

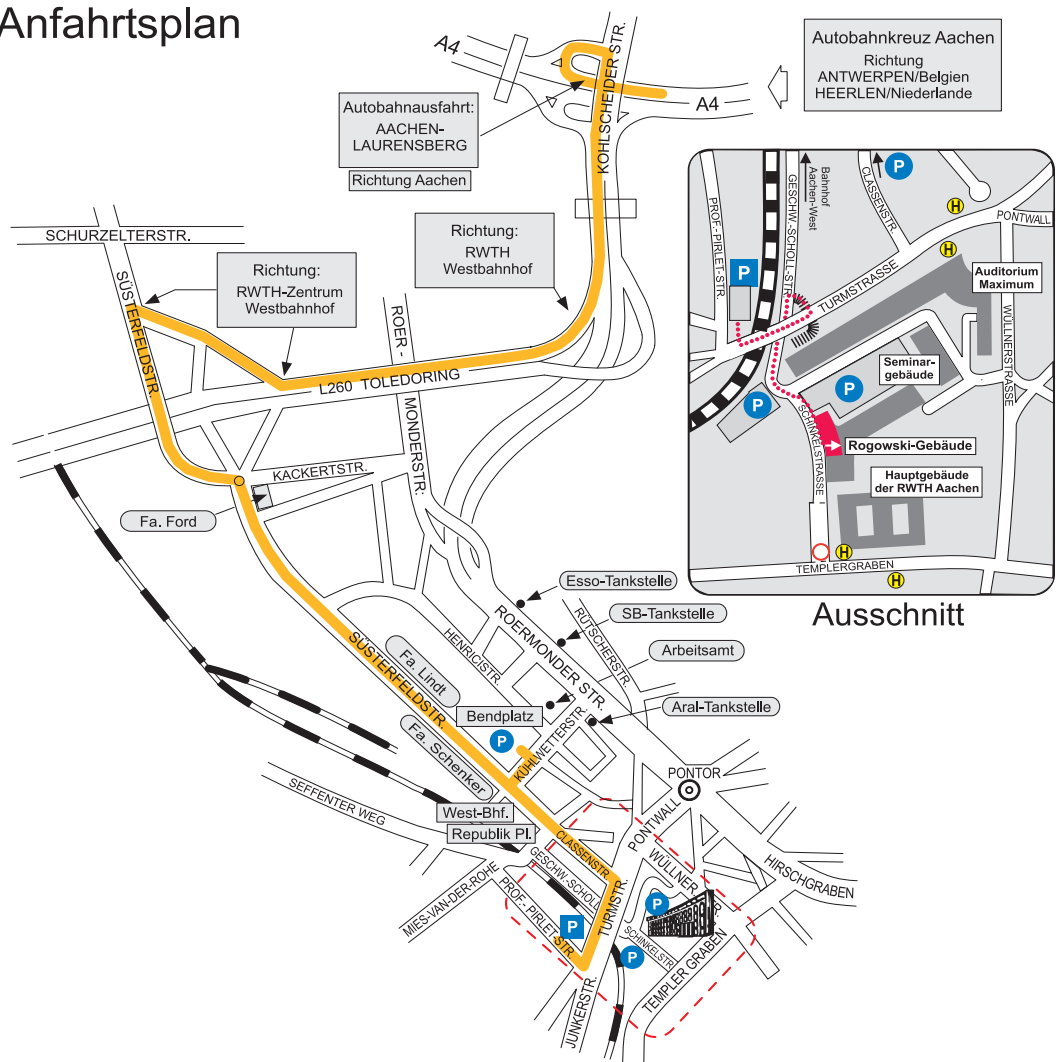


Jahresbericht  
2009

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. A. Kurz, Dipl.-Gwl. M. Keller  
 Redaktionsschluß: 31.12.2009

---

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

### Forschung am IFHT

Forschungsgebiete .....	10
Berichte aus der Forschungsgruppe Leistungsschalter .....	16
Berichte aus der Forschungsgruppe Isoliertechnik und Diagnostik .....	28
Berichte aus der Forschungsgruppe Nachhaltige Energiesysteme .....	54
Berichte aus der Forschungsgruppe Anlagentechnik und Asset Management .....	77
Berichte aus dem Lehrgebiet Gasentladungstechnik .....	81
Dissertationen .....	85
Interdisziplinäre Aktivitäten .....	92

### Lehre am IFHT

Vorlesungen und Praktika .....	96
Diplom-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten .....	103
Seminare .....	119

### Das Institut

Chronik .....	122
Veröffentlichungen .....	126
Technische Exkursionen .....	129
Hochspannungstechnische Gesellschaft an der RWTH Aachen e.V. ....	134
Girls'day 2009 .....	136






---

## Contents

### Preface

#### Research at IFHT

Fields of Research .....	10
Scientific Reports of Research Group Circuit Breakers .....	16
Scientific Reports of Research Group Insulation Systems and Diagnosis .....	28
Scientific Reports of Research Group Sustainable Energy Systems .....	54
Scientific Reports of Research Group Systems Engin. and Asset Management ..	77
Scientific Reports of Research Group Gas Discharge Engineering .....	81
PhD Theses .....	85
Interdisciplinary activities .....	92

#### Teaching at IFHT

Lectures and Laboratories .....	96
Diploma-, Master-, Bachelor- and Project Theses 2009 .....	103
Seminars .....	119

#### The Institute

Chronicle .....	122
Publications .....	126
Technical excursions .....	129
Community for High Voltage Technology at the RWTH Aachen University ....	134
Girls'day 2009 .....	136

## Sehr geehrte Freunde des Instituts,

*mit dem Jahresbericht 2009 verfolgen wir auch in diesem Jahr wieder das Ziel, Ihnen in kurzer Form unsere Forschungsarbeiten und -ergebnisse sowie aktuelle Entwicklungen vorzustellen.*

*Trotz (oder vielleicht gerade wegen?) der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise und den damit verbundenen Maßnahmen zur Konjunkturstabilisierung können wir auf das bisher erfolgreichste Jahr in meiner nunmehr 9-jährigen Zeit am Institut für Hochspannungstechnik zurückblicken.*

- 1. Die Anzahl der Studierenden in den energietechnischen Bachelor-Studiengängen hat weiterhin zugenommen - mit allein über 300 neu eingeschriebenen Studierenden im Wirtschaftsingenieur-Studiengang „Elektrische Energietechnik“. Dieses wird allerdings dazu führen, dass voraussichtlich ab dem Wintersemester 2010/2011 in diesem Studiengang eine Zulassungsbeschränkung gilt, um eine Soll-Stärke von 160 Studierenden zu gewährleisten. Wir sind mit dieser Beschränkung nicht glücklich - die aktuellen Rahmenbedingungen haben diese Maßnahme jedoch erforderlich werden lassen.*
- 2. Im Jahr 2009 konnten wir 41 Abschlussarbeiten (Diplom, Master, Bachelor) zählen und sind damit nach 2007 wieder das gemessen an den Abschlussarbeiten erfolgreichste Institut der Fakultät.*
- 3. Zudem konnten wir eine Vielzahl von Forschungsprojekten aus nationaler und internationaler Förderung (Fördervolumen mehrere Millionen Euro) verbuchen. Diese werden in den nächsten Jahren unsere personelle Ausstattung und Infrastruktur nachhaltig verbessern helfen. Schwerpunkte der Förderung waren in 2009*

*wiedermum die Themen „Elektromobilität“ und „Dynamisierung der Auslastung von Netzen und Betriebsmitteln“. Hierüber werden wir in der nächsten Zeit separat berichten können.*

- 4. Der am 15. November 2008 gegründete Ehemaligenverein hat sich gut entwickelt. Mit jetzt 35 Mitgliedern und einem aktiven Beirat sind einige Projekte in der Umsetzung.*

