$ Turbulenzmodell nachgebildet. Der Energietransport durch Strahlung wird entsprechend dem Modell der Netto-Emissionskoeffizienten implementiert [2]. Aufgrund der geringen eingebrachten Leistung kann der Düsenabbrand hier vernachlässigt werden.

Die Stromnullsimulation beginnt $100\ \mu\text{s}$ vor dem Nulldurchgang. Zu Beginn wird eine stationäre Berechnung des Zustand durchgeführt. Im Anschluss wird der Strom mit einer Steigung von $di/dt = 14.6\ \text{A}/\mu\text{s}$ linear bis zum Nulldurchgang verringert. Die simulierte Geometrie ist in Abb. 1 dargestellt.

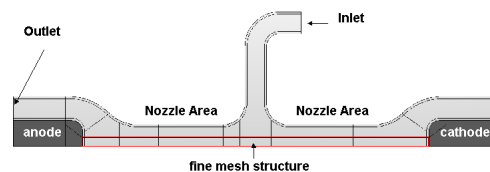


Abb. 1: Darstellung der simulierten Geometrie

Sie besteht aus Anode (links), Kathode (rechts) und dem Düsenbereich, der in der Lichtbogenzone besonders fein vernetzt ist. An den Auslässen wird eine Temperatur von $300\ \text{K}$ und ein Fülldruck von $5\ \text{bar}$ SF₆ angenommen. Zur Vereinfachung wird das Heizvolumen durch einen Einlass nachgebildet. Die Randbedingungen des Inlets

werden durch eine Simulation der Hochstromphase ermittelt.

Theorie des Energietransfers

Es können drei Mechanismen zur Kühlung des Lichtbogens unterschieden werden: Konvektion, Strahlung und Turbulenzen [3]. Konvektiver Energietransport wird entweder durch eine laminare Strömung oder durch Strömung aufgrund eines Temperaturgradienten verursacht. Turbulente Strömungen entstehen an den Grenzflächen von zwei Gasschichten mit stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten (z.B. zwischen dem heißen Gas im Lichtbogenbereich und dem kalten Beblasungsgas). Dieser Effekt führt zu einer starken Durchmischung der Energie und der Temperatur an der Grenzschicht. Strahlungskühlung durch elektromagnetische Wellen oder Photonen tritt oberhalb einer Gastemperatur von 1500 K ein.

Beschreibung des Kühlungsprozesses

Der eingeprägte Strom verursacht einen Widerstandsverlauf, der in Abb. 2 dargestellt ist. Der Zeitpunkt $100\text{ }\mu\text{s}$ stellt den Stromnulldurchgang dar. Während der Lichtbogenwiderstand von 0 bis $90\text{ }\mu\text{s}$ sehr gering ist, steigt er während der letzten $10\text{ }\mu\text{s}$ stark an. Insbesondere während der letzten μs ist ein besonders starker Widerstandsanstieg erkennbar.

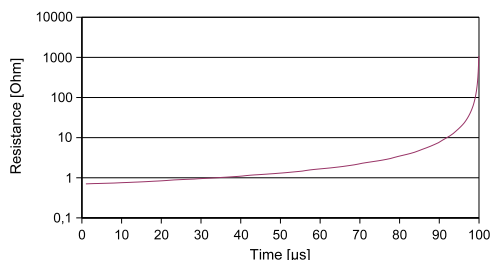


Abb. 2: Simulierter Widerstand von 0 bis $100\text{ }\mu\text{s}$ (logarithmisch aufgetragen)

Die Bedeutung der Vorgänge kurz vor dem Stromnulldurchgang wird ebenfalls in [4]

hervorgehoben. Der Lichtbogenwiderstand R_{200} 200 ns vor Stromnull hängt linear vom Widerstand im Nulldurchgang ab, kann aber besser bestimmt und ausgewertet werden. Daher beziehen sich alle weiteren Ergebnisse auf die Zeit 200 ns vor dem Stromnulldurchgang. Je höher der Lichtbogenwiderstand R_{200} ist, desto besser sind Kühlung und Ausschaltverhalten eines Leistungsschalters. Um detailliertere Informationen zu erhalten, wird der simulierte Widerstandsbelag (Widerstand pro Längeneinheit) analysiert (Abb. 3). Der höchste Widerstand tritt im Düsenbereich auf.

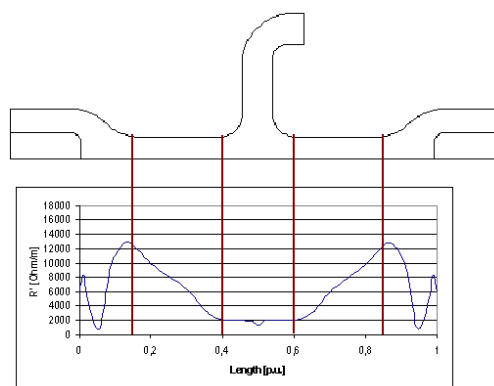


Abb. 3: Auf Länge bezogener Widerstand (unten) der simulierten Geometrie (oben) 200 ns vor Stromnull

Um die Verteilung des Widerstandsbelags R' zu erklären müssen die Kühlmechanismen evaluiert werden (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Negative Werte entsprechen einem Energieverlust (dementsprechend Kühlung) des Lichtbogens. Es muss besonders darauf hingewiesen werden, dass die Strahlungskühlung und die konvektive Kühlung im Lichtbogenzentrum dargestellt sind, während die turbulente Kühlleistung am Bogenrand ausgewertet wird. Der Radius des Lichtbogens beträgt etwa $250\text{ }\mu\text{m}$. Daher ist die Kühlung durch Turbulenzen der dominierende Vorgang der Energieabfuhr wegen dem größeren Wirkungsbereich, obwohl die abgeführte Leistung pro Volumeneinheit geringer ist. Die turbulente Kühlung erreicht ihr Maximum in den Dü-

sen und führt dort zu einem hohen Widerstand. Strahlungskühlung tritt hauptsächlich in der Mitte zwischen den Elektroden auf, wo die Lichtbogentemperatur am höchsten ist. Konvektion leistet keinen nennenswerten Beitrag zur Kühlung.

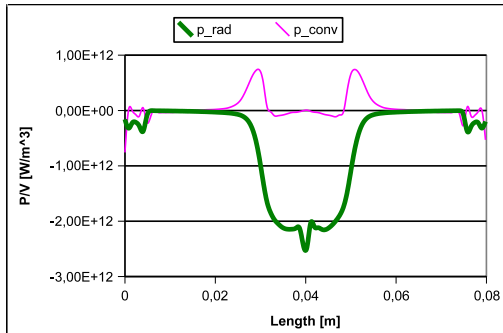


Abb. 4: Kühlleistung pro Volumeneinheit durch konvektive Kühlung (dünne Linie) und Strahlungskühlung (dicke Linie) in der Mitte des Lichtbogens; 200 ns vor Stromnull

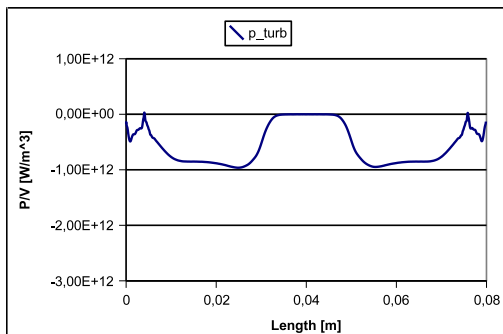


Abb. 5: Kühlleistung pro Volumeneinheit durch turbulente Kühlung am Lichtbogenrand; 200 ns vor Stromnull

Analyse des Kühlungsverhaltens bei Variation der Geometrie

Die Kenntnis der Kühlmechanismen ermöglicht es, die Auswirkungen von Geometrieänderungen an Leistungsschaltern zu bewerten. Wie in [4] beschrieben, führen höhere R_{200} Werte zu einem verbesserten Ausschaltvermögen. Hier wird eine unsymmetrische Aufweitung der Düsen zur Mitte hin betrachtet (Abb. 6). Durch die

se Veränderung wird die zylindrische Form der Düsen aufgegeben. Eine Parameterstudie zeigt, dass die Vergrößerung des Düsendurchmessers am Heizkanal von einem Faktor 1,0 (zylindrisch) bis zu einem Faktor von 1,8 keinen signifikanten Einfluss auf den normierten Wert von R_{200} aufweist (siehe Abb. 7). Daher kann nicht auf eine Änderung des Ausschaltvermögens aufgrund dieser Geometrieänderung geschlossen werden. Es ist jedoch zu betonen, dass sich die Strömungsverhältnisse ändern.

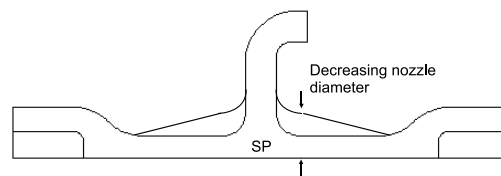


Abb. 6: Unsymmetrische Vergrößerung des Düsendurchmessers am Heizkanal

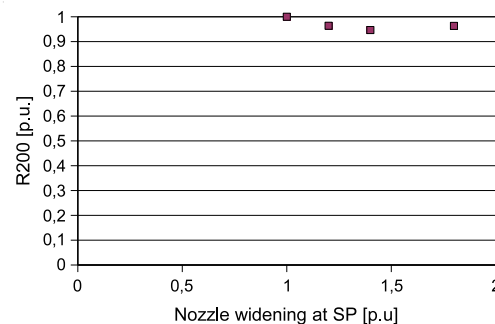


Abb. 7: Widerstand 200 ns vor Stromnull bei Vergrößerung des Düsenradius um Faktoren zwischen 1,0 und 1,8

In Abb. 8 sind die Widerstandsverteilungen pro Längeneinheit dargestellt. Es gibt einen deutlichen Unterschied zwischen der ursprünglichen Geometrie und der Geometrie mit einem erhöhten Düsendurchmesser am Heizkanal um den Faktor 1,8. Dieser Unterschied ist auf die veränderte turbulente Kühlung zurück zu führen. In der modifizierten Geometrie findet eine verringerte Kühlwirkung statt, die jedoch durch die höheren Turbulenzen am Ende der Düsen (in der Nähe der Elektroden) kompensiert wer-

den. Der Gesamtwiderstand bleibt nahezu konstant.

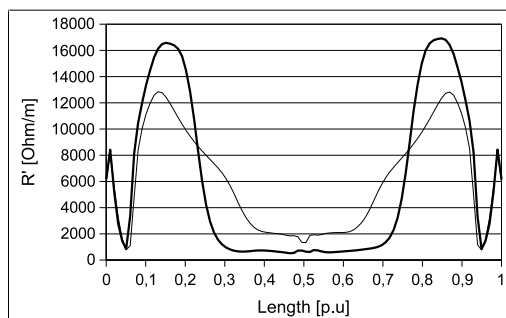


Abb. 8: Verteilung des längenbezogenen Widerstandes, dünne Linie: unveränderte Geometrie, dicke Linie: um Faktor 1,8 vergrößerter max. Düsenradius

Zusammenfassung

Die Simulation der Kühlmechanismen ermöglicht ein besseres Verständnis des Abschaltvorgangs in Selbstblas-Leistungsschaltern. Innerhalb der Düsen wird die Kühlung des Lichtbogens im Wesentlichen durch Turbulenzen bestimmt. Die hier vorgestellten Simulationsmethoden stellen also ein Mittel dar, mit dessen Hilfe gezielte Optimierungen an der Geometrie durchgeführt werden können, um das Ausschaltvermögen von Selbstblas-Leistungsschaltern zu verbessern.

Danksagung

Wir danken der ABB Schweiz AG Corporate Research für die finanzielle Unterstützung und die fachlichen Diskussionen.

Literatur

- [1] C. M. Franck, M. Seeger: *Application of High Current and Current Zero Simulations of High-Voltage Circuit Breakers*. Contrib. Plasma Phys. 46, No. 10, 2006.
- [2] V. Aubrecht, B. Gross: *Net Emission Coefficient of Radiation in SF₆ arc plasmas*. J. Phys. D: Appl. Phys. 27, 1994.
- [3] H. K. Versteeg, W. Malalasekera: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd Edition, Pearson Education Limited, 2007.
- [4] H. Knobloch, U. Habedank: *Behaviour of SF₆ High-Voltage Circuit Breakers with Different Arc-Extinguishing Systems at Short-Line Fault Switching*. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. Vol. 148 No. 6, 2001.

Kontakt

Dipl.-Ing. Jan-Christoph Kahlen
kahlen@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94912

Dipl.-Ing. Andreas Kurz
kurz@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-90270

Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang
tang@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94914

Simulation of the Cooling Behaviour of Switching Arcs in SF₆ Self-Blast Circuit Breakers

During the switching operation of a self-blast circuit breaker the effects close to current zero crossing determine the interruption behaviour. At that time the pressure inside the heating volume is higher than the pressure inside the arcing area leading to a backflow and therefore a cooling of the switching arc. If this cooling power exceeds the input power by the electric arc a successful interruption can be achieved, otherwise a failure will occur. Due to this reason the cooling mechanisms shortly before current zero crossing are of great importance. Using a simulation model the cooling effects are analysed and influences on a variation of the nozzle geometry are discussed.

Introduction

To avoid damages to the components of electric power systems short circuit currents have to be switched off absolutely reliably. During a switching operation of a self-blast circuit breaker the energy of the arc leads to ablation of the PTFE nozzles. Due to the ablated material the gas is guided into the heating volume generating a pressure build-up. While the energy input of the arc decreases towards current zero crossing the pressure in the arcing area falls below the pressure in the heating volume. A backflow process occurs leading to a gas flow from the heating volume to the arcing area and cooling the electric arc. To simulate the processes inside a self-blast circuit breaker breaker computational fluid dynamics (CFD) simulation tools can be used [1]. Especially, current zero simulation models are used to analyse the cooling behaviour of the gas flow on the switching arc.

Simulation Model

The numerical model for the electric arc and the gas flow consists of conservation equations of fluid dynamics coupled with Maxwell's equations and the radiative transport equation (RTE). To consider turbulent effects the Kato-Launder $k-\epsilon$ turbu-

lence model is used here. Radiative energy transfer is implemented using the net emission coefficient (NEC) radiation model [2]. The ablation of the nozzle material will be neglected due to the small input power of the arc.

The simulation of the current zero phase starts $100\text{ }\mu\text{s}$ before current zero crossing. An initial state is calculated for the current flowing $100\text{ }\mu\text{s}$ before current zero (CZ). Afterwards, the current will be decreased with a steepness of $di/dt = 14.6\text{ A}/\mu\text{s}$ until the current reaches the current zero crossing. The simulation geometry is illustrated in Fig. 1.

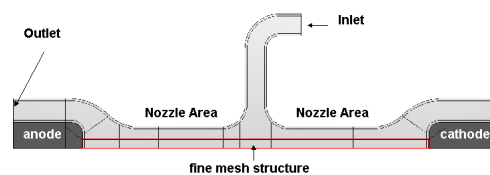


Fig. 1: Illustration of the simulation geometry

It consists of an anode (on the left hand side) and a cathode (on the right hand side) and in between the electrodes there is the nozzle area which includes a finely meshed arcing area. The outlet area assumes ambient conditions with a temperature of 300 K and the filling pressure of 5 bar SF₆. The heating volume is reduced to an inlet for simplification. To get realistic values for the

boundary conditions of the inlet the parameters of temperature and pressure are taken from simulations of the high current phase.

Theory of energy transfer

The cooling mechanisms of switching arcs can be classified into three effects: cooling by convection, cooling by radiation and cooling by turbulence [3]. Convective energy transfer is caused either by a laminar flow or a temperature gradient which leads to a flow inside gaseous media. If the velocities of two layers are very different (i.e. on the one hand the hot gas of the arc and on the other hand the cold cooling gas) the gas flow at the boundary becomes turbulent. This second effect results in a high rate of energy and temperature mixing in between the layers. The third energy transfer mechanism is radiation. Radiation of electromagnetic waves and streams of photons takes place if the gaseous temperatures exceed 1500 K .

Description of the cooling process

The input current has a constant current steepness and reaches the value of zero at the time $100\text{ }\mu\text{s}$. The simulated resistance is shown in Fig. 2. While the arc resistance is very low from 0 to $90\text{ }\mu\text{s}$, it starts to increase during the last $10\text{ }\mu\text{s}$. Nevertheless, the highest increase occur at the last μs .

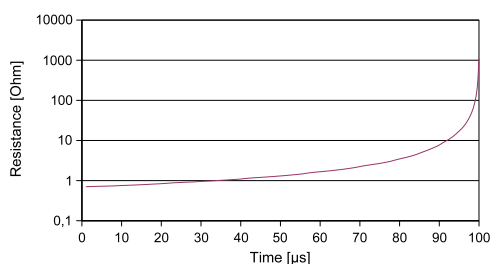


Fig. 2: Simulated resistances from 0 to $100\text{ }\mu\text{s}$ (logarithmic scale)

The importance of the effects shortly before current zero is also emphasised by [4]. The arc resistance 200 ns before current zero

R_{200} is linearly dependent on the resistance at CZ and easier to evaluate. Hence, further results will be presented for the time 200 ns before current zero. The higher the arc resistance the better is the cooling and the better is the switching performance. To get more detailed information the simulated resistance per length is analysed and shown in Fig. 3. The highest resistances can be achieved inside the nozzle area.

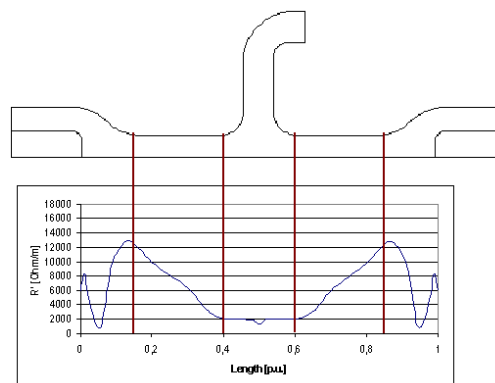


Fig. 3: Distribution of the resistance per length (on the bottom) of the simulated geometry (on the top); 200 ns before current zero

To understand the distribution of R' the cooling mechanisms are illustrated in Fig. 4 and Fig. 5. Negative values represent energy loss and correspondingly cooling. It is important to consider that the radiative cooling and the convective cooling is plotted at the arc center and the turbulent cooling power is evaluated at the arc edge. The arc edge has round about a radius of $250\text{ }\mu\text{m}$ and therefore the volume of the turbulent cooling is much higher. Although the absolute value of the cooling power per volume is lower, the predominant cooling mechanism is cooling by turbulence. The turbulent cooling power reaches the highest value in the nozzle area leading to higher values of the resistance. Radiative cooling mainly takes place at the middle area where the arc has its highest temperatures and the convective cooling does have an negligible effect.

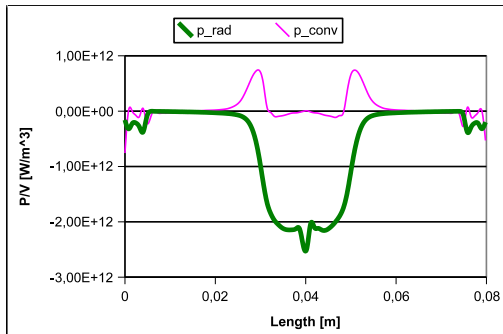


Fig. 4: Cooling power per volume for convective cooling (fine line) and radiative cooling (thick line) at the arc centre; 200 ns before current zero

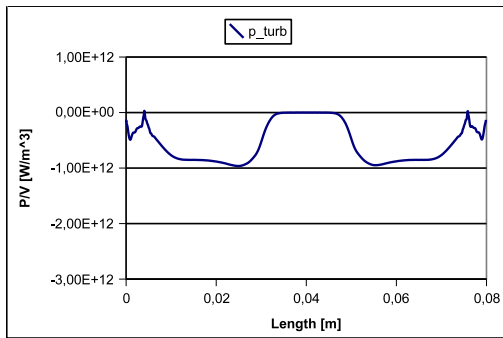


Fig. 5: Cooling power per volume for turbulent cooling at the arc edge $T = 5000\text{ K}$; 200 ns before current zero

Analysing the cooling behaviour of geometry changes

With the knowledge of the main cooling mechanism in self-blast circuit breakers geometry changes can be evaluated. As proposed in [4] higher R_{200} values result in better interruption performance. In this case the widening of the nozzle on one side will be discussed (illustrated in Fig. 6). These changes lead to non-cylindrically shaped nozzles. A parameter study shows that an increase of the maximum nozzle diameter at the stagnation point (SP) by a factor in the range between 1.0 and 1.8 has no significant influence on the normalized value of R_{200} (see Fig. 7). Therefore, an influence on the interruption performance can not be

concluded. Nevertheless, the flow conditions due to the non-cylindrical nozzle do change.

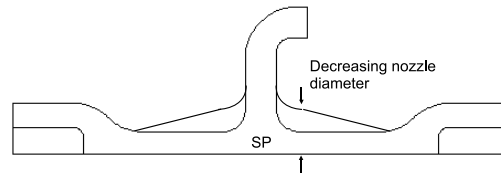


Fig. 6: Illustration of a linearly decreasing nozzle diameter

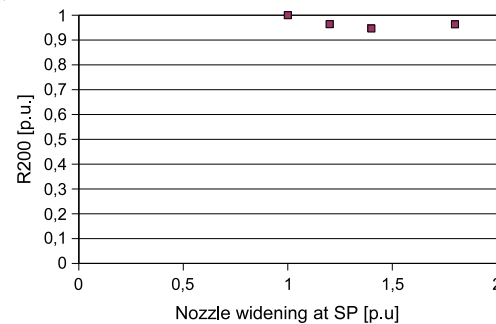


Fig. 7: Resistances 200 ns before current zero by varying nozzle widening factors

In Fig. 8 the distributions of the resistances are presented. There is a clear difference between the original geometry and the geometry with a maximum nozzle radius increased by a factor of 1.8. This difference can be explained due to different turbulent cooling behaviour. In the varied geometries the turbulent cooling powers are concentrated towards the smallest flow area leading to higher cooling (and therefore higher resistances) in the nozzle regions close to the electrodes. But the turbulent cooling power is decreased in the nozzles close to the stagnation point. All in all the absolute resistance remains nearly constant.

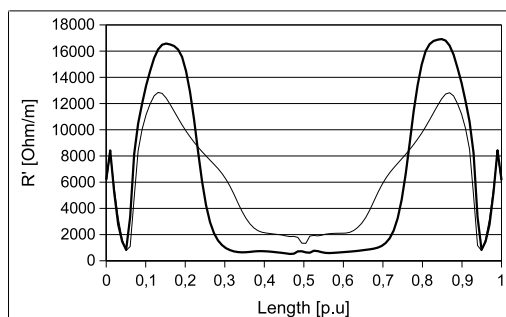


Fig. 8: Distribution of the resistance per length for the changed geometry. Thin line: original geometry, thick line: widening of the nozzle with the factor 1.8.

Conclusion

The simulation of the cooling mechanisms of the electric arc in self-blast circuit breakers are highly relevant to better understand the switching process. The three main energy transfer mechanisms are cooling by convection, cooling by radiation and cooling by turbulence. The third item is mainly responsible for the cooling of the switching arc inside the nozzle area and therefore an increasing resistance can be achieved. As a consequence optimisation of self-blast circuit breakers means improving the turbulent cooling to achieve higher interruption performances.

Acknowledgement

We are grateful to the ABB Switzerland Ltd. Corporate Research for the financial and advisory support.

References

- [1] C. M. Franck, M. Seeger: *Application of High Current and Current Zero Simulations of High-Voltage Circuit Breakers*. Contrib. Plasma Phys. 46, No. 10, 2006.
- [2] V. Aubrecht, B. Gross: *Net Emission Coefficient of Radiation in SF₆ arc plasmas*. J. Phys. D: Appl. Phys. 27, 1994.
- [3] H. K. Versteeg, W. Malalasekera: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd Edition, Pearson Education Limited, 2007.
- [4] H. Knobloch, U. Habedank: *Behaviour of SF₆ High-Voltage Circuit Breakers with Different Arc-Extinguishing Systems at Short-Line Fault Switching*. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. Vol. 148 No. 6, 2001.

Contact

Dipl.-Ing. Jan-Christoph Kahlen
kahlen@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94912

Dipl.-Ing. Andreas Kurz
kurz@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-90270

Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang
tang@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94914

Ermittlung des thermischen Ausschaltvermögens von Gasen für Selbstblasleistungsschalter

In Selbstblasleistungsschaltern wird üblicherweise SF₆ als Lichtbogenlöschgas eingesetzt. Trotz der guten Eigenschaften von SF₆ ist die Forschung an alternativen Gasen notwendig. Diese wird aufgrund des hohen Treibhauspotentials von SF₆ vorangetrieben. Um das Ausschaltvermögen von verschiedenen Gasen vergleichen zu können, wird ein geeignetes Leistungsschaltermodell entwickelt. Weiterhin wird eine Methode zur Auswertung der experimentellen Ergebnisse angewendet. Der Schwerpunkt dieses Berichtes ist die Beschreibung dieser Auswertungsmethode und ihrer physikalischen Grundlagen.

Einleitung

Zur Verifikation von Simulationen, die auch genutzt werden, um das Leistungsschaltermodell zu optimieren, wird dessen Schaltvorgang auch experimentell untersucht. Dies erfolgt mittels eines synthetischen Weil-Dobke Prüfkreises und liefert Informationen über das thermische Ausschaltvermögen. Dieses wird durch den maximalen Strom, den der Schalter bei einer vorgegebenen Steilheit der wiederkehrenden Spannung abschalten kann, beschrieben. In den Untersuchungen am IFHT wird die Spannungssteilheit konstant gehalten. Dies ermöglicht die Verwendung der Stromsteilheit als ein Kriterium für das Ausschaltvermögen und erlaubt den Vergleich verschiedener Gase. Die Anwendung dieses Kriteriums und die zugrunde liegenden physikalischen Grundlagen werden in diesem Bericht dargestellt. Die verwendeten Beispiele stammen von Untersuchungen mit SF₆ als Füllgas.

Bewertung der Stromnull-Messungen

Der Zusammenhang zwischen Spannungs- und Stromsteilheit ist gegeben durch [1]:

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{limit}} \propto \left(\frac{di}{dt}\right)^{-n}$$

Deswegen existiert für einen Leistungsschalter bei gegebener Spannungssteilheit ein maximales $\frac{di}{dt}$. Diese Grenze ist vom Druck p und der Netzwerkimpedanz Z abhängig [2]:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{limit}} \propto p^\alpha Z^\beta$$

Alle Messungen werden mit einer identischen Netzwerkimpedanz durchgeführt. Der Koeffizient α ist abhängig vom verwendeten Gas und wurde anhand von experimentellen Parameterstudien am IFHT für SF₆ und CO₂ bestimmt. Mit der Kenntnis dieses Druck-Skalierungs-Gesetzes des thermischen Ausschaltvermögens ist es möglich, die gemessenen Werte der Stromsteilheit $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{mess},i}$ auf einen Druck p_0 zu beziehen. Der Index i steht dabei für die Nummer des Stromnulldurchgangs. Dies wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_i = \left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{mess},i} * \left(\frac{p_0}{p_{\text{mess},i}}\right)^\alpha$$

Bei der Durchführung der Experimente treten in den meisten Fällen zwei oder mehr Versager vor einer erfolgreichen Unterbrechung auf. Um die Informationen zum Ausschaltvermögen nicht nur aus einem Halter

und dem Versager, der diesem Halter direkt vorausgeht, zu gewinnen, ist es notwendig den kritischen Lichtbogenwiderstand zu bestimmen. Dieser stellt einen Schwellwert zwischen Versagern und Haltern dar. Abb. 1 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Lichtbogenwiderstand R_0 und dem Widerstand R_{200} 200 ns vor dem Stromnulldurchgang (SN). Da der Widerstand 200 ns vor SN verlässlicher gemessen werden kann, wird dieser Wert für die weiteren Untersuchungen verwendet [3].

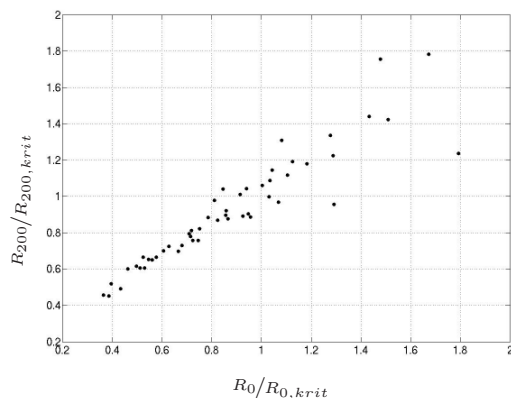


Abb. 1: R_{200} in Abhängigkeit von R_0

Der Zusammenhang zwischen dem Lichtbogenwiderstand R_{200} und der Stromsteilheit im SN ist gegeben durch [4]:

$$R_{200} \propto \left(\frac{di}{dt} \right)^{-m}$$

Der Exponent m kann aus den Experimenten bestimmt werden.

In Abb. 2 ist die Abhängigkeit des Lichtbogenwiderstands R_{200} von der Stromsteilheit dargestellt. Beide Werte sind jeweils auf den kritischen Widerstand bzw. auf das Ausschaltvermögen bezogen. Halter werden durch einen Punkt und Versager durch ein Kreuz repräsentiert. Die gestrichelte Linie parallel zur x-Achse ist der kritische Widerstand. Durchgezogen ist die an den Exponent m angepasste, oben angegebene Funktion dargestellt. Diese Anpassung wird nach der Methode des kleinsten Fehlerquadrates vorgenommen.

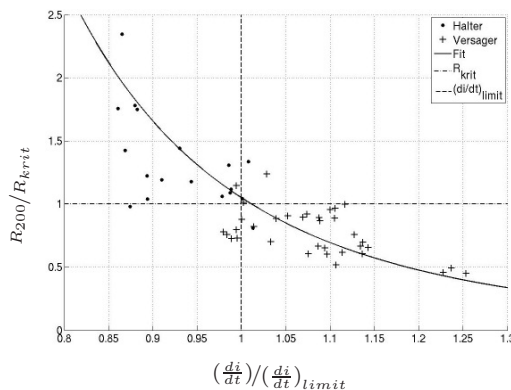


Abb. 2: Bestimmung des Ausschaltvermögens

Offensichtlich gibt der Wert des Lichtbogenwiderstands einen Hinweis auf die Nähe zur Ausschaltgrenze des Leistungsschalters. Um auch die SN mit zu bewerten, deren Widerstand deutlich vom kritischen Lichtbogenwiderstand abweicht, wird eine Normierung anhand der folgenden Gleichung vorgenommen [5]:

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{limit,i} = \left(\frac{di}{dt} \right)_i * \left(\frac{R_{200}}{R_{krit}} \right)^{1/m}$$

Abb. 3 zeigt, dass die korrigierten Werte der Stromsteilheit maximal noch etwa 10 % von ihrem Mittelwert abweichen.

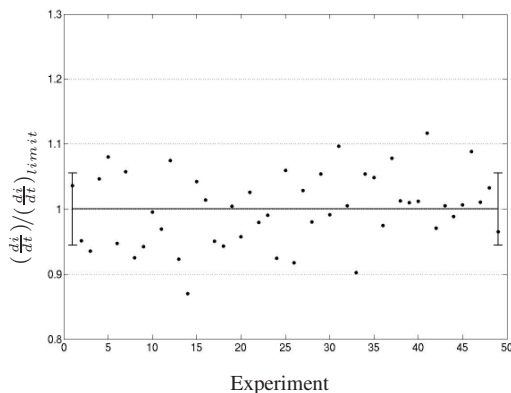


Abb. 3: Normalisierte $\frac{di}{dt}$ -Messpunkte, deren Mittelwert und Standardabweichung

Der Mittelwert wird aus allen Stromnulldurchmessungen gemäß

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{limit} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \left(\frac{di}{dt} \right)_{limit,i}$$

berechnet, und als das thermische Ausschaltvermögen $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{limit}}$ angesehen, welches durch die senkrechte, gestrichelte Linie in Abb. 2 dargestellt wird.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht wird eine Methode zur Untersuchung des thermischen Ausschaltvermögens von Selbstblasleistungsschaltern vorgestellt und an Stromnullmessungen mit SF₆ als Füllgas angewendet.

Die maximale Stromsteilheit, die vom Schalter unterbrochen werden kann, wird als Kriterium gewählt, um das Ausschaltvermögen zu charakterisieren. Die Messergebnisse werden auf den Druck des Löschgases und den kritischen Widerstand normiert. Aus diesem Grund kann die Anzahl der Stromnulldurchgänge, die zur Berechnung beitragen, vergrößert werden. Dadurch verbessert sich auch die Datenbasis. Der Schwerpunkt zukünftiger Forschungen wird bei alternativen Isolations- und Löschgasen wie z.B. CO₂ liegen.

Anhand der oben dargestellten Untersuchungsmethode ist es möglich, verlässliche Bewertungen verschiedener Gase vorzunehmen.

Danksagung

Wir danken der ABB Schweiz AG Corporate Research für die finanzielle Unterstützung und fachliche Diskussion.

Quellen

- [1] G. Frind: *Experimental Investigation of Limiting Curves for Current Interruption of Gas Blast Breakers*, In: Proceedings of the Brown Boveri Symposium on Current Interruption in High-Voltage Networks; Baden: 1978

- [2] R. Dommerque: *Einfluss des Elektrodenabbrandes auf das Schaltverhalten eines SF₆-Selbstblasse Schalters*, Dissertation, RWTH-Aachen; Aachen: 2006

- [3] C. Kahlen, R. Dommerque, M. Schwinne, M.-C. Tang, A. Schnettler: *Application of a New Measuring System for Investigations of the Interruption Behaviour of a SF₆-Selfblast Circuit Breaker Model*, In: XVIth Symposium on Physics of Switching Arc; Brno: 2005

- [4] H. Knobloch, U. Habedank: *Arc Resistance at Current Zero: A Tool to Describe the Breaking Capacity of SF₆ Circuit Breakers at Short-Line Faults*, In: XI International Symposium on High Voltage Engineering; London: 1999

- [5] A. Steffens, C.M. Franck, M. Seeger, T. Votteler: *Judging the Interruption Performance of Circuit Breakers from Arc Resistance Measurements*, In: XVI Symposium on Physics of Switching arc; Brno: 2005

Kontakt

Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker
hoffacker@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94944

Dipl.-Ing. Christoph Kahlen
kahlen@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94912

Dipl.-Ing. Piotr Margiel
margiel@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94916

Determination of the thermal interruption capability of different gases for self-blast circuit breakers

Today SF₆ still is the most common arc quenching gas used in self-blast circuit breakers. Despite its good arc quenching and dielectric properties research on alternative gases is indispensable. This research is motivated by the high Global-Warming-Potential of SF₆. In order to make a comparison between different gases with regard to the thermal interruption capability a suitable circuit breaker model is developed. Furthermore a general method for the evaluation of experimental results is applied. The focus of this report is the description of the evaluation method and its basic physical principles.

Introduction

In addition to simulations, which are also used to optimise the circuit breaker model, the switching process is investigated with experimental test series. The experimental investigations are performed with a synthetic test circuit by Weil-Dobke and provide information about the thermal interruption limit. This limit is described by the maximum current which can be interrupted by the breaker model at a certain steepness of the recovery voltage. In the experiments carried out at the IFHT the voltage steepness is set to a constant value. This allows the use of the current steepness as a criterion to evaluate the interruption limit and to compare different gases. The application of this criterion and its underlying physical principles are presented in this report. The given measurement examples and diagrams relate to measurements with a SF₆ self-blast circuit breaker model.

Evaluation of current zero measurements

The relation between voltage steepness and current steepness is given by [1]:

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{limit} \propto \left(\frac{di}{dt}\right)^{-n}$$

Consequently, for a given value of the voltage steepness there is a limit of $\frac{di}{dt}$ that can be mastered by the circuit breaker. This limit depends both on the blow gas pressure p and the network impedance Z as described in the following equation [2].

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{limit} \propto p^\alpha Z^\beta$$

All measurements are carried out under identical conditions with regard to the network impedance. The coefficient α depends on the gas and has been determined by means of experimental parameter studies with SF₆ and CO₂. With the knowledge of these pressure scaling laws of the thermal interruption limit it is possible to normalise the measured values of current steepness $\left(\frac{di}{dt}\right)_{meas,i}$ and the corresponding pressure $p_{meas,i}$ of each current zero crossing to the pressure p_0 . The index i stands for the number of the current zero crossing. The equation describing this normalisation is given below:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_i = \left(\frac{di}{dt}\right)_{meas,i} * \left(\frac{p_0}{p_{meas,i}}\right)^\alpha$$

When performing experiments with a synthetic test circuit in most cases two or even more failures occur before the successful interruption. In order to obtain information not only from the successful interrup-

tion and one immediately preceding failure it is essential to consider the critical arc resistance. It defines a threshold between failures and successful interruptions. Fig. 1 shows that there is a linear relation between the arc resistance R_0 at current zero and the resistance R_{200} 200 ns before current zero (cz). As the resistance 200 ns before cz can be measured more reliably this value is used for further evaluations [3].

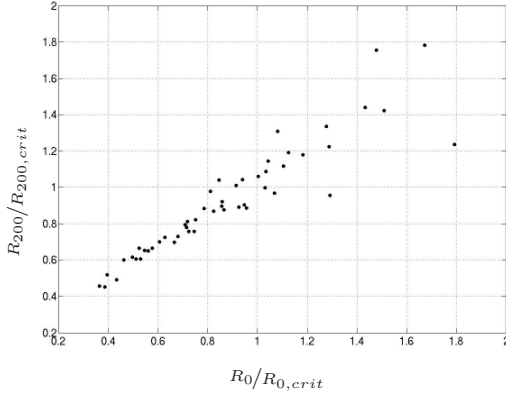


Fig. 1: R_{200} over R_0

The relation between the arc resistance R_{200} and the current steepness at cz can be described by a power law and is given in the following equation [4]:

$$R_{200} \propto \left(\frac{di}{dt} \right)^{-m}$$

The exponent m can be evaluated from the measurements.

In Fig. 2 the dependency of the arc resistance on the current steepness is shown. Both values are normalised to the critical value or the limit value, respectively.

In this figure successful interruptions are shown as dots while crosses represent failures. The critical arc resistance corresponds to the dashed line in parallel to the x-axis. The solid line visualises the fit curve for the determination of the above mentioned power law and the exponent m . The fit is made according to the method of least square error.

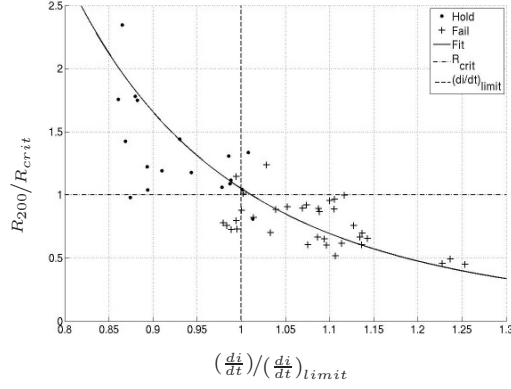


Fig. 2: Calculation of interruption capability

Obviously, the value of the arc resistance gives a hint about how close to its interruption limit the circuit breaker is at the moment of cz. In order to evaluate also those current zero crossings with arc resistances deviating from the critical value a normalisation according to the following equation is done [5]:

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{limit,i} = \left(\frac{di}{dt} \right)_i * \left(\frac{R_{200}}{R_{crit}} \right)^{1/m}$$

Fig. 3 shows that the corrected values of current steepness deviate only approximately 10 % from their average value.

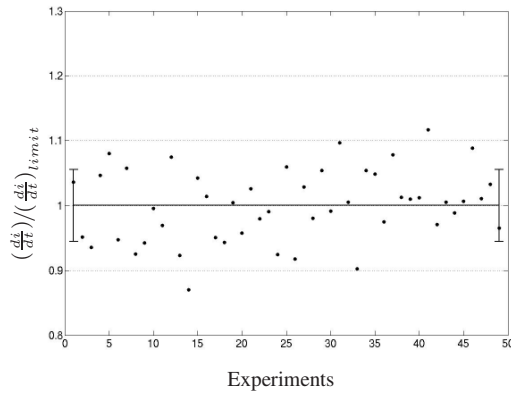


Fig. 3: Normalised $\frac{di}{dt}$ -values, their average and standard deviation

The average value is calculated from all current zero measurements according to

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{limit} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \left(\frac{di}{dt} \right)_{limit,i}$$

and considered as the thermal interruption limit $\left(\frac{di}{dt}\right)_{limit}$ which is visualised by the vertical dashed line in Fig. 2.

Conclusion and outlook

In this report a method to investigate the thermal interruption capability of self-blast circuit breakers is presented and applied to current zero measurements with SF₆.

The maximum current steepness that can be interrupted by the breaker is chosen as criterion to evaluate the interruption capability. The measurement results are normalised with regard to blow gas pressure and critical arc resistance. Due to this the number of current zero crossings that can be analysed is increased and the database is improved.

The focus of future research will be on the investigation of alternative insulating and quenching gases like e.g. CO₂.

By means of the above mentioned evaluation method it is possible to make a reliable assessment of the different gases.

Acknowledgement

We are grateful to the ABB Switzerland Ltd. Corporate Research for the financial and advisory support of our research work.

References

- [1] G. Frind: *Experimental Investigation of Limiting Curves for Current Interruption of Gas Blast Breakers*, In: Proceedings of the Brown Boveri Symposium on Current Interruption in High-Voltage Networks; Baden: 1978

- [2] R. Dommerque: *Einfluss des Elektrodenabbrandes auf das Schaltverhalten eines SF₆-Selbstblassschalters*, Dissertation, RWTH-Aachen; Aachen: 2006

- [3] C. Kahlen, R. Dommerque, M. Schwinne, M.-C. Tang, A. Schnetler: *Application of a New Measuring System for Investigations of the Interruption Behaviour of a SF₆-Selfblast Circuit Breaker Model*, In: XVIth Symposium on Physics of Switching Arc; Brno: 2005

- [4] H. Knobloch, U. Habedank: *Arc Resistance at Current Zero: A Tool to Describe the Breaking Capacity of SF₆ Circuit Breakers at Short-Line Faults*, In: XI International Symposium on High Voltage Engineering; London: 1999

- [5] A. Steffens, C.M. Franck, M. Seeger, T. Votteler: *Judging the Interruption Performance of Circuit Breakers from Arc Resistance Measurements*, In: XVI Symposium on Physics of Switching arc; Brno: 2005

Contact

Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker
hoffacker@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94944

Dipl.-Ing. Christoph Kahlen
kahlen@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94912

Dipl.-Ing. Piotr Margiel
margiel@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94916

Untersuchung des thermischen Einflusses auf die Zustandsbewertung von Hochspannungskabelmuffen mittels Ultraschall

Als alternatives, nicht destruktives und ortsauflösendes Diagnoseverfahren wird die Ultraschall Diagnostik zur Bewertung von polymeren Isoliersystemen betrachtet. Am Beispiel der automatisierten Diagnose von Hochspannungskabelmuffen aus EPDM kann ein signifikanter Einfluss der Temperatur auf das Verfahren gezeigt werden. Die daraus resultierenden Optimierungsmöglichkeiten für das Verfahren werden aufgezeigt indem die Wirkung einer Temperaturänderung auf die verschiedenen Mechanismen der Ultraschallausbreitung analysiert wird.

Einleitung

Polymere Isoliersysteme werden hauptsächlich nach zwei Gesichtspunkten bewertet: *Kosteneffiziente Herstellung* und *lange Lebensdauer*.

Im Falle von Hochspannungskabelmuffen sind die Rohstoffkosten in Relation zu den Herstellungs- und Prüfkosten zu vernachlässigen, so dass eine Kostenoptimierung im Sinne einer *kosteneffizienten Herstellung* in diesen Prozessen am effektivsten ist. Zu diesem Zweck kann die Ultraschall Diagnostik als "prä-selektives" Prüfverfahren eingesetzt werden, welches unzulängliche Muffen bereits vor der vorgeschriebenen elektrischen Prüfung identifiziert und so die aufwendige elektrische Prüfung erübrigt [1].

Lange Lebensdauern werden nicht nur durch die Konstruktion, sondern auch durch die Wahl geeigneter Rohmaterialien, deren Güte und der Verarbeitungsqualität bestimmt. Wird Ultraschall zur Qualitätsprüfung herangezogen, so sind Lage und Art einer Ungänze (Kontamination oder Gaseinschluss) bekannt. Dieses sind Informationen, die oftmals in der vorgeschriebenen elektrischen Prüfung durch einen Durchschlag verloren gehen. Sind jedoch Lage und Art bekannt, erleichtert diese Kenntnis eine Fehlerquelleneingrenzung und ermöglicht prozesstechnische Qualitätsverbesserungen,

die unter alleiniger Verwendung der elektrischen Diagnostik nicht möglich sind.

Temperaturabhängige Ultraschallprüfung von EPDM

Der thermische Einfluss auf die Ultraschallprüfung kann in drei Kategorien unterteilt werden: Änderung der akustischen Materialeigenschaften, Änderung der Schallankopplung und Änderung der Reflektivität von Einschlüssen. In Abb. 1 ist die gemessene Schallgeschwindigkeit von EPDM und gerußtem EPDM, welches in Muffen zur Feldsteuerung verwendet wird, über der Temperatur dargestellt.

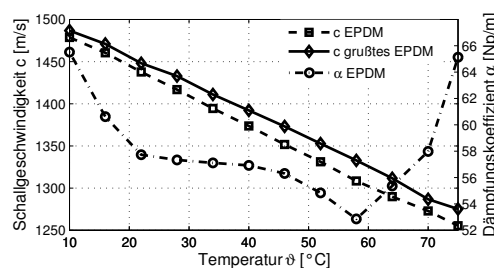


Abb. 1: Thermoakustische Eigenschaften von EPDM und gerußtem EPDM

Polymere zeichnen sich durch eine hohe Ultraschallschwächung aus, was die Diagnose mittels Ultraschall generell erschwert. Die thermische Abhängigkeit der

Schalldämpfung ist ebenfalls in Abb. 1 dargestellt.

Anders als bei den Schallgeschwindigkeiten, die monoton fallen, zeigt der Dämpfungskoeffizient ein ausgeprägtes Minimum bei 58 °C. Dieses Verhalten ist dadurch erklärbar, dass EPDM als teilkristallines Copolymer sowohl eine Glasübergangstemperatur der amorphen Phase als auch eine Schmelztemperatur der kristallinen Phase aufweist. Bei beiden Temperaturen ist der mechanische Verlustfaktor bei Polymeren erhöht, der ein Maß für die Wärme ist, die bei dynamischer Beanspruchung in Folge von Dissipation („innerer Reibung“) erzeugt wird [2]. Zwischen diesen Temperaturen liegt ein Minimum, das im Falle des betrachteten EPDMs bei 58 °C zu einer Verringerung der Dämpfung um 4,9 Np/m ($\approx 42 \text{ dB/m}$) im Vergleich zu 22 °C führt.

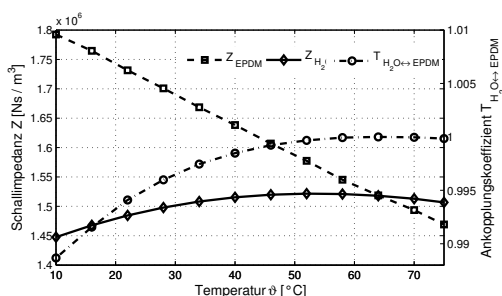


Abb. 2: Schallimpedanzen EPDM & H₂O, Ankopplungsfaktor H₂O ↔ EPDM

Die Schallankopplung an EPDM wird über eine Wasservorlaufstrecke gewährleistet, so dass bei Impulsechoverfahren eine Grenzfläche EPDM/H₂O zwei mal passiert werden muss. In Abbildung 2 sind die gemessenen Schallimpedanzen von Wasser und EPDM und der sich daraus ergebende theoretische Ankopplungsfaktor $T_{H_2O \leftrightarrow EPDM} \doteq T_{H_2O \rightarrow EPDM} \cdot T_{EPDM \rightarrow H_2O}$, mit dem gemessene Schalldrücke gewichtet werden müssen, dargestellt. Referenzmessungen zeigen jedoch, dass auf Grund von Oberflächenabsorption der tatsächliche Ankopplungsfaktor deutlich temperaturabhängiger ist als der theoretische. So können bei

52 °C um 8 dB höhere Schalldruckamplituden angekoppelt werden als bei 22 °C.

Auch die Reflexion an der Grenzfläche EPDM / geruhtem EPDM zeigt, abweichend von der Theorie, eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Bei 58 °C kann ein Zuwachs von 5 dB im Vergleich zu 22 °C beobachtet werden, wohingegen das Echo-signal der Grenzfläche EPDM/Luft konstant bleibt. Dieser Effekt ist besonders günstig, da die wahrscheinlichste Kontamination in einer Muffe ein Einschluss aus geruhtem EPDM ist, dessen Reflektivität absolut betrachtet deutlich geringer ist als die eines Lufteinschlusses.

Zusammenfassung und Ausblick

Unter Ausnutzung der oben genannten Effekte zeigt sich, dass eine Verbesserung der Diagnosequalität bei geschickter Wahl der Messtemperatur für Hochspannungskabelmuffen von 13 dB möglich ist. Auswirkungen einer thermisch bedingten Reflektivitätsänderung kleiner Einschlüsse aufgrund der mit der Temperatur fallenden Wellenlänge ($\lambda \sim c$) sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

Quellen

- [1] T.Wirz, P.Walter, C.Cornelissen, A.Schnettler: *Automated Ultrasonic Diagnosis for Condition Assessment of Electrical Insulation Systems*, 9th ECNDT 2006
- [2] H. Domininghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Springer 2005

Kontakt

Dipl.-Ing. Torsten Wirz
wirz@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94910

Investigations on the thermal influence on the condition assessment of power cable joints using ultrasound

Ultrasound diagnostic is regarded as an alternative, spatial and non destructive method for condition assessment of polymeric insulation systems. A significant influence of temperature on this method can be shown using the diagnosis of high voltage power cable joints as an example. The resulting optimization opportunities for the ultrasound diagnostic are described by analysing the effect of temperature change on the mechanism of ultrasound propagation in the polymeric material.

Introduction

Main challenges considering polymeric insulation systems are *cost-efficient production* and *long service life*. In case of high voltage cable joints the raw material costs are negligible in relation to production and testing costs. Against the background of *cost-efficient production*, cost optimisation is most effective in that processes. For this purpose ultrasound diagnosis can be applied as a „pre-selective“ testing procedure which is capable of identifying inadequate cable joints before the electrical routine test. In doing so, the time-consuming electrical test can be put aside for critical joints [1].

Long service life is dependent on multiple factors e.g. an adequate construction, suitable raw materials, pureness of raw material and its quality of processing. If ultrasound is used for quality assessment, position and kind of an inhomogeneity (contamination or gas inclusion) is known. This information is lost oftentimes, if a discharge occurs during the routine test. The knowledge of inhomogeneity's position and kind can be used for identification of the failure source which results in options for production process based quality improvement.

Temperature dependent ultrasound diagnostic of EPDM

The thermal influence on ultrasonic testing can be classified in three categories: Changes of acoustical material characteristics, changes of sonic coupling and changes of inclusion reflectivity. Fig. 1 shows the measured sound velocity dependent on temperature of EPDM and carbonized EPDM, which is used for electrical field control in power cable joints.

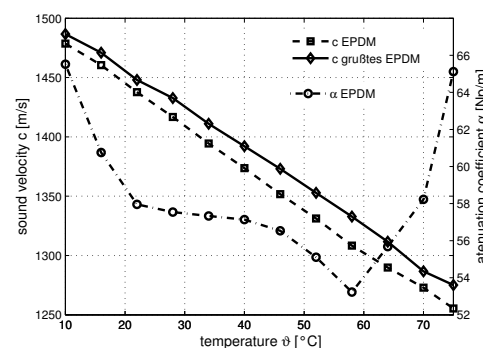


Fig. 1: Thermoacoustical properties of EPDM and carbonized EPDM

Polymers are characterised by a high sonic attenuation that makes diagnostic using ultrasound difficult in general. The thermal dependence of the sonic attenuation is displayed in fig. 1, too.

Differing from the sound velocities, which are decreasing monotonously, the attenuation coefficient shows a minimum at 58 °C.

This can be traced back to the fact, that semi-crystalline EPDM has a glass transition temperature of the amorphous phase and a melting temperature of the crystalline phase. The mechanical loss factor of polymers is increased at both temperatures and correlates with the amount of heat which is generated by dynamic stress due to dissipation („inner friction“). Between this temperatures a minimum is located which can explain the attenuation decrease of $4,9 \text{ Np/m}$ ($\approx 42 \text{ dB/m}$) at 58°C in relation to the attenuation at 22°C .

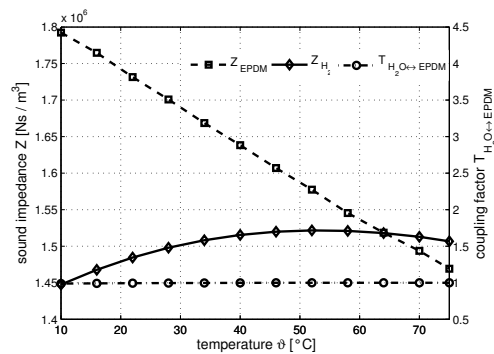


Fig. 2: Sonic impedance EPDM& H₂O, coupling factor H₂O ↔ EPDM

The sonic coupling between the transducer and EPDM is assured by a water gap. Using impulse echo method the interface EPDM/H₂O has to be crossed twice. Fig. 2 shows the measured sonic impedances of water and EPDM together with the corresponding theoretical coupling factor $T_{H_2O \leftrightarrow EPDM} \doteq T_{H_2O \rightarrow EPDM} \cdot T_{EPDM \rightarrow H_2O}$. All measured sound pressures have to be weighted with that factor. Reference measurements show, that due to surface absorption the actual coupling factor is more thermal dependant than the theoretical coupling factor. So, up to 8 dB higher sound pressures can be coupled to EPDM at 52°C than at 22°C .

The reflexion at the interface EPDM / carbonized EPDM shows a significant temperature dependence, differing from theory. A increase of about 5 dB can be observed at 58°C in relation to 22°C , whereas the echo signal of an EPDM/air interface is constant. This effect is advantageous, because the most probable contamination in a cable joint is an inclusion of carbonized EPDM, which absolute reflectivity is significant lower than of an gaseous inclusion.

Summary and Outlook

The utilization of the described effects it is possible to improve the diagnose quality up to 13 dB by choosing a advantageous measurement temperature. A thermal dependent change of the reflection behaviour of small singular inclusions because of a decreasing wavelength with increasing temperature ($\lambda \sim c$) is objective of current investigations.

References

- [1] T.Wirz, P.Walter, C.Cornelissen, A.Schnettler: *Automated Ultrasonic Diagnosis for Condition Assessment of Electrical Insulation Systems*, 9th ECNDT 2006
- [2] H. Domininghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Springer 2005

Contact

Dipl.-Ing. Torsten Wirz
wirz@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94910

Untersuchungen des Alterungsverhaltens von nanostrukturierten superhydrophoben Isolierstoffoberflächen unter Multi-Stress-Bedingungen

Die Lebenserwartung polymerer Isolierstoffoberflächen ist maßgeblich von den Multi-Stress-Bedingungen im Betrieb abhängig. Um eine hohe Zuverlässigkeit von Hochspannungsisoliersystemen zu gewährleisten, ist es von besonderer Bedeutung, das Alterungsverhalten von Materialien unter simultanen elektrischen Beanspruchungen und Feuchtigkeit zu ermitteln. Durch Verwendung neu entwickelter Nanopartikel kann die Superhydrophobieeigenschaft auf bestimmten Kunststoffen realisiert werden. Derzeit werden Untersuchungen zur Erosionsbeständigkeit behandelter Isolierstoffoberflächen unter Multi-Stress-Belastungen durchgeführt.

Einleitung

Bei kritischen Schwachstellen in einer Vielzahl von Isoliersystemen der Energietechnik handelt es sich in erster Linie um die Grenzflächen, die in der Praxis sowohl einem elektrischen Feld als auch klimatischen Einflüssen ausgesetzt werden. Hinsichtlich ihrer Erscheinungsform unterscheiden sie sich hauptsächlich zwischen inneren und äußeren Grenzflächen. Zur Überwindung der Fremdschichtproblematik an äußeren Grenzflächen finden derzeit häufig polymere Formstoffe, z.B. Silikonelastomere (SiE), in den betroffenen Betriebsmitteln Anwendung. Neben Verringerung des Gewichts sowie Erleichterung des Herstellungsprozesses zeichnet sich das Material durch eine intrinsische Hydrophobieeigenschaft der Oberflächen aus. Somit können die angelagerten Wassertropfen aufgrund eines Randwinkels von ca. 90° leicht von den Oberflächen entfernt werden. Einen weitergehenden vielversprechenden Ansatz stellt die superhydrophobe Isolierstoffoberfläche durch noch geringere Oberflächenspannung dar, die auf der Oberflächenhydrophobierung und Nanostrukturierung beruht und daher einen selbstreinigenden Effekt hervorruft (siehe Abb. 1). In-

folgedessen wird die Bildung von zusammenhängenden Fremdschichten entlang der Isolierstrecke deutlich erschwert, wodurch fremdschichtinitiierte Schädigungsprozesse an den Isolierstoffoberflächen verhindert werden.

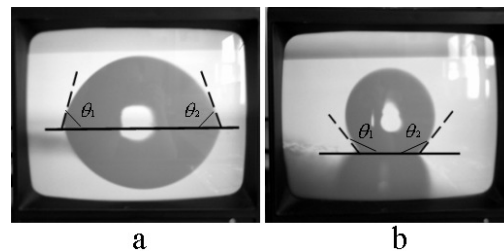


Abb. 1: Randwinkelmessung an a) unbehandelten Oberflächen und b) superhydrophoben Oberflächen

Experimentelle Untersuchungen

Untersucht werden zylindrische Modellprüfkörper, die einem quasi-homogenen elektrischen Feld ausgesetzt werden. Um die klimatischen Belastungen bezüglich der verschiedenen Anwendungsbereiche simulieren zu können, werden die feuchten Beläge in unterschiedlicher Art und Weise auf die Prüfkörperoberflächen aufgebracht: Während der modifizierte Rad-Tauch-Test ein beschleunigtes Alterungsverfahren an

Freiluftisolierungen darstellt, eignet sich die definierte Nebelbelastung mit geringer Volumenleitfähigkeit im Kaltnebeltest für die Ermittlung des Oberflächenverhaltens unter erschwerten Innenraumbedingungen. Des Weiteren wird ein zyklischer Betauungstest an Referenzmaterialien und oberflächenmodifizierten Prüflingen durchgeführt.

Ergebnisse

Im Rad-Tauch- und Kaltnebeltest weisen die superhydrophoben Oberflächen im Wesentlichen eine längere Lebensdauer gegenüber den unbehandelten Oberflächen auf [1]. Weiterhin lässt sich das dynamische Verhalten des Ableitstroms bzw. der Fremdschichtwirkleistung mit sprunghafter Zunahme der Messwerte durch die modifizierten superhydrophoben Isolierstoffoberflächen signifikant unterdrücken. Im Gegensatz dazu ist eine große Schwankung der Ergebnisse bei den unbehandelten Modellprüfkörpern zu erkennen. Allerdings wird hier eine Verschlechterung der Ergebnisse bei den superhydrophoben Modellprüfkörpern im Betauungstest beobachtet. Dies weist darauf hin, dass im Fall der Betauung die Hydrophobie-eigenschaft aufgrund der besonderen Mechanismen der Wasseranlagerung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Demzufolge führt die durch Nanopartikel zunehmende Oberflächenrauigkeit zu einer Erhöhung der Benetzbarkeit der Prüfkörper.

Bezeichnung	Zusammensetzung
R1	EP/W12
R2	EP/W12 EST
A1	EP/W12/Trennmittel
A2	EP/W12 EST/Trennmittel
B1	EP/W12/oberflächenmodifiziert
B2	EP/W12 EST/oberflächenmodifiziert
C1	EP/W12/Trennmittel/oberflächenmodifiziert
C2	EP/W12 EST/Trennmittel/oberflächenmodifiziert

Abb. 2: Bezeichnungen und Zusammensetzungen der untersuchten Prüfkörper

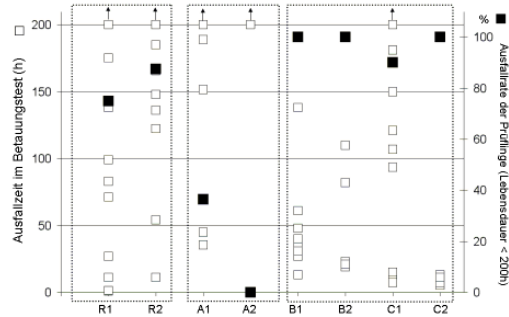


Abb. 3: Ausfallzeiten und Ausfallraten der verschiedenen Isolierstoffoberflächen im Betauungstest

Es wird gezeigt, dass die Lebensdauer der untersuchten Prüfkörper bei Betauung nur durch Verwendung eines silikonöhlhaltigen Trennmittels verlängert werden kann. Den Abb. 2 und 3 sind die Ausfallzeiten und Ausfallraten der verschiedenen Isolieroberflächen im Betauungstest zu entnehmen.

Ausblick

Aus den Versuchsergebnissen ist schließlich ein Modell für den Einsatz superhydrophober Oberflächen unter Multi-Stress-Bedingungen zu bilden. Grundlegende Prozesse der Entstehung und Fortpflanzung von elektrisch und klimatisch verursachten Schädigungen an der Nanostruktur und der Superhydrophobie sollen mittels dieses Modells beschrieben werden.

Quellen

- [1] J. Wu, B. Heil, A. Schnettler: *Study on durability of nanostructured superhydrophobic insulating surfaces under simultaneous climatic and electrical stresses*, 15th ISH, 2007.

Kontakt

M.Sc. Junliang Wu
Wu@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94924

Investigation of the aging performance of nanostructured superhydrophobic insulating surfaces under multi-stress-conditions

The life expectancy of polymeric insulating surfaces is substantially affected by the multi-stress conditions in operation. To reach a high reliability of high voltage insulating systems, it is very important to examine the aging performance of materials under simultaneous electrical stresses and moistures. By using newly developed nanoparticles, the superhydrophobic surfaces can be realized on polymeric insulating materials. The resistivity of the treated insulation surfaces against degradation is investigated during this study.

Introduction

For a large number of insulating systems in electrical power engineering, the interfaces of the insulations are regarded as most critical. In practice, the interfaces of the insulations are usually exposed to an electrical field as well as climatic stresses. According to the forms of appearance, they can generally be subdivided into internal and external interfaces. To overcome the contamination problem at the external interfaces, polymeric materials like silicone rubber (SiR) are often used as housing materials of the equipments concerned. Apart from the reduction of the weight as well as the simplification of the production process, it exhibits an intrinsic surface hydrophobicity. Due to a contact angle in the range of 90° , the formed water drops can be easily removed from the insulating surfaces.

An advanced promising approach is considered to be superhydrophobic insulating surfaces. They show even much lower surface tension, which is based on a surface treatment (hydrophobisation and nanostructuring) and hence gives rise to the so-called self-cleaning effect (see Fig. 1). Thus, the occurrence of contamination layers along the insulating surfaces can be evidently prevented. As a result, the contamination-initiated degradation processes of the insulating surfaces can be also avoided.

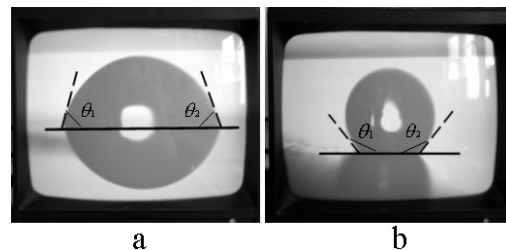


Fig. 1: Contact angle measurement on a) untreated surfaces and b) superhydrophobic surfaces

Experimental Tests

The test objects are cylindrical insulating specimens, which are subjected to a quasi uniform electrical field. According to climatic stresses under the different service conditions, the contamination layers are generated on the specimen surfaces in the following ways: Whereas the modified rotating wheel dipping test can be regarded as an accelerated aging test for outdoor insulations, a special clean fog test, using distilled water with a low conductivity, is usually employed for the investigation of the surface behaviours under severe conditions of indoor applications. Furthermore, reference materials and surface modified specimens are examined by using a cyclic condensation test.

Results

In the modified rotating wheel dipping test and the clear fog test, the superhydrophobic specimens have a much longer life span of the sample surfaces [1]. Meanwhile, the dynamic behaviour, e.g. impulses of leakage currents and effective power dissipations in the contamination layers, is not pronounced in the presence of modified superhydrophobic insulating surfaces. In contrast to the superhydrophobic surfaces, the untreated test specimens show a significant deviation of the measurement data.

However, a decline of surface performance of the superhydrophobic specimens is observed in the condensation test. It indicates that in a special case of wetting i.e. dew the quality of the hydrophobicity plays no decisive role because of the mechanisms of condensation. On the other hand, an increase of the surface roughness is caused by the coating of nanoparticles. Hence, the wettability of the specimens is enhanced extensively.

Finally, it is shown that the life span of the specimens during the condensation experiment can be extended only by using a release agent containing silicone oil. The failure time and ratio of the different insulating surfaces in the condensation test are given in Fig. 2 and 3.