*Neben diesen, für uns sehr positiven Entwicklungen geben mir die derzeitigen Vorgänge in der uns nahe stehenden Branche Anlass zur Sorge. Hierbei bin ich nicht über die generellen wirtschaftlichen Entwicklungen oder Pressemitteilungen überrascht, da sich ein Eintrüben der Rahmenbedingungen und ein zu schneller Aufbau der weltweiten (Produktions-)Kapazitäten bereits vor geraumer Zeit andeuteten. Vielmehr bin ich über die hohe Geschwindigkeit beunruhigt, mit der die Auswirkungen direkt für unsere Absolventen und Praktikanten spürbar werden. Ich kann nur hoffen, dass sich die Zeiten der absoluten Einstellungsstopps und der Vernachlässigung des Nachwuchses Anfang/Mitte der 90er Jahre nicht wiederholen. Wie wir alle wissen, reagiert die Gruppe der Schüler bzw. der zukünftigen Studierenden sehr schnell... - hier müssen wir gemeinsam einen langfristig orientierten und für alle Betroffenen optimierten Weg finden.*

*Die Umstellung der Diplom-Studiengänge auf die Bachelor-/Master-Ausbildung hat bei uns bisher zu keinen größeren Problemen geführt. Wir sind davon überzeugt, die Qualität der Ausbildung beibehalten zu können und dieses auch tun zu müssen. Dennoch werden wir alle Aktivitäten unterstützen, den akademischen Grad des „Dipl.-Ing.“ weiter vergeben zu dürfen. Diesen Titel sehen wir auch als Qualitätszeichen einer durchgängigen und hochwertigen Ingenieurausbildung an, die durch*

die vielfältigen Wahlmöglichkeiten unterschiedlichster Ausbildungsstätten und Studiengänge so intransparent wie niemals zuvor geworden ist. Gerne stehe ich Ihnen hierzu für Diskussionen und Anregungen zur Verfügung.

Im Rahmen der Umstellung haben wir zwei zusätzliche Vorlesungen für die Bachelorstudiengänge in unser Angebot aufgenommen. In enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Elektromagnetische Energiewandlung und dem Institut für Elektrische Maschinen bieten wir eine neue Vorlesung „Komponenten und Anlagen der elektrischen Energieversorgung“ an, die durch die eigene IFHT-Vorlesung „Schaltgeräte und Schaltanlagen“ inhaltlich weiter ausgekleidet wird.

Dass das intensive quantitative Wachstum der letzten Jahre offensichtlich nicht zu Lasten der Qualität gegangen ist, zeigt die Liste der Auszeichnungen unseres Teams. Unsere ehemalige kaufmännische Auszubildende Hanna Johnen hat ihre Ausbildung zur Kauffrau für Bürokommunikation mit „sehr gut“ abgeschlossen und wurde hierfür durch die IHK Aachen ausgezeichnet. Herr Dr.-Ing. Alexander Tröger erhielt für seine Dissertation „Analyse der elektrischen Durchschlagmechanismen in syntaktischen Schäumen“ den ABB Preis für eine ausgezeichnete Dissertation auf dem Gebiet der Energietechnik. Mit den Herren Til Kristian Vrana (SAG Award 2009 für eine ausgezeichnete Abschlussarbeit) sowie Stefan Post (Otto-Junker-Preis 2009 für hervorragende Studienleistungen) konnten sich zwei Diplomanden des IFHT in die Liste der Preisträger eintragen. Mit besonderem Erfolg („mit Auszeichnung“) haben unsere Mitarbeiter Daniel Eichhoff (Dipl.-Ing.), Thomas Helmschrott (Dipl.-Ing.) und Stanislav Votruba (M.Sc.) zudem ihr Studium sehr erfolgreich abschließen können. Wir beglückwünschen alle Preisträger für ihre Auszeichnungen auch mit dem Hinweis, dass wir natürlich stolz auf ihre Leistungen sind. Selbstverständlich gelten unser Dank und unsere Glückwünsche allen Absolventen und ehemaligen Mitarbeitern - für die

abgeschlossene Dissertation den Herren Dr.-Ing. Uwe Macharey und Dr.-Ing. Alexander Tröger, für die abgeschlossene Ausbildung Frau Hanna Johnen und Herrn Jermaine Storp. Herr Christoph Kahlen hat uns planmäßig verlassen, um die Position des Abteilungsleiters Anlagentechnik der FGH e.V., Mannheim, zu übernehmen. Wir wünschen den neuen Ehemaligen alles Gute für eine erfolgreiche Zukunft.

Im Jahr 2009 wurden wir durch Herrn Dr.-Ing. Ralf Puffer, Akademischer Rat, die wissenschaftlichen MitarbeiterInnen Mathias Behle, Daniel Eichhoff, Maximilian Keller, Claas Matrose, Benjamin Preidecker (Daimler AG), Eva Szczechowicz, sowie den Auszubildenden Daniela Vitale (Kauffrau) und Pascal Müller (Industriemechaniker) verstärkt. Im Zuge der geplanten Nachfolgeregelung hat Herr Stefan Federlein im Dezember die Aufgaben des Oberingenieurs übernommen. Ich freue mich auf die zukünftige Zusammenarbeit und wünsche viel Erfolg und Freude am IFHT.

Weitere Details über unsere Aktivitäten, den Projekten und dem Institutsleben entnehmen Sie bitte diesem Jahresbericht - aktuellere Informationen erhalten Sie über unsere Homepage - von der wir uns vorgenommen haben, diese zukünftig intensiver zu pflegen.

Ihnen allen, den Mitarbeitern, Freunden und Partnern des Instituts für Hochspannungstechnik danke ich für Ihren Einsatz, Ihr Vertrauen und die sehr angenehme und erfolgreiche Kooperation. Ich darf Ihnen versichern, dass ich mich auf die weitere Zusammenarbeit sehr freue und sende Ihnen die besten Grüße und Wünsche aus Aachen.

Ihr



Aachen, im Januar 2010

## Dear friends of the institute,

as every year with the annual report we want to present to you our current research projects and results together with newest trends concerning our institute and our business. Despite the global economic crisis (or may be because of it?) we have experienced the most successful one of the 9 years I have spent at the institute.

1. The number of students in the bachelor courses for power engineering has risen again, there are 300 new students of business engineering specializing in „Electrical Power Engineering“. This, however, will make restrictions necessary. From winter term 2010/2011 onwards, only 160 students will be permitted each year. We are not particularly happy about this, but recent developments have made this restriction necessary.
2. In 2009 there were 41 theses (Diploma, Master, Bachelor) at our institute which made us again (after 2007) the faculty's most successful institute regarding the number of theses.
3. Moreover, we were able to obtain a number of research projects paid for by both national and international grants with an overall volume of several million Euros. These will help to improve our infrastructure and personnel. Focus of the support in 2009 were the research topics „E-mobility“ and „Dynamisation of the utilisation of grids and components“. We will be able to report on this in the near future.
4. The High Voltage Society for alumni and supporters of our institute, which was founded on November 15th 2008, has made a good start. There are now 35 members and a

very active advisory board who are working together on a couple of projects.

The transition from Diploma to Bachelor/Master courses has not led to major problems for us. We are certain that we will be able to maintain our high standards in education and that it will be absolutely necessary to do so. Nevertheless we will support everything that will enable us to bestow the degree of „Dipl.-Ing“ in the future. For us, this title represents a valuable and stringent engineering education which has, regrettably, due to recent introduction of manifold different specialisations and places of education, become very opaque. I would like to engage in a lively discussion with you in that matter. Along with the restructuring we are now offering two additional lectures for Bachelor courses. In cooperation with the Institute for Electrical Machines and the chair of Electromagnetic Energy Conversion we offer the new lecture „Components and Installations for the Supply of Electricity“ which is complemented by the lecture „High and Medium Voltage Apparatus and Switchgear“.