Name	Composition
R1	EP/W12
R2	EP/W12 EST
A1	EP/W12/release agent
A2	EP/W12 EST/release agent
B1	EP/W12/surface-modified
B2	EP/W12 EST/surface-modified
C1	EP/W12/release agent/surface-modified
C2	EP/W12 EST/release agent/surface-modified

Fig. 2: Notation and composition of the samples

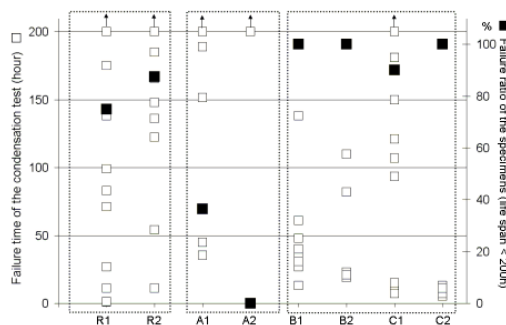


Fig. 3: The failure time and the failure ratio of the specimens during the condensation experiment

Outlook

In further investigations, the surface analysis of the specimens will be conducted. In this way, the topographical and chemical changes of the modified insulating surfaces will be evaluated. Finally, an aging model of the superhydrophobic surfaces under multi-stress-conditions should evolve from the test results and their evaluation. In this model, the degradation processes of nanostructured superhydrophobic surfaces, caused by electrical and climatic stresses, should be described, so that it can contribute to the assessment of the life span of such surfaces.

References

- [1] J. Wu, B. Heil, A. Schnettler: *Study on durability of nanostructured superhydrophobic insulating surfaces under simultaneous climatic and electrical stresses*, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana (Slovenia), August 27-31, 2007

Contact

M.Sc. Junliang Wu
Wu@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94924

Parameterstudien zum elektrischen Durchschlag in syntaktischem Schaum

In Anlehnung an ihre schaumstoffartige Struktur werden mit Mikrohohlkugeln gefüllte Polymer-Harze als syntaktische Schäume bezeichnet. Aufgrund ihrer niedrigen spezifischen Dichte und der elektrischen und mechanischen Festigkeit bietet ein Einsatz dieses Materials als Isolierstoff in hochspannungstechnischen Geräten insbesondere dann Vorteile, wenn bei der entsprechenden Anwendung eine leichte und kompakte Bauweise angestrebt wird. Anhand von geeigneten Parameterstudien wird gezeigt, dass ein elektrischer Durchschlag in diesem Werkstoff bei einer kurzzeitigen Wechselspannungsbelastung in den Hohlräumen initiiert wird.

Einleitung

Polymerharze, bei denen Hohlkugeln mit Durchmessern im Bereich 20-120 μm als Füllstoff zugesetzt sind, werden aufgrund ihrer schaumstoffartigen Struktur als syntaktische Schäume bezeichnet. Sie zeichnen sich durch ein isotropisches Belastungsverhalten, eine geringe spezifische Dichte und eine für Schäume hohe elektrische und mechanische Festigkeit aus [1]. Aufgrund dieser Vorteile wird ein spezieller syntaktischer Schaum in Hochspannungserzeugern für Computertomographen eingesetzt, um dort elektrische Spannungen zu isolieren. Neben dieser Anwendung wäre ein Einsatz dieses Materials in allen zukünftigen Isoliersystemen vorteilhaft, bei denen speziell die Kombination von geringem Gewicht, Kompaktheit und Isoliervermögen im Vordergrund steht. Die Erschließung dieser Anwendungsbereiche erfordert jedoch eine umfassende elektrische Charakterisierung des Materials. Da bezüglich der elektrischen Eigenschaften des Schaums bislang nur wenige Erkenntnisse vorliegen, werden zurzeit Untersuchungen angestellt, die Aufschluss über den Durchschlagsmechanismus von syntaktischem Schaum im Kurzzeitbereich bei Gleich- und Wechselspannungsbelastung geben.

Einfluss der Grenzflächen und der Harzmatrix auf die elektrische Festigkeit

Die Herstellungsverfahren von syntaktischem Schaum und gefüllten Epoxidharzen weisen eine Reihe signifikanter Parallelen auf: Es wird ein Füllstoff in ein meist aus mehreren Komponenten bestehendes flüssiges Epoxidharzsystem eingemischt und bei Unterdruck vergossen. Dabei entsteht eine heterogen aufgebaute, isotrope Materialstruktur, die sich durch eine große Anzahl von Grenzflächen zwischen Füllstoff und Polymermatrix auszeichnet. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Grenzflächen, zusammen mit der Harzmatrix selbst, die elektrischen Eigenschaften von gefüllten Epoxidharzen maßgeblich beeinflussen können [2]. So ist bezüglich der elektrischen Festigkeit bei Wechselspannungsbelastung eine Abhängigkeit von der Temperatur messbar, die in [3] direkt auf Veränderungen in der Harzmatrix zurückgeführt werden: Unterhalb der Aushärtetemperatur der Harzmatrix bewirkt eine Erwärmung der Proben makroskopisch eine Beseitigung mechanischer Spannungen im Material, mikroskopisch werden Molekülketten in der Harzmatrix entspannt. Die Folge davon ist eine Senkung der Leitfähigkeit des Polymerwerkstoffs, die zu einer Erhöhung der Durchschlagsspannung führt. Mit steigender

Temperatur wird jedoch auch die thermische Bereitstellung von freien Ladungsträgern im Harz zunehmend vereinfacht und findet bereits bei niedrigeren Feldstärkebelastungen statt. Da eine gesteigerte Anzahl freier Ladungsträger wiederum die elektrische Festigkeit senkt und dieser Effekt in den Messungen bei höheren Temperaturen dominant ist, ist eine erneute Verringerung der Spannungsfestigkeit im Temperaturbereich oberhalb der Aushärtetemperatur zu verzeichnen.

Untersuchung

Um die Gültigkeit dieses Zusammenhangs für syntaktischen Schaum zu überprüfen, werden Proben mit einer Kugel-Kugel-Elektrodenanordnung mit syntaktischem Schaum vergossen und deren elektrische Festigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen getestet. Der Schaum besteht aus einer Epoxidharzmatrix, in welche 50 Vol% Glasmikrohohlkugeln mit einem durchschnittlichen Durchmesser von $65\ \mu\text{m}$ eingemischt werden. Die Schlagweite der Kugelelektrodenanordnung beträgt 3 mm, bei einem Durchmesser der Kugelelektroden von 12 mm ist die Anordnung somit quasi-homogen. Die Proben werden für 24 h bei Prüftemperatur gelagert und anschließend bei 20°C, 60°C, 85°C und 110°C einer Spannung ausgesetzt, die in Stufen erhöht wird bis ein elektrischer Durchschlag der Probe verzeichnet werden kann. Den Messergebnissen in Abb. 1 kann entnommen werden, dass die Ergebnisse bei **Gleichspannungsbelastung** eine Temperaturabhängigkeit zeigen, die der von gefüllten mineralischen Epoxidharzen bei Wechselspannungsbelastung ähnlich ist.

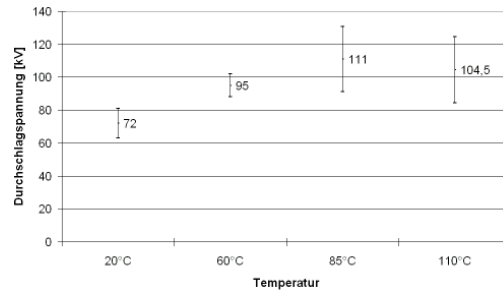


Abb. 1: DC-Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Temperatur

Abb. 2 zeigt hingegen, dass bei kurzzeitiger **Wechselspannungsbelastung** von syntaktischem Schaum keine signifikante Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit von Temperatur des Materials festgestellt werden kann.

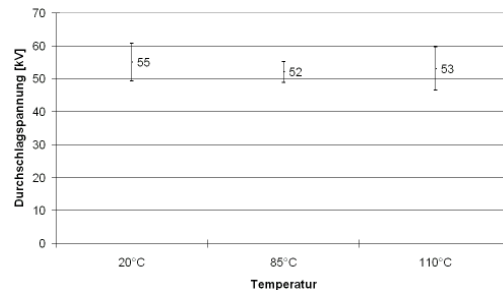


Abb. 2: AC-Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Temperatur

Diskussion

Die Entwicklung der elektrischen Festigkeit über der Temperatur wird bei gefüllten Epoxidharzen durch eine Änderung der Leitfähigkeiten in der Harzmatrix erklärt. Da eine Änderung der Leitfähigkeit bei Gleichspannungsbelastung zwangsläufig Auswirkungen auf das elektrische Feld im Werkstoff hat, ist die gemessene Temperaturabhängigkeit plausibel.

Im Gegensatz dazu ist das temperaturunabhängige Verhalten bei Wechselspannungsbelastung ein Hinweis darauf, dass der Durchschlag in diesem Fall in Bereichen initiiert wird, die keine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit aufweisen. Aufgrund der

mechanischen Spannungen, die sich beim Aushärtvorgang zwischen Glashohlkugeln und Harzmatrix aufbauen, gilt dies ausschließlich für den Gasraum in den Mikro-hohlkugeln. Eine temperaturbedingte Veränderung des Gasdrucks im Inneren der Mikro-hohlkugel kann dabei im betrachteten Temperaturbereich vernachlässigt werden.

Einfluss der Hohlkugelgröße

Kommerziell verfügbare Kugeltypen, die bei der Herstellung von syntaktischem Schaum eingesetzt werden, weisen bedingt durch die Produktionstechnologie eine breite Partikelgrößenverteilung auf. Um die Frage zu klären, welchen Einfluss der Hohlkugeldurchmesser auf die Spannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum bei Wech-selspannungsbelastung hat, werden Untersuchungen an Materialproben mit reduzierter Partikelgrößenverteilung durchgeführt.

Untersuchungen

Untersucht werden je 5 Proben aus syntaktischem Schaum mit einem Füllgrad von 50Vol% Mikro-hohlkugeln mit definierter Größenverteilung. Die Fraktionierung der Kugel erfolgt in einem mehrstufigen Siebverfahren, bei dem die Größenfraktionen 45-63 μm und 63-80 μm gewonnen werden. Die Materialproben aus syntaktischem Schaum werden in einem Stufentest mit Wechselspannung bis zum Durchschlag belastet. Das Ergebnis der Messreihe ist in Tab.1 dargestellt.

Kugel-durchm.	Durchschlag-feldstärke	Konf.-interv. 95%
45-63 μm	32 kV/mm	$\pm 2,7$ kV/mm
63-80 μm	28 kV/mm	$\pm 1,1$ kV/mm

Tab. 1: AC-Durchschlagsfeldstärke in Abhängigkeit der Hohlkugelgröße

Die Spannungsfestigkeit von syntaktischem Schaum hängt von der Größe der eingesetzten Hohlkugeln ab. Die Spannungsfestig-

keit der Materialproben aus Hohlkugeln mit kleinerem Durchmesser ist höher.

Nano-ZnO in syntaktischem Schaum

Durch eine gleichmäßige Verteilung vieler kleinster Teilchen in Nanometergröße kann Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des gesamten Isoliersystems genommen werden.

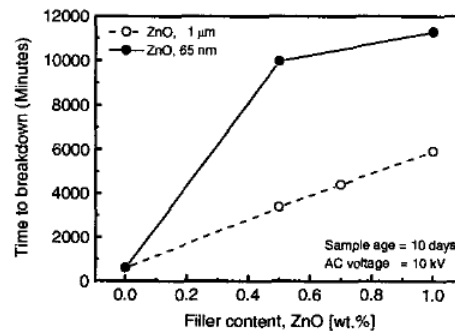


Abb. 3: Ausfallszeit bei steigendem ZnO-Füllgrad. Quelle:[4]

In [4] ist eine feldhomogenisierende Wirkung bereits bei unter 1gew% an Nano-ZnO in reinem Epoxidharz festgestellt worden. Abb. 3 zeigt die Ausfallszeit mit steigendem Füllgrad an Nanopartikeln für eine spezielle Prüfanordnung. Zur weiterführenden Bestätigung der vorgestellten Ergebnisse wurde syntaktischer Schaum zusätzlich mit Nano-ZnO modifiziert. Eine Kombination aus syntaktischem Schaum und ZnO dürfte demnach keinen nennenswerten Einfluss auf die Kurzzeitspannungsfestigkeit haben, da das ZnO nicht in den Kugelhohlraum eindringen kann, der bei Wechselspannungsbelastung die elektrische Schwachstelle darstellt.

Untersuchungsergebnisse

Untersucht werden je fünf Proben aus syntaktischem Schaum mit und ohne 2gew% ZnO. Zur Herstellung des Schaumes werden Mikro-hohlkugeln mit einem mittleren Durchmes-

ser von $35\mu\text{m}$ zu 50Vol% vermischt. In Abb. 4 ist das Ergebniss der Kurzzeitspannungsfestigkeitsmessung dargestellt.

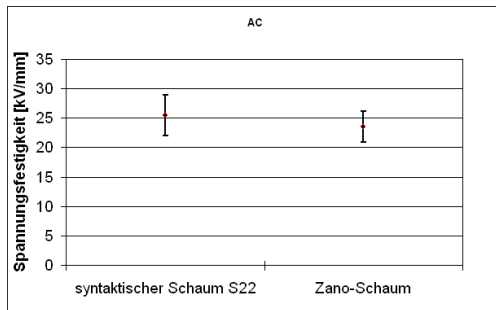


Abb. 4: Kurzzeitspannungsfestigkeit

Es wird ein Verfahren entsprechend dem vorherigen Test angewendet. Dabei wird der syntaktische Schaum ohne ZnO mit dem syntaktischen Schaum mit ZnO (Zano-Schaum) verglichen. Es ist kein signifikanter Unterschied der Ergebnisse festzustellen, eine Verbesserung durch ZnO erscheint eher unwahrscheinlich.

Fazit

Die Untersuchung der Kurzzeitwechselspannungsfestigkeit mit syntaktischem Schaum mit ZnO in Nanometergröße hat gezeigt, dass keine signifikante Verbesserung durch Nano-ZnO zu erwarten ist. Im Gegensatz dazu führt die Verwendung von Hohlkugeln mit kleineren Durchmessern zu einer erhöhten Durchschlagfeldstärke des Schaums. Aus diesen beiden Versuchsergebnissen und den vorgestellten Untersuchungen zur elektrischen Festigkeit von syntaktischem Schaum bei unterschiedlichen Temperaturen kann zusammenfassend gefolgert werden, dass die elektrische Schwachstelle des Materials bei Wechselspannungsbelastung im Inneren der Mikrohohlkugeln zu finden ist, bei Gleichspannung hingegen entweder an der Grenzfläche zwischen den Mikrohohlkugeln und dem Harz oder im Harz selbst.

Danksagung

Wir danken der Philips Medical Systems DMC GmbH für die finanzielle Unterstützung und fachliche Diskussion.

Quellen

- [1] F.A. Shutov, *Polymer Foams*, In D.Klempner / K.C.Frisch (Hrg.): Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. Hanser Publishers, 1998
- [2] U. Bammert, *Bestimmung des Teilentladungs(TE)-Verhaltens von gefülltem Epoxidharz anhand automatisch erfasster Kenngrößen*, Dissertation Universität Hannover, 1987
- [3] R. Kotte, E. Gockenbach, H. Borsi, *Influence of the Filler on the Breakdown and Partial Discharge Behaviour of Heat-Resistant Cast Resins*, Konferenzband des IEEE Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA, April 2000
- [4] H. Ding, B. Varlow, *Effect of Nano-Fillers on Electrical Treeing in Epoxy Resin Subjected to AC Voltage*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; IEEE 2004

Kontakt

Dipl.-Ing. Michael Keßler
kessler@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94936

M. Sc. Andrey Mashkin
mashkin@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94939

Dipl.-Ing. Alexander Tröger
troeger@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94920

Parameter Study with Respect to the Electrical Breakdown in Syntactic Foam

Polymers which are filled with hollow microspheres are called syntactic foams because of their foam-like structure. A low specific gravity and a sufficient electrical and mechanical strength are the main properties of this type of material. This can be of advantage if syntactic foams are used for insulating purposes in high voltage equipment, especially if a light and compact design of the system is important. Suitable parameter studies show that the initiation of an electrical breakdown takes place in its gas cavities if an AC-voltage is applied on a short-time basis.

Introduction

Polymer resins which are filled with hollow spheres with a diameter in the range of 20-120 μm are called syntactic foams. They feature microstructural isotropy and a high electrical and mechanical strength [1]. Due to these outstanding properties, a special type of syntactic foam is employed as part of a light insulation system for high voltage generators in computer tomographs.

An application in other insulation systems, which are dimensioned to especially fulfil the requirements of a lightweight, compact and electrically resilient design would be of advantage. As a pre-condition, the electrical behaviour of this material has to be thoroughly investigated. Current investigations deal with the short-term electrical breakdown if AC- or DC-voltage is applied.

Influence of the interface and the resin matrix on the electrical strength

The production process of syntactic foam and filled epoxy resins are similar: a filler is mixed into a liquid epoxy resin and cast in a mould in a low pressure atmosphere. A specimen with a heterogeneous material structure and a high number of interfaces between the filler and the polymer matrix is the result. In case of epoxy resins, investigations have shown that these interfaces (together with the resin matrix itself) are responsible for the determination of electrical

properties of such a material: e.g. Kotte [3] tested the influence of temperature on the electrical strength of filled epoxy resin and he found out that heating the material leads to an increase of the electrical strength if the temperature of the sample is below the curing temperature of the epoxy resin. This can be explained with the relaxation of mechanical and molecular strains, which reduce the conductivity and therefore increase the breakdown field strength of the material. If the heating exceeds the curing temperature, the electrical strength decreases again. The reason for this is another effect, that dominates the first one at elevated temperatures: it is the facilitation of charge carrier deployment according to the Van't Hoff's law.

Investigations

In order to determine a similar interrelation for syntactic foam, the electrical strength of specimens with cast in sphere electrodes is tested at different temperatures. The foam consists of 50Vol% glass-microspheres with an average diameter of 65 μm . The gap distance of the electrodes is 3 mm and their diameter 12 mm, the setup can therefore be considered as quasi-homogeneous. The specimens are stored at a temperature of 20°C, 60°C, 85°C and 110°C for a minimal duration of 24 h and tested immediately afterwards with a

step test until an electrical breakdown occurs. The test results in Fig. 1 show that the expected interrelation is obtained in case of a **DC-load**.

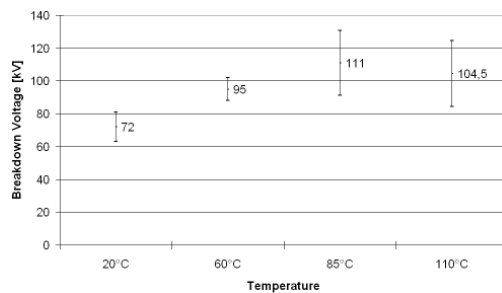


Abb. 1: DC-breakdown voltage in dependence of the specimen's temperature

In contrast to that, no temperature dependence can be observed in case of an **AC-load**, as can be seen in Fig. 2.

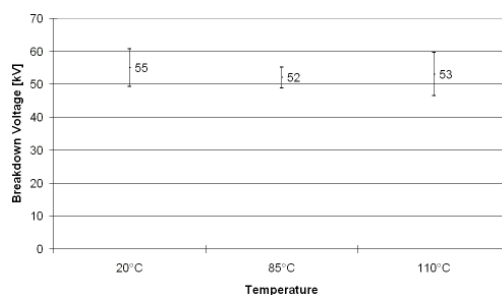


Abb. 2: AC-breakdown voltage in dependence of the specimen's temperature

Discussion

The correlation between electrical strength and temperature which has been documented for epoxy resins with mineral fillers, depends on two effects that have an impact on the conductivity of the polymer matrix. In case of a DC-load, a change of conductivity of the material does inevitably alter the electric field and the breakdown conditions in the specimens. The measured breakdown field strengths in Fig. 1 are therefore plausible.

The independence of the AC breakdown field strength from the temperature of the specimens can be seen as evidence that

breakdown initiation has to take place in an area which is not temperature dependent. Due to the impact of mechanical strain on the polymer matrix and the interfaces, both can be ruled out as a possible weakest link concerning the electrical strength. This leads to the conclusion that an AC-breakdown in syntactic foam has its seeds in the gas cavities of the microspheres. The influence of the temperature on the gas pressure in these voids can be neglected in the considered temperature range.

Effect of microsphere size

Due to their production technology, commercial available microspheres show very broad size distribution. Effect of microsphere size on breakdown strength of syntactic foam have to be investigated. Parameter study on syntactic foam with narrow-distributed microspheres is therefore performed.

Investigations

Tests are performed on syntactic foam with microspheres of accurately defined particle size. Original microspheres are screened therefore mechanically through several precision screens. Fractions of 45-63 μm and 63-80 μm are obtained. Samples of syntactic foam containing 50% volume share of microspheres are tested with step-raised AC-Voltage until breakdown. Tab. 1 represent the test data.

Sphere size	Breakdown field strength	Variance 95%
45-63 μm	32 kV/mm	$\pm 2,7$ kV/mm
63-80 μm	28 kV/mm	$\pm 1,1$ kV/mm

Tab. 1: AC breakdown field strength depending on microsphere size

The breakdown field strength of syntactic foam depends on the size of microspheres

used. Breakdown strength of samples consisting of small microspheres is higher.

Nano-ZnO in syntactic foam

The electrical parameters of an insulation system can be influenced by an homogeneous distribution of many smallest particles in a dimension of some nanometers. In [4], a field homogenising property of Nano-ZnO is presented. Already under 1wt% of ZnO in pure epoxy resin is sufficient. Fig. 3 shows the durability depending on the filling degree of nano-particles for a special arrangement.

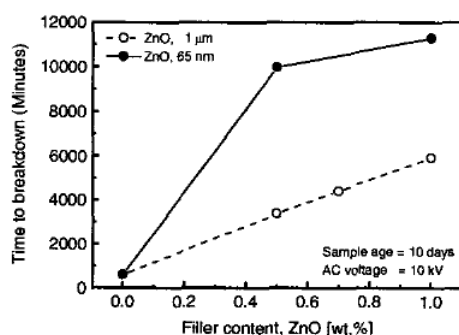


Abb. 3: Time to breakdown of ZnO/epoxy composites. Source:[4]

For confirmation of the presented results above, syntactic foam was additionally modified with Nano-ZnO. A combination of syntactic foam and ZnO should not lead to a significant rise of the dielectric strength, because the ZnO is not able to invade the microspheres, which are the electrical chinks in AC applications.

Results

Syntactic foams with and without 2wt% of ZnO are investigated with five samples respectively. The syntactic foam consists of 50vol% of microspheres with an average diameter of 35µm. The results of the investigation of the short time electrical strength are presented in fig. 4.

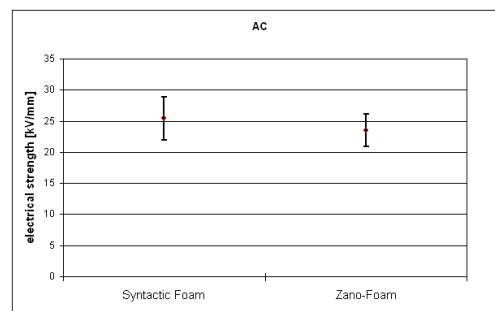


Abb. 4: Short time electrical strength

The test-procedure is similar to the prior tests. The syntactic foam without ZnO is compared with the syntactic foam with ZnO (Zano-foam). There is no significant difference in the results. An improvement by ZnO seems to be unlikely.

Conclusion

Investigations concerning the short-time electrical strength of syntactic foam have shown that no improvement can be expected if nano-particles made of ZnO are mixed into the polymer resin matrix. By contrast, a decrease of the microsphere's diameter does increase the AC breakdown voltage of the tested specimens. These two results and the findings of the investigation which deals with the influence of temperature on the electrical strength of the material lead to the conclusion that the electrically weakest link of the material can be found inside the microsphere gas cavity in case of an AC load and either at the interface between filler and resin matrix or in the matrix itself in case of a DC-load.

Acknowledgement

We are grateful to the Philips Medical Systems DMC GmbH for the financial and advisory support.

References

- [1] F.A. Shutov, *Polymer Foams*, In D.Klempner / K.C.Frisch (Hrg.): Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. Hanser Publishers, 1998
- [2] U. Bammert, *Bestimmung des Teilentladungs(TE)-Verhaltens von gefülltem Epoxidharz anhand automatisch erfasster Kenngrößen*, Dissertation Universität Hannover, 1987
- [3] R. Kotte, E. Gockenbach, H. Borsi, *Influence of the Filler on the Breakdown and Partial Discharge Behaviour of Heat-Resistant Cast Resins*, Konferenzband des IEEE Symposium on Electrical Insulation, Anaheim,USA, April 2000

- [4] H. Ding, B. Varlow, *Effect of Nano-Fillers on Electrical Treeing in Epoxy Resin Subjected to AC Voltage*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; IEEE 2004

Contact

Dipl.-Ing. Michael Keßler
kessler@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94936

M. Sc. Andrey Mashkin
mashkin@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94939

Dipl.-Ing. Alexander Tröger
troeger@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94920

Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas - ein ökologischer Vergleich

Das bestehende Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) fördert die Energiewandlung aus regenerativen Brennstoffen wie z.B. Biogas nur dann, wenn sie eine Stromerzeugung beinhaltet. Dieser Artikel befasst sich daher in Anlehnung an eine Veröffentlichung der Forschungsgruppe [1] mit der Analyse der ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsarten von Biogas und versucht die Grenzen der bisherigen Förderung aufzuzeigen.

Potentiale der Biogaserzeugung in Deutschland

Um den möglichen Beitrag zur Energieversorgung in Deutschland anschaulich zu machen, soll im Folgenden kurz das Potential der Biogaserzeugung skizziert werden.

Die Auswertung diverser Studien ergab für das technische Biomassepotential eine Bandbreite von 734 PJ/a [2] bis 1587 PJ/a [3] für das Bezugsjahr 2010. Im Vergleich dazu beträgt der Primärenergieverbrauch in Deutschland seit Jahren rund 14.000 PJ/a.

Das Gros der Biomasse in Deutschland speist sich dabei aus zwei Quellen. Zum einen die Menge der Rückstände und Abfälle, worunter auch tierische Exkremente verstanden werden und zum anderen aus den in Deutschland angebauten Energiepflanzen. Die große Diskrepanz zwischen den Studien resultiert dabei fast ausschließlich aus den unterschiedlichen Annahmen bezüglich zur Verfügung stehender Anbauflächen für Energiepflanzen. Abbildung 1 stellt beispielhaft die Zusammensetzung und mögliche Verwendung des Biomassepotential gemäß der Studie des Instituts für Energetik und Umwelt in Leipzig [4] dar, die als konservative, aber sehr detaillierte Schätzung angesehen werden darf.

Die Studie schätzt die zur biochemischen Verwendung, also Vergasung, einsetzbare Biomasse auf 269 PJ/a. Diese Energiemenge entspricht einem Biogasvolumen von ca. 13.200 Mio. Normkubikmetern. Dabei wird

ein durchschnittlicher Methangehalt von 55 Prozent angenommen, wie er sich zum Beispiel aus den Untersuchungen von [5] ergibt.

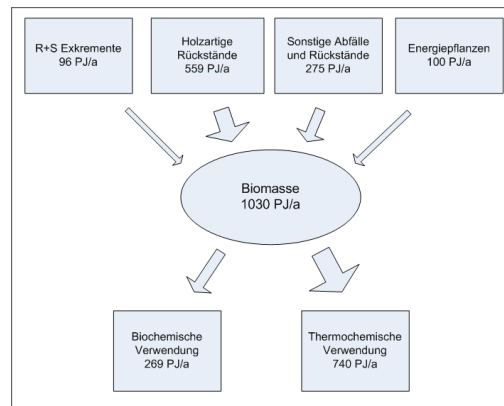


Abb. 1: Biomasseherkunft und mögliche Verwendung

Vergleich der Nutzungsmöglichkeiten von Biogas in der Energiewandlung

Auch wenn bei der Energiewandlung aus Biomasse nur soviel CO₂ entstehen kann wie zuvor im Rahmen der Biomasseentstehung aus der Atmosphäre entnommen wurde, verlangt eine vollständige Ökobilanz stets auch die Einberechnung der durch Aussaat, Ernte und Fermentierung entstehenden Emissionen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bereitstellung von 1m³ Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen ab Fermenter Treibhausgasemissionen

in Höhe von ca. 330g CO₂-Äquivalenten hervorruft [4]. Eine vergleichbare Energiemenge an fossilem Erdgas wäre mit Emissionen von rund 1400g CO₂-Äquivalenten belastet.

Im Folgenden werden die ökologischen Auswirkungen von 5 Varianten energetischer Nutzung von jeweils 1m³ Biogas gegenübergestellt (Abbildung 2).

Nicht selten werden in ländlichen Gebieten Biogasanlagen ausschließlich zur elektrischen Energiewandlung betrieben, da eine ausreichende Wärmesenke in der unmittelbaren Umgebung nicht zur Verfügung steht. Dabei wurde in den letzten Jahren ein Trend hin zu größeren Anlagen beobachtet. Diese sollen im Folgenden durch ein BHKW mit Nennleistung 500kW abgebildet werden. Bei dieser Leistungsklasse kann von einem elektrischen Wirkungsgrad von rund 40 Prozent ausgegangen werden. Ein Kubikmeter Biogas kann dann bei durchschnittlichen Methangehalten in

rund 2,2 kWh elektrische Energie gewandelt werden. Die Wandlung einer Kilowattstunde elektrischer Energie ist daher mit Emissionen von rund 150g CO₂ Äquivalenten behaftet.

In seltenen Fällen besteht auch in dezentraler, ländlicher Gegend die Möglichkeit der Wärmenutzung. Konkret bedeutet dies eine zusätzliche Energiewandlung von rund 2,8 kWh thermischer Energie (thermischer Wirkungsgrad 50%) aus einem Kubikmeter Biogas. Auch hier ist neben dem Nutzungsgrad des BHKW der Methangehalt des vorliegenden Biogases entscheidend.

Gemäß Informationen des Fachverband Biogas e.V. werden in Deutschland rund 30% der im BHKW anfallenden Abwärme in den Fermentierungsprozess eingebracht. Die verbleibende Restwärme wird schätzungsweise zur Hälfte genutzt, beispielsweise zur Temperierung von Stallungen oder zur Einbringung in Nahwärmenetze.

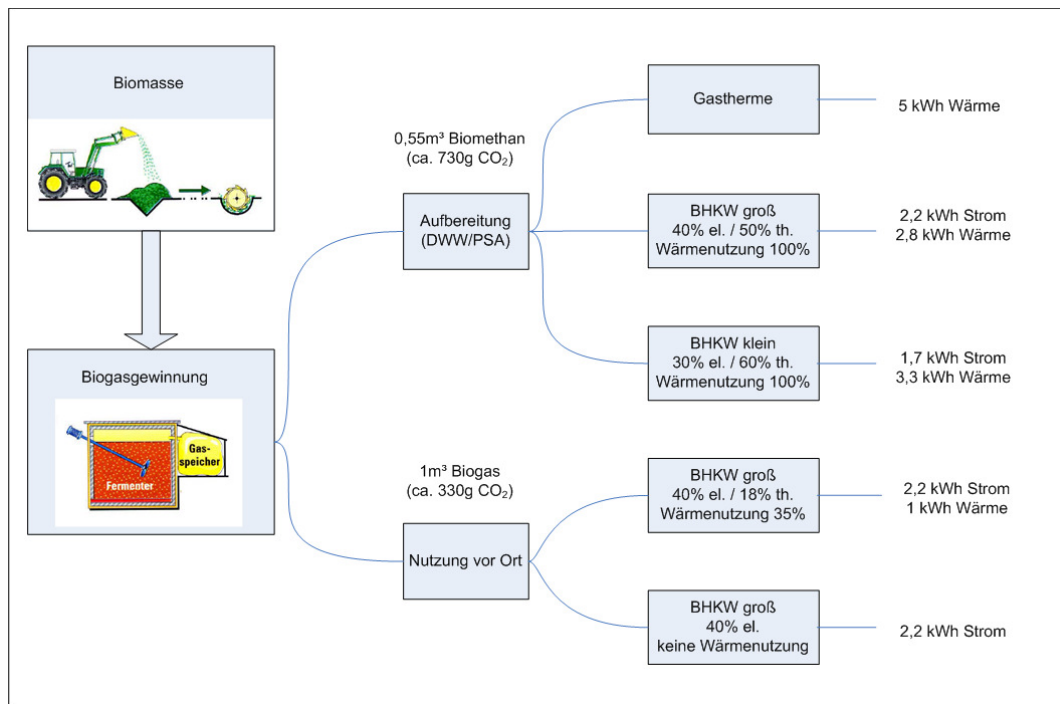


Abb. 2: Mögliche Verwendungsarten von Biogas

Eine weitere Möglichkeit stellt die Einspeisung von Biogas in neu zu errichtende lokale Mini- bzw. Mikrogasnetze dar, die das erzeugte Biogas ohne Aufbereitung zu nahegelegenen Wärmesenken transportieren, bei denen eine KWK-Nutzung möglich ist. Die dazu zu errichtende Gasnetz-Infrastruktur verringert allerdings die ökologischen Einspareffekte und muss im Einzelfall unter wirtschaftlichen Aspekten auf Machbarkeit untersucht werden.

Aufgrund der oftmals unzureichenden Wärmenutzung vor Ort liegt ein Transport des Energieträgers Biogas in die Umgebung großer Wärmesenken nahe. Als sinnvollste Methode hat sich dabei die Aufbereitung auf Erdgasqualität mit anschließender Einspeisung ins Gasnetz herausgestellt, im folgenden mit Bioerdgas bezeichnet.

Allerdings verursacht die Erhöhung des Methangehalts auf Erdgasniveau verfahrensabhängige Treibhausgasemissionen von 300g CO₂-Äquivalenten beim Verfahren der Druckwasserwäsche (DWW) bis hin zu 500g CO₂-Äquivalenten bei Einsatz der Druckwechseladsorption (PSA) pro Kubikmeter Biogas [4]. Wird auch hier ein durchschnittlicher Methangehalt von 55% zugrunde gelegt, bewirkt die Produktion von 0,55m³ Bioerdgas im Mittel rund 730g CO₂-Äquivalent unter Berücksichtigung des gesamten Herstellungsprozesses. Die technisch naheliegendste Nutzung des so gewonnen Erdgases besteht in der Verwendung in dezentralen Gasthermen und Heizkraftwerken, allerdings erfolgt für diese Art der Nutzung zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Förderung nach dem EEG. Da die Gasdistribution in Deutschland mit sehr geringen Verlusten verbunden ist und die Nutzungsgrade moderner Gasthermen deutlich über 90% liegen, können aus besagten 0,55m³ Bioerdgas bis zu 5 kWh thermischer Energie gewonnen werden. Dies führt zu klimaschädlichen Emissionen in Höhe von ca. 120g CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde (DWW) oder ca. 160g/kWh

(PSA).

Auch im Fall der Nutzung im entfernten BHKW gelten die genannten Emissionen für Produktion und Aufbereitung des Biogases. Bei garantierter Wärmeabnahme am Standort, z.B. im städtischen Gebiet, kann ein solches BHKW jedoch ganzjährig seinen hohen Gesamtnutzungsgrad von ca. 90% ausspielen. Obwohl hier der gleiche Gesamtnutzungsgrad wie in der alleinigen Wärmebereitstellung zugrunde gelegt wurde, ermöglicht die KWK höhere Treibhausgaseinsparungen, da der anteiligen Stromproduktion höhere Einsparungen entgegenstehen als der Wärmeerzeugung.

Zudem besteht im dezentralen Betrieb die Möglichkeit auch sogenannte Mini-BHKWs zum Einsatz zu bringen. Daher wird neben dem bereits eingeführten BHKW Typ mit 500kW Nennleistung auch die Klasse der 5kW BHKWs angenähert durch einen elektrischen Wirkungsgrad von 30% sowie thermischen Wirkungsgrad von 60%.

Zusammenfassung

Wie ein Vergleich mit den Emissionen des deutschen Strom- und Wärmemixes zeigt, ist jegliche Nutzung von Biogas den konventionellen Energiewandlungen ökologisch überlegen und daher sinnvoll. Allerdings stellt die möglichst vollständige Wärmenutzung aus mehrerlei Gründen eine wünschenswerte Voraussetzung dar. So können die spezifischen Emissionen pro Kilowattstunde Energie gesenkt werden und den Anlagen wird eine zusätzliche Einnahmequelle erschlossen.

Nicht unerwähnt bleiben darf an dieser Stelle, dass die Energiewandlung mittels Biogas deutlich höhere versauernde und eutrophierende Emissionen nach sich zieht. Es handelt sich jedoch bei diesen Emissionen um größtenteils lokale Effekte bei der Biogaserzeugung, die auf die Gärresteaus-

bringung zurückzuführen sind. Bis zu einer Reduzierung durch verbesserte Ausbring- oder Einarbeitungstechniken müssen die verschiedenen Emissionen gegeneinander abgewogen werden. Eine mögliche dezentrale Energiewandlung bei Entnahme von Biogas aus dem Erdgasnetz erhöht natürlich die am Wandlungsort anfallenden lokalen Emissionen, was bei der Planung und dem Betrieb von dezentralen KWK berücksichtigt werden muss.

Da bisher stets die Erzeugung elektrischer Energie im Mittelpunkt des EEG stand, wird die aus ökologischer Sicht nahezu ebenbürtige Einspeisung von aufbereitetem Biogas (Bioerdgas) ins Erdgasnetz zur Versorgung von Gasthermen oder Erdgastankstellen nicht gefördert. Ein verstärktes Einbringen von in Deutschland erzeugtem Bioerdgas wäre aber auch im Hinblick auf die Versorgungssicherheit sinnvoll.

Als mögliche Strategie zur Förderung sei an dieser Stelle auf den Entwurf eines Gaseinspeisegesetzes des Fachverbands Biogas e.V. aus dem Jahr 2001 hingewiesen, der trotz seines Alters nicht an Aktualität eingebüßt hat. Dieser Entwurf sieht je nach Größe der Anlage Zuschüsse zwischen 50 Cent und einem Euro pro Kubikmeter Bioerdgas vor. Dies entspräche zum gegenwärtigen Zeitpunkt einer Verdopplung des Erdgaspreises, sollte jedoch bei gleich bleibender Preisentwicklung fossiler Energieträger bis 2030 marktüblichen Preise entsprechen.

Durch eine solche Einspeisevergütung wäre eine Entkopplung der Gaserzeugung von der Stromerzeugung möglich, die die bisherige zwangsweise Verknüpfung von Fermentierung und Energiewandlung überflüssig macht und damit alternative Verwendungsmöglichkeiten dieses heimischen Energieträgers ermöglicht.

Quellen

- [1] T. Smolka, T. Dederichs, A. Schnettler;
Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas - Ein ökologischer Vergleich zeigt Ansätze für zukünftige Förderungsmodelle;
ew - das Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 14/2007.
- [2] U. Fritsche et al.;
Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse;
Öko-Institut e.V., 2004.
- [3] J. Nitsch et al.;
Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland;
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2004.
- [4] M. Kaltschmitt et al.;
Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, Bd. 2
Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig 2005.
- [5] W. Gruber;
Landwirtschaftliche Biogasanlagen - Technik, Betrieb, Wirtschaftlichkeit; Präsentation der Landwirtschaftskammer NRW, Bonn 2005.

Kontakt

Dipl.-Ing. Thomas Dederichs
dederichs@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94934

Dipl.-Ing. Thomas Smolka
smolka@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94940

Power and Heat from Biogas - an Ecological Comparison

The existent law for the advancement of renewable energy (EEG) supports the energy conversion from regenerative fuels, e.g. biogas, only if accompanied by a power generation. This article based on a publication of the research group [1] therefore analyzes the ecological impacts of different approaches of using biogas and tries to show the limitation of the current support structure.

Potential of Producing Biogas in Germany

To demonstrate a possible contribution of biogas to the German power and heat consumption the production potential of gasified biomass shall be outlined.

An evaluation of several studies shows a technical biomass potential ranging from 734 PJ/a [2] up to 1587 PJ/a [3] for the year 2010. The German total primary energy supply in comparison has for years been steady at around 14,000 PJ/a.

The bulk part of the biomass in Germany is fed from two sources. On the one hand residues and waste, including animal excrements, and on the other hand the amount of energy crops grown in Germany. The vast discrepancies between the different studies result mainly from different assumptions regarding the available area for cultivation of energy crops.

Figure 1 shows the contributions and usage of the potential biomass according to a study carried out by the Institute for Energy and Environment in Leipzig [4], which can be reckoned as a conservative, but very detailed estimate.

The study specifies the amount of biomass for biochemical utilization, i.e. gasification, to be approximately 269 PJ/a. This amount of energy is equivalent to a biogas capacity of around 13,200 million standard cubic meters. This assumption is based upon an average methane content of 55 percent as is

being indicated by several studies, e.g. [5].

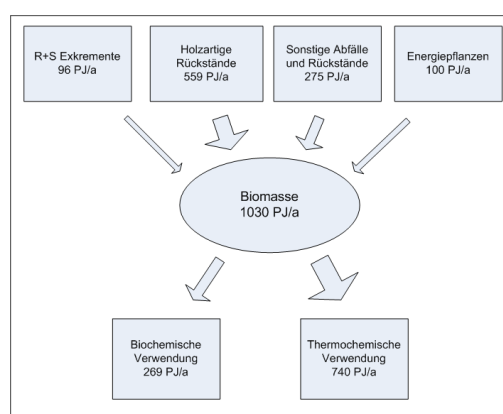


Abb. 1: Source of biogas and possible utilization

Comparison of different biogas usages for energy conversion

Even if the actual energy conversion of biomass only releases as much CO₂ as is previously extracted from the atmosphere during the growth of the crop, a holistic life cycle assessment always requires the consideration of emissions resulting from sowing, harvesting and fermentation. According to a scientific study the provision of one standard cubic meter of biogas ex fermentation results in the emission of greenhouse gases equivalent to 330g of CO₂ [4]. A comparable amount of natural gas would have a global warming potential of around 1400 g CO₂-equivalent.

The following paragraphs show the ecological impacts of 5 different ways of utilizing 1m³ of biogas (Fig 2).

Especially biogas plants in rural areas are oftentimes solely used for power generation, since no adequate heat consumption can be found in close vicinity. During the last years there has also been a trend towards higher electrical nominal outputs for these plants. In this article rural plants are represented by a 500kW electric generator. A typical implementation of this generator size is assumed to have an electrical efficiency of about 40 per cent. A cubic meter of biogas containing an average methane content is therefore transformed into 2.2 kWh of electrical energy. The provision of 1 kWh of power through these means is hence associated with emitting 150g CO₂ equivalents.

In rare cases there is also a heat requirement in rural areas, giving the opportunity of using combined heat and power plants (CHP).

This means an additional energy conversion of around 2.8 kWh of thermal energy (thermal efficiency 50%) from one cubic meter of biogas. In this case besides the efficiency factors of the combined heat and power plant the methane content of the biogas at hand is also crucial.

According to informations from the German Biogas Association (Fachverband Biogas e.V.) approximately 30% of the heat produced by the CHP unit is used within the fermentation process. Of the remaining thermal energy probably half is being used, for example heating stables or inserted into a local heat grid, the other half is wasted.

A further alternative is the infeed of biogas into local micro gas grids, which transport the biogas to a close heat sink without reformation. This way a more efficient combined heat and power process using all the converted electric and thermal energy is possible.

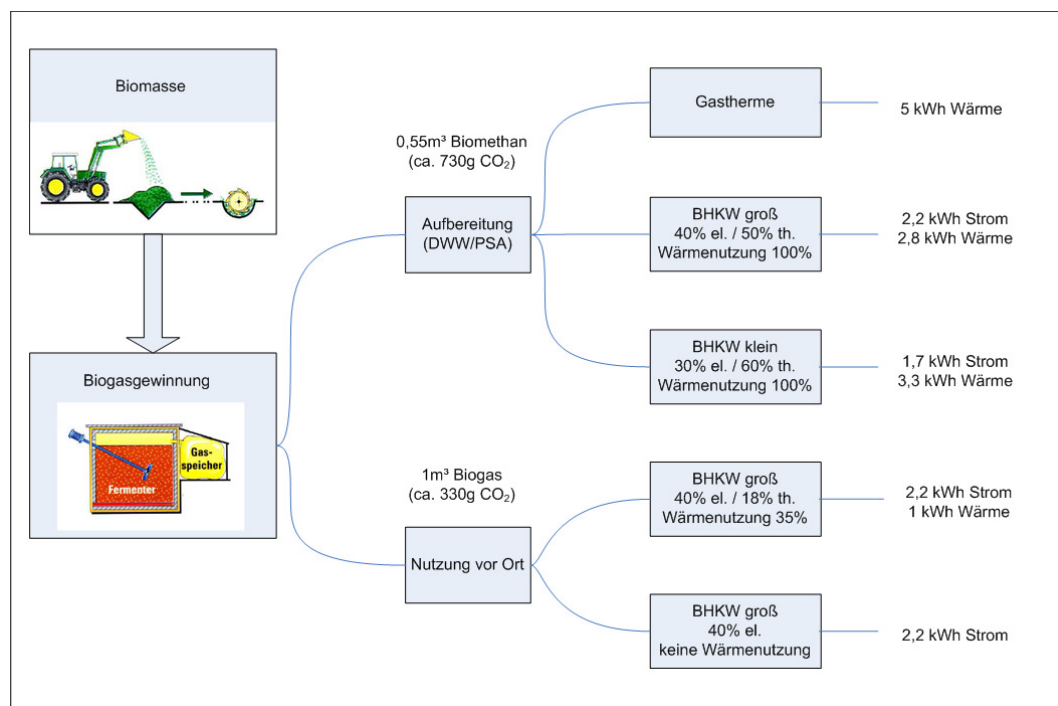


Abb. 2: Possible alternatives of using biogas

The installation of new micro gas grids however reduces the ecological advantages and its feasibility must also be studied case by case from an economic point of view. Because of the insufficient on-site heat demand a transport of the energy contained inside the biogas to urban areas with a higher heat demand suggests itself. The reformation of biogas to natural gas and distributing through the existing gas grid has proven to be the most reasonable method. Admittedly the reformation process, i.e. the increase of the methane content through purification, is the cause for a significant increase of greenhouse gas emissions ranging from 300g CO₂-equivalents when using „Druckwasserwäsche“ to about 500g CO₂-equivalents per cubic meter of biogas when using the Pressure Swing Absorption (PSA) [4]. If an average methane content of 55 percent is assumed, the production of 0.55m³ of natural gas from reformed biogas has a total global warming potential of 730g CO₂-eq when considering the complete life cycle.

The most obvious application for the processed gas from a technical point of view is the usage in gas central heating or district heating, even though this kind of use is currently not entitled to a federal aid according to the renewable energies law. Since German gas distribution is associated with very low losses and the total efficiency of modern central heating equipment is well above 90%, the above mentioned 0.55m³ of processed gas can be transformed to around 5 kWh of thermal energy. This leads to climate relevant emissions of 120g CO₂-eq. per kWh (DWW) or approx. 160g/kWh for PSA.

In the case of using a distant CHP unit the same emissions for production and reformation of the biogas apply. A sufficient heat sink near the distant CHP, e.g. at an urban location, would help guarantee the utilization of the high combined efficiency

of about 90%. Even though the efficiency factor is the same as that of a central heating, the combined generation of heat and power allows more greenhouse gas reductions, since the production of electric energy is usually connected with higher specific emissions than thermal energy.

Furthermore there is also the possibility of using micro CHP units at a distant urban location. Therefore a new class of CHP units is introduced. Besides the already mentioned 500kW units, a class of 5kW CHP units is approximated assuming an electrical efficiency of 30% as well as a thermal efficiency of 60%.

Summary

A comparison to the emissions of German power and heat supplies shows that every method of using biogas is superior to conventional energy conversion from an ecological point of view and therefore sensible. However maximizing the share of used thermal energy should be preferred for several reasons. First of all a significant reduction in specific emissions is possible. Secondly an additional source of income opens up for the combined heat and power units.

It has to be mentioned that the energy conversion from biogas results in significantly higher emissions regarding acidification and eutrophication potential. As these emissions are mostly local effects originating from the application of fermentation waste. Until a reduction of these emissions is possible due to improved application processes the different kind of emissions have to be compared. A possible distributed generation also increases the local emissions in the area of the generating unit, which must be considered when planning a decentralized CHP unit.

Until now the generation of electrical energy has been at the center of the renewable energies act, meaning that the ecologically equivalent reformation and distribution of biogas via the natural gas grid for purposes like supplying central heating or gas filling stations is not subsidized. However a stronger commitment to biogas produced in Germany could also help to reduce dependencies and strengthen the security of supply.

A possible strategy for supporting biogas production in Germany is the draft of a gas support law proposed by the German Biogas Association in the year 2001, that is still up-to-date even considering the time passed. This proposal introduced subsidies between 50 cent and 1 Euro per cubic meter of reformed biogas depending on the size of the fermentation unit. Compared to current prices this would equal an increase of at least 100%, but would be similar to expected prices of natural gas in the year 2030.

This kind of subsidy might help to decouple the gas production from the power generation, which makes the fermentation process independent from energy conversion and would therefore stimulate alternative uses of this domestic energy source.

Fortunately the German Federal Government kept this in mind when introducing the Meseberg Climate Protection Program in 2007, making an occupation with this topic worthwhile.

References

- [1] T. Smolka, T. Dederichs, A. Schnetler;
Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas - Ein ökologischer Vergleich zeigt Ansätze für zukünftige Förderungsmodelle;
ew - das Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 14/2007.
- [2] U. Fritsche et al.;
Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse;
Öko-Institut e.V., 2004.
- [3] J. Nitsch et al.;
Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland;
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2004.
- [4] M. Kaltschmitt et al.;
Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, Bd. 2
Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig 2005.
- [5] W. Gruber;
Landwirtschaftliche Biogasanlagen - Technik, Betrieb, Wirtschaftlichkeit; Präsentation der Landwirtschaftskammer NRW, Bonn 2005.

Contact

Dipl.-Ing. Thomas Dederichs
dederichs@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94934

Dipl.-Ing. Thomas Smolka
smolka@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94940

Innovative IKT-Infrastrukturen für Smart Grid Anwendungen



Das FP6-Projekt S-TEN unter der Koordination der FGH e.V. entwickelt innovative Technologien zur Überwachung und Steuerung dezentraler Energieversorgungsnetze, indem semantische Ontologien für die Identifizierung der Netzwerkelemente sowie für die Kommunikation und Automatisierung genutzt werden. Das Netzwerk und sein Management werden damit "intelligenter". In dem auf die erforderliche Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) fokussierten Projekt werden mehrere Prototypen im Anwendungsfeld der verteilten Erzeugung und des Lastmanagements in Verteilungsnetzen entwickelt.

Einleitung

Aktuelle politische Strategien zu Klimaschutz und erneuerbaren Energien werden zu einem deutlichen Anstieg dezentraler Erzeugung mit unterschiedlicher Charakteristik führen. Die Integration dieser Anlagen in die Mittel- und Niederspannungsnetze stellt neue Anforderungen an einen intelligenten Netzbetrieb: höhere Flexibilität, mehr Dezentralität und stärkere Automatisierung in den Kontrollprozessen kennzeichnen ein solches Smart Grid und sollen einen Mehrwert für alle beteiligten Stakeholder bereitstellen.

Einen wichtigen Schritt hin zu einer intelligenten Einbindung dezentraler - zum Teil volatiler - Energiequellen macht das EU-Forschungsprojekt S-TEN (*Intelligent Self-describing Technical and Environmental Networks*). Es wendet die Technologien des Semantischen Webs auf die effiziente Überwachung, Steuerung und Wartung sich selbst-organisierender physikalischer und technischer Netzwerke mit dynamischen Netzwerkkomponenten an. Aus der Vielzahl von denkbaren Applikationen im Bereich der (elektrischen) Energiesysteme werden einige im S-TEN Projekt als Demonstratoren umgesetzt.

Die S-TEN Architektur

Im S-TEN Ansatz wird die Akquisition verteilter Informationen und die Prozesskontrolle durch sich selbst-beschreibende Geräte unterstützt, die ihre Existenz, Position, ihre zur Verfügung stehenden Dienste und ihre technische Beschreibung bekannt geben. Durch den eigenständigen Eintrag in eine Registry können sie von Anwendern auf Basis der gesuchten Dienstleistungen aufgefunden werden. Die für die Definition der Metadaten erforderlichen Ontologien werden aus internationalen Standards, wie der IEC 61850 Normenreihe, abgeleitet und semantisch aufbereitet. Mit Hilfe des Semantischen Webs ist der Computer in der Lage, Daten nicht nur zu verarbeiten, sondern ihren Sinnzusammenhang zu "verstehen". Als Konsequenz können Maschinen Daten mit einem hohen Automatisierungsgrad verarbeiten, indem semantisch definierte Regeln angewendet werden - was heute nur durch ein festes Coding der Software-Logik möglich ist. Zusätzlich können Best-Practise-Advices für Entscheidungsträger bereitgestellt werden, um z.B. angemessen in kritischen Situationen wie Stabilitätsproblemen im Stromnetz (Spannung, Frequenz) reagieren zu können.

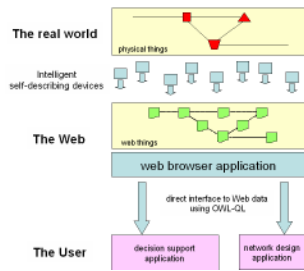


Abb. 1: S-TEN Ansatz

Anwendungen in elektrischen Netzen

Im Projekt werden Demonstratoren zur Praxis-Evaluation der S-TEN Technologie entwickelt. Aus dem Bereich dezentraler elektrischer Anlagen (DEA) sollen hier zwei vorgestellt werden:

Die Applikation **Steuerung von verteilten Ressourcen in Elektrischen Netzen** unter Federführung von IFHT und FGH e.V. hat die Überwachung von DEA (z.B. Windenergie, PV und KWK-Anlagen) und weiterer Komponenten (z.B. Speichereinheiten, Schalter und Kurzschlussanzeiger) in Verteilungsnetzen zum Ziel, um das Netzwerkmanagement mit Blick auf Fernsteuerung und Automatisierung zu verbessern. Hierzu wird die Systembeobachtbarkeit durch Mechanismen zu Ereignis und Regel basierten Maßnahmen (z.B. Alarmer) ergänzt. Langfristig soll der Prototyp um Steuerungsmöglichkeiten auf Basis von LCA-Parametern, wie sie in der Forschungsgruppe Nachhaltige Energiesysteme am IFHT erarbeitet werden, erweitert werden.

Im Prototyp **Sekundärkontrolle von elektrischen Netzen** implementiert der spanische Projektpartner LABEIN einen dynamischen Ansatz für die Steuerung von Microgrids unter Berücksichtigung des Zustands und der dynamischen Fähigkeiten der unterschiedlichen Anlagen im LABEIN-Testfeld. Die semantisch aufbereitete Anlagenbeschreibung ist dabei Grundlage für die Sekundärregelung des Netzwerks sowie für die Steuerung einzelner Anlagen.

Damit stellt das Projekt eine solide Basis für ein breites Feld von Betriebs- und Geschäftsmodellen im Bereich der elektrischen Erzeugung oder des Lastmanagements bereit. Die Weiterentwicklung der Prototyp-Applikationen wird durch S-TEN User Groups unterstützt, die externen Interessenten wie Netzbetreibern oder Herstellern eine frühzeitige Einbindung in die Projektarbeit ermöglichen.

S-TEN Innovationen

Die S-TEN Anwendungen ermöglichen die Bereitstellung von Daten verteilter Netzwerkkomponenten zu niedrigen Kosten und unabhängig von ihrer Position. Die Semantik ist dabei der Schlüssel für mehr Intelligenz im Netzbetrieb. Sie ermöglicht dynamische Betriebsweisen und damit einen Mehrwert für alle teilnehmenden Stakeholder aufgrund von maßgeschneiderten Geschäftsmodellen. Der Einsatz des Internets für das Netzmanagement im Umfeld der elektrischen Energieversorgung wird heute mit Blick auf Datensicherheit und Echtzeitanforderungen noch kritisch gesehen. Zukünftige Netze mit einem verstärkten Einsatz von DEA erfordern allerdings ein intelligentes Management, das sich der flexiblen Struktur des Internets bedient. Die S-TEN Technologie kann hier für die Kontrolle von DEA auf der einen, und ggf. steuerbarer Lasten auf der anderen Seite einen wesentlichen Beitrag liefern.

Weitere Informationen

S-TEN, FP6-IST-2005-027683

Website: www.s-ten.eu

Kontakt

Dipl.-Phys. Bernhard Schowe-v.d. Brellie
schowe@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80-949 00

Innovative ICT-infrastructure for smart grid applications



The innovative S-TEN technology developed in the homonymous FP6-project under the coordination of FGH e.V. is capable for monitoring and operating distributed energy networks by using semantic ontologies for the identification of network elements as well as for their communication and automation purposes. Thus, the network becomes more "intelligent", hence, improving its management. Within the information- & communication-technology (ICT)-based project several prototypes are developed addressing the field of dispersed generation and load management in electrical distribution networks.

Introduction

Current policies on emission reduction and renewable energy imply a significant increase of distributed energy resources with different characteristics to be integrated in the medium- and low-voltage system, posing new requirements to network operation such as becoming more flexible, more decentralised and automated in its controlling processes. Hence, network operation has to become more intelligent and provide added value to all participating stakeholders.

A substantial step towards the intelligent integration of decentralised - partly fluctuating - energy resources is made by the EC funded research project S-TEN (*Intelligent Self-describing Technical and Environmental Networks*). It applies Semantic Web technologies to efficiently monitor, operate and maintain self-organizing physical and technical networks. Based on the self-describing and decision support capabilities this approach enables the monitoring and automated control of dynamic networks of various single components shifting in space and time. Various applications in the field of energy systems are conceivable - some of them being analysed and demonstrated in detail within the S-TEN project.

The S-TEN Architecture

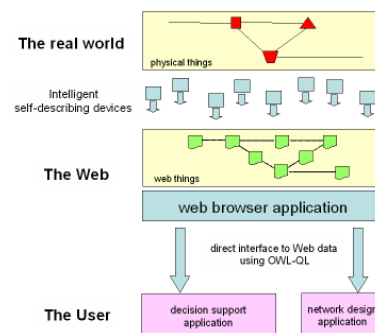


Abb. 1: S-TEN approach

Applying the S-TEN approach, the acquisition of distributed information and process control is assisted by self-describing devices that announce their existence, position, available web services and technical self-descriptions. They register themselves in a registry and can be tracked by service consumers looking for a matching service. The ontologies for the definition of the required metadata are derived from international standards like the IEC 61850 standard series and will be semantically enhanced. Using Semantic Web technologies implies that the computer does not only process but "understands" the data it handles. As a consequence it can operate on the data, thus enabling a high degree of automation by inferencing and processing semantically

defined rules which - up to now - is done by a priori programming the logic within the software. In addition, best-practise support can be provided to decision makers offering a means to react adequately to critical situations like stability problems (voltage or frequency) in the power grid.

Application in electrical networks

Within the S-TEN project several prototype applications are developed evaluating the S-TEN technology, two of them addressing the operation of dispersed generation (DG) in electrical distribution networks:

The prototype application **Control of distributed resources in electrical power networks** developed and implemented by IFHT and FGH is dedicated to monitor DG in distribution networks (e.g. wind power, PV and CHP units) and further components (e.g. storage devices, short-circuit displays and disconnectors) in order to improve the network management in terms of remote control and automation capabilities. Beside the monitoring functionality an event and rule handling package will be implemented. In future, the prototype application will be enhanced with control mechanisms taking into account ecologic and economic parameters as elaborated in the research group sustainable power systems at IFHT.

The prototype application **Secondary control of a Microgrid** developed by LABEIN, Spain, implements a dynamic approach to microgrids taking into account the status of the different resources that are part of the test bench and their dynamic capability. The self-descriptions of the resources will allow the central controller to operate the entire network with respect to secondary control as well as each resource connected to the network.

Thus, the project provides a solid basis for a broad range of operational and business models in the field of electrical generation and dispatchable load management approaches. The further development of

possible applications is granted by S-TEN User Groups open to the interested public and comprising external representatives of grid operators, suppliers and research organisations.

S-TEN Innovations

The S-TEN web application enables the provision of data of distributed energy network resources at low cost independent of their location. Semantics are the key for an intelligent form of cooperation and process control. They provide dynamic operation schemes and, hence, added value based on tailor made business concepts to all participating stakeholders like owners and operators with partly diverging interests. Up to now, in the field of electricity supply industry, concerns regarding the security and privacy of data as well as real-time requirements have postponed the use of Web technologies for network management. However, future networks with a high number of DG units require an intelligent network management. The S-TEN technology, applied to a network of a steadily increasing DG - private and commercial CHP plants and PV - on the one hand and dispatchable loads on the other hand, would provide an essential and cost effective contribution to an efficient network management. This benefit is even increased when regarding dynamic patterns of loads, generation and storage units within the control area.

Further informationen

S-TEN, FP6-IST-2005-027683

Website: www.s-ten.eu

Contact

Dipl.-Phys. Bernhard Schowe-v.d. Brelie
schowe@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80-949 00

Life Management von 123 kV Leistungsschaltern

Life Management von Schaltanlagen, mit dem Ziel der optimierten Nutzung der Betriebsmittel, gehört zu den aktuellen Aufgaben der Netzbetreiber. Eine essentielle Eingangsgröße des Life Managements ist der Zustand der Betriebsmittel. Darüberhinaus soll mit Hilfe von Alterungsmodellen das zukünftige Verhalten von Betriebsmitteln und das Ende deren Lebensdauer prognostiziert werden, wobei die betriebsmittelspezifischen Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind.

Einleitung und Grundlagen

Die Entwicklung verschiedener Alterungs- bzw. Zustandsmodelle für Hochspannungsbetriebsmittel ist das Ziel laufender Forschungsarbeiten. Im Prozess des Life Managements kann der Zustand eines Betriebsmittels durch den Einsatz verschiedener Verfahren bestimmt und beschrieben werden [1]. In abgeschlossenen Arbeiten konnten Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Parameter, wie beispielsweise Alter, Schalthäufigkeit, Einsatzbereich auf das Schaden- und Störungsverhalten und somit auf den Zustand eines Leistungsschalters in Abhängigkeit seiner Lösch- und Antriebs-Technologie gewonnen werden.

Die Auswertungen basieren auf Betriebsmittel-, Ereignis und Instandhaltungsdaten eines Netzbetreibers, die sich auf einen repräsentativen Teil des Gesamtnetzes beziehen. Es werden 6 Freiluft-Leistungsschalterttypen näher betrachtet, die durch jeweils 2 Kennziffern bezeichnet werden. Die Bezeichnung „SF“ symbolisiert somit einen Leistungsschalter (LS) mit Selbstblas-Technik und Federspeicherantrieb.¹ Abbildung 1 zeigt das entsprechende Mengengerüst der Leistungsschalter im Jahre 2007 in Abhängigkeit des Alters.

Des Weiteren werden zwei Arten von Instandhaltungsmaßnahmen betrachtet. Dabei kann eine „Inspektion“ als intensive Sichtkontrolle bezeichnet werden, die

auch kleinste Wartungsarbeiten, wie beispielsweise Reinigung oder Korrektur des Isoliermittelstands, beinhalten können. Dieser Inspektion steht die weit aufwändigere „Wartung“ gegenüber. Dabei werden u. a. einige Teile wie Verschraubungen, Dichtungen etc. zustandsabhängig oder vorbeugend ausgetauscht.

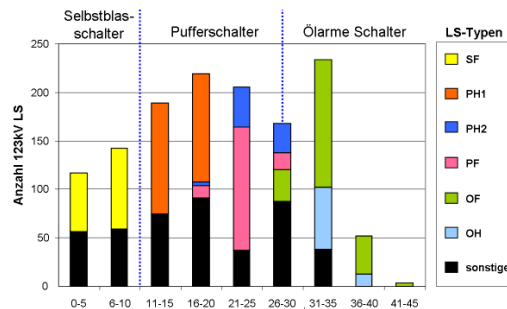


Abb. 1: Altersabhängiges Mengengerüst

Altersabhängiges Schadensverhalten

Der Zustand der Leistungsschalter kann mit Hilfe von inspezierten Schäden während einer Instandhaltungsmaßnahme beschrieben werden. In Abb. 2 ist das resultierende Altersverhalten der Leistungsschalter dargestellt. Die Kurve „Anzahl der Schäden pro Inspektion“ beschreibt in Abhängigkeit des Alters und unter Berücksichtigung aller durchgeführten Inspektionen, wie viele Schäden bei einem bestimmten LS-Typ detektiert wurden. Die Grafik zeigt einen vom Alter abhängigen exponentiell steigen-

¹ S=Selbstblas-, P=Puffer-Technik (SF₆), O=Ölarm, F=Feder-, H=Hydraulik-Antrieb

den Trend des Schadensverhaltens, wobei die ersten 15 Betriebsjahre kaum Veränderungen aufweisen. Ab einem Alter von 25 Jahren ist jedoch vermehrt mit durch Umwelteinflüssen hervorgerufenen Schäden zu rechnen, die überwiegend durch undichte Isolatoren (Flanschkorrosion) und Schutzanstriche hervorgerufen werden.

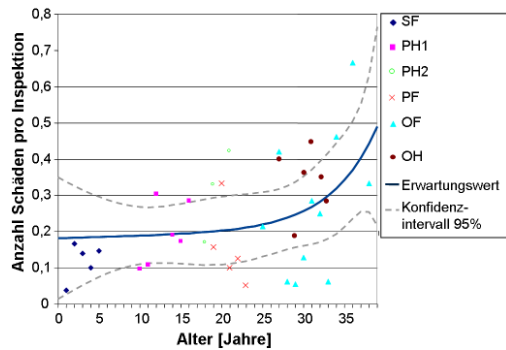


Abb. 2: Altersabhängiges Schadensverhalten

Altersabhängiges Störungsverhalten

Das Verhalten der Leistungsschalter unter Berücksichtigung des Störungsaufkommens kann mit Hilfe einer altersabhängigen Störungsrate beschrieben werden, die durch

$$\lambda_{A_j} = \frac{100 \cdot \sum_{x,y=j}^m S_{B_x T_y}}{\sum_{x=j}^m N_{B_x}} \Bigg|_{j=0}^n = \left[\frac{\text{Störungen}}{100 \text{ LS Jahren}} \right]_{j=0}^n$$

definiert ist.² Hierbei ist es unerlässlich, die Störungsrate mit der Anzahl von Leistungsschaltern zum Störungszeitpunkt zu bestimmen, da der Einfluss eines veränderten Mengengerüsts auf die Störungsrate nicht zu vernachlässigen ist [2].