The expansion of staff during the last years had obviously no negative impact on the quality of the work done at the institute. This is shown by the long list of achievements and awards won by members of our team. Our former apprentice Hanna Johnen has concluded her education in „office communication“ with distinction and was rewarded a price from the Aachen chamber of commerce. Mr. Dr.-Ing. Alexander Tröger received the ABB award for remarkable dissertations in electrical energy for his PhD thesis „Investigation on Electrical Breakdown Behavior of Syntactic Foam“. Two more awards were granted to our students Til Kristian Vrana (SAG award 2009 for remarkable theses) and to Stefan Post (Otto-Junker-Award 2009 for excellent achievements). Our stu-



dents Daniel Eichhoff (Dipl.-Ing.), Thomas Helmschrott (Dipl.-Ing.) and Stanislav Votruba (M.Sc.) finished their studies with distinction. We congratulate all those who received awards and are proud of their achievements. Thanks and best wishes also goes out to all our alumni and former staff, the PhD theses of Dr.-Ing. Uwe Macharey and Dr.-Ing. Alexander Tröger, for the completed education of Hanna Johnen and Jermaine Storp. Christoph Kahlen left the institute on friendly terms to become head of the technological department of the FGH e.V. in Mannheim. We wish all the best to all our former staff for their future careers.

In 2009 our staff was reinforced by Dr.-Ing. Ralf Puffer, Academic Councillor, the researchers Mathias Behle, Daniel Eichhoff, Maximilian Keller, Claas Matrose, Benjamin Preidecker (Daimler AG), Eva Szczechowicz and the apprentices Daniela Vitale (office/secretary) and Pascal Müller (Industrial mechanic). In December, Stefan Federlein succeeded Thomas Smolka

as chief engineer. I am looking forward to good cooperation and hope the time at the IFHT will be successful and pleasant.

More details about our projects, research and other activities can be found in this annual report. Additional information can be found on our homepage, which we will keep more up-to-date in the future.

I want to thank you, our staff and all friends and partners of the Institute for High Voltage Technology for the commitment and for the very agreeable and successful cooperation. I am very much looking forward to future cooperation.

Yours

Aachen, January 2010



**Berichte aus der Forschung**  
**Dissertationen**

**Research at IFHT**  
**PhD Theses**



## Forschungsgebiete

### Forschungsgruppe „Leistungsschalter“

*Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Andreas Kurz*

*Kurzbeschreibung:*

Leistungsschalter stellen eines der wichtigsten Sicherheitselemente in elektrischen Energieversorgungssystemen dar. Daher ist es von großer Bedeutung, die physikalischen Vorgänge, die hinter einem Ausschaltvorgang stehen, nachvollziehen zu können. Um diesem Ziel näher zu kommen, werden in der Forschungsgruppe zwei verschiedene Ansätze verfolgt.

Einerseits werden die Vorgänge mittels sogenannter CFD-(Computational-Fluid-Dynamics)-Simulationen nachgebildet. Damit können wichtige Informationen über sonst nur schwer zugängliche Parameter, wie z. B. der Temperatur gewonnen werden. Andererseits verfügt die Forschungsgruppe über das notwendig Equipment und Know-How, um sich den Effekten auch von der experimentellen Seite her zu nähern. Im Rahmen der Entwicklung von neuen Schaltkonzepten gehören Temperatur- und Druckmessungen sowie die Messung der Gasströmung und der maximalen Ausschaltleistung zu den grundlegenden Untersuchungstechniken.

Durch das intensive Zusammenspiel beider Aspekte konnten im vergangenen Jahr einige der neuen Erkenntnisse in Erfindungsmeldungen umgesetzt werden.

*Gruppenmitglieder:*

Dipl.-Ing. Mathias Behle (seit Juni) \* Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff (seit Dezember) \* Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker \* Dipl.-Ing. Jan Christoph Kahlen (bis September) \* Dipl.-Ing. Andreas Kurz \* Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

*Studentische Hilfskräfte:*

Stefan Buß \* Tim Kubiczek \* Thien-duc Nguyen \* Gregor Nikolic \* Karl Oberdieck \* Tobias Wild

### Forschungsgruppe „Isoliersysteme und Diagnostik“

*Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Michael Keßler*

*Kurzbeschreibung:*

Die Forschungsgruppe bearbeitet ein weites Themengebiet von der Entwicklung neuartiger Isolierstoffe bis zur Zustandsbewertung von Isoliersystemen mittels verschiedener Diagnostikmethoden. Bei den Untersuchungen zu Hybridisoliersystemen stehen die syntaktischen Schäume als neuartige Isolierstoffe mit niedriger spezifischer Dichte im Vordergrund. Besonderes Augenmerk wird auf die Korrelation der Spannungsfestigkeit und der Haftung zwischen Mikrohohlkugeln als Füllstoff und der Matrix gelegt. 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. Eine neue Anwendung der Ultraschall Diagnostik stellt die Temperaturmessung an inneren Grenzflächen dar. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Verbesserung der Effizienz von Zündsystemen mittels „Multisparkzündung“. Dabei

wird die Spule derart betrieben, dass anstelle eines konzentrierten Einzelzündfunken viele kurze Entladungen in serieller Folge erzeugt werden, um eine gleichmäßige Zündung des Kraftstoff-Luftgemisches sicherzustellen.

### *Gruppenmitglieder:*

Dipl.-Ing. Gregor Brammer \* Dipl.-Ing. Michael Keßler \* M. Sc. Andrey Mashkin \* Dipl.-Ing. Benjamin Preidecker (seit Oktober, Daimler AG) \* Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf \* Dipl.-Ing. Sascha Schulte (Daimler AG) \* Dipl.-Ing. Anja Strauchs

### *Studentische Hilfskräfte:*

Julian Becker \* Dominik Böcker \* Sepideh Doroudian \* Paul Duisberg \* Christoph Hohmann \* Sebastian Kamps \* Thomas Nemeth \* Alexa Rombach \* Nikolai Rudi \* Christoph Schneider \* Jurij Schneider \* Mathias Schöneberger \* Parsa Tavassoli \* André Wagner \* Matthias Wiesmann \* Serdar Burak Yildiz

## **Forschungsgruppe „Nachhaltige Energiesysteme“**

*Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs*

### *Kurzbeschreibung:*

Der Fokus der FG liegt auf der Modellierung und Bewertung integrierter Energiesysteme. Hierunter werden solche Systeme verstanden, die aufgrund technologischer Entwicklungen (z.B. Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen oder Elektromobilität) durch ein fortschreitendes Zusammenwachsen der Märkte für verschiedene Energieformen gekennzeichnet sind. Die Kompetenzen der Forschungsgruppe sind dabei insbesondere entlang der Wertschöpfungskette von Erzeugung, Übertragung und Verteilung angesiedelt. Die im Rahmen der Modellbildung eingesetzten Methoden reichen von klassischen Szenarioanalysen über Lastfluss- sowie Stabilitätsberechnungen bis hin zu ökonomischen Untersuchungen (zum Beispiel Potential- oder Risikoabschätzungen) und werden durch weitreichende Kenntnisse im Bereich der Ökobilanzierung gemäß ISO 14040/44 abgerundet.

Nachhaltigkeit wird in den Forschungsarbeiten als multikriterielles Optimierungsproblem verstanden, das technische, ökonomische und ökologische Bewertungskriterien berücksichtigen muss. Die Gruppe sieht sich dabei als treibende Kraft in der Weiterentwicklung des methodischen Fundaments der technischen Ökoeffizienz. Die enge Kooperation der Forschungsgruppe mit dem interdisziplinären Projektteam „Humtec“ im Bereich „Ethik der Energieversorgung“ ermöglicht darüber hinaus den Blick auf soziale und ethische Fragestellungen.