In Abb. 3 ist die Störungsrate in Abhängigkeit des Betriebsmittelalters dargestellt. Das Alterungsverhalten der Leistungsschalter ist durch eine typische Badewannenkurve geprägt, die sich durch die Kombination von elementaren und unabhängi-

gen Alterungskurven (z.B. Inbetriebnahme, Verschleiß etc.) ergibt [3]. Die drei Phasen der Badewannen-Charakteristik können wie folgt erläutert werden:

Phase 1: Die sogenannten Frühausfälle, mit einem Maximalwert von 3,0 Störungen pro 100 LS Jahren, treten überwiegend in den ersten Betriebsjahren bis zu einem Alter von 10 Jahren auf. Fehlerhafte elektronische Bauteile wie beispielsweise SF₆-Dichtewächter und Hilfsschalter sind hauptsächlich für diese Störungen verantwortlich.

Phase 2: In einem Alter von etwa 10 bis 25 Jahren ist das Störungsverhalten durch stochastische Prozesse geprägt. Stochastische Ausfälle zeichnen sich nicht durch eine Häufung von Problemen mit bestimmten Komponenten aus. Hier sind verschiedenste Schalterelemente am Störungsaufkommen beteiligt, wodurch weitgehend eine konstante Rate von etwa 0,8 Störungen pro 100 LS Jahren hervorgerufen wird.

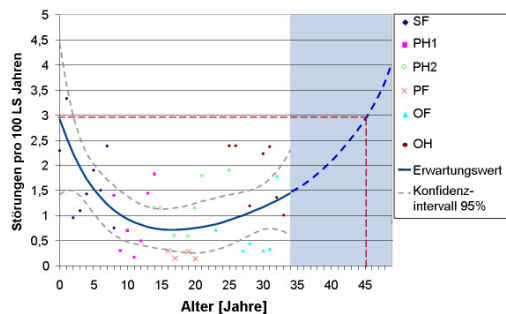


Abb. 3: Altersabhängiges Störungsverhalten

Phase 3: Verschleißausfälle treten ab einem Alter von 25 Jahren vermehrt auf und werden durch einen exponentiellen Anstieg der Störungsrate beschrieben. Ursächlich sind hier mechanisch und elektrisch stark beanspruchte Komponenten. Besonders im Bereich des Antriebs sind häufig Störungen auf Grund von Undichtigkeiten im Hydrauliksystem sowie defekte Dämpfungsbremsen detektiert worden.

Darüber hinaus ist eine Abschätzung der

² λ_{A_j} = Störungsrate im Alter A_j ; $S_{B_x T_y}$ = Anz. Störungen für LS mit Baujahr B_x im Betrachtungsjahr T_y ; N_{B_x} = Anz. LS mit Baujahr B_x ; m = Anz. Betrachtungsjahre; n = Anz. Baujahre.

Lebensdauer in Abhängigkeit des prognostizierten zukünftigen Störungsverhaltens möglich. Der Zeitpunkt, an dem die verschleißbedingte Störungsrate die Werte der Frühausfälle ($\lambda = 3,0$) erneut erreicht, kann beispielsweise als Kriterium für das Ende der Nutzungsdauer herangezogen werden. In diesem Fall beträgt die erwartete Nutzungsdauer für 123 kV LS etwa 45 Jahre (siehe Abb. 3).

Feldtyp und Schaltspielzahl

Die Betrachtung der unterschiedlichen Feldtypen sowie der Schaltspielzahlen führt zu weiteren Einflussfaktoren auf das Störungsverhalten. Leistungsschalter werden mit unterschiedlichen Belastungen beansprucht, die in Abhängigkeit des Feldtyps (Kupplungs-, Leitungs-, Trafofeld), durch das Schalten von Kurzschlussströmen sowie der Schalthäufigkeit charakterisiert werden.

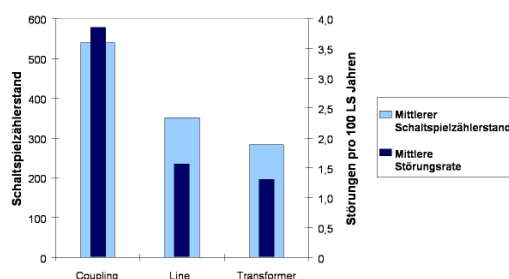


Abb. 4: Einfluss von Feldtyp und Schaltspiel

In Abb. 4 werden die mittlere Störungsrate sowie der mittlere Schaltspielzählerstand zum betrachteten Zeitraum der relevanten Leistungsschalterttypen für verschiedene Feldtypen dargestellt. Besonders Leistungsschalter in Kupplungsfeldern bei Schaltanlagen mit Mehrfachsammlerschienen sind häufig von Störungen betroffen. Dabei führt die hohe Schalthäufigkeit in Kupplungsfeldern zu einer höheren Störungsrate.

Instandhaltungsfreie Zeit

Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass auch nach Instandhaltungsmaßnahmen vermehrt Störungen auftreten können. Um den Einfluss verschiedener Maßnahmen auf das Störungsverhalten zu untersuchen, kann die Störungsrate in Bezug auf die „instandhaltungsfreie Zeit“ ermittelt werden. Diese Zeitspanne ist abhängig vom Instandhaltungszyklus und wird durch die betrachtete Instandhaltungsmaßnahme begrenzt. Sobald die betrachtete Maßnahme stattfindet, beginnt die Zeitspanne bei $t=0$. Eine Differenzierung zwischen Inspektion und Wartung ist wichtig, da aufgrund des unterschiedlichen Instandhaltungsaufwands verschiedene Einflüsse auf das Störungsgeschehen erwartet werden. Für die „wartungsfreie Zeit“ errechnet sich das in Abb. 5 dargestellte Störungsverhalten, welches ebenfalls durch eine Badewannen-Charakteristik geprägt wird. Für den Peak nach 4-5 Jahren sind inspizierte Schäden verantwortlich, die bei der Betrachtung des Störungsverhaltens nicht weiter berücksichtigt werden.

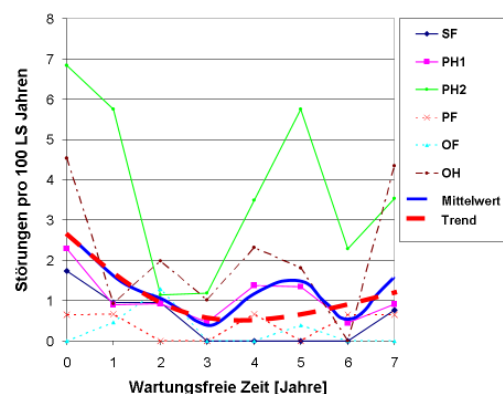


Abb. 5: Störungen in wartungsfreier Zeit

Nach einer Wartungsmaßnahme kommt es im Mittel zu einer Rate von etwa 2,5 Störungen pro 100 LS Jahren, die in den darauffolgenden 4 Jahren auf ein Minimum von 0,5 abklingt. Störungen an Antrieb und Steuerung, die zum Teil auf die Wartungsmaßnahme selbst zurückzuführen

sind, begründen die hohe Störungsrate nach der Aktion. Überwiegend sind Undichtigkeiten von Anschlüssen, die während der Wartungsmaßnahme geöffnet und getauscht werden, für die zusätzlichen Störungen verantwortlich.

Die Auswertung der Störungsrate in Abhängigkeit von der inspektionsfreien Zeit zeigt, dass nach der Maßnahme „Inspektion“ keine Erhöhung der Störungsrate zu erwarten ist. Bei der Evaluierung neuer Instandhaltungsstrategien bzw. bei der Veränderung von Zyklen oder Aufwand, muss somit der Einfluss verschiedener Instandhaltungsmaßnahmen auf das Störungsgeschehen berücksichtigt werden. So ist unter bestimmten Voraussetzungen sogar eine Reduktion des Störungsaufkommens bei einer Verlängerung des Zyklus möglich, wenn innerhalb von 8 Jahren nach einer Wartung mit keinem erheblichen Störungsanstieg zu rechnen ist. Dies hätte einen großen Einfluss auf die Balance zwischen Kostenreduktion und Betriebsmittel-Qualität.

Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Evaluierungen zeigen, dass das Alter der Betriebsmittel einen Einfluss auf das Schadens- und Störungsverhalten hat. Dabei ist das Alterungsverhalten der Schalter durch einen exponentiellen Anstieg des Schadenaufkommens und durch eine charakteristische Badewannenkurve in Bezug auf das Störungsgeschehen gekennzeichnet. Darüber hinaus können zusätzlich hohe mechanische Belastungen der Schalter (z.B. durch hohe Schaltspielzahlen) zur Erhöhung der Störungsrate führen. Weiterhin ist der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen auf das Betriebsmittelverhalten nicht zu vernachlässigen. Besonders nach intensiven Maßnahmen kann es direkt nach der Maßnahme zu einer höheren Störungsrate kommen.

In laufenden Arbeiten wird das Verhalten von 123 kV Drehtrennschaltern unter oben aufgeführten Aspekten untersucht. Weiter-

hin werden der Einfluss einer veränderten Instandhaltungsstrategie sowie die Korrelation zwischen einem inspezierten Schaden und einer möglichen Folgestörung ermittelt. Um auch die ökonomischen Aspekte des Asset Managements zu integrieren, werden in Zukunft zusätzlich verschiedene Szenarien unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet.

Quellen

- [1] U. Zickler, H. Krings, A. Schnettler, S. Federlein. *Life Management von Schaltanlagen mit moderner Sekundärtechnik*. Internat. ETG-Kongress 2007, Karlsruhe, Oktober 2007
- [2] S. Federlein, A. Schnettler, J. Schneider, U. Zickler. *Asset Management Processes for Future Substation Technologies*. CIGRE SC B3 Colloquium, Berlin, September 2007
- [3] D. Drescher, G. Balzer, C. Neumann, R. Meister. *Beurteilung des Alterungsverhaltens von Hochspannungsleistungsschaltern*. ew Jg. 104 (2005), Heft 3

Kontakt

Dipl.-Ing. Stefan Federlein
federlein@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94959

Dipl.-Ing. Christian Hille
hille@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94915

M.Sc. Tirinya Cheumchit
cheumchit@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94937

M.Sc. Rattanakorn Phadungthin
phadungthin@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94941

Life Management of 123 kV Circuit Breakers

Life Management of substations is a current task of network operators with the goal to optimally use equipment. An essential input parameter for life management is the condition of the equipment. Moreover, its prospective behaviour and the end of life time shall be expected by means of ageing models by considering the equipment specific influencing factors.

Introduction and fundamentals

The development of various ageing and condition models for high voltage equipment is one objective of current research studies. In the process of life management, the condition of equipment can be determined and described by application of different methods [1]. In concluded works, the influence of different parameters such as age, switching frequency and area of application on the minor and major failure behaviour as well as on the condition of circuit breakers (CB) can be obtained.

The evaluation is based on equipment, event and maintenance data of a network operator, which refers to a representative part of the whole network. Six types of circuit breakers from air insulated switchgears are closely considered by identifying 2 code digits. The term SS' represents a circuit breaker with self blast technique and spring drive.³ Figure 1 shows the corresponding quantity structure of circuit breakers in year 2007 with respect to their age.

Furthermore, two kinds of maintenance measures are observed. Thereby, an "inspection" can be identified as an intensive visual check, which can also include smallest servicing works such as cleaning or correction of the insulation state. This inspection is different from the complex "servicing." Thereby, some parts like screwing or sealing etc. are replaced depending on

the state or as a preventive procedure.

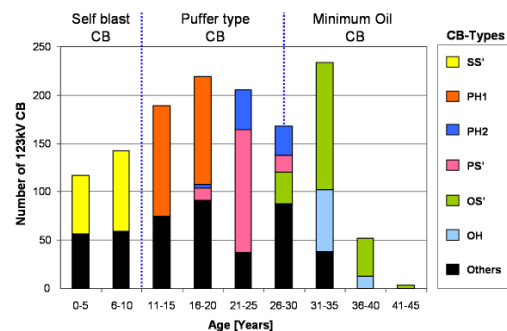


Fig. 1: Age-dependent quantity structure

Ageing behaviour considering minor failures

The conditions of circuit breakers can be described by means of inspected minor failures during maintenance. Figure 2 shows the resultant ageing behaviour of circuit breakers. The "number of minor failures per inspection" specifies how many minor failures were detected on a certain CB type depending on the age in relation to all implemented inspections. The graph shows an exponentially growing trend of the failure occurrence depending on the age. From aged 25, the minor failures increase predominantly because of the environmental influence that leads to flange

³S=self blast-, P=puffer-technique (SF₆), O=minimum oil, S'=spring-, H=hydraulic-drive

corrosion and defective protective coating.

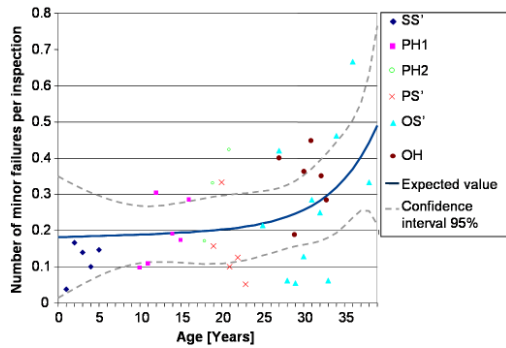


Fig. 2: Minor failures per inspection

Ageing behaviour considering major failures

The behaviour of circuit breakers under consideration of major failure occurrence can be described by means of an age-dependent major failure rate, which is defined as following equation.⁴

$$\left[\lambda_{A_j} = \frac{100 \cdot \sum_{x,y=j}^m S_{B_x T_y}}{\sum_{x=j}^m N_{B_x}} \right]_{j=0}^n = \left[\frac{\text{Major failures}}{100 \text{ CB years}} \right]$$

It is necessary to calculate the major failure rate with the number of circuit breakers at the moment of failure occurrence. The influence of changing quantity structures on the major failure rate cannot be disregarded by using the current quantity structures in combination with previous major failures [2].

In Figure 3 the major failure rate depending on the age of equipment is illustrated. The ageing behaviour of circuit breakers follows the typical characteristic of the bath tub curve, which is the result of the combination of elementary and independent ageing curves (e.g. teething, deterioration, etc.) [3]. The three phases of the bath-tub-

characteristic can be explained as the following:

Phase 1: The so called “teething failures” with a maximal value of 3.0 major failures per 100 CB years occur predominantly at the beginning of operating time until an age of 10 years. Faulty electrical components such as SF₆-density monitor and auxiliary switch are mainly responsible for these major failures.

Phase 2: At the age of approximately 10 to 25 years the major failure occurrence is determined by stochastic processes, known as random failures. Stochastic major failures are not characterized by an accumulation of problems with certain components. Here, the most different switching elements contribute to the major failure occurrence, whereby a constant rate of 0.8 major failures per 100 CB years is caused.

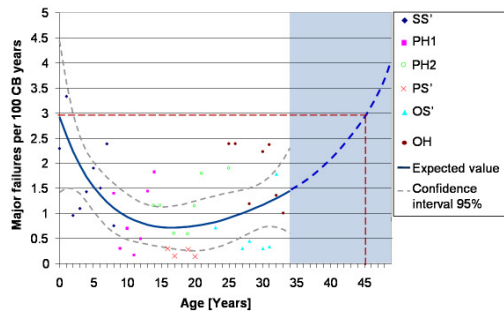


Fig. 3: Major failure rate

Phase 3: Deteriorated major failures increasingly arise from an age of 25 years and are characterized by an exponential rise of the “wear out” failure rate. Causes are heavily mechanical and electrical stressed components. Especially the drive is frequently affected by leakages in the hydraulic system and defect damping breaks. Moreover, it is possible to estimate the life cycle depending on the expected prospective major failure occurrence. The point of time, in which the deteriorated conditioned major failure rate reaches the values of the

⁴ λ_{A_j} = major failure rate in age A_j ; $S_{B_x T_y}$ = number of major failures for CB with constructed year B_x in considered year T_y ; N_{B_x} = number of CB with constructed year B_x ; m = number of considered years; n = number of constructed years

teething failures ($\lambda = 3.0$) again, could be considered as one criterion for the end of the service life. In this case the expected service life for 123 kV CB is app. 45 years (cf. Fig. 3).

Bay type and switching cycles

The observation of different bay types as well as the number of switching cycles leads to further influencing factors on the major failure occurrence. Circuit breakers are stressed with different loads which are, in dependency of the bay type (coupling, line, transformer bay), characterized by the application of short-circuit current as well as switching frequency.

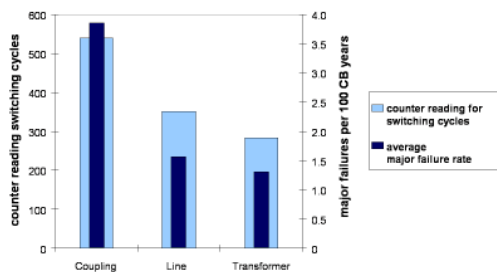


Fig. 4: Influence of bay types and switching cycles

In Figure 4 the average states of counting readers of switching cycles in the observed time period of the relevant circuit breaker types for different bay types are shown. Especially, circuit breakers in coupling bays at switching stations with multiple busbars are often affected by major failures. Consequently, the high switching frequency of coupling bays leads to an increased occurrence of major failures.

Maintenance free time

Operational experiences have shown that further major failures may also occur after maintenance measures. In order to investigate the influence of various measures on

the major failure occurrence, the major failure rate can be determined with respect to the “maintenance free time.” This time span depends on the maintenance cycle and is limited by the considered maintenance measure. When the considered measure takes place, the time span starts at $t=0$. A differentiation between inspection and servicing is important because different effects on the major failure occurrence are visualised due to the different maintenance complexity. For the “servicing free time” the major failure occurrence as shown in Figure 5 is calculated. It also follows the bath-tub-characteristic. The peak after 4-5 years is wrongly related to inspected minor failures, which do not have to be considered any longer by observing the major failure occurrence.

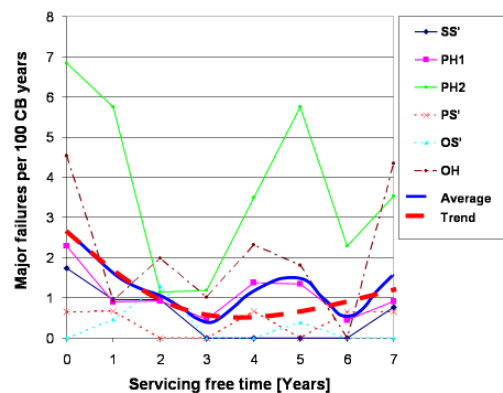


Fig. 5: Major failures in servicing free time

After a servicing measure, an average rate is app. 2.5 major failures per 100 CB years, which decays after 4 years to a minimum of 0.5. Major failures at drive and control, which are partially the effect of maintenance measure, justify the high major failure rate after the procedure. Predominantly, leakages of connections, which are opened and changed during the servicing measure, are responsible for additional major failures.

The evaluation of the major failure rate depending on the inspection free time indicates that the inspection measure does not influence the major failure rate. For the

assessment of new maintenance strategies or for modification of cycles or complexity, the influence of different maintenance measures on the major failure occurrence must be considered. Thus, under certain conditions a reduction of the major failure occurrence is actually possible by a prolongation of the cycle if there is no considerable major failure increase foreseen within 8 years after servicing. This would have a great influence on the balance between cost reduction and equipment quality.

Summary and outlook

The mentioned evaluations demonstrate that the age of equipment has an influence on their minor and major failure occurrence. Thereby, the ageing behaviour of circuit breakers is characterized by an exponential increase of minor failure occurrence and by a bath tub curve related to the major failure occurrence. In addition, high mechanical stresses (e.g. due to high numbers of switching cycles) lead to an increased occurrence of the major failures.

Furthermore, the influence of maintenance measures on the equipment behaviour cannot be neglected. Intensive maintenance measures can induce an elevated major failure rate for a certain time.

In ongoing works, the behaviour of 123 kV rotary disconnectors is investigated regarding to above described aspects. Furthermore, the influence of a modified maintenance strategy as well as the correlation between inspected minor failure and possible consequent major failures are determined. In order to integrate the economic aspects of asset management as well, additional various scenarios will be considered under economic points of view in future.

References

- [1] U. Zickler, H. Krings, A. Schnettler, S. Federlein. *Life Management von Schaltanlagen mit moderner Sekundärtechnik*. Internat. ETG-Kongress 2007, Karlsruhe, Oktober 2007
- [2] S. Federlein, A. Schnettler, J. Schneider, U. Zickler. *Asset Management Processes for Future Substation Technologies*. CIGRE SC B3 Colloquium, Berlin, September 2007
- [3] D. Drescher, G. Balzer; C. Neumann, R. Meister. *Beurteilung des Alterungsverhaltens von Hochspannungsleistungsschaltern*. ew Jg. 104 (2005), Heft 3

Contact

Dipl.-Ing. Stefan Federlein
federlein@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94959

Dipl.-Ing. Christian Hille
hille@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94915

M.Sc. Tirinya Cheumchit
cheumchit@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94937

M.Sc. Rattanakorn Phadungthin
phadungthin@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94941

Modellierung von SF₆-Luft-Gemischen für die Druckberechnung in MS-Schaltanlagen im Störlichtbogenfall mittels eines CFD-Tools

Aufgrund seiner hervorragenden Isolier- und Löscheigenschaften wird SF₆ in kompakten MS-Schaltanlagen eingesetzt. Im Störlichtbogenfall wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgesetzt, die zur Temperatur- und Druckerhöhung im fehlerbehafteten Schotttraum führt. Nach dem Ansprechen der Druckentlastungsöffnung des fehlerbehafteten Schotttraums strömt Heißgas in die Umgebung und vermischt sich mit der Luft im Schaltanlagegebäude. Dabei steigt der Druck im Schaltanlagegebäude. Für die Planung von neu zu errichtender Schaltanlage ist eine zuverlässige Druckberechnung erforderlich, die auch die veränderliche Gaszusammensetzung beim Ausströmvorgang von SF₆ in das Schaltanlagegebäude berücksichtigt.

Einleitung

Störlichtbögen in gasisolierten Schaltanlagen verursachen eine Temperatur- und Druckerhöhung im fehlerbehafteten Schotttraum und Schaltanlagegebäude. Dieser Überdruck kann Personen, Anlagen und Gebäude gefährden. In MS-Schaltanlagen wird SF₆ weitgehend als Isoliergas und Löschmittel verwendet. Beim Auftreten eines inneren Fehlers expandiert SF₆ durch Druckentlastungsöffnungen in die Umgebung z.B. in das Schaltanlagegebäude. Dabei fällt der Druck im fehlerbehafteten Schotttraum ab und steigt im Schaltanlagegebäude an.

Um eine Überlastung von Schaltanlage und Gebäude zu vermeiden, ist eine geeignete Auslegung der gesamten Anlage mit Hilfe der Druckberechnung unerlässlich. Dieses kann orts aufgelöst mit *Computational-Fluid-Dynamics* (CFD)-Verfahren erfolgen. Dabei müssen die Gaseigenschaften von SF₆-Luft-Mischungen mit veränderlicher Zusammensetzung betrachtet werden. Anhand einer zusätzlichen Erhaltungsgleichung für den SF₆-Masseanteil lässt sich die Zusammensetzung der SF₆-Luft-Gemische in der Strömungsdomäne wäh-

rend des Ausströmungsvorgangs bestimmen.

Berechnungsverfahren

Grundsätzlich basiert das CFD-Verfahren auf der numerischen Behandlung der Erhaltungsgleichung für Masse, Impuls und Energie in den Teilvolumina der Strömungsdomäne. In der Regel wird ein Turbulenzmodell eingesetzt, um die Wirkung von Turbulenz zu berücksichtigen. Hier wird das k- ϵ -Modell verwendet.

Um die Strömung der SF₆-Luft-Gemische zu simulieren, ist die Kenntnis ihrer thermodynamischen Eigenschaften sowie Transportgrößen erforderlich. Diese werden durch Interpolation zwischen Stützwerten von bekannten Gasdaten in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Zusammensetzung (SF₆-Masseanteil) bestimmt. Darüber hinaus muss außer der Erhaltungsgleichung für Masse, Impuls und Energie eine Erhaltungsgleichung für den SF₆-Masseanteil in der Strömungsdomäne mitberücksichtigt werden [1].

Der Lichtbogen gibt die Energie an seine Umgebung durch viele Wechselwirkungsmechanismen wie z.B. Wärmeleitung, Kon-

vektion und Strahlung ab. Allerdings tragen diese Mechanismen ungleich zur Druckentwicklung bei. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, wird üblicherweise ein thermischer Transferkoeffizient (k_p -Faktor) eingeführt, der den Anteil P_{therm} der elektrischen Energie P_{el} , der zum Druckaufbau beiträgt, angibt.

$$P_{therm} = k_p P_{el}$$

Dieser k_p -Faktor kann durch Anpassung von berechneten mit experimentellen Druckverläufen bestimmt werden und hängt von mehreren Faktoren wie z.B. der Gasdichte, dem Elektrodenmaterial ab.

Anwendung

Um das auf Gasgemische beruhende Druckberechnungsverfahren zu evaluieren, werden Berechnungen durchgeführt, zu den experimentellen Daten verfügen [2]. Das Versuchsmodell Abb. 1 besteht aus einem Lichtbogenraum A, der über eine Berstscheibe mit einem Raum B verbunden ist.

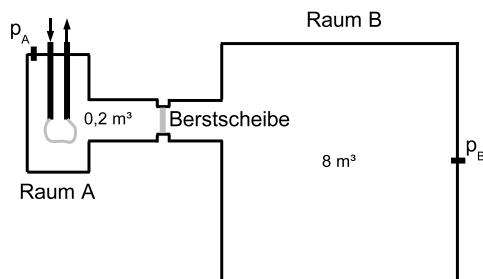


Abb. 1: Anordnung des Versuchsmodells

Raum A (0,2 m³) wird mit SF₆ bei einem Anfangsdruck von 105 kPa befüllt. Raum B enthält Luft bei Atmosphärendruck. Die Berstscheibe öffnet bei einem Überdruck von etwa 50 kPa. Die Versuche werden mit einem Kurzschlussstrom von 20 kA und einer Lichtbogendauer von 300 ms durchgeführt. Die mittlere Lichtbogenspannung beträgt ca. 780 V. Die gemessenen und berechneten Druckverläufe in beiden Räumen sind in Abb. 2 dargestellt.

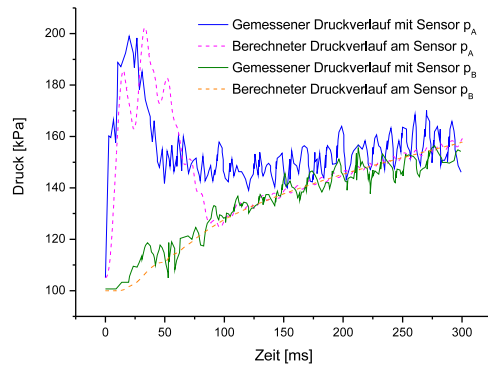


Abb. 2: Gemessene und berechnete Druckverläufe in beiden Räumen

Gemessene und berechnete Druckentwicklungen stimmen gut insbesondere im Entlastungsraum überein. Eine geringfügige Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Druckverlauf ist im Raum A zu beobachten. Diese ist vermutlich auf die Annahmen zu den Randbedingungen bei der Simulation (z.B. verzögerungsfreie, vollständige Öffnung der Berstscheibe beim Ansprechdruck) zurückzuführen.

Quellen

- [1] K. Anantavanich, G. J. Pietsch, M. Schwinne, A. Schnettler, *Modelling of SF₆-air mixtures in MV switchgear during internal arcing using a CFD tool*, XVth International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, T3-282
- [2] M. Schumacher, G. Pietsch, E. Dullni, *Zum Druckanstieg in Gebäuden bei Störlichtbögen in Innenraum-Schaltanlagen*, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93, H. 22, S. 1347-1353

Kontakt

M. Sc. Kittipong Anantavanich
 anantavanich@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80-90015

Modelling of SF₆-air mixtures for the calculation of the pressure rise in MV substations during internal arcing by applying a CFD tool

SF₆ is used in compact medium voltage switchgears due to its excellent insulating and arc extinguishing properties. In case of internal arcing, electric energy is converted into heat energy, which leads to overtemperature and pressure increase in the faulty compartment. After the opening of the pressure relief device of the faulty compartment, hot gas flows into the surroundings and mixes with air in the switchgear building. As a result, the pressure in the switchgear building increases. For a proper design of new substation, a reliable calculation method for the pressure rise resulting from internal arcing is required, which takes into account the changing gas composition, if SF₆ is used as insulating gas.

Introduction

Fault arcs in gas-insulated switchgear cause temperature and pressure rise in the faulty compartment of the switchgear and within the switchgear building. This overpressure may damage the switchgear cubicle and even the switchgear building and by this endanger personnel. In MV switchgears, SF₆ is widely applied as insulating gas and arc quenching media. During internal arcing, SF₆ expands through pressure relief openings into the surroundings, for instance into the switchgear building. Consequently, the pressure decays in the faulty compartment and rises in the building.

In order to avoid mechanical overload of switchgear and building, an appropriate design of the whole installation by means of pressure rise calculation is necessary. Spatially resolved calculation can be performed by a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) solver. However, with SF₆, the gas properties of SF₆-air mixtures with changing gas composition have to be taken into consideration. The changing composition is taken into account by the introduction of an additional conservation equation for the SF₆ mass fraction.

Calculation method

Basically, the CFD method is based on the numerical treatment of the conservation equation of mass, momentum, and energy in all discretised volumes of the flow domain. In order to consider the effect of turbulence, a turbulence model is normally used. Here, the k-ε model is applied.

In order to simulate the flow of SF₆-air mixtures, the knowledge of their thermodynamic as well as transport properties is required. These gas properties are determined by interpolation between reference values of available data depending on pressure, temperature, and gas composition (SF₆ mass fraction). In addition, a conservation equation of SF₆ mass fraction in the flow domain has to be added to the conservation equations for mass, momentum, and energy [1].

The arc transfers the energy to its environment by several mechanisms such as heat conduction, convection, and radiation. Nevertheless, these mechanisms do not contribute in an equal manner to pressure rise. In order to overcome this difficulty, a thermal transfer coefficient (k_p factor) is usually introduced, which describes

the portion P_{therm} of the electric energy P_{el} leading to overpressure.

$$P_{therm} = k_p P_{el}$$

This k_p factor can be obtained by fitting calculation to experimental results and depends on many factors such as gas density and electrode material.

Application

In order to evaluate the calculation model for the pressure rise with consideration of gas mixtures, calculations were performed for a test arrangement, for which experimental results are available [2]. The test arrangement Fig. 1 consists of an arc room A, which is connected to room B over a rupture disc.

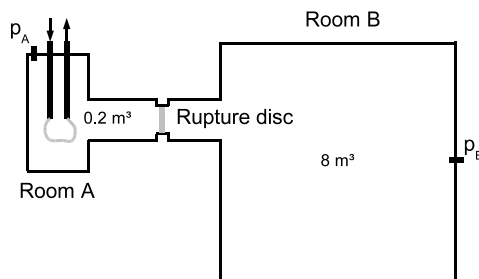


Fig. 1: Test arrangement

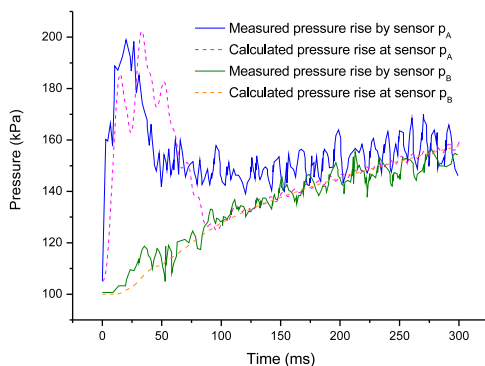


Fig. 2: Measured and calculated pressure developments in both rooms

Room A ($0,2 \text{ m}^3$) is filled with SF_6 at 105 kPa. Room B contains air at atmospheric pressure. The rupture disc opens at an overpressure of about 50 kPa. The tests had been conducted with 20 kA short-circuit current and an arc duration of 300 ms. The average arc voltage is about 780 V. The measured and calculated pressure developments in both rooms are shown in Fig. 2. Measured and calculated values are in good agreement, particularly in the relief room. However, a small deviation in room A is observed. It may be caused by the boundary conditions used in the simulation, e.g. complete opening of rupture disc at response pressure without any time lag.

References

- [1] K. Anantavanich, G. J. Pietsch, M. Schwinne, A. Schnettler, *Modelling of SF_6 -air mixtures in MV switchgear during internal arcing using a CFD tool*, XVth International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, T3-282
- [2] M. Schumacher, G. Pietsch, E. Dullni, *Zum Druckanstieg in Gebäuden bei Störlichtbögen in Innenraum-Schaltanlagen*, *Elektrizitätswirtschaft*, Jg. 93, H. 22, S. 1347-1353

Contact

M. Sc. Kittipong Anantavanich
 anantavanich@ifht.rwth-aachen.de
 +49 241 80-90015

Untersuchungen zum Einsatz von Energieabsorbern in Ringkabelschaltanlagen im Störlichtbogenfall

Dissertation: Dr.-Ing. Arno Wahle

Tag der mündlichen Prüfung: 09. März 2007

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Pietsch
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Haubrich

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum Verständnis der Funktions- und Wirkungsweise von Energieabsorbern in metallgekapselten Ringkabelschaltanlagen. In einem experimentellen Teil werden die Gasabkühlung und das durch Absorber veränderte Strömungsverhalten untersucht. Messungen des Druckverlaufs, der Gasströmungsgeschwindigkeit und -temperatur dienen der Gewinnung von Parametern zur Beschreibung von Absorbern und dem Vergleich mit Rechenergebnissen.

Im theoretischen Teil wird erstmalig die Wirkung von Energieabsorbern (Wärmeübergang und Strömungshindernis) modelliert und in Druckberechnungsverfahren eingebunden. Die Modellierung erfolgt in Analogie zu Vorgängen in Wärmetauschern, die aus gekreuzten Rohrreihen bestehen. Die Simulationsergebnisse werden mit Messergebnissen verglichen und bewertet.

Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zum Verständnis der Wirkungsweise von Energieabsorbern in metallgekapselten Ringkabelschaltanlagen zur Reduktion von Störlichtbogenauswirkungen zu leisten. Hierbei steht die Abschätzung der Druck- und Temperaturentwicklung in den einzelnen Schotträumen der Schaltanlage und im Schaltanlagenraum bzw. in einer Ortsnetzstation bei einem inneren Fehler im Vordergrund. Damit wird der derzeitige Kenntnisstand bzgl. der Sicherheit von Innenraum-Schaltanlagen in Bezug auf Personen- und Gebäudeschutz erweitert und verbessert, sowie eine kostenoptimierte konstruktive Auslegung von Energieabsorbern durch Berechnungen ermöglicht.

Es wird zunächst mit Hilfe experimenteller Untersuchungen Messdaten zum Energie-

transfer zwischen dem heißen Gasstrom und den Kühlgittern gewonnen. Hierbei werden Störlichtbogenprüfungen in Modellanordnungen und gasisolierten Ringkabelschaltanlagen mit integrierten Energieabsorbern durchgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen ist auf das Aus- und Durchströmen der heißen Isoliergase aus dem Lichtbogenraum durch den Absorber in einen Entlastungsraum gelegt. Die Temperaturreduktion durch den Energieabsorber wird bestimmt und dessen Effizienz ermittelt. Des Weiteren stellen die Kühlgitteranordnungen einen Strömungswiderstand dar, der Rückwirkungen auf die Druckbelastung der Schotträume hat. Der Strömungswiderstand wird ermittelt und die Rückwirkung auf die Schaltanlage bewertet.

In weiteren Experimenten wird der Einfluss der Isoliergase Luft und Schwefelhexafluorid im Lichtbogenraum auf die Wirkungs-

weise von Energieabsorbern geklärt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein theoretisches Modell des Wärmeüberganges zwischen Heißgas und Absorber entwickelt. Die experimentell gewonnenen Daten bilden die Basis für einen Ansatz zur Modellierung der Energieabsorption durch Kühlgitter. Dabei ist der Strömungswiderstand der Energieabsorber im Modell berücksichtigt.

Untersuchung der Eigenschaften von Energieabsorbern

Bei Zündung eines Lichtbogens in einer metallgekapselten Schaltanlage wird dem umgebenden Isoliermedium ein Teil der elektrisch eingespeisten Energie thermisch zugeführt, der eine Druckzunahme im Kapselungsraum bewirkt. Bei Ansprechen von Druckentlastungseinrichtungen strömt das heiße Isoliergas in den Schaltanlagenraum und beansprucht mechanisch das Schaltanlagegebäude bzw. die Ortsnetzstation und kann Personen in der Umgebung gefährden. Die Auswirkungen von Lichtbögen müssen bei der baulichen Auslegung der Stationen berücksichtigt und der Personenschutz muss sichergestellt werden. Dies erfolgt in zunehmendem Maße durch den Einbau von Energieabsorbern oder Druckentlastungskanälen in Schaltanlagen bzw. -gebäuden.

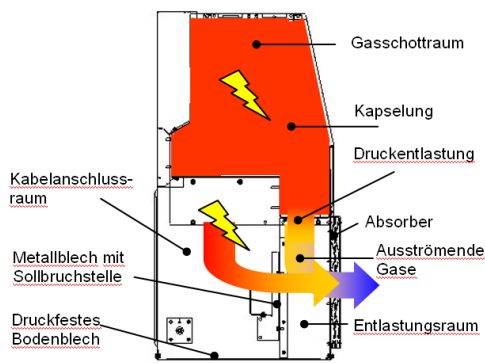


Abb. 1: Seitenansicht RMU mit integriertem Energieabsorber

Abb. 1 zeigt die Ringkabelschaltanlage in einem seitlichen Schnitt und die Gasströmungsrichtungen bei Fehlern im Gasschott- und im Kabelanschlussraum.

Energieabsorber bestehen im Allgemeinen aus mehreren Lagen Streckmetallgittern aus verzinktem Stahl. In Abb. 2 ist der Aufbau eines Energieabsorbers dargestellt. In dieser Arbeit sind experimentelle Grundsatzuntersuchungen bzgl. des Energietransfers zwischen dem heißen Gasstrom und den Absorbern durchgeführt worden. Hierzu wurden Lichtbogenversuche in einer Modellanordnung sowie in gasisolierten Ringkabelschaltanlagen durchgeführt.



Abb. 2: Aufbau eines Energieabsorbers

Im experimentellen Teil wurde zunächst die Temperaturreduktion durch die Energieabsorber in Luft untersucht. Hierzu wurden Störlichtbogenversuche mit verschiedener Lichtbogenleistung in der Modellanordnung und in Ringkabelschaltanlagen durchgeführt. Es wurden für verschiedene Gitterbauweisen die Gastemperaturen vor und hinter dem Absorber gemessen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Gastemperaturen hinter dem Gitter proportional zu denen vor dem Gitter sind, s. Abb. 3.

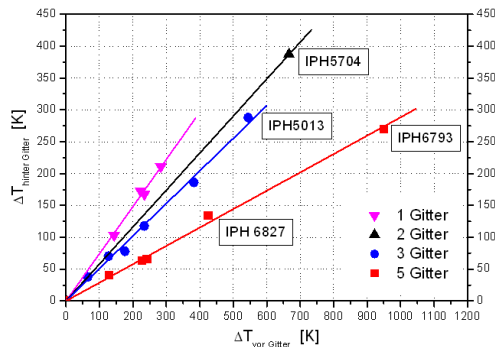


Abb. 3: Übertemperaturen vor und hinter den Gittern

Die Temperaturreduktion ist ein Maß für die thermische Energieabsorption durch die Kühlgitter. Für die untersuchten Gitterkonfigurationen wurde der thermische Wirkungsgrad ermittelt. Zusätzlich wurde der thermische Wirkungsgrad der Absorber im Isoliermedium Schwefelhexafluorid bestimmt und mit den Messergebnissen in Luft verglichen. Die Effizienz der Kühlgitter ist bei den SF_6 -Versuchen deutlich niedriger. Grund hierfür sind die kleineren Aus- bzw. Durchströmgeschwindigkeiten von SF_6 .

Das Strömungsverhalten der heißen Gase beim Austritt aus dem Lichtbogenraum durch den Absorber in einen Entlastungsraum wurde in weiteren Experimenten untersucht. Zunächst wurden die Strömungsgeschwindigkeiten direkt in der Druckentlastungsöffnung beim Austritt des Heißgases aus dem Lichtbogenraum gemessen. Zur Untersuchung des Strömungsverhaltens des Heißgases hinter dem Lichtbogenraum, wurden Strömungsgeschwindigkeiten vor und hinter dem Energieabsorber bei Störlichtbogenversuchen gemessen. In einer weiteren experimentellen Versuchsreihe wurde der Strömungswiderstand von Energieabsorbern untersucht. Es wurde der Druckverlustbeiwert für verschiedene Kühlgitteranordnungen in einer Modellanordnung bestimmt. Hierzu wurde der statische Druck vor und hinter den Absorbern gemessen.

Modellierung der Eigenschaften von Energieabsorbern

Im theoretischen Teil der Arbeit wird ein Modellansatz zur Simulation der Wärmeaufnahme und des Strömungswiderstandes der Energieabsorber beschrieben. Die Modellierung der Energieabsorber erfolgt in Analogie zu derjenigen von Rohrbündeln, die von einem Fluid umströmt werden und vielfach in Wärmeübertragern eingebaut sind. Die Ergebnisse der Modellierungsarbeiten wurden in zwei Berechnungsverfahren zur Druck- und Temperaturentwicklung im Störlichtbogenfall eingebunden. Das erste Verfahren basiert auf einer nicht-orts aufgelösten analytischen Berechnung, das zweite auf einem numerischen Computational-Fluid-Dynamic (CFD) Ansatz.

Das nicht-ortsauflösende Verfahren erlaubt die Berechnung des mittleren Druck- und Temperaturverlaufes bei einem inneren Fehler in mehreren Räumen der Schaltanlage bzw. des -gebäudes. Das Modell des Absorbers wurde in das bestehende Berechnungsverfahren eingebunden und örtlich zwischen zwei Entlastungsräumen berücksichtigt. Beim nicht-orts aufgelösten Berechnungsverfahren wurde der Wärmeübergang zwischen dem heißen Gas und dem Kühlgitter bestimmt. Hierbei wurde der Wärmeübergangskoeffizient bzw. die Nusselt-Zahl in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Gastemperatur berechnet. Der Druckverlust am Absorber wurde mittels analytischer Funktionen beschrieben und der Strömungswiderstand wurde in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Die theoretisch ermittelten Druckverlustbeiwerte für die verschiedenen Gitteranordnungen stimmen mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Das dreidimensionale CFD-Berechnungsverfahren bietet die Möglichkeit, den Wärmeübergang zwischen dem heißen Gas und dem Absorber durch eine Wärmesenke und den Druckverlust durch ein parametrierbares Strömungsmodell abzubilden. Zur Parametrierung des Kühl- und Strömungsmodells wurde der experimentell ermittelte thermische Wirkungsgrad und der durch Messungen bestimmte Druckverlustbeiwert der Kühlgitteranordnungen verwendet. Das CFD-Verfahren ermöglicht u.a. die orts- und zeitaufgelöste Berechnung der Gastemperatur, des Druckes und der Strömungsgeschwindigkeit. Abb. 4 zeigt die räumliche Temperaturverteilung zu einem ausgewählten Zeitpunkt.

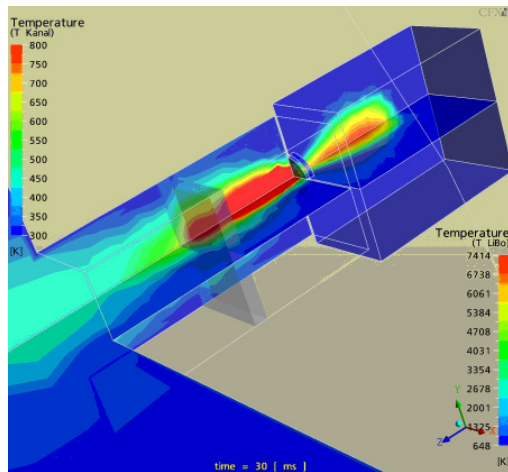


Abb. 4: Temperaturverteilung in der Modellanordnung

Abschließend wurden die Ergebnisse der beiden Druckberechnungsverfahren mit Messwerten von Störlichtbogenprüfungen in der Modellanordnung und in Ringkabelschaltanlagen verglichen. Das nicht-ortsauflösende Verfahren liefert gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Druck-, Temperatur- und Strömungsgeschwindigkeitsverläufen. Die Druck- und Temperaturreduktion durch die Energieabsorber wird richtig nachgebildet.

Grenzen des nicht-ortsauflösenden Ansatzes werden aufgezeigt, indem mit zunehmender Größe der Entlastungsräume nicht

mehr von einer homogenen Energieeinspeisung in das gesamte Volumen ausgegangen werden kann. Die lokalen Druck- und Temperaturverhältnisse sind für große Räume stark unterschiedlich und bleiben vom nicht-ortsauflösenden Ansatz unberücksichtigt.

Die Rechenergebnisse des dreidimensionalen CFD-Verfahrens hinsichtlich Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit stimmen weitgehend mit den Messergebnissen überein. Strömungsphänomene, vor allen Dingen die turbulenten Verwirbelungen beim Aus- und Durchströmen, konnten in der Simulation nachgebildet werden.

Der große Vorteil der CFD-Simulation liegt in der ortsauflösenden Berechnung und Darstellung aller hydrodynamischen Größen unabhängig von Raumanordnungen und -abmessungen, die detaillierte Parameterstudien ermöglichen.

Mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsansatzes von Energieabsorbern in Schaltanlagen lassen sich die Auswirkungen eines Störlichtbogens bzgl. Druck und Temperatur auf Personen und Anlagegebäude genauer abschätzen. Für die Entwicklung von Schaltanlagen mit Energieabsorbern stellt dies ein bedeutendes Konstruktionswerkzeug dar und es können zukünftig virtuelle Projektstudien durchgeführt werden.

Kontakt

Dr.-Ing. Arno Wahle
AREVA Energietechnik GmbH Sachsenwerk
arno.wahle@areva-td.com

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G.J. Pietsch
pietsch@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94943

Diplom-, Master- und Studienarbeiten

Diplomarbeiten

Averes, Markus

Untersuchung des Einflusses von zusätzlichen Abbrandlelementen zur Verbesserung des Ausschaltverhaltens in Leistungsschaltern

In dieser Arbeit wird der Einfluss von zusätzlichen Abbrandlelementen zur Verbesserung des Ausschaltverhaltens in einem CO₂-Selbstblasleistungsschaltermodell untersucht. Ebenso wie der Düsenabbrand mit zum Druckaufbau in einem Selbstblasleistungsschalter beiträgt, soll gezeigt werden, dass abbrennende Kunststoffelemente im Heizkanal und im Heizvolumen zu einer Erhöhung des Druckaufbaus führen. Der erhöhte Druck soll das Ausschaltverhalten verbessern. Anhand von Vorexperimenten wird in einer vereinfachten Versuchsanordnung aus verschiedenen wasserstoffhaltigen Kunststoffen eine Vorauswahl des Materials getroffen. Die folgenden Untersuchungen werden an einem Schaltermodell durchgeführt. Es wird der Einfluss von verschiedenen Platzierungen und Anordnungen der Abbrandlelemente auf den Druckaufbau betrachtet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Kahlen,
Dipl.-Ing. Ming Chark Tang

Dederichs, Thomas

Szenarienanalysen zum Betrieb von dezentralen Energiewandlungseinheiten in Verteilungsnetzen

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Herausforderungen der Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie mittels dezentraler Energiewandlung in Deutschland. Ausgehend von dem politi-

schen Wunsch einer signifikanten Senkung der Treibhausgasemissionen werden mögliche Szenarien zur Integration dezentraler Energiewandlungseinheiten in bereits bestehende Verteilungsnetze beurteilt. Zu diesem Zweck wird ein Stoffstrommodell zur vollständigen Abbildung der Energieversorgung innerhalb einer Netzregion entwickelt. Die Vorgehensweisen bei der Erstellung und Parametrierung dieses Modells werden aufgezeigt, wobei besonderes Augenmerk auf die Implementierung des Allokationsverfahrens im Zusammenhang mit Kraft-Wärme-Kopplung gelegt wird. Am Beispiel einer auf Gutschriftenrechnung basierenden Studie werden die Vorteile dieses Verfahrens erläutert. Im Rahmen einer Szenarioanalyse werden bedeutsame Einflussvariablen ermittelt und bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben. Diese Einflussvariablen werden zu einem Analyseraster kombiniert und als Eingangsdaten für die Szenarienrechnung genutzt. Abschließend werden anhand der so gewonnenen Ergebnisse dominante Szenarien bestimmt, die Rückschlüsse auf optimale Strategien zur ökologischen Energieversorgung erlauben.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Finck, Dorothee

Modellbetrachtungen zur Zertifizierung von Windpark-Projekten auf Basis von WEA-Modellen

Einhergehend mit der Zunahme der Windenergieeinspeisung in das deutsche Übertragungsnetz wurden neue, erweiterte Netzanschlussregeln für den Anschluss von Windenergieanlagen (WEA) entwickelt. Die Einhaltung der Richtlinien wird derzeit durch Zertifizierung der einzelnen WEA gewährleistet. Die Diplomarbeit behandelt die Zertifizierung von Windpark-Projekten

zur Einhaltung deutscher bzw. internationaler Netzanschlussregeln. Um zukünftig die Zertifizierung gesamter Windpark-Projekte zu ermöglichen, werden Grundlagen für Black-Box Modelle entwickelt, die die realen WEA abbilden sollen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Uwe Macharey

Golidis, Andreas

Ökoeffizienzbewertung dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen in Neubaugebieten

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Versorgung mit thermischer und elektrischer Energie mittels dezentraler Energiewandlung von Neubaugebieten. Dabei wird auf die zukünftige Entwicklung sowohl auf Erzeuger als auch auf Verbraucherseite eingegangen. Der untersuchte Zeitraum erstreckt sich von 2010 bis 2030. Um eine Senkung der Treibhausemissionen zu bezwecken, werden im Rahmen eines Szenarioanalyseverfahrens unterschiedliche Szenarien zur dezentralen Energieversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und Wärmepumpen erstellt und diese in einem Strommodell abgebildet und optimiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Großmann, Philipp

Ökoeffizienzanalyse von Flexibilisierungsmaßnahmen in Energieversorgungsnetzen

Die derzeitige elektrische Energieversorgung basiert im Wesentlichen auf Großkraftwerken. Dabei spielen dezentrale Energiewandlungsanlagen bzw. deren Kombination in großer Stückzahl ursprünglich nur eine kleine Rolle. Die weitere Zunahme z. B. der Windenergieeinspeisung in das deutsche Übertragungsnetz erfordert, dass sowohl das Übertragungsnetz als auch die dezentralen Anlagen und insbesondere auch Windparks flexibler betrieben werden müssen. Im Rahmen der Diplomarbeit werden Umweltwirkungen von verschiede-

nen Übertragungstechnischen und systemtechnischen Maßnahmen zur Steigerung der Übertragungskapazität in Energieversorgungsnetzen analysiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Uwe Macharey

Heinbockel, Andreas Johannes

Untersuchungen des Alterungsverhaltens von nanostrukturierten superhydrophoben Isolierstoffoberflächen mit Multi-Stress-Prüfverfahren

Das elektrische Verhalten von Isolierstoffen wird in großem Umfang durch die Multi-Stress-Bedingungen im Betrieb beeinflusst. Durch gezielte Oberflächenmodifikation, die auf der Hydrophobierung und Nanostrukturierung beruht, können modifizierte superhydrophobe Isolierstoffoberflächen erzeugt werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll das Alterungsverhalten von derartigen Isolierstoffoberflächen unter simultanen elektrischen und klimatischen Beanspruchungen untersucht werden. Hierzu werden verschiedene Alterungsverfahren verwendet. Die Bewertung der erzielten Meßergebnisse soll schließlich einen Rückschluss über die Beständigkeit und Einsetzbarkeit der modifizierten Isolierstoffoberflächen geben.

Betreuer: M. Sc. Junliang Wu

Hille, Christian

Evaluierung verschiedener Einflussfaktoren auf das Schaden- und Störungsverhalten von Hochspannungs-Leistungsschaltern

Im Rahmen der Diplomarbeit werden verschiedene Parameter von Hochspannungs-Leistungsschaltern, die auf den Zustand bzw. das Schaden- und Störungsgeschehen Einfluss haben, an Hand von zur Verfügung gestellten Daten eines Netzbetreibers untersucht. Hierbei werden verschiedene Kenngrößen wie Baujahr, Gerätetyp, Spannungsebene, Einsatzbereich etc. berücksichtigt. Zusätzlich wird der Zusammenhang von

Instandhaltungsmaßnahmen und Störungsverhalten ermittelt.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

Hoffacker, Matthias

Bestimmung des thermischen Ausschaltvermögens eines CO₂ basierten Leistungsschaltermodells mit zusätzlichen Abbrandelementen

Da Kohlendioxid verglichen mit Schwefelhexafluorid schlechtere thermische und dielektrische Eigenschaften aufweist, müssen Möglichkeiten gefunden werden, das Ausschaltvermögen eines CO₂ Selbstblasleistungsschalters zu verbessern. In dieser Arbeit wird der Einfluss von zusätzlichen Abbrandelementen auf das thermische Ausschaltvermögen eines CO₂ Selbstblasleistungsschaltermodells ermittelt. Hierbei werden die Materialien Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyethylen (PE), Polyoxymethylen (POM) und Siliziumkarbid (SiC) eingesetzt. Das Material des Abbrandelementes wird durch die auftreffende Strahlung und das vorbeiströmende Heißgas abgebrannt. Das hat Auswirkungen auf die Gaszusammensetzung, die Gastemperatur und den Druckaufbau. Diese Effekte werden in der vorliegenden Arbeit sowohl durch Experimente als auch durch Simulationen untersucht.

Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz,
Dipl.-Ing. Ming Chark Tang

Kempf, Ullrich

Entwicklung einer Modellvorstellung für die Durchschlagsmechanismen in syntaktischem Schaum bei Gleichspannungsbelastung

Um den Einsatz eines syntaktischen Schaums als Isolierstoff im Bereich der Hochspannungstechnik zu ermöglichen, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die Mechanismen genauer untersucht, die bei einer Überbelastung mit Gleichspannung

zu einem Versagen des Materials führen. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das Material gezielt elektrisch geschädigt werden kann, ohne dass ein kompletter Durchschlag des Materials eingeleitet wird. Die Materialschädigungen wurden anschließend mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen analysiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Meyer, Luc

Einflussgrößen und Regelparameter für die Steuerung dezentraler Energieversorgungseinheiten

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Tagsoptimierung von verteilten Energieerzeugern und steuerbaren Lasten entwickelt. Die gemischte Zielfunktion berücksichtigt sowohl Kosten als auch Emissionen. Ohne eine angemessene Kommunikationsstruktur zwischen den verschiedenen Erzeugern und steuerbaren Lasten kann eine solche Optimierung nicht sinnvoll ausgeführt werden. Mögliche Kommunikationsstandards und Datenstrukturen werden vorgestellt. Danach werden mögliche Optimierungsalgorithmen und -tools vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird ein synthetischer Mittelspannungsknoten aufgebaut und die Optimierungsmethode darauf angewendet. Sowohl elektrische als auch thermische Erzeuger und Lasten werden in dieser Arbeit berücksichtigt. Zum Schluss werden die Ergebnisse vorgestellt und ein Ausblick für mögliche Verbesserungen und Erweiterungen gegeben.

Betreuer: Dipl.-Phys. Bernhard Schowe

Ottersbach, Jörg

Entwicklung von öko-effizienten Betriebsstrategien dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

In dieser Arbeit werden verschiedene Strategien zum gebündelten Betrieb dezentraler Erzeugungsanlagen für Strom und Wärme

im Rahmen so genannter Virtueller Kraftwerke erarbeitet. Auf Basis eines realen elektrischen Netzes wird ein Systemmodell mit erweitertem Erzeugungsportfolio unter Berücksichtigung von elektrischen und thermischen Lasten erstellt und mit Hilfe des Simplex-Algorithmus optimiert. Die so gewonnenen Ganglinien einer Tagesoptimierung werden in Hinsicht auf ihre ökonomischen und ökologischen Auswirkungen, sowie ihre technische Effizienz untersucht und bewertet. In Hinblick auf die wachsenden Herausforderungen durch den Klimawandel wird die Integration volatiler regenerativer Quellen diskutiert. In einer Lösungsvariante wird ein so genanntes Microgrid implementiert und optimiert, um eine vollständige Autarkie des Netzes abzubilden. Um eine Unabhängigkeit von Erdgasimporten zu erreichen, werden darüber hinaus auch die Nutzung von Bioerdgas im Vergleich zu Erdgas unter Berücksichtigung des CO₂-Preises und die Machbarkeit einer vollständig regenerativen Versorgung aufgezeigt und analysiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Schramm, Judith

Entwicklung einer Schnittstelle zur Kopplung von CFD-Simulationen mit einem Netzberechnungstool

Die Schnittstellenkopplung zwischen einem CFD- und einem Netzberechnungsprogramm berücksichtigt sowohl die physikalischen Vorgänge im Leistungsschalter als auch Einflüsse des umgebenden Netzwerks. Mit einem Modell, das eine Parallelkapazität zum Schalter simuliert, wird die Funktionalität der Schnittstelle gezeigt und mit der numerischen Lösung dieses Problems validiert. Damit können Stromnullsimulationen ohne Rückgriff auf experimentelle Daten durchgeführt werden. Eine weitere Anwendung besteht darin, die Schnittstelle so zu erweitern, dass die Einbindung weiterer Netzwerkelemente mög-

lich wird.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Kahlen,
Dipl.-Ing. Ming Chark Tang

Weyer, Michael

Untersuchungen der Beständigkeit von modifizierten superhydrophoben Isolierstoffoberflächen unter Multi-Stress-Bedingungen

In einer Vielzahl von Betriebsmitteln der Energietechnik wird die Lebensdauer von Isolierstoffen durch Multi-Stress-Bedingungen (u.a. elektrische und klimatische Belastungen) beeinflusst. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll die Beständigkeit von superhydrophoben Isolierstoffoberflächen unter simultanen Feuchtebelastungen und elektrischen Beanspruchungen ermittelt werden. Hierzu werden verschiedene Prüfverfahren angewendet, um den realen Alterungsprozess der Oberflächen zu beschleunigen. Mit Hilfe von mikroskopischen Oberflächenanalysen soll schließlich ein Rückschluss über das Alterungsverhalten der verwendeten Beschichtungsstoffe gezogen werden.

Betreuer: M. Sc. Junliang Wu

Wiesner, Simon

Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten und den Durchschlagsmechanismen in syntaktischem Schaum bei Wechselspannungsbelastung

Wenn syntaktischer Schaum mit einer ausreichend hohen Wechselspannung belastet wird, treten im Material Teilentladungen auf, die die mikroskopische Struktur des Schaums schädigen und zu einem elektrischen Durchschlag führen können. Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist der Zusammenhang zwischen der Teilentladungsaktivität und den Veränderungen, die vor einem Durchschlag im Werkstoff auftreten, nachgewiesen worden. Des Weiteren wurden die Wechselwirkungen untersucht, die zwischen benachbarten Hohlräumen bei

Teilentladungsaktivität auftreten können.
Betreuer: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Wittlinger, Peter

Entwicklung eines Verfahrens zur optimalen Platzierung von dezentralen Energiewandlungseinheiten in Verteilungsnetzen unter Berücksichtigung des lokalen Strom- und Wärmebedarfs

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur optimierten Platzierung von dezentralen Energiewandlungsanlagen in Verteilnetzen entwickelt. Unter Berücksichtigung des lokalen Strom- und Wärmebedarfs werden KWK-Anlagen anhand verschiedener Auslegungskriterien dimensioniert und in unterschiedliche Verteilungsnetze integriert. Es wird durch Erstellung einer Ökobilanz gezeigt, dass erhebliche Einsparpotentiale durch die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung zur Bedarfsdeckung vorhanden sind. Die Potentiale beziehen sich dabei auf eine konventionelle Versorgung der Netzgebiete mit elektrischer und thermischer Energie aus getrennter Bereitstellung. Dabei wird sowohl die zukünftige Entwicklung auf Verbraucher- als auch auf Erzeugerseite berücksichtigt. Der Zeithorizont der Untersuchung umfasst dabei den Zeitraum von 2010 bis 2030.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Masterarbeiten

Aydin, Turgay

Untersuchung der Beständigkeit der nanostrukturierten superhydrophoben Isolierstoffoberflächen unter erschwerten Innenraumbedingungen und elektrischer Beanspruchung

Das Fremdschichtverhalten eines Isoliersystems für Innenraumanwendungen wird durch spezielle klimatische Belastung bzw. Betauung beeinflusst. Hierzu soll der zykli-

sche Betauungstest an den nanostrukturierten superhydrophoben Prüflingen durchgeführt und ggf. ein neuer Versuchsaufbau entwickelt werden, um die alterungsbedingte Veränderung des Oberflächenzustands genau zu ermitteln. Die Bewertung der erzielten Messergebnisse soll schließlich eine Aussage über die Tauglichkeit der verwendeten Beschichtungsstoffe im Innenraumbereich ermöglichen.

Betreuer: M. Sc. Junliang Wu

El Oukaili, Samer

Development of a Methodology for the Assessment of Asset Management Strategies

The development and the analysis of a high-level approach for the assessment of asset management strategies is the aim of this thesis. For a network model, probabilistic reliability calculations are performed in order to evaluate the present reliability indices, as well as the sensitivity of system supply reliability to the components' failure level. Together with suitable models for the prognosis of component failure levels, and appropriate cost models, the expected reliability performance and economical performance of the system should be assessed over a future time period. The tools to be used are mainly standard office software for general data handling and results compilation, and the PSSTMSINCAL network planning tool for the basic technical analyses.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein,
Dr.-Ing. Michael Schwan (Siemens AG)

Florez, Javier Dario Mantilla

Measurements and Simulations of Cold Gas Flows in Basic Gas Circuit Breaker Geometries

The interruption of capacitive currents is a far more critical case for the dielectric recovery process of a CB after during interruption. Its energy contribution to the

arc is less, making easy the interruption at small gap distances between the circuit breaker contacts rising the possibility of a dielectric failure. Here a dielectric breakdown will occur if the TRV exceed the breakdown voltage threshold. In a Self Blast CB under these stressing circumstances the flow behaviour of the insulating gas in each stage of the interruption process vary strongly through the nozzle and diffuser system. This generates critical weak regions characterized by high flow speeds and low pressures in which the probability of an electrical breakdown rises. This work provides quantitative and qualitative analysis about the cold gas flow behaviour in a circuit breaker similar geometry.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Kahlen

Gonzalez, David

Bestimmung von Modellfunktionen zur Darstellung des Alterungsverhaltens von Hochspannungs-Betriebsmitteln

Im Rahmen der Masterarbeit werden verschiedene Modellfunktionen ermittelt, die das Alterungsverhalten von Hochspannungsbetriebsmitteln wissenschaftlich beschreiben. An Hand von Störungs- und Schadensdaten eines Netzbetreibers werden unterschiedliche statistische Alterungskurven mit Hilfe verschiedener Ausgleichsrechnungsarten und unter Verwendung von Vertrauensintervallen berechnet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

Manglabruks, Karapin

Application of a comprehensive asset management method in distribution networks

In this thesis, the current status of suitable models for the prognosis of component failure performance is to be applied in a comprehensive asset management approach for a distribution network. Different asset management strategies are to be analyzed regarding their effect on both, the cost

performance and the reliability performance of the system over a prognosis period of at least 25 years. Besides proving the applicability and benefits of such asset management approaches, the results are to be analyzed for general characteristics of asset management strategies and suggestions to improve the available computational tools should be collected.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein,
Dr.-Ing. Michael Schwan (Siemens AG)

Panichpisal, Kamolsak

Simulation of pressure rise in SF₆/air-insulated switchgear and switchgear building in case of internal arcing

Internal arcing in SF₆/air-insulated switchgear causes temperature and pressure increase in the switchgear and switchgear building. By applying a CFD program with gas properties of SF₆-air mixtures generated by an available program, spatially resolved calculation to determine pressure rises in switchgear and switchgear building can be performed. The influence of insulating gas (SF₆ or air) in switchgear on pressure rises are investigated by simulation. Some influencing parameters such as kp factor, size of switchgear, operating pressure of pressure relief opening, etc. are also included in the investigation.

Betreuer: M. Sc. Kittipong Anantavanich

Wu, Yunling

Anwendung von Multi-Stress Prüfverfahren an superhydrophoben Isolierstoffoberflächen

Das Fremdschichtverhalten eines Isoliersystems wird maßgeblich von den äußeren Grenzflächen beeinflusst. Durch bestimmte Oberflächenmodifikation können nanostrukturierte superhydrophobe Isolierstoffoberflächen erzeugt werden. In dieser Arbeit wird die Superhydrophobieeigenschaft mit Hilfe von verschiedenen Multi-Stress-

Prüfverfahren untersucht. Auf Basis der gewonnenen Messergebnisse soll schließlich eine Aussage über die Einsetzbarkeit bzw. Beständigkeit der verwendeten Beschichtungsstoffe getroffen werden.