### *Gruppenmitglieder:*

Dipl.-Ing. Thomas Dederichs \* Dipl.-Wirt.-Ing. Koray Karaadak (seit August) \* Dipl.-Gwl. Maximilian Keller (seit Juli) \* Dipl.-Ing. Claas Matrose (seit November) \* M. Sc. Thomas Pollok \* Dipl.-Ing. Martin Scheufen \* Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz (seit Juni)

### *Studentische Hilfskräfte:*

Christian Bredtmann \* Philipp Erlinghagen \* Andreas Haidl \* Georg Hörning \* Julian Langstädtler \* Pablo Briones Morales \* Cora Sophie Petino \* Fabian Potratz \* Stephan Raths \* Christian Scheefer \* Yvonne Surmann \* Johannes Turinsky

---

## Forschungsgruppe „Anlagentechnik und Asset Management“

*Gruppenleiter: Dipl.-Ing. Christian Hille*

*Kurzbeschreibung:*

Die Forschungsgruppe beschäftigt sich mit der Optimierung des Betriebes von elektrischen Energieversorgungsnetzen. Hierzu ist es notwendig, die Systemzustände sowie den technischen Zustand der einzelnen Hochspannungs-Betriebsmittel zu bewerten, damit eine optimale Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategie realisiert werden kann. Diese Optimierung ist ökonomisch und/oder qualitativ möglich und wird durch die Entwicklung neuer Diagnoseverfahren innerhalb der Forschungsgruppe zusätzlich unterstützt. Durch die Entwicklung von Alterungs- und Zustandsmodellen soll die zukünftige Instandhaltungsstrategie der Betriebsmittel und das Ende deren Lebensdauer ermittelt werden, wobei die spezifische Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Ausgehend hiervon wird der Einfluss verschiedener Instandhaltungsmaßnahmen sowie einer veränderten Instandhaltungsstrategie auf das Betriebsmittelverhalten untersucht. Hierbei stellt das Online-Monitoring von Transformatoren einen weiteren Forschungsschwerpunkt dar. Künstliche neuronale Netze und Fuzzy Logic spielen dabei eine wesentliche Rolle. Unter Einbezug der Anreizregulierung wird mit Hilfe dieser und anderer Verfahren eine Methode zur Bewertung von Schaltanlagen und ganzen Netzen entwickelt, was ihm Rahmen der zunehmenden Netzan- und -verkäufe eine wichtige Beurteilungsgrundlage darstellt.

*Gruppenmitglieder:*

M. Sc. Tirinya Cheumchit \* Dipl.-Ing. Christian Hille \* Dipl.-Ing. Uwe Zickler (FGH e.V.)

*Studentische Hilfskräfte:*

Alexander Gitis \* Michael Kippen \* Karina Klusmann \* Franziska Krämer \* Cornelius Plath \* Simon Sandor

## 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 SF<sub>6</sub>-isolierte Anlagen erweitert werden. Hierbei treten veränderliche SF<sub>6</sub>-Luft-Gemische im Entlastungsraum auf. Durch Vergleich mit vorhandenen Messergebnissen kann das erweiterte Berechnungsverfahren evaluiert werden. Eine weitere Problematik betrifft den Ersatz von SF<sub>6</sub> durch Luft aus Gründen des Umweltschutzes bei der Prüfung von SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen. Hier soll herausgefunden werden, ob Bedingungen angebbbar sind, unter denen Prüfungen mit Luft solche mit SF<sub>6</sub> ersetzen können.

*Gruppenmitglieder:*

M. Sc. Kittipong Anantavanich

*Studentische Hilfskräfte:*

Polson Keeratibumrungpong \* Zheng Fan \* Jochen Roder

## Fields of Research

### Research Group “Circuit Breakers”

*Manager: Dipl.-Ing. Andreas Kurz*

*Short description of the research topics:*

Circuit breakers are one of the most important protective devices in electrical power systems. Therefore, it is of huge importance to understand the physical process of a switching operation. Thus, the research group follows two different approaches.

On the one hand so called CFD-(Computational-Fluid-Dynamics)-Simulations are used to model the physical phenomena. Due to this information parameters can be figured out, which are in general difficult to observe e. g. the temperature. On the other hand the required equipment and know-how to investigate the phenomena experimentally is available in the research group. While developing new switching technologies measurements of the temperature, the pressure, the gas flow as well as a determination of the interruption limit are part of the basic investigation methods.

Due to an intensive interaction of both approaches some results could be transferred into new inventions.

*Members of the group:*

Dipl.-Ing. Mathias Behle (since June) \* Dipl.-Ing. Daniel Eichhoff (since December) \* Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker \* Dipl.-Ing. Jan Christoph Kahlen (until September) \* Dipl.-Ing. Andreas Kurz \* Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

*Student assistants:*

Stefan Buß \* Tim Kubiczek \* Thien-duc Nguyen \* Gregor Nikolic \* Karl Oberdieck \* Tonia Wild

### Research Group “Insulation Systems and Diagnosis”

*Manager: Dipl.-Ing. Michael Keßler*

*Short description of the research topics:*

The research group covers a wide variety of technical challenges: ranging from the development of new insulating materials, up to a condition assessment of insulating systems by means of different diagnostic methods. In the field of hybrid insulation systems, syntactic foam as a new insulating material with low specific density is in the main focus. Especially a possible correlation of the dielectric strength and the adhesion between microspheres as filler and the matrix is investigated. In the field of diagnosis, the assessment of polymeric insulation systems by using ultra sound is another focus. Besides the detection of small impurities in different materials like elastomers (e.g. in cable joints), boundary layers between two different materials and inhomogeneous cross-linking are detectable. A new application of ultra sound diagnosis is the temperature measurement at inner interfaces.

An efficiency advancement of ignition systems in combustion engines via “Multisparc Ignition” is a new research field of this group. Instead of one single sparc, many short discharges are ignited in series to assure a steady ignition of the fuel-air mixture.

*Members of the group:*

Dipl.-Ing. Gregor Brammer \* Dipl.-Ing. Michael Keßler \* M. Sc. Andrey Mashkin \* Dipl.-Ing. Benjamin Preidecker (since October, Daimler AG) \* Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf \* Dipl.-Ing. Sascha Schulte (Daimler AG) \* Dipl.-Ing. Anja Strauchs

*Student assistants:*

Julian Becker \* Dominik Böcker \* Sepideh Doroudian \* Paul Duisberg \* Christoph Hohmann \* Sebastian Kamps \* Thomas Nemeth \* Alexa Rombach \* Nikolai Rudi \* Christoph Schneider \* Jurij Schneider \* Mathias Schöneberger \* Parsa Tavassoli \* André Wagner \* Matthias Wiesmann \* Serdar Burak Yildiz

## **Research Group “Sustainable Energy Systems”**

*Manager: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs*

*Short description of the research topics:*

The research group is focused on modelling and assessing integrated energy systems. These systems are characterized by merging the markets for different forms of energy due to technological developments (e.g. Combined Heat & Power, heat pumps or electric vehicles). The expertise of the group lies especially in generation, transmission and distribution technologies. The methods implemented in the process of modelling include classic scenario analysis, load flow and stability assessments as well as economical analyses (for example potential or risk assessment). This is complemented by extensive knowledge in the field of Life Cycle Assessment according to ISO 14040/44.

Sustainability is perceived as a multi-criteria optimization problem, which must include technical, economical, and ecological assessment criteria. Much effort is directed into supporting the further development of a methodology for technical eco-efficiency analysis. Due to the close cooperation with the interdisciplinary project house “Humtec“ in the field of „Ethics for Energy Technologies“ the research is rounded off by taking ethical problems into consideration.

*Members of the group:*

Dipl.-Ing. Thomas Dederichs \* Dipl.-Wirt.-Ing. Koray Karaadak (since August) \* Dipl.-Gwl. Maximilian Keller (since July) \* Dipl.-Ing. Claas Matrose (since November) \* M. Sc. Thomas Pollok \* Dipl.-Ing. Martin Scheufen \* Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz (since June)

*Student assistants:*

Pablo Briones Morales \* Philipp Erlinghagen \* Andreas Haidl \* Georg Hörning \* Julian Langstädtler \* Cora Sophie Petino \* Fabian Potratz \* Stephan Raths \* Christian Scheefer \* Yvonne Surmann \* Johannes Turinsky

## **Research Group “Systems Engineering and Asset Management”**

*Manager: Dipl.-Ing. Christian Hille*

*Short description of the research topics:*

The research group is focusing on optimized operation of power grids. Doing this, the assessment of system status and technical condition of each asset are important pre-conditions for optimal maintenance- and renewal-strategies. This optimization can be done in an economic and/or qualitative way and is supported by the development of new diagnostic methods within this research group. Future maintenance measures and end-of-lifetime calculations can be derived from new aging- and condition-models. Here, specific influencing factors for each component have to be taken into account. After that, the influences of this maintenance-strategy on the equipment-behavior are investigated. In this case, the on-line monitoring of transformers is an additional exploratory focus where artificial neural networks and fuzzy logic play an important role. Including the incentive regulation, these and other methods are used to develop an assessment system for substations or even complete grids, which is an important basic principle in case of future purchases and sales of networks.