Betreuer: M. Sc. Junliang Wu

Yao, Dawei

Untersuchungen zur Stoffbestimmbarkeit von Fremdeinschlüssen in Polymerem Isolierstoff mittels Ultraschall

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, in wie weit mittels Ultraschall eine Fremdstoffbestimmung in polymerem Isolierstoff möglich ist. Ziel ist festzustellen ob anhand eines thermisch abhängigen Reflexionsverhaltens eine eindeutige Identifizierung des Einschlussmaterials möglich ist. Dazu wird das thermisch abhängige Reflexionsverhalten verschiedener Kunststoffe in Silikonelastomer modelliert und mit Messungen an entsprechenden Probekörpern verglichen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Torsten Wirz

Garza de los Santos, Daniel III

Einfluss von Isolierungsverunreinigung auf die Druckentwicklung in Schaltanlagen und Schaltanlagegebäuden im Störlichtbogenfall

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Isolierungsverunreinigung auf die Druckentwicklung in Schaltanlagen und Schaltanlagegebäuden im Störlichtbogenfall untersucht, und zwar im Hinblick auf die Gaseigenschaften des durch Metaldampf verunreinigten Isoliergases. Es wird der Einfluss von verschiedenen Konzentrationen der durch Metaldampf Isolierungsverunreinigung bei SF₆ und Luft auf die Druckentwicklung in Schaltanlagen und Schaltanlagegebäuden betrachtet. Die Untersuchungen erfolgen theoretisch mit Hilfe eines Computational-Fluid-Dynamics (CFD)-Programms.

Betreuer: M. Sc. Kittipong Anantavanich

Studienarbeiten

Behle, Mathias

Untersuchung des Abbrandverhaltens alternativer Materialien zum Einsatz als Düsenmaterialien in Selbstblas-Leistungsschaltern

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Kahlen,
Dipl.-Ing. Ming Chark Tang

Coenen, Isabel

Erstellung einer Statistik zur Schaden- und Störungsverteilung von HS-Schaltgeräten

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

Dederichs, Thomas

Potentialanalyse des Einsatzes von Biogas in der dezentralen Energiewandlung

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Kirchhoff, Franz

Optimierung der Fehlstellendetektion in polymeren Isolierstoffen mittels Ultraschall

Betreuer: Dipl.-Ing. Torsten Wirz

Krengel, Stefan

Ermittlung der Auswirkungen möglicher Entwicklungspfade des Kraftwerksparks in Deutschland auf den Strommix

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Lescher, Andreas

Entwicklung von Lastprofilen zum zukünftigen Energiebedarf privater Haushalte und Gewerbebetriebe

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Smolka

Pamir, Erol

Untersuchung zum Einfluss thermischer Belastung auf die elektrischen Eigenschaften von syntaktischem Schaum

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Keßler

Roggendorf, Christoph

Untersuchung des Verhaltens neuer Isoliermaterialien auf Schaumbasis unter Impulsspannungsbeanspruchung

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Keßler

Römel, Simon-Patrick

Untersuchungen zur Materialbestimmung von Stoffeinschlüssen in polymeren Isolierstoffen mittels Ultraschall

Betreuer: Dipl.-Ing. Torsten Wirz

Schniedertöns, Thomas

Einfluss der Temperatur auf Ultraschalluntersuchungen an Hochspannungskabeln aus XLPE

Betreuer: Dipl.-Ing. Torsten Wirz

Schütte, Gregor

Vergleich von Teilentladungs- und Ultraschalldiagnostik anhand von Messungen an Fehlstellen in Epoxydharz

Betreuer: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Stickelmann, Uwe

Aufbau einer kapazitiven Messung zur Erfassung von Vorformlingswanddicken-schwankungen beim Extrusionsblasformen

Betreuer: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Strauchs, Anja

Modifikation eines TE-Messstands zur Untersuchung von Electrical Trees in syntaktischem Schaum

Betreuer: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Weber, Thorsten

Untersuchung des Teilentladungs-Verhaltens von eingegossenen Mikrohohlkugeln

Betreuer: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Veröffentlichungen / Publications

H. Ueno, P. Walter, C. Cornelissen, A. Schnettler

Resolution Ecaluation of Ultrasonic Diagnosis Tools for Electrical Insulation Devices and the Detection of Electrical Trees
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No.1, February 2007

H. Fink, D. Gentsch, B. Heil, C. Humpert, A. Schnettler

Conditioning of Series Vacuum Interrupters (VIs) for Medium Voltage by Applying High-Frequency (HF) Current to Increase the Dielectric Strength of VIs
IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 35, No. 4, August 2007, pp 873-878

U. Zickler, H. Krings, A. Schnettler, S. Federlein

Life Management von Schaltanlagen mit moderner Sekundärtechnik
Internationaler ETG-Kongress 2007, Karlsruhe Oktober 2007, ETG-Fachbericht 108

A. Schröder, B. Schowe-von der Brelie, A. Schnettler

Intelligente sich selbst beschreibende dezentrale Erzeuger
Internationaler ETG-Kongress 2007, Karlsruhe Oktober 2007, ETG-Fachbericht 108

A. Schnettler, M. Kurrat, V. Hinrichsen, T. Leibfried

Schaltanlagen und Netze - Trends und zukünftige Herausforderungen
Internationaler ETG-Kongress 2007, Karlsruhe Oktober 2007, ETG-Fachbericht 108

T. Smolka, T. Dederichs, A. Schnettler

Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas - Ein ökologischer Vergleich zeigt Ansätze für zukünftige Förderungsmodelle
ew - das Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 14/2007

J. Wu, B. Heil, A. Schnettler

Study on durability of nanostructured superhydrophobic insulating surfaces under simultaneous climatic and electrical stresses
15th ISH(International Symposium on High Voltage Engineering) 2007 in Ljubljana, Slovenia

A. Troeger, H. Negle, B. Heil, A. Schnettler

Investigation of Treeing Behaviour and Breakdown Mechanisms in Syntactic Foam
15th ISH(International Symposium on High Voltage Engineering) 2007 in Ljubljana, Slovenia

S. Federlein, J. Schneider, A. Schnettler, U. Zickler

Asset management processes for future substation technologies
CIGRE SC B3 Colloquium - PS1 Substation 2020, Berlin 2007

K. Anantavanich, G. J. Pietsch, M. Schwinne, A. Schnettler

Modelling of SF₆-air mixtures in MV switchgear during internal arcing using a CFD tool
15th ISH(International Symposium on High Voltage Engineering) 2007 in Ljubljana, Slovenia

**M. C. Tang, J. C. Kahlen, M. Schwinne,
A. Kurz, J. Schramm, A. Schnettler**

*Influence of a Parallel Capacitance on the
Switching Behaviour of Self-Blast Circuit
Breakers*

XVIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Brno (Czech Republic) 2007

U. Macharey, A. Schnettler, T. Smolka

*Life Cycle Assessment of Ultra High Voltage
System Layout and Operation Compared
to 420 kV AC Power Systems*

IEC/CIGRÉ UHV Symposium, Beijing
(China) 2007

G. Pietsch, A. Saveliev

*Treatment of Carbon Tetrafluoride with Gas
Discharges*

Plasma Process. Polymer. 4, issue 7-8, 737-
742 (2007))



Lehre am ifht

Teaching at ifht

Lehre am ifht

Hochspannungstechnik I (SS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V 2, Ü 1, ab 6. Semester

Inhalt

- Überspannungen in Hochspannungsnetzen: innere und äussere Überspannungen, Wanderwellen, Überspannungsschutz
- Durchschlagsvorgänge: Statistik, Gasdurchschlag, Feststoffdurchschlag, Flüssigkeitsdurchschlag, Vakuumdurchschlag, Lichtbogen, Fremdschichtüberschlag
- Hochspannungs-Isolierstoffe: Kenngrössen, anorganische Isolierstoffe, organische Isolierstoffe
- Technische Exkursion

High Voltage Engineering I (Summer Term)

Lecturer: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V 2, Ü 1, from 6th semester, International Master Program: 2nd semester

Content

- Overvoltages in power systems: Travelling waves, overvoltage protection
- Breakdown-phenomena: Statistics, breakdown in gases, solids and liquids, vacuum breakdown, arcing, pollution flashover
- Insulation systems and dielectrics
- Technical excursion

Hochspannungstechnik II (WS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V 2, Ü 1, ab 7. Semester

Inhalt

- Erzeugung und Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen
- Hochspannungsteiler, Shunts
- Hochspannungsgeräte: Konstruktionsmerkmale, Kondensator, Durchführungen und Ausleitungen, Transformator, Schalter, Wandler
- Grundlagen Elektromagnetischer Verträglichkeit in energietechnischen Anlagen

High Voltage Engineering II (Winter Term)

Lecturer: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
V 2, Ü 1, from 7th semester, International Master Program: 3rd semester

Content

- Generation and measurement of high AC, DC and impulse voltages
- Dividers and Shunts
- High voltage equipment: Construction, capacitors, bushing, transformers, breakers
- Electromagnetic compatibility (EMC) for power systems

Schutzmaßnahmen und Schutzeinrichtungen in elektrischen Netzen und Anlagen

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, Ü 1, ab 5. Semester

Inhalt

- Sicherheitsvorschriften und Normen, nationale, regionale und internationale Normen, rechtliche Grundlagen der Normung; Prüfzeichen
- Gefahren durch elektrischen Strom, Unfallstatistik, Stromwirkungen auf den Menschen; Sicherheitsgrenzen; Gefährdung durch hochfrequente Felder
- Schutzmaßnahmen in Niederspannungsanlagen gegen direktes und bei indirektem Berühren; Netzformen; Schutz- und Funktionskleinspannung; Bewertung
- Schutzmaßnahmen in Hochspannungsanlagen, Erdung; Überspannungs- und Blitzschutz
- Schutz von Leitungen und Kabeln, Überlast; Kurzschluß
- Schutzeinrichtungen und deren Wirkungsweise, Schutzkriterien; Sicherungen; LS- und FI-Schutzschalter; Relais; Überspannungsableiter
- Schutzsysteme, Motor-, Generator-, Transformatorenschutz.

Protective Measures and Equipment in Power Supply Systems and Electrical Installations

Lecturer: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, Ü 1, Master program in Electrical Power Engineering

Content

- Regulations and standards, national, regional and world-wide safety regulations and standards, legal authority of standardisation, test certificates
- Risk of electric currents, accident statistics, effects of current on human body, safety limits, endangering by high-frequency fields
- Protective measures of low voltage installations against direct and indirect contact, configurations of the network, safety, protectional and functional extra low voltage, evaluation
- Protective measures of high voltage installations, earthing, overvoltage and lightning protection
- Protection of lines and cables against overload and short circuits
- Protective equipments and their modes of action, protection criteria, fuses, line protective switches and current-operated earth-leakage circuit breakers, relays, surge arresters
- Protection systems for motors, generators and transformers

Power Cable Engineering (Winter Term)

Lecturer: Dr.-Ing. D. Meurer
V 2, Ü 1, from 5th Semester

Content

- Introduction: cable industry, cable market, power cables in networks, history, technical standards, transmission properties
- Cable Components: materials, conductor, insulation, screen, sheath, armour
- Design: low-/medium-/high-voltage cables, utility/special cables
- Production: paper insulated/extruded cables, conductor/core/cable
- Quality Management: ISO 9000, quality assurance, type-/sample-/routine-test, commissioning test, ageing, lifetime
- Accessories: termination, joints, field control, installation techniques
- Cable Projects: cable route, current carrying capacity, transport, laying
- High Power Cables: cable losses, forced cooling, HVDC, gas-insulated cables, cryogenic cables, superconducting cables (LTSC, HT-SC)

Seminar Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen (SS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler
Dr.-Ing. M. Schumacher,
ABB AG

ab 6. Semester

Inhalt

- Schaltlichtbögen
- SF₆-Hochspannungsleistungsschalter
- Vakuumschalter
- Hochspannungssicherungen
- Kabelsteckverbindungen
- Leistungstransformatoren
- Einführung in die Anlagentechnik und gasisolierte Schaltanlagen
- Freiluftschaltanlagen und Anlagen der Hochspannungsgleichstromübertragung
- Mittelspannungsfelder und -schaltanlagen
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Entwicklung
- Schutz- und Stationsleittechnik
- Betriebserfahrungen mit moderner Sekundärtechnik
- Asset Management in Verteilnetzen

Siehe Bericht auf Seite 98

Praktika am ifht

Energietechnisches Praktikum I (SS)

TÜ 4, ab 6. Semester

Inhalt

Das energietechnische Praktikum I wird von mehreren Lehrstühlen durchgeführt. Drei Versuche finden am Institut für Hochspannungstechnik statt:

- Wechselspannungsmessung und Durchschlagsuntersuchungen
- Gleichspannungserzeugung und -messung
- Stoßspannungserzeugung

Laboratory in Electrical Power Engineering I (Summer Term)

TÜ 4, from 6th Semester

Content

The laboratory in Electrical Power Engineering I is carried out by several institutes. Three experiments take place at the Institute for High Voltage Engineering:

- Measurement of alternating voltages / Breakdown measurements
- Generation and measurement of direct voltages
- Surge voltages

Energietechnisches Praktikum II (WS)

TÜ 4, ab 7. Semester

Inhalt

Das energietechnische Praktikum II wird von mehreren Lehrstühlen durchgeführt. Drei Versuche finden am Institut für Hochspannungstechnik statt:

- Messen mit Teilern
- Stoßspannungsverteilung an Transformatorwicklungen
- Elektromagnetische Verträglichkeit

Laboratory in Electrical Power Engineering II (Winter Term)

TÜ 4, from 7th Semester

Content

The laboratory in Electrical Power Engineering II is carried out by several institutes. Three experiments take place at the Institute for High Voltage Engineering

- High Voltage Divider
- Transient Processes on Wires, Travelling Waves
- Electromagnetic Coupling



Hochspannungstechnisches Praktikum

TÜ 4, ab 7. Semester für Elektrotechniker

Inhalt

- Durchschlagsuntersuchungen
- Gleichspannungsuntersuchungen
- Teilentladung
- EMV Störungseinkopplung
- Stoßspannungsuntersuchung
- Transiente Vorgänge auf Leitungen
- Hochspannungsmeßtechnik
- Dimensionierung synthetischer Prüfkreise

Elektrotechnisches Praktikum I (SS)

TÜ 3, ab 2. Semester Elektrotechniker und Lehramtskandidaten

Inhalt

Das Praktikum enthält 8 Grundlagenversuche zur Einarbeitung in die elektrische Versuchstechnik mit folgenden Themenkreisen:

- Strom- und Spannungsquellen
- Spannungsteiler
- Messung in linearen Netzen
- Simulation linearer Netzwerke
- Dioden und Transistoren
- Operationsverst. (Messung)
- Operationsverst. (Simulation)
- Messung nichtelektr. Größen

High Voltage Laboratory

TÜ 4, from 7th Semester

Content

- Breakdown measurements
- Experiment on DC voltage
- Partial discharge
- EMC Interference Launch
- Surge voltages
- Transient processes on wires
- High voltage divider
- Dimensioning of a synthetic test circuit

Physikalisch-technische Laborübungen für Maschinenbauer (SS)

TÜ 4, ab 4. Semester für Maschinenbauer und Lehramtskandidaten

Gemeinschaftsveranstaltung der Fakultäten für Elektrotechnik, Maschinenwesen und der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

Inhalt

Im Rahmen dieses Praktikums werden vom Institut vier Versuche angeboten:

1. Spannungsquelle, Transformator
2. Meßbereichserweiterung, Meßwandler, Leistungsmessung im Drehstromnetz
3. Elektronenstrahloszilloskop, Gleichrichtung
4. Digitale Meßtechnik

Chronik

**Seminar Hoch- und Mittelspannungs-
schaltgeräte und -anlagen**

Aktivitäten 2007

Exkursionen

Chronicle

**Technical Seminar on Medium and
High Voltage Equipment and
Substations**

Activities in 2007

Technical Excursions

91

Chronik 2007

26.01.07

Exkursion der Vorlesung Power Cable Engineering zu Nexans, Charleroi

30.01. - 01.02.07

Armin Schnettler, Christoph Kahlen, Andreas Kurz, Michael Schwinne und Ming Chark Tang besuchen die ETH Zürich

01.02.07

Erster Arbeitstag von Tirinya Cheumchit

30.01. - 02.02.07

DAAD-Vorauswahlsitzung für Studienbewerber aus der russischen Föderation in Moskau

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

07.02.07

Information & Brokerage Day der EU-Kommission zum 7. EU-Forschungsrahmenprogramm in Köln

Teilnehmer: Bernhard Schowe-von der Brölie

08.02.07

Traditionelles Sprottenessen der InstitutsmitarbeiterInnen mit Rückblick auf das Jahr 2006

09.02.07

Doktorprüfung von Tobias Paulun: "Strategische Ausbauplanung für Elektrische Netze unter Unsicherheit" an der RWTH Aachen

Korreferent: Armin Schnettler

11.02. - 18.02.07

Besuch von Evgeni Tonkonogov von der Technischen Universität St. Petersburg im Rahmen des Leonhard-Euler-Projekts am Institut

21.02. - 18.03.07

Besuch von Victor Belko, Evgeny Gorodchuk, Juri Solovey und Oleg Vaytishin von der Technischen Universität St. Petersburg im Rahmen des Leonhard-Euler-Projekts am Institut

18.02. - 23.02.07

Besuch der Thai German Graduate School in Bangkok, Thailand
Armin Schnettler

11.02. - 18.02.07

Besuch von Prof. Yuriy Boacharov und Prof. Evgenij Tonkonogov von der Technischen Universität St. Petersburg im Rahmen des Leonhard-Euler-Projekts am Institut

21.02. - 18.03.07

Aufenthalt von Victor Belko, Evgeny Gorodchuk, Juri Solovey, Oleg Vaytishin von der Technischen Universität St. Petersburg im Rahmen des Leonhard-Euler-Projekts am Institut

06.03.07

CIGRÉ-Meeting "Transmission Asset Risk Management" in Arnhem, Niederlande

Teilnehmer: Stefan Federlein

09.03.07

Podiumsdiskussion "Erneuerbare Energien" im Rahmen der TEFAF in Maastricht

Referent: Armin Schnettler

09.03.07

Doktorprüfung von Arno Wahle: „Untersuchungen zum Einsatz von Energieabsorbern in Ringkabelschaltanlagen im Störlichtbogenfall“ an der RWTH Aachen

Referent: Gerhard Pietsch

12.03.07

Wissenschaftliche Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): "Bewertung der Optimierungspotenziale zur Integration der Windenergie in das Verbundnetz" in Berlin

Abschlusspräsentation: Armin Schnettler, Uwe Macharey

12.03. - 15.03.07

Auswahlgespräche mit Bewerbern aus der Russischen Föderation für DAAD-Studienstipendien (Masterprogramm) in Moskau

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

23.03.07

Rechtliche, administrative und finanzielle Regelung im FP7-Workshop des EU-Büros des BMBF

Teilnehmer: Bernhard Schowe-von der Brölie

15.04. - 17.04.07

Hannover-Messe, Podiumsdiskussion "Life needs Power" - "Smart Grids & Großverbund - Widerspruch oder Ergänzung"

Moderator: Armin Schnettler

24.04.07

Auswahlsitzung für Stipendiaten aus osteuropäischen Staaten der Mummert-Stiftung (Führungskräftenachwuchs) in Bonn-Bad Godesberg

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

14.05.07

High Volt Kolloquium 2007 in Dresden

Teilnehmer: Michael Keßler

19.05.07

Marathonlauf in Mannheim

Teilnehmer: Armin Schnettler, Felix Schnettler, Junliang Wu, Mikimasa Iwata, Kittipong Anantavanich



Die Teilnehmer des Marathonlaufs

21.05. - 24.05.07

19th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution in Wien, Österreich

Teilnehmer: Thomas Smolka

25.05.07

Dr. Mikimasa Iwata erhält den "Technology Progress Award" vom IEEJ (Institute of Electrical Engineers of Japan) für seine Arbeiten zum Thema "Development of arcing horns for interrupting short-circuit current of 66kV/77kV transmission line".

28.05. - 01.06.07

Pfingstexkursion nach Frankreich

Leitung: Armin Schnettler

09.06. - 10.06.07

Segelwochenende

11.06. - 13.06.07

FGH Fachtagung "Windenergie und Netzzintegration" in Hannover

Teilnehmer: Armin Schnettler, Uwe Macharey, Bernhard Schowe-von der Brölie

14.06. - 15.06.07

Schaltanlagen-Seminar "Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen 2007"

Leitung: Dr. Martin Schumacher

30.06.07 Letzter Arbeitstag von Michael Schwinne	26.08. - 31.08.07 15th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Ljubljana, Slowenien Teilnehmer: Alexander Tröger, Bernhard Heil, Kittipong Anantavanich
04.07. - 11.07.07 Besuch der Thai German Graduate School in Thailand Armin Schnettler, Stefan Federlein	31.08.07 Gründungsversammlung "EnergyHill e.V." im Quellenhof Aachen Teilnehmer: Bernhard Schowe-von der Brellie
11.07.07 Doktorprüfung von Christoph Meyer: "Key Components for Future Offshore DC Grids" an der RWTH Aachen Korreferent: Armin Schnettler	01.09.07 40-jähriges Dienstjubiläum von Werkstatt-leiter Helmut Gehlen
12.07.07 Vortrag am IFHT: "Weltmarkt aus Sicht eines Energietechnik-Herstellers" Referent: Dr. Georg Friberg, ABB AG Hanau	03.09.07 Besuch von Mr. Miyazaki, Shikoku Electric Power Co., Japan am Institut
13.07.07 Besuch von Professor Tanaka, Waseda University Kyushu, Japan	03.09.07 Erster Arbeitstag von Thomas Dederichs
16.07. - 22.07.07 IEC CIGRÉ UHV Symposium in Beijing, China Vortrag "Life Cycle Assessment of Ultra High Voltage system layout and operation compared to 420 kV AC power systems" Teilnehmer: Uwe Macharey	10.09. - 13.09.07 FSO 2007, XVIIth International Symposium on Physics of Switching Arc in Brno, Tschechien Teilnehmer: Ming Chark Tang
01.08.07 Erster Arbeitstag von Christian Hille	12.09. - 13.09.07 CIGRÉ B3 Kolloquium 2007, Berlin Teilnehmer: Stefan Federlein, Christian Hille, Sebastian Winter, Michael Kippen, Klaus Philipp Düren
22.08.07 Dr. Y. Goda, CRIEPI, Yokosuka, Japan besucht das Institut	14.09. - 06.10.07 Exkursion nach Thailand
24.08.07 Betriebsausflug zum Deutschen Sport- und Olympia-Museum in Köln, Wanderung zu den Brauhäusern und Fahrt zum Chefgarten nach Kornelimünster	20.09 - 21.09.07 FGE-Tagung "Markt und Netze" Teilnehmer: Christian Hille, Thomas Dederichs

26.09. - 27.09.07

Ökobilanzwerkstatt 2007 des Netzwerks
Lebenszyklusdaten in Bad Urach
Teilnehmer: Thomas Dederichs

15.10. - 17.10.07

Umbrella Symposium "Renewable Energy"
am IFHT
RWTH Aachen, Forschungszentrum Jülich,
Technion Haifa, Israel

30.09. - 18.10.07

DAAD-Seminar: Electrical Engineering for
young Russian Engineers am IFHT
Wissenschaftliche Leitung: Gerhard
Pietsch

22.10. - 24.10.07

ETG-Kongress 2007 in Karlsruhe
Teilnehmer: Armin Schnettler, Stefan Fe-
derlein, Tirinya Cheumchit, Thomas Dede-
richs, Christian Hille

01.10.07

Armin Schnettler übernimmt die Funkti-
on des Herausgebers der wissenschaftli-
chen Zeitschrift "Archiv für Elektrotech-
nik - Electrical Engineering" des Springer
Verlags. Die Erstherausgabe der Zeitschrift
erfolgte im Jahr 1912 durch Professor Ro-
gowski

26.10.07

Doktorprüfung von Christian Leo Krane:
„Strukturbewertung elektrischer Übertra-
gungsnetze“ an der RWTH Aachen
Korreferent: Gerhard Pietsch

03.10.07

Besuch von Prof. R. Smeets, KEMA Arn-
heim und N. Uzelac, G&W Electric Co.
USA zum Gedankenaustausch über Stör-
lichtbogenprobleme
Teilnehmer: Gerhard Pietsch, Kittipong
Anantavanich

29.10. - 31.10.07

Auswahlsitzung für Lomonossov-
Stipendiaten der Russischen Föderation in
Moskau
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

10.10.07

Fachtagung "SF₆-Hochspannungsschaltan-
lagen" an der Technischen Universität
Darmstadt
Teilnehmer: Christian Hille

29.10. - 03.11.07

South Africa National Committee of CI-
GRÉ in Mosselbay, Südafrika
Teilnehmer: Thomas Smolka

02.11.07

1. Arbeitstag von Matthias Hoffacker

11.10. - 12.10.07

CIGRÉ Working Group C1-16 in Brügge,
Belgien
Teilnehmer: Stefan Federlein

02.11.07

Empfang im russischen Generalkonsulat für
Stipendiaten der russisch-deutschen „Mi-
chael Lomonossov- und Immanuel Kant-
Programme“ in Bonn-Bad Godesberg
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

12.10.07

Abschlussfeier für Mummertstipendiaten in
Köln
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

02.11.07

1. Arbeitstag von Rattanakorn Phadung-
hing

07.11.07

ATEC Aachener Technology Entrepreneurship Conference 2007 in Aachen
Teilnehmer: Christian Hille, Thomas Dederichs

10.11.07

Mikimasa Iwata kehrt nach einjährigem Aufenthalt in Aachen nach Japan zurück

14.11.07

Auswahlsitzung im Rahmen des DAAD-Sonderprogramms „Akademischer Neuaufbau Südosteuropa“ in Bonn-Bad Godesberg
Teilnehmer: Gerhard Pietsch

15.11.07

Fachkonferenz 2007 der Gesellschaft für Netzintegration (GENI): „Die Zukunft der Einspeisung“; Vortrag: „Kombikraftwerk oder European-Super-Grid? Was hilft dem Netz?“ in Dormagen (Zons)
Referent: Armin Schnettler
Teilnehmer: Thomas Dederichs

17.11.07

Verleihung des Preises „Der Mann mit der ruhigen Kugel“ im Rahmen des 31. Hochwissenschaftlichen Kolloquiums am IFHT an Ming Chark Tang

21.11. - 23.11.07

FGH Seminar „Probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse elektrischer Energieversorgungssysteme“ in Deidesheim
Teilnehmer: Christian Hille, Tirinya Cheumchit

22.11.07

Besuch von Walter Rogowski und Ehefrau, Neffe des Institutsgründers Walter Rogowski



Walter Rogowski und Ehefrau

27.11.07

Workshop „Transformation and Innovation in Power Systems (TIPS)“ in Berlin
Teilnehmer: Thomas Dederichs

28.11.07

CIGRÉ/CIRED - „Informationsveranstaltung. Verbrauchsnahe versus verbrauchsferne Stromerzeugung“ in Stuttgart
Teilnehmer: Stefan Federlein

28.11. - 30.11.07

BMBF Foresight-Workshop in Berlin
Teilnehmer: Bernhard Schowe-von der Brölie

29.11.07

Besuch einer Delegation von Hochschullehrern und leitenden Verwaltungsbeamten der Staatlichen Polytechnischen Universität St. Petersburg

02.12.07 - 04.12.07

Fachkongress „Netztechnik“ (VWEW-Kabeltagung) in Erfurt
Referent: Armin Schnettler
Teilnehmer: Ming Tang, Florian Ellerkamp, Thorsten Weber, Tilman Schmidt, Markus Plewnia, Bartholomäus Wasowicz

03.12. - 06.12.07

“European Offshore Wind 2007“ in Berlin
Teilnahme: Uwe Macharey

05.12. - 08.12.07

One World - Many Facets, Alumni-Meeting
der Siemens/DAAD-Stipendiaten in Mün-
chen

Teilnehmer: Andrey Mashkin, Gerhard
Pietsch

07.12.07

Doktorprüfung von Phuwanart Choonha-
pran aus Bangkok: “Applications of High
Voltage Circuit Breakers and Development
of Aging Models“ an der TU Darmstadt
Korreferent: Armin Schnettler

12.12.07

AiF-Workshop “Nanotechnologie“ in Stutt-
gart

Referent: Junliang Wu

19.12.07

Weihnachtsfeier des IFHT

20.12.07

Evaluation des DAAD-Seminars für junge
russische Ingenieure in Berlin

Teilnehmer: Gerhard Pietsch



Seminar Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen 14.6. - 15.6. 2007

Wie bereits in den vergangenen fünf Jahren fand auch in 2007 das Blockseminar als Weiterbildungsveranstaltung des Instituts für Hochspannungstechnik in Zusammenarbeit mit dem VDE-Regio Aachen und der FGH Mannheim statt.

Insgesamt 13 Referenten aus der Industrie gaben einen umfassenden Überblick über den Aufbau, die Funktionsweise von Komponenten und Anlagen der elektrischen Energieübertragung und -verteilung. Für die Seminarleitung konnte, wie schon in den letzten Jahren, Herr Dr.-Ing. Martin Schumacher gewonnen werden.

Ausgehend von den physikalischen Grundlagen wurde die Schaltgeräte- und Anlagentechnik bis zu wirtschaftlichen Aspekten und Asset Management Strategien umfassend behandelt.

Neben der Funktionsweise eingesetzter Geräte, wie z. B. Schaltgeräte, Schaltanlagen oder Schutzeinrichtungen wurden Betriebserfahrungen mit moderner Anlagentechnik aus Sicht der Energieversorgungsunternehmen präsentiert und Informationen über gültige Vorschriften und Normen gegeben.



Das Seminar-Programm gliederte sich in folgende Vorträge:

- **Begrüßung**
Prof. Dr.-Ing Rolf Windmüller
VDE Landesvertretung NRW
- **Einführung in die Thematik**
Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB AG Hochspannungsprodukte,
Hanau-Großauheim
- **Schaltlichtbögen**
Dr.-Ing. Max S. Claessens,
ABB Schweiz AG, Zürich
- **SF₆-Hochspannungsleistungsschalter**
Dr.-Ing. Roland von Starck,
Siemens AG, Berlin
- **Vakuumschalter**
Dr.-Ing. Dietmar Gensch,
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen
- **Hochspannungssicherungen**
Dipl.-Ing. Johannes-Goerg Gödeke,
SIBA GmbH & Co. KG, Lünen
- **Kabelsteckverbindungen**
Dipl.-Ing. Litz Zühlke
Pfisterer Kontaktsysteme GmbH & Co. KG, Winterbach
- **Leistungstransformatoren**
Dipl.-Ing. Frank Hofmann,
AREVA Energietechnik GmbH, Möchengladbach
- **Einführung in die Anlagentechnik**
Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB Schweiz AG Hochspannungsprodukte, Zürich

- **Freiluftschaltanlagen und Anlagen der Hochspannungsgleichstromübertragung**

Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn,
AREVA Energietechnik GmbH, Berlin

- **Gasisolierte Schaltanlagen**

Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB Schweiz AG Hochspannungsprodukte, Zürich

- **Mittelspannungsschaltanlagen**

Dipl.-Ing. Heinz Schwartze,
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen

- **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Entwicklung**

Dr.-Ing. Hartmut Knobloch,
Siemens AG, Berlin

- **Schutz- und Stationsleittechnik**

Dr.-Ing. Siegfried Lemmer,
Siemens AG, Nürnberg

- **Betriebserfahrungen mit moderner Sekundärtechnik**

Dr.-Ing. Heinrich Hoppe-Oehl,
RWE Rhein-Ruhr AG, Neuss

- **Asset Management in Verteilnetzen**

Prof.Dr.-Ing. Armin Schnettler,
RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik

Die Teilnehmerzahl lag bei insgesamt 90 Teilnehmern, von denen 35 aus der Industrie stammen sowie 55 Studierende. In diesem Jahr wurde das Programm durch eine Studentenexkursion zur 400kV Schaltanlage Aachener Kreuz und zum Transformatorenwerk der Firma AREVA Schorch Energietechnik GmbH in Mönchengladbach abgerundet. Bei allen Vortragenden, der STAWAG, Aachen und AREVA, Mönchengladbach möchten wir uns an dieser Stelle noch einmal herzlich bedanken.

Ausblick

Aufgrund der guten Resonanz und positiven Kritik soll das Seminar auch 2008 angeboten werden, dann jedoch in modifizierter Form: Um die Themengebiete Schutz- und Stationsleittechnik eingehender als bisher behandeln zu können, soll das Seminar an drei Tagen mit erweitertem Programm stattfinden. Dabei sollen in den ersten zwei Tagen Aspekte der Primär- oder Anlagentechnik behandelt werden, der dritte Tag wird ausschließlich der Sekundärtechnik gewidmet. Wie üblich wird für die teilnehmenden Studierende eine Exkursion angeboten werden.