*Members of the group:*

M. Sc. Tirinya Cheumchit \* Dipl.-Ing. Christian Hille \* Dipl.-Ing. Uwe Zickler (FGH e.V.)

*Student assistants:*

Alexander Gitis \* Michael Kippen \* Karina Klusmann \* Franziska Krämer \* Cornelius Plath \* Simon Sandor

## **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 SF<sub>6</sub>-insulated installations. In this case, changing SF<sub>6</sub>-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 SF<sub>6</sub> by air for tests of SF<sub>6</sub>-insulated switchgear due to environmental concern. This task is to find out, whether there exist possibilities to replace tests with SF<sub>6</sub> by those with air.

*Members of the group:*

M. Sc. Kittipong Anantavanich

*Student assistants:*

Polson Keeratibumrungpong \* Zheng Fan \* Jochen Roder

# Lichtbogenwiderstand und Kühlverhalten im Stromnulldurchgang eines SF<sub>6</sub>-Leistungsschalters

Um den Strom in einem Leistungsschalter sicher unterbrechen zu können, muss der beim Abschaltvorgang entstehende Lichtbogen im Bereich des natürlichen Stromnulldurchgangs effektiv gekühlt werden. Diese Kühlung sorgt für einen ansteigenden Widerstand über der Schaltstrecke. Anhand dieses Widerstands kann das Ausschaltvermögen des Leistungsschalters bewertet werden. Weiterhin kann die örtliche Verteilung des Widerstands entlang der Schaltstrecke genutzt werden, um auf die wirkenden Kühlmechanismen zu schließen.

## Einleitung

Leistungsschalter stellen wesentliche Sicherheitselemente in elektrischen Netzen dar. Sie müssen deswegen in der Lage sein, auftretende Kurzschlussströme nicht nur zu führen, sondern auch zu unterbrechen. Bei der Kontakttrennung entsteht im Leistungsschalter ein Lichtbogen, welcher das eigentliche Schaltelement darstellt. Um den Lichtbogen zum Verlöschen zu bringen und damit den Stromfluss zu unterbrechen, wird dieser mit kühlendem Gas beblasen. Im Bereich des natürlichen Stromnulldurchgangs kann die zugeführte Kühlleistung die im Lichtbogen eingebrachte Heizleistung übersteigen. Der Widerstand über der Schaltstrecke steigt an und der Stromfluss wird unterbrochen. Moderne Leistungsschalter arbeiten nach dem Selbstblasprinzip, welches die im Lichtbogen eingebrachte Energie nutzt, um den zur bebläsung notwendigen Gasdruck zu erzeugen.

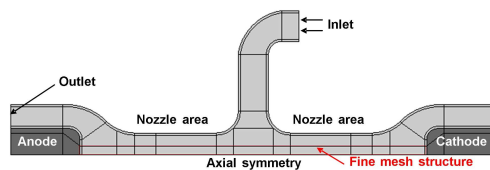


Abb. 1: Für die Simulation verwendete Geometrie

Um die physikalischen Prozesse des Kühl-

vorganges zu untersuchen, werden sogenannte Computational-Fluid-Dynamics (CFD) Simulationen durchgeführt. Zum besseren Verständnis der physikalischen Vorgänge wird dabei der Einfluss der Düsenlänge auf den Lichtbogenwiderstand und auf das Kühlverhalten untersucht.

## Simulationen

Zur Simulation des Stromnullbereichs eines Leistungsschalters müssen verschiedene physikalische Vorgänge durch mathematische Modelle abgebildet werden. Diese Modelle werden unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen im Rahmen einer Multi-Physics-Simulation berechnet. Die verwendete Geometrie ist in Abb. 1 dargestellt. Hierbei wird das aus dem Heizvolumen des Leistungsschalter strömende Gas durch ein Inlet realisiert. Das Gas verlässt den simulierten Bereich über die beiden symmetrisch angeordneten Outlets rund um die Elektroden. Der simulierte Lichtbogen brennt entlang der Rotationsachse im Bereich der fein aufgelösten Gitterstruktur. Zunächst wird der stationäre Zustand 100  $\mu$ s vor Stromnull bestimmt, um anschließend eine transiente Rechnung mit sinkender Stromamplitude durchzuführen. Zur Nachbildung der auftretenden Turbulenzen in der Gasströmung kommt das Kato-Launders  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenz-Modell zum



Einsatz. Damit kann die turbulente Kühlleistung  $p_{turb}$  bestimmt werden [1]:

$$p_{turb} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$$\text{mit } \lambda \approx \lambda_t = \rho c_p \frac{C_\mu}{Pr_t} \frac{k^2}{\epsilon}$$

$\lambda$  ist die absolute thermische Leitfähigkeit und wird in ihrem Wert hauptsächlich durch die turbulente thermische Leitfähigkeit  $\lambda_t$  dominiert.  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $k$  und  $\epsilon$  stehen für die Dichte, die spezifische Wärmekapazität, die turbulente kinetische Energie sowie deren Dissipationsrate. Die Konstanten haben den Wert  $C_\mu = 0,09$  und  $Pr_t = 0,9$ .

### Einfluss der Düsenlänge

Um verschiedene Kühlmechanismen zu untersuchen, wird die Düsenlänge der Modellanordnung auf beiden Seiten symmetrisch variiert. Zur Bewertung des Ausschaltvermögens wird der Lichtbogenwiderstand 200 ns vor Stromnull betrachtet [2]. Abb. 2 zeigt den Einfluss dieser Länge auf die Höhe des Widerstands  $R_{200}$ .

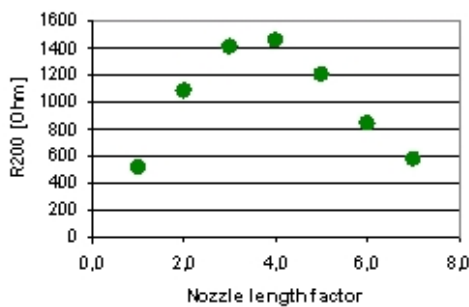


Abb. 2: Simulierter Lichtbogenwiderstand  $R_{200}$  in Abhängigkeit von der Düsenlänge

Es wird deutlich, dass sich für einen Düsenlängenfaktor von 4 ein Maximum des  $R_{200}$  ergibt. Dieses Maximum stellt gleichzeitig den Punkt des höchsten thermischen Ausschaltvermögens dar. Um dieses von der Düsenlänge abhängige Verhalten zu

analysieren, wird die örtliche Verteilung des Widerstand 200 ns vor Stromnull herangezogen (Abb. 3). Einerseits zeigt sich, dass zwar mit steigender Düsenlänge die Strecke länger wird, über die der Widerstand aufgebaut werden kann, andererseits nimmt das Maximum des längenbezogenen Widerstands bei steigender Düsenlänge ab. Beide Effekte beeinflussen so den Gesamtwiderstand bei variierender Düsenlänge gegensätzlich. Hierdurch ist das in Abb. 2 erkennbare Maximum begründbar.

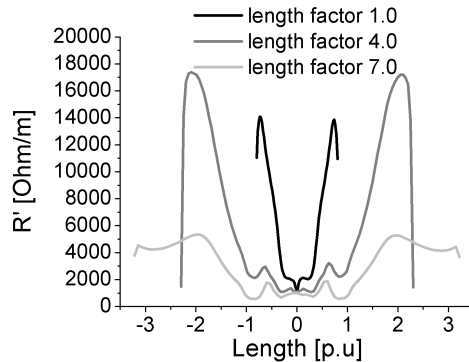


Abb. 3: Längenbezogener Lichtbogenwiderstand in Abhängigkeit der Position für verschiedene Düsenlängen

Die turbulente Kühlleistung ist der dominierende Kühlmechanismus kurz vor dem Stromnulldurchgang [3]. Betrachtet man diese entlang der Lichtbogenachse für verschiedene Düsenlängen (Abb. 4), so zeigt sich ein zur Widerstandsverteilung analoges Verhalten. Die Kühlleistung ist im Bereich des Stagnationspunktes zwischen den Düsen am geringsten, steigt dann im Düsenbereich deutlich an und nimmt zu den Elektroden wieder ab. Es zeigt sich, dass das Maximum der turbulenten Kühlleistung stark von der Düsenlänge abhängt. Dies ist die Ursache für die Entwicklung des Lichtbogenwiderstands und somit für die Ausbildung einer optimalen Dü-

senlänge im Sinne eines maximalen  $R_{200}$ .