Das Schaltanlagenseminar 2008 wird für 16.06-18.06.2008 terminiert.

Hochspannungstechnik für Konstrukteure

Das IFHT bietet ab diesem Jahr ein Trainingsseminar für Mitarbeiter aus der Industrie an. Ein erster Durchgang im Frühjahr wurde bereits erfolgreich absolviert. Ziel des Seminars ist die Vermittlung von hochspannungstechnischem Know How an Praktiker, die ursprünglich nicht aus dem Bereich der Elektrotechnik kommen oder ihre Kenntnisse nach einiger Zeit wieder auffrischen möchten. Hierbei kommt eine Kombination aus traditioneller Wissensvermittlung und Anwendung modernster Medien, wie z.B. das e-Learning, zum Einsatz.

Einleitung

Für die erfolgreiche Bearbeitung interdisziplinärer Fragestellungen ist es notwendig, dass Spezialisten verschiedener Fachgebiete Hand in Hand arbeiten. Vorteilhaft ist hierbei, wenn jeder ein Gefühl für die Problemstellungen der jeweils anderen besitzt. In der Praxis sieht es jedoch häufig so aus, dass diese Sensibilität fehlt. So weiss z.B. ein Konstrukteur häufig nur, dass er Hochspannung führende Teile abrunden muss, nicht aber warum und wie. Das IFHT bietet in diesem Zusammenhang seit 2007 ein Trainingsseminar für Mitarbeiter aus der Industrie an, in dem maßgebliche Problemstellungen der Hochspannungstechnik vermittelt werden.

Struktur des Seminars

Das Seminar mit maximal sechs Teilnehmern gliedert sich in fünf Einheiten:

- Grundlagen elektrischer Felder
- Dielektrika, Mischdielektrika, Grenzflächen und Isolationsfehler
- Durchschlagmechanismen, Alterung
- Komplexere Geometrien (Durchführungen), hochfrequente Vorgänge
- Magnetik und Transformatormessungen

Sind die ersten vier Units noch eher als Grundlagenvermittlung anzusehen, ist das

fünfte Kapitel auf die jeweilige Zielgruppe zugeschnitten. Bei der Wissensvermittlung kommt eine Mischung aus klassischen und modernen Methoden zur Anwendung. Der klassische Teil besteht pro Unit aus einer zweistündigen **theoretischen Einheit**, einer einstündigen **Übung** sowie einer vierstündigen **Laborübung**. Hierbei ist zu betonen, dass der **theoretische Teil** nicht im Stile einer klassischen Vorlesung gehalten wird, vielmehr gibt es die Möglichkeit der intensiven Diskussion. Zudem können konkrete Aufgabenstellungen der Seminarteilnehmer behandelt werden. Im **Übungsteil** soll durch Bearbeitung geeigneter Aufgaben das Wissen weiter vertieft und weiterhin quantitative Beispiele für die Theorie geliefert werden. In der **Laborübung** wird schließlich das Gelernte eigenständig experimentell überprüft und angewendet.

Der moderne Teil der Wissensvermittlung bezieht sich auf e-Learning-Einheiten. Über ein Internetportal besteht die Möglichkeit, die Folien und Lernmaterialien nachzuschlagen sowie Links zu weiteren externen Angeboten zu verfolgen. In einem Selbsttest (Self-Assessment) besteht zu jeder Unit die Möglichkeit das Gelernte zu überprüfen und mögliche Lücken zu schließen. Da hierbei jeweils eine begrenzte Anzahl an Fragen aus einem größeren Pool genommen wird und die Antwortmöglichkeiten rotieren, ist ein reines auswendig lernen praktisch ausgeschlossen. Ergänzend besteht die Möglichkeit, sich über ein Forum untereinander auszutauschen. Eine Aufnahme der Theorie und Übung auf Video wird eben-

falls angestrebt, um eine Nachbereitung des Stoffes zu ermöglichen.

Erfahrungen

Ein erster Durchgang des Seminars wurde im April/Mai diesen Jahres erfolgreich absolviert. An fünf aufeinanderfolgenden Freitag Nachmittagen fanden Theorie und Übungen, am Samstag Vormittag die Laborübungen statt. Vor dem Seminar wurde eine Wissenstandserhebung durchgeführt und die Entwicklung über das Onlinportal protokolliert. In Tab. 1 ist die Entwicklung der Testergebnisse dargestellt.

Teilnehmer	vor Seminar	nach Seminar	nach 1/2 Jahr
1	2	9,3	9,5
2	3	7,7	7,8
3	3	9,4	9,4
4	3	9,3	9,5
5	1	7,3	7,2
6	2	8,3	8,5

Tab. 1: Testergebnisse

Es wurde ein Eingangstest über alle fünf Units gemacht (zweite Spalte). Die dritte Spalte zeigt den Mittelwert über die Testergebnisse aus allen fünf Units unmittelbar nach dem Seminar. Es ist eine deutliche Verbesserung zu erkennen, was den Lernerfolg des Seminars bestätigt. Da das Onlinportal auch nach Abschluß des Seminars für eine längere Zeit freigeschaltet bleibt, können die Themen in regelmäßigen Abständen wiederholt und getestet werden. Spalte

vier zeigt den Mittelwert der Testergebnisse ein halbes Jahr nach Abschluß des Seminars. Erkennbar ist hier, dass der Wissensstand auf diese Weise über einen längeren Zeitraum gewahrt werden kann.

Fazit

Der erste Durchgang hat gezeigt, dass die gewählte Verknüpfung von Methoden der Wissensvermittlung großen Erfolg hatte und dazu beitragen kann das Wissen auch über einen längeren Zeitraum zu wahren. Weiter hat die Evaluierung ergeben, dass die Resonanz seitens der Teilnehmer durchweg positiv ausgefallen ist. Die Gliederung und Thematik, die Lehrmaterialien und -methoden, das Interesse sowie der Erfolg der Teilnehmer wurden hervorgehoben. Die Veranstaltungen „im kleinen Kreis“ und „Zeit für Zwischenfragen“ wurden besonders gelobt. Weiter wurde der Wunsch nach „mehr Laborstunden“ und Vorschläge für Inhalte weiterer Ausbildungseinheiten geäußert. Darauf aufbauend sind derzeit weitere Einheiten in der Vorbereitung.

Kontakt

Dipl.-Ing. Christoph Kahlen
kahlen@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94912

Dipl.-Ing. Michael Keßler
kessler@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94936

IFHT-Studenten bewegen sich auf dem internationalen Parkett der Schaltanlagen-Technik

Um einen Gedankenaustausch zwischen Studenten und international erfahrenen Ingenieuren anzuregen, nahmen dreizehn Studenten aus ganz Deutschland am Cigré Colloquium and Tutorial „Substations“ teil, welches vom 11.-14. September 2007 in Berlin stattfand. Vier dieser Studenten kamen mit der Unterstützung des IFHT aus Aachen.

In diesem Jahr bot das Institut für Hochspannungstechnik auf Initiative von Herrn Wolfgang Degen (Siemens AG) und Prof. Schnettler vier ausgewählten Aachener Studenten, zusammen mit Kommilitonen aus Braunschweig, Dresden und München, die Möglichkeit der Teilnahme am „Berlin Colloquium and Tutorial of CIGRÉ Study Committee B3“.



Teilnehmer des Cigré-B3-Colloquiums

Unter dem Motto „Sustainable and reliable electricity supply using modern substation technologies“ diskutierte ein international besetztes Plenum zwei Tage über die Zukunft moderner Schaltanlagen. Den Studenten wurde hierbei in Form von Vorträgen und Plenarveranstaltungen nicht nur ein Überblick über bestehende, verschiedene nationale Schaltanlagenkonzepte von Canada bis Japan geboten, sondern auch ein Ausblick auf die zukünftige internationale

Entwicklung der Branche.

Zusätzlich zu dem den Vorträgen auf fachlich hohem Niveau, zu denen auch ein Vortrag des IFHT mit dem Titel „Asset Management Processes for Future Substation Technologies“, präsentiert von Stefan Federlein gehörte, konnte der Kongress auch durch sein hervorragendes Rahmenprogramm überzeugen. Sowohl der Empfang in der Berliner Siemens Dependance, den Wurzeln des Unternehmens, mit anschließender Werksführung, als auch die „River Cruise Tour“ auf der Spree erfreuten sich äußerster Beliebtheit. Von studentischer Seite wäre als weiterer Höhepunkt noch die Einkehr in die letzte rheinische Bastion der Hauptstadt, auch bekannt als „Ständige Vertretung“ zu nennen, in der ein reger Austausch unter den Studenten der verschiedenen Universitäten gepflegt wurde.

Am letzten Tag trennten sich die studentischen Teilnehmer nicht ohne vorher Kontaktadressen auszutauschen und gegenseitig die Einladung auszusprechen, die jeweils andere Universität doch einmal zu besuchen.

Text: K. Düren, M. Kippen, S. Winter
Foto: CIGRÉ

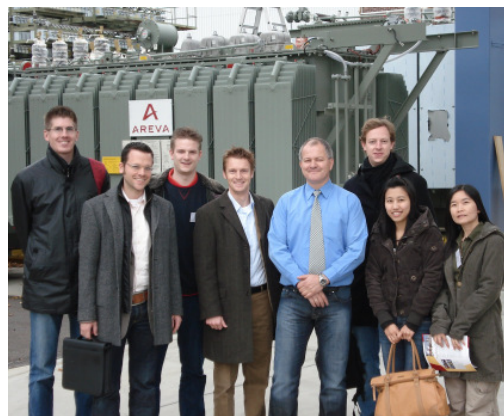
Besuch der Areva Schorch GmbH

Die Beurteilung des Alterungsverhaltens sowie des Zustandes verschiedener Betriebsmittel ist ein Ziel der Forschungsgruppe „Anlagentechnik und Asset Management.“ Der hohe Stellenwert von Transformatoren in der Energieversorgung begründet den Einbezug dieser Assets in die aktuellen Untersuchungen. Um Informationen über die Herstellung von Transformatoren sowie neue Methoden des Online-Monitorings aus erster Hand zu erhalten, besuchte die Forschungsgruppe am 5. November 2007 das Transformatorenwerk der Areva Schorch GmbH in Mönchengladbach.

Am Montag, den 5. November 2007 fuhr die Forschungsgruppe „Anlagentechnik und Asset Management“ zum Transformatorenwerk der Areva Schorch GmbH in Mönchengladbach. Seit mehr als 100 Jahren fertigt das Unternehmen Transformatoren. 1882 hatte der Pionierunternehmer Max Schorch die Firma gegründet, 1904 wurden die ersten Trafos ausgeliefert. Heute arbeiten ca. 240 Mitarbeiter an der Entwicklung und Fertigung von Transformatoren, die Leistungen von einigen 100 MVA erreichen. Die boomenden asiatischen Märkte erfordern eine Erweiterung der Kapazitäten. Der französische Energiekonzern investiert dazu 4,5 Millionen Euro in den Neubau einer Produktionshalle für die Tochtergesellschaft in Mönchengladbach.

Im Bereich Online-Monitoring für Leistungstransformatoren ist Areva führend auf dem Weltmarkt. Den Teilnehmern der Exkursion bot sich somit die Möglichkeit, aus erster Hand Informationen zu neuesten Entwicklungen zu erhalten. Michael Rösner, Verantwortlicher für die Entwicklung neuer Monitoringsysteme bei Areva, übernahm hierbei die Federführung. In einem ausführlichem Vortrag erläuterte er das neue Monitoring-System MS 3000, welches den Netzbetreibern jederzeit den Zugriff auf spezifische Daten der Transformatoren erlaubt. Die Bestimmung von Durchführungskapazitäten, Öl-Analysen, Hot-Spot-Messungen und weitere Funktionalitäten erlauben somit eine Beurtei-

lung des aktuellen Transformatorenzustandes, ohne eine kostenintensive Instandhaltungsmaßnahme durchzuführen.



Die AM-Gruppe mit M. Rösner bei Areva

In einer anschließenden Diskussion gefolgt von einem Mittagessen, war es möglich die offerierten Informationen auch im Hinblick auf eine Anwendung für Auswertungen am IFHT näher zu beleuchten. So konnten verschiedene Parameter isoliert werden, die für eine Zustandsbeurteilung unabdingbar sind. Diese Kenntnisse konnten bei der abschließenden Werksbesichtigung noch vertieft werden. Die Ausmaße verschiedener Großtransformatoren hinterließen bei allen Teilnehmern einen bleibenden Eindruck. Für diesen hochinformativen und unterhaltsamen Tag möchte sich die Forschungsgruppe „Anlagentechnik und Asset Management“ herzlich bei Herrn Rösner bedanken.

Text: Christian Hille, Klaus Düren

Das 31. Hochwissenschaftliche Kolloquium

oder

Die Wahl zum Hektiker 2007

Die 31. Veranstaltung des Hochwissenschaftlichen Kolloquiums stand unter dem Motto „Big Hektiker is watching you“. Im Rahmen dieser Veranstaltung wurde der hektischste Arbeitskollege mit dem Wanderpokal „Der Mann mit der ruhigen Kugel“ gekürt, auf das ihn diese Auszeichnung auf den Pfad der Ruhe zurückführe.

Mit Beginn der fünften Jahreszeit am 11.11. um 11:11 Uhr fand auch die Wahl statt, mit deren Hilfe der hektischste Mitarbeiter des IFHT ermittelt wird. Traditionsgemäß wurden hierzu Berliner gereicht und der Wahlvorgang mit karnevalistischer Musik untermauert.

Das Hochwissenschaftliche Kolloquium am 17. November 2007 stellte dann den festlichen Rahmen, um den „demokratisch“ auserwählten neuen Hektiker zu ehren. Unter dem Motto „Big Hektiker is watching you“ wurden die hektischen Aktionen der Mitarbeiter des Institutes dokumentiert und an diesem Abend durch die drei „Untersuchungsgruppen“ dargelegt. Hervorragende Arbeiten leisteten die Agententeams unter den Pseudonymen „MI5“, „Mossad“ und „KGB“, um die geheimen Ermittlungen mit viel guter Laune, einer Portion Witz, gespickt mit einem Hauch Ironie zu präsentieren. Nicht immer wurde dabei ausschließlich auf faire Mittel zurückgegriffen.



Einsatz von unfairen „Waffen“

Am Ende der vorgestellten Untersuchungen wurde der Gewinner des Pokals „Der Mann mit der ruhigen Kugel“ bekannt gegeben. Diese Auszeichnung wird dem neuen Hektiker zur Mahnung und als Vorbild überreicht. Als seine erste Amtshandlung ruft er dann die Eröffnung des Anschlussprogramms aus. Der gemütliche Teil des Abends findet in einem passenden Ambiente ihren Ausklang.



Ehrung des neuen Hektikers (rechts) mit dem Pokal in den Händen haltend

Autor: Ming Tang

Betriebsausflug nach Köln am 24. August 2007

Im Jahr 2007 führte der Betriebsausflug das IFHT nach Köln. Dort wurden die Mitarbeiter des Institutes im Deutschen Sport und Olympia Museum zunächst aktiv gefordert. Im Rahmen des Wettbewerbs "Höher, Schneller und Weiter" galt es, die sportliche Leistungs- und Teamfähigkeit unter Beweis zu stellen. Anschließend konnten sich die Mitarbeiter auf einer Stadtführung der etwas anderen Art, dem Kölner Brauhauswanderweg, erholen und erfahren einiges Wissenswertes über die Stadt Köln. Eine Einführung in die traditionelle Kölsche Braukunst durfte hierbei natürlich ebenso wenig fehlen, wie das traditionelle Abschluss-Grillen bei Familie Schnettler.

Sport und Olympia Museum

Pünktlich um 08:00 Uhr brach das IFHT zum deutschen Sport und Olympia Museum auf. Nachdem die Auslosung in die fünf verschiedenen Teams, benannt nach großen Sportlerinnen und Sportlern der Vergangenheit und Gegenwart, durchgeführt worden war, sprach Renate Bosetti stellvertretend für alle Athleten den Olympischen Eid. Jetzt mussten sich die Teams in acht verschiedenen Disziplinen einer mehr als 2500 jährigen Sportgeschichte stellen. Bei der ältesten Disziplin handelte es sich um den antiken Fünfsprung.



Guido Xhonneux als Biathlet

Angespornt von den Kollegen jagte eine Höchstleistung die nächste. Doch nicht nur Kraft, sondern auch Reaktionsfähigkeit, Wissen über die Sportgeschichte sowie Teamfähigkeit waren gefordert, um ein möglichst gutes Abschneiden des Teams

zu gewährleisten. Beim Biathlon galt es beispielsweise trotz eines erhöhten Pulses eine sichere Hand zu behalten und möglichst fünfmal ins Schwarze zu treffen. Des Weiteren konnten die Hobbyfußballer der IFHT-Betriebssportgruppe ihre Fähigkeiten an einer original Torwand aus den Anfängen des aktuellen Sportstudios demonstrieren. Vorbei an der Torwand ging es schließlich hinauf auf das Dach des Museums, Kölns höchsten Sportplatz, um sich im Streethockey und Basketball zu messen. Die Abschlussdisziplin war schließlich eine Partie Dart. Am Ende des Tages gab es zwar keine Verlierer, aber dennoch wurden die Platzierungen im Rahmen einer Siegerehrung entsprechend gewürdigt.



Die Sieger des Wettbewerbes "Höher, Schneller und Weiter"

Brauhauswanderweg

Nachdem sportliche Höchstleistungen von allen IFHT-lern erbracht worden waren, hatten wir uns eine Stärkung in Form des Kölner national Gerichtes "Halve Hahn" verdient. Für alle "nicht-Kölner", der Halve Hahn hat nichts mit einem Hähnchen gemeinsam; hierbei handelt es sich um ein Roggenbrötchen und eine Scheibe mittelalten Gouda, zu dem typischerweise ein Kölsch getrunken wird. Frisch gestärkt wurden wir nun im Brauhaus Sion von zwei Imis, wie der Kölner zwar in Köln wohnende aber nicht hier geborene Bürger nennt, herzlich zu einer kleinen Bierkunde begrüßt. Voller Vorfreude auf die fünfundzwanzig verschiedenen Kölschsorten machten wir uns nun auf zu einer etwas anderen Stadtführung. Über die alte Römerstraße führte uns der Weg zum Dom. Hier erfuhren wir viel Wissenswertes über den Dom und die Stadtgeschichte Kölns. Nun wanderten wir weiter vorbei am Heinzelmannbrunnen und vorbei am Frühkölsch in Richtung Rathaus.



Vor dem Heinzelmannbrunnen

Dort wurden wir eingeweiht in die Parfümeriekünste der Familie Farini und zogen schließlich weiter in Richtung Altstadt. Nach zahlreichen theoretischen Abhandlungen über die Kölner Brauereikünste konnten wir im schön gelegenen Biergarten des Paffgen unter einigen Schatten spendenden Bäumen endlich wieder die Probe aufs Exempel machen und praktische Erfahrungen sammeln. Auf dem weiteren

Weg begegneten wir nun den zwei wohl bekanntesten Kölnern, Tünnes und Schäl. Um uns auch für das nächste Jahr wieder Glück zu sichern, rieben wir dann, so wie es der Brauch verlangt, über die Nase des Tünnes.



Gruppenbild einiger Teilnehmer mit Tünnes und Schäl

Der Weg führte uns weiter über den Eisenmarkt, der bekannt für die Puppenspieler ist, wieder auf den Alter Markt, wo unsere Führung schließlich endete. Nach einigen Abschluss-Kölsch und einer weiteren Stärkung traten wir nun bester Stimmung die Rückreise nach Aachen an.

Ausklang bei Familie Schnettler

Im Anschluss an den Betriebsausflug lud Prof. Schnettler die Angehörigen des Instituts zum traditionellen Grillen in seinen Garten ein. Gut gelaunt folgten die meisten Mitarbeiter gerne dieser Einladung und bereicherten das opulente Grillbuffet durch ein kleines Mitbringsel in Form eines Salates oder eines heißbegehrten Pflaumenkuchens. So wurde dieser Abend zu einem gemütlichen und wiederholenswerten Abschluss eines schönen und abwechslungsreichen Tages.

Organisation

Dipl.-Ing. Andreas Kurz
M.Sc. Tirinya Cheumchit

Pfingstexkursion nach Frankreich

Auch in diesem Jahr organisierte das IFHT wieder eine Pfingstexkursion. Diesmal führte die Exkursion die Teilnehmer, die wie in jedem Jahr aus Assistenten des Lehrstuhls und aus Studenten bestanden, vom 28. Mai bis zum 01. Juni nach Frankreich. Traditionsreiche Unternehmen wie die EDF (Électricité de France) oder die Firma Areva ermöglichten den Teilnehmern einen interessanten Einblick in den industriellen Alltag. Einen Höhepunkt des Rahmenprogramms stellte eine Bootsfahrt auf der Seine dar, die mit ihren zahlreichen Panoramen für bleibende Eindrücke sorgte.

Anreise nach Paris

Am Montagmorgen um 07:30 Uhr trafen sich 8 Assistenten und 40 Studenten am Treffpunkt Wüllnerstraße um, angeführt von Prof. Schnettler, in das etwa 430 km entfernte Paris aufzubrechen. Dort trafen wir mit etwas Verspätung gegen 15:00 Uhr ein und bezogen unsere Zimmer in der Jugendherberge "Auberge Internationale de Jeunes de Paris" im Pariser Stadtzentrum.



Blick vom Trocadéro auf den Eiffelturm in Paris

Nachdem die Zimmer bezogen wurden, folgten einige Teilnehmer der Einladung von Prof. Schnettler zum Lauftraining, während andere die Zeit zu einer ersten

Stadterkundung nutzten und den ersten Blick auf den Eiffelturm genießen durften. Am frühen Abend traf man sich schließlich zu einer Sightseeingtour auf der Seine. Die Tour startete unterhalb der Pont-Neuf, führte vorbei an der Kathedrale ,Notre Dame, dem Hôtel de Ville, dem Louvre und zahlreichen weiteren Sehenswürdigkeiten. Vom Boot aus konnten wir so die großartigen Eindrücke auf uns einwirken lassen und anschließend den Tag bei einem gemütlichen Essen in einer Pariser Seitenstraße ausklingen lassen.

EDF (Électricité de France) in Renardières

Nach einem stärkenden "petit-déjeuner" brachen wir am Dienstagmorgen um 08:00 Uhr in das etwa 80 km entfernte Renardières auf, um dort das EDF Research Center zu besichtigen. Nach einigen informativen Vorträgen im Informationszentrum, die im Schwerpunkt die Forschungsaktivitäten vorstellten, wurden uns die Laboratorien und Prüffelder des Forschungszentrums in kleinen Gruppen ausführlich erläutert. Besonders beeindruckend waren die Dimensionen der Aufbauten, die die am IFHT vorhanden Prüfaufbauten deutlich übertrafen. Nach einer freundlichen Einladung zu einem hervorragenden Mittagessen konnten in einer abschließenden Fragerunde alle offenen Fragestellungen geklärt werden. Am Nachmittag besuchten wir das nahegelegene Château de Fontainebleau und konn-

ten den Tag im wunderschön angelegten Schlossgarten ausklingen lassen.



Gruppenbild vor dem Château de Fontainebleau

Areva T & D

Am Mittwoch fuhren wir, chauffiert von unserem freundlichen Busfahrer, über die Champs-Élysées in den Pariser Stadtteil La Défense. Nach einer aufregenden Fahrt erreichten wir gegen 09:00 Uhr unser Ziel, das Areva T & D Headquarter.



Die Areva Zentrale in Paris

Dort erfuhren wir Wissenswertes über die strategische Ausrichtung Arevas. Einen technologischen Schwerpunkt stellte dabei die Weiterentwicklung und Erforschung der Fissionskraftwerke dar. Nachdem Geist und

Körper, dank der freundlichen Einladung zum Essen, gestärkt waren, brachen wir gegen Mittag zu unserem zweiten Etappenziel Lyon auf. Nach einer anstrengenden Busfahrt in das etwa 460 km entfernte Lyon, bezogen wir gegen 20:00 Uhr unsere neue Unterkunft, das Centre International de Séjour, und ließen den Tag gemütlich in kleineren Gruppen ausklingen.

Leistungsschalterfertigung in Villeurbanne

Am Donnerstag erwartete uns ein bunt gemischtes Programm, das die Brücke zu der am Vortag in Paris vorgestellten strategischen Ausrichtung Arevas schlug. Nach einer kurzen Begrüßung und Einführung in den Standort Villeurbanne erhielten wir detaillierte Einblicke in die Anforderungen, die an heutige Leistungsschalter gestellt werden, und die Produktionstätigkeiten am Standort.



Die Vortragenden der Firma Areva mit den Organisatoren der Exkursion und Prof. Schnettler

Unterteilt in drei kleinere Gruppen gewährte uns Areva Einblicke in die Produktion und die Prüffelder. Besonders die Prüffelder beeindruckten durch ihre Dimensionen. Nach einer kurzen Mittagspause wurde in einer sehr interessanten Präsentation nochmals auf die verschiedenen Leistungsschaltertypen eingegangen; zudem gab es ausreichend Gelegenheit zur Erörterung der diversen Fragen. Nach unserer Rückkehr

in die Unterkunft lud Prof. Schnettler zum Lauftraining und zum traditionellen Abschlussessen ein. Der Einladung in das gemütliche Restaurant “La Tonnelle” in Lyon zu einem gehobenen drei gängigen Menü folgten natürlich alle Teilnehmer gerne.



Gemütliches Abschlussessen aller Teilnehmer

Nancy Universität

Am Freitagmorgen traten wir besonders früh und nach dem netten Ausklang am Vorabend auch besonders müde die Rückreise nach Aachen an. Auf etwa halben Weg nach Aachen unterbrachen wir unsere Rückreise, um die Universität in Nancy zu besuchen. Dort erfuhren wir zunächst Wissenswertes über das französische Bildungssystem. Anschließend folgten wir der freundlichen Einladung von Prof. Bougdira und erhielten eine interessante Führung durch

das LPMIA (Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications) bei der uns die Forschungsaktivitäten eindrucksvoll vorgestellt wurden. Des Weiteren wurde uns hier die Vorgehensweise den Forschungsschwerpunkt der Kernfusion betreffend näher erläutert und eine Versuchsanlage vorgestellt.



Gruppenbild vor dem LMPI

Organisatoren der Pfingst-exkursion

Dipl.-Ing. Andreas Kurz
Andreas.Kurz@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-90270

Dipl.-Ing. Stefan Federlein
Stefan.Federlein@ifht.rwth-aachen.de
+49 241 80-94959

Institutsexkursion nach Thailand vom 14.-26.09.2007

Im Abstand von ca. 4 Jahren findet am IFHT jeweils eine größere Exkursion mit den Professoren und Assistenten statt. In diesem Jahr führte uns die Exkursion nach Thailand. In 13 Tagen wurden in einem straffen Programm zahlreiche Besichtigungen durchgeführt: Auf dem Programm standen Kraftwerke, Umspannanlagen, die Thai-German Graduate School of Engineering (TGGs) in Bangkok sowie die Metro von Bangkok. Auch kulturelle Aspekte kamen nicht zu kurz, so dass die Teilnehmer einen umfassenden Einblick in das Land bekommen konnten.

Ankunft und Abflug in Thailand war die Metropole Bangkok, wo auch, bedingt durch die industrielle Infrastruktur des Landes, ein großer Teil der Exkursion stattfand. Da die Anreise auf ein Wochenende fiel, bestand zunächst die Möglichkeit, die kulturelle Seite Bangkoks kennen zu lernen. Wir besuchten den Wochenendmarkt Chatuchak im Norden der Stadt, wo von einer unüberschaubaren Anzahl von Händlern von Lebensmitteln über Gebrauchsgüter und Kleidung nahezu alles angeboten wird. Am nächsten Tag unternahmen wir eine Stadtbesichtigung, die durch das tägliche Verkehrschaos u.a. zu einigen buddistischen Tempeln, sogenannten Wats, führte. Höhepunkt waren sicherlich der königliche Palast, der zum Teil von Touristen besucht werden kann, sowie der goldene liegende Buddha.



Teilnehmer der Thailand-Exkursion im Kraftwerk Ratchaburi

Von Bangkok aus besuchten wir das Combined Cycle Power Plant Ratchaburi, ein

kombiniertes Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk westlich von Bangkok. Die erste Turbine wurde 1999 in Betrieb genommen, heute hat das Kraftwerk eine Gesamtleistung von 3200MW. Das Kraftwerk gehört wie alle Kraftwerke und Höchstspannung-Schaltanlagen in Thailand zum thailändischen Stromversorger EGAT (Electricity Generating Authority of Thailand).

Unser nächster Besuch führte uns zur Schaltanlage Wang Noi bei Ayattuya, nördlich von Bangkok gelegen. Die Schaltanlage besteht aus einer 230kV AIS sowie einer 500kV GIS.

Von der Schaltanlage aus besuchten wir die nahe gelegene Stadt Ayattuya, die alte Hauptstadt Thailands, das zu der damaligen Zeit Siam hieß. Um den historischen Ortskern, der seinerzeit von den Burmesen komplett zerstört wurde, wächst mittlerweile eine große Stadt heran, die aber keine weiteren Sehenswürdigkeiten bietet. Interessant ist die unkomplizierte Art, mit der in ganz Thailand Tourismus mit traditioneller Kultur verbunden wird: In den Tempeln (oder Wats), die einerseits buddistische Zentren darstellen, andererseits aber auch Touristenattraktionen, müssen nur Ausländer Eintritt zahlen, unsere thailändischen Kollegen haben freien Zutritt.

Von Bangkok aus flogen wir in den Norden, nach Chiang Mai. Noch in Bangkok erlebten wir thailändisches Improvisationsvermögen: Nachdem unser Flug kurzfristig aus technischen Gründen abgesagt wurde, wur-

de uns von der Fluggesellschaft ein Ersatzflug einer anderen thailändischen Fluggesellschaft zur gleichen Zeit angeboten. Da dieser aber nicht wie unsere geplanter Flug vom alten Flughafen Don Muang ausging, sondern vom neuen Flughafen Suvarnabhumi, wurde kurzerhand ein Linienbus organisiert, der uns zusammen mit einigen weiteren Fluggästen quer durch Bangkok zum anderen Flughafen brachte. Trotz der sehr knapp bemessenen Zeit, verlief alles problemlos, obwohl der Check-In Schalter für den Flug eigentlich längst geschlossen war, kamen wir und unser Gepäck planmäßig in Chiang Mai an (verspätete und verschollene Koffer gab es erst wieder in Deutschland). Chiang Mai wird auch die „Perle Nordthailands“ genannt, wobei dieser Name völlig gerechtfertigt ist. Hier kann unter anderem der prächtige Wat Doi Suthep besichtigt werden, dessen Besuch über einen langen kunstvollen Treppenaufstieg mit 306 Stufen eine schweißtreibende Angelegenheit ist.



Der Wat Doi Suthep in Chiang Mai

Von Chiang Mai aus fuhren wir mit drei Vans über kurvige Straßen durch hügelige Waldgebiete nach Mae Hong Son. Diese Stadt, nahe der Grenze nach Myanmar gelegen, war bis 1973 in der Regenzeit nur mit dem Flugzeug erreichbar, mittlerweile gibt es eine Straßenanbindung. Die Stromversorgung wird über Wasserkraftwerke und Dieselgeneratoren sichergestellt, wobei die Stadt anfangs im Inselbetrieb ver-

sorgt wurde. Seit einigen Jahren erst existiert ein Mittelspannungsanschluss. 2004 wurde zur Unterstützung der Stromversorgung ein batteriegepuffertes 500kW Photovoltaikkraftwerk gebaut, welches wir besichtigten.



Photovoltaikkraftwerk in Mae Hong Son

Das anschließende Wochenende nutzten wir zu einem Ausflug nach Phuket. Hier erlebt man einerseits den Tourismus mit Thailand untypischen aufdringlichen Straßenhändlern und Restaurantbesitzern, wobei andererseits bereits der Anflug auf die Halbinsel einen Eindruck von der malerischen Landschaft vermittelt, der bei einem Bootsausflug bekräftigt wird.

Zurück in Bangkok standen zwei weitere Besuche auf dem Programm. Der Besuch der TGGs vermittelte einen Eindruck, wie die Ingenieurausbildung in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen durchgeführt wird. Der letzte Besuch führte uns schließlich zu Siemens, zur Metro von Bangkok, die in den nächsten Jahren stark ausgebaut werden soll. In Bangkok existiert zusätzlich ein Skytrain, der zwar ebenfalls von Siemens ist, aber neben der Metro autark ist, da es völlig unterschiedliche Systeme sind. Nachdem uns unser Bus wie immer zuverlässig durch das allgegenwärtige Verkehrschaos zum Flughafen gebracht hat, verlassen wir Thailand mit vielen neuen Eindrücken eines sehr interessanten Landes.

Autor: Bernhard Heil