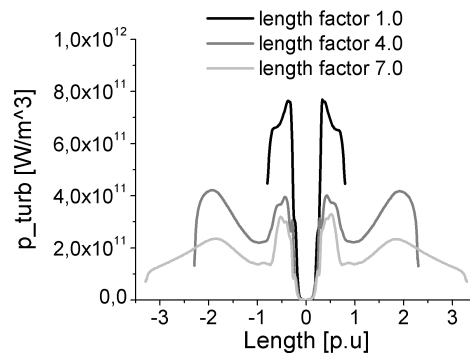


Abb. 4: Turbulente Kühlleistung in Abhängigkeit der Position für verschiedene Düsenlängen

### Verifikation

Die Simulationen zeigen bisher bei physikalischer Konsistenz eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Hierbei können jedoch nicht alle berechneten Größen mit dem Experiment verglichen werden. So kann z.B. zwar die integrale Größe des Lichtbogenwiderstands im Experiment gemessen werden - die örtliche Verteilung ist jedoch nicht problemlos messbar. Aufgrund der Bedeutung der Widerstandsverteilung für das physikalische Verständnis der Kühlvorgänge ist eine geeignete Messmethode wünschenswert. Bisher erprobte Verfahren sind z.B.:

- Langmuirsonde
- Plasmaspektroskopie
- Mikrowellendiagnostik
- direkte Potentialmessung

Alle bisher bekannten Verfahren beeinflussen jedoch das Plasma oder die Gasströmung, sind nur punktuell anwendbar oder benötigen einen optischen Zugang zum Lichtbogen. Somit ist die ganzheitliche Betrachtung eines axial beblasenen Lichtbogens nicht oder nur unter starken Einschränkungen möglich. Daher wird am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH-Aachen

zur Zeit ein neuartiges Messverfahren entwickelt, welches die geschilderten Probleme umgeht und in der Lage ist, die Widerstandsverteilung des Lichtbogens auf dessen gesamter Länge experimentell zu bestimmen.

### Acknowledgement

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

### Quellen

- [1] M.T.C. Fang, Q. Zhang, X.J. Guo: *Current-zero behaviour of an SF6 gas-blast arc. Part II: turbulent flow*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 27, pp. 74-83, 1994.
- [2] 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(6), pp. 273-279, 2001.
- [3] M.-C. Tang, M. Hoffacker, J.-C. Kahlen, A. Schnettler: *Cooling behaviour in the current zero phase of SF6 self-blast circuit breakers with different nozzle geometries*, XVIII Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, Czech Republic, 2009.

### Kontakt

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

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

# Resistance and Cooling Behaviour of Switching Arcs in SF<sub>6</sub> Circuit Breakers at the Current Zero Phase

During the current interruption process of a circuit breaker an electric arc is initiated between the electrodes. The arc has to be quenched to interrupt the current. To attain this, the switching arc has to be cooled effectively around current zero. Therefore, the resistance of the switching gap increases and it can be used to evaluate the interruption performance of the circuit breaker. The spatial distribution of the resistance can be used to analyse the cooling mechanisms of the switching arc in more detail.

## Introduction

Circuit breakers are widely used as safety and switching elements in electrical power systems. In case of short circuit failures the currents have to be switched of reliably. Due to the separation of the electrodes an electric arc is ignited which carries the current flow in the switching gap. To achieve a successful interruption of the short circuit current this switching arc has to be quenched. In self-blast circuit breakers the required blow gas pressure is generated by the arc itself inside a heating volume. The gas flow out of this volume cools the arc at the current zero phase. The cooling power exceeds the power input by the current. Thus, the resistance of the switching gap increases and leads to a non-conductive state. To investigate the physical processes Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are performed. For a better illustration of the cooling behaviour of the switching arc the influence of the nozzle length on the resistance will be described.

## Simulations

For the current zero simulations the physical phenomena have to be expressed by mathematical equations. They are implemented in a multi-physics software including the interaction of the physical pro-

cesses. The approach of CFD is based on the flow equations of Navier-Stokes. The simulation geometry is depicted in Fig. 1.

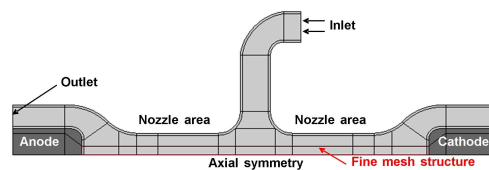


Fig. 1: Simulation geometry

As a validated simplification the heating volume is substituted by an Inlet with an inflowing gas. The gas flow is guided into the nozzle area and leaves the simulation area by the outlets around the electrodes. The simulated arc is arranged in the axis of symmetry. Within this area a fine mesh is used to resolve the arc conditions. The simulation starts with a steady-state simulation at 100  $\mu$ s before current zero. Thereafter, a transient simulation is performed with a decreasing current curve. Turbulent effects in the simulations are considered due to the Kato-Lauder  $k$ - $\epsilon$  turbulence model. Using this model the turbulent cooling power density  $p_{turb}$  can be determined by [1]:

$$p_{turb} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$$\text{with } \lambda \approx \lambda_t = \rho c_p \frac{C_\mu}{\text{Pr}_t} \frac{k^2}{\epsilon}$$

$\lambda$  is the thermal conductivity and can be approximated by the turbulent thermal conductivity  $\lambda_t$ .  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $k$  and  $\epsilon$  are the density, the specific heat capacity, the turbulent kinetic energy and the dissipation rate respectively. The constants are  $C_\mu = 0.09$  and the Prandtl number  $Pr_t = 0.9$ .

### Influence of the Nozzle Length

To analyse the cooling mechanism of the switching arc various nozzle lengths are investigated. The nozzle length is changed on both sides keeping the symmetrical arrangement. The evaluation of the interruption capability can be performed using the resistance 200 ns before current zero [2]. Fig. 2 shows the influence of the nozzle length on this  $R_{200}$  value.

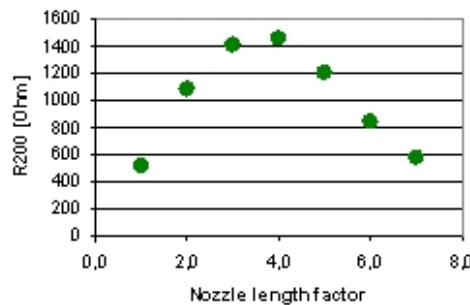


Fig. 2: Simulation of the arc resistance  $R_{200}$  in dependence of the nozzle length

A maximum of the  $R_{200}$  value at the nozzle length factor of 4 can be obtained. Hence, it is expected that the maximum interruption capability can be achieved using this nozzle length. For a more detailed insight in this conclusion the spatial resistance distribution is analysed in Fig. 3. On the one hand a longer nozzle leads to an increase of the area for the resistance development. On the other hand the resistance per length  $R'$  decreases at higher nozzle lengths. Both effects are effective in a contrary way which concludes to

an optimum dependency of the parameter.

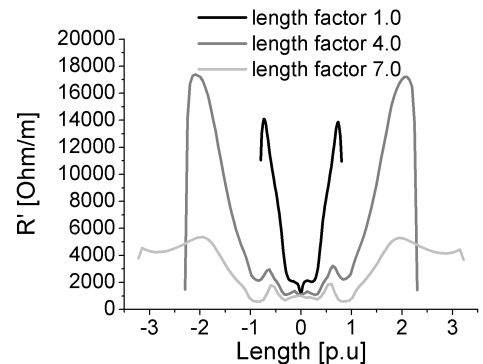


Fig. 3: Resistance per length values in dependence of the position for various nozzle lengths

To provide a more physical interpretation of this behaviour the dominant cooling behaviour of switching arcs is analysed. This is the turbulent cooling process [2]. The turbulent cooling power density at the arc edge is given in Fig. 4.

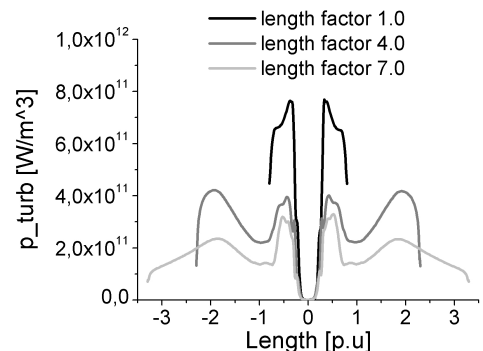


Fig. 4: Turbulent cooling power density in dependence of the position for various nozzle lengths

The turbulent cooling is not effective in the area around the stagnation point. But within the nozzle areas turbulences are generated due to the parallel shear flow of the quenching gas and the gas in the arc. The maximum turbulent cooling power decreases with increasing nozzle length because of the lower pressure gradient. As a result, an optimum turbulent cooling performance

and accordingly an optimum  $R_{200}$  can be achieved at a specific length.

## Verification

Using a physical consistent simulation model a good performance of the simulation results can be achieved. But not all relevant parameters can be determined experimentally. In this case the total resistance can be measured but not the spatial resistance distribution. Due to the importance of the resistance, especially for the evaluation of the interruption limit and the evaluation of the cooling performance, the determination of the resistance distribution will lead to improvements of today's switching arc understanding. The following approaches such as:

- Langmuir probe
- Plasma spectroscopy
- Diagnosis by microwaves
- direct measurement of the potential

are evaluated either to have an influence on the plasma or gas flow, to be applicable only at a specific point or to have the need of a direct optical sight. A new measuring approach is investigated at the Institute for High Voltage Technology at the RWTH Aachen University. This new measuring method should have no influence or restriction in the determination of the specific resistances for the total switching arc area.

## Acknowledgement

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

## References

- [1] M.T.C. Fang; Q. Zhang; X.J. Guo: *Current-zero behaviour of an SF6 gas-blast arc. Part II: turbulent flow*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 27, pp. 74-83, 1994.
- [2] 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(6), pp. 273-279, 2001.
- [3] M.-C. Tang, M. Hoffacker, J.-C. Kahlen, A. Schnettler: *Cooling behaviour in the current zero phase of SF6 self-blast circuit breakers with different nozzle geometries*, XVIII Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, Czech Republic, 2009.

## Contact

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

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

# Bestimmung der dielektrischen Wiederverfestigung innerhalb einer Isolierstoffdüse aus PTFE

*Leistungsschalter stellen wichtige Sicherheitselemente in elektrischen Übertragungsnetzen dar. Daher ist von immenser Bedeutung, dass sie in der Lage sind, sowohl Nenn- als auch Kurzschlussströme zuverlässig zu unterbrechen. Neben dem thermischen Ausschaltvermögen stellt die dielektrische Wiederverfestigung eines der charakteristischen Merkmale eines Leistungsschalters dar. Insbesondere für alternative Löschgase, wie z. B. CO<sub>2</sub> oder synthetische Luft, sind nur wenige Informationen über den Einfluss der Isolierstoffdüsen auf die dielektrische Wiederverfestigung bekannt. Daher wird dieser Aspekt im Folgenden genauer betrachtet.*

## Einleitung

Heutzutage stellen mit SF<sub>6</sub> gefüllte Selbstblasleistungsschalter den Stand der Technik dar. Bei diesen Leistungsschaltern wird der zur Beblassung notwendige Druck durch den in der Hochstromphase verursachten Abbrand der Isolierstoffdüsen (PTFE) selbst erzeugt. Unmittelbar nachdem der Lichtbogen verlöscht ist, muss die Schaltstrecke in der Lage sein, der wiederkehrenden Netzspannung (TRV) stand zu halten [1]. Zu diesem Zeitpunkt emittieren die Isolierstoffdüsen aufgrund ihrer Aufheizung während der Hochstromphase weiterhin heißes Gas. Daher kann das abbrennende Düsenmaterial einen Einfluss auf die dielektrische Festigkeit nehmen. Dieses Phänomen konnte bereits in früheren Untersuchungen beobachtet werden [2]. Hier wurde die dielektrische Wiederverfestigung eines Leistungsschalters unter dem Einsatz von synthetischer Luft als Löschgas bestimmt. Der Einsatz eines alternativen Löschgases lässt sich mit dem enormen Treibhausgaspotential (GWP) von SF<sub>6</sub> erklären, welches etwa 22200 mal so groß wie das von CO<sub>2</sub> ist. Im Rahmen dieses Projektes wird daher der Einfluss der Isolierstoffdüse auf die dielektrische Wiederverfestigung untersucht.

## Experimenteller Aufbau

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen wird ein simplifizierter Aufbau (PTD) verwendet. Das PTD besteht im Wesentlichen aus einer zylindrischen Isolierstoffdüse, zwei Elektroden und ist umgeben von Luft.

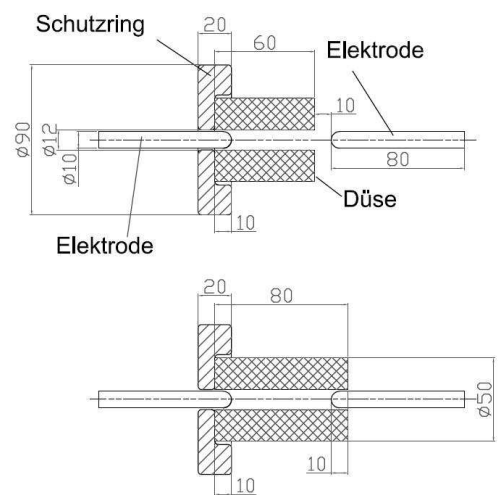


Abb. 1: Simplifizierter Aufbau (PTD); oben: Anordnung D60 ; unten: Anordnung D80

Als Materialien werden die für Leistungsschalter typischen verwendet. Für die Düse wird Teflon (PTFE) gefüllt mit MoS<sub>2</sub> und für die Elektroden eine Legierung aus Wolfram und Kupfer verwendet. Der Elektrodenabstand kann durch das Verfahren

einer Elektrode in axialer Richtung variiert werden. Im Folgenden werden Abstände von 50 und 60 mm betrachtet. Um zusätzlich optische Untersuchungen durchführen zu können, wird neben der Standard Düsenlänge von 60 mm eine zweite von 80 mm verwendet. Für die Aufnahmen wird eine Kamera des Typs Sensi Cam 370LF verwendet. Abbildung 1 zeigt die beiden Anordnungen, mit der Abkürzung D60 oder D80 wird die entsprechende Düsenlänge bezeichnet. Der Ringspalt zwischen Elektrode und Düse weist eine Weite von 1 mm auf. Der eingezeichnete Schutzring ist aus Aluminium gefertigt und sorgt für eine inhomogene Feldverteilung. Ein Ersatzschaltbild des verwendeten Prüfkreises ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein Schwingkreis aus einer Kondensatorbank und einer Spule stellt den erforderlichen Strom mit einer Amplitude von  $2 \text{ kA}_{peak}$  und einer Frequenz von ca. 50 Hz zur Verfügung. Zur Zündung des Lichtbogens wird ein dünner Kupferdraht (Durchmesser 0,05 mm) verwendet. Nach der Stromunterbrechung wird die Schaltstrecke über eine Zündfunkenstrecke mit einem Spannungsimpuls belastet. Durch eine Variation der Verzögerung des Zuschaltzeitpunktes kann durch die Ermittlung der jeweiligen Durchschlagsspannungen die dielektrische Wiederverfestigung bestimmt werden.

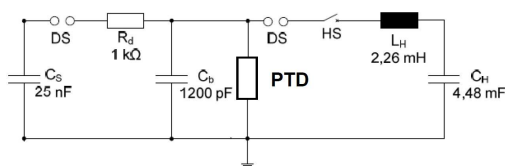


Abb. 2: Prüfkreis

### Ergebnisse

Als Beispiel stellt Abb. 3 die für einen Elektrodenabstand von 50 mm und 60 mm unter Verwendung einer 80 mm langen Düse erzielten Ergebnisse dar. Es kann fest-

gestellt werden, dass nach einem schnellen Anstieg auf ca. 25 kV die Durchschlagsspannung mit einer deutlich reduzierten Steigung langsam ansteigt. Während dieser ersten Phase, die ca. 1 ms andauert, zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kurven. Im Gegensatz dazu zeigt sich im weiteren Verlauf ein deutlicher Unterschied, der sich in einer Differenz von etwa 8 kV widerspiegelt. Dieser reduziert sich jedoch im weiteren Verlauf ab einer Verzögerungszeit von 10 ms.

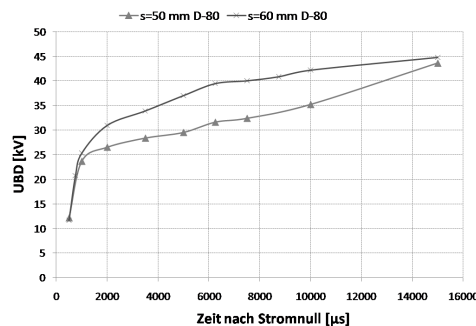


Abb. 3: Ergebnisse der Messung

### Diskussion

Um den charakteristischen Verlauf der dielektrischen Wiederverfestigung nachvollziehen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Temperatur unabdingbar. Die mit einem Zwei-Farben-Pyrometer durchgeführten Messungen zeigen innerhalb der ersten Millisekunden einen schnellen Abfall, welcher mit der steigenden Durchschlagsspannung korreliert. Dieser schnelle Abfall liegt hauptsächlich darin begründet, dass durch die Löschung des Lichtbogens die einzige Strahlungsquelle des Systems verloren geht. Somit ist eine schnelle Abkühlung der Gasstrecke möglich. Im weiteren Verlauf bleibt die Temperatur nahezu konstant, entsprechend einer nur leicht ansteigenden Durchschlagsspannung. Es lässt sich vermuten, dass die Gastemperatur zu diesem Zeitpunkt maßgeblich durch die Temperatur der Isolierstoffdüse beeinflusst wird.

Demzufolge müsste sich die heißeste Gas-schicht in der Nähe der Düsenwand be-finden. Dies lässt sich durch die optischen Untersuchungen bestätigen. Abb. 4 zeigt beispielhaft Aufnahmen für eine Verzöge-rungszeit von 2 ms (oben) und 7,5 ms (unten). Beide Aufnahmen korrespondieren mit den jeweiligen Phasen. Es zeigt sich deutlich, dass die Durchschläge zu den grö-ßeren Verzögerungszeiten sich vornehm-lich entlang der Düsenwand vollziehen.

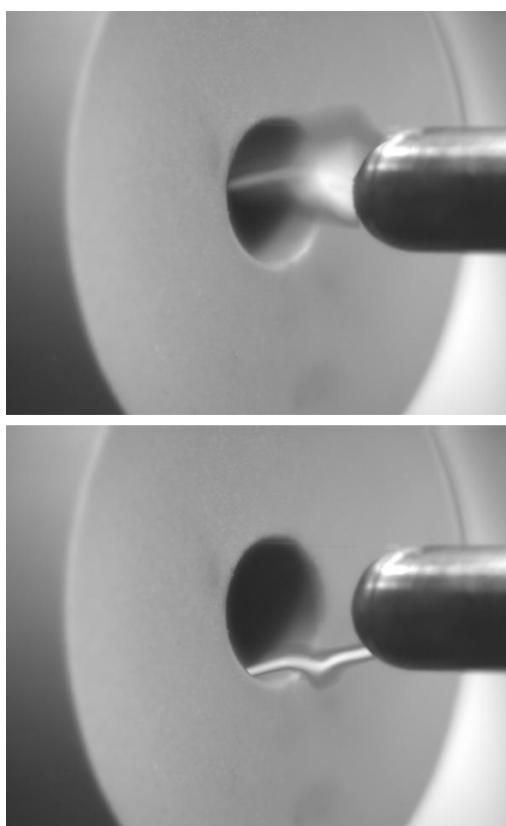


Abb. 4: Vergleich der Durchschlagspfade nach 2 ms (oben) und 7.5 ms (unten). Bilder wurden einem Referenzbild überlagert.

## Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Forschungszentrum der ABB Schweiz AG für die ertragreichen Diskussionen und die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit. Ebenfalls gilt mein Dank dem Institut für Wärme- und Stoffübertragung für die Bereitstellung des Pyrometers.

## Quellen

- [1] R. Dommerque: *Einfluss des Elektrodenabbrandes auf das Schaltverhalten eines SF6-Selbstblusschalters*, Dissertation, 2006
- [2] M. Seeger, G. Naidis, A. Steffens, H. Nordborg and M. Claessens: *Investigation of the dielectric recovery in synthetic air in a high voltage circuit breaker*, J. Phys. D: Appl. Phys.38, pp. 1795-1804, 2005

## Kontakt

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



# Determination of the dielectric recovery in an insulating PTFE-nozzle

*Circuit breakers are important elements in electric power systems. Therefore it is of high importance that breakers are able to interrupt nominal and short circuit currents sufficiently. Beside the thermal interruption capability, the dielectric recovery of a circuit breaker is one of the most relevant characteristics. Especially for alternative quenching gases like CO<sub>2</sub> or compressed air only little information of the interaction between the insulating nozzle and dielectric recovery of the gas is available. Hence, it is investigated here.*

## Introduction

Nowadays state of the technology are SF<sub>6</sub> filled self blast circuit breakers. In these types of circuit breakers the necessary blow gas pressure is built up by ablating material from the PTFE insulating nozzles during the high current phase.

After the extinction of the arc the circuit breaker must be able to withstand the transient recovery voltage in order to prevent dielectric failures [1]. At that time the insulating nozzles are still evaporating hot gas due to the fact that the whole nozzle was heated up during the high current phase. For this reason the nozzle material has an impact on the dielectric recovery of the circuit breaker [2]. Here the dielectric recovery of a test circuit breaker using compressed air as a quenching gas was determined. The use of compressed air as a quenching gas can be justified by the high global warming potential (GWP) of SF<sub>6</sub>, which is nearly 22200 times higher than the GWP of CO<sub>2</sub>.

Here the influence of the evaporating nozzle on the dielectric recovery of hot air is experimentally investigated.

## Experimental setup

To perform the experiments a simplified test arrangement, from here on referred to as PTD (principal test device) is used. This PTD consist of a cylindrically shaped nozzle, two electrodes and is surrounded by air.

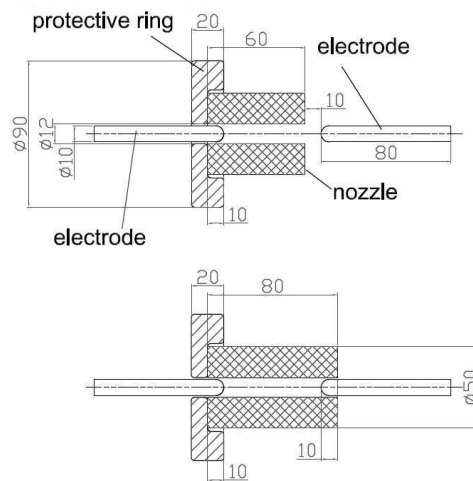


Fig. 1: Simplified test arrangement plug located outside of the nozzle (top, 60 mm-D60) and inside (bottom, 60 mm-D80)

The nozzle and the electrodes are made of conventional material used in high voltage circuit breakers, which is polytetrafluorethylene (PTFE) filled with molybdenum disulphide (MoS<sub>2</sub>) in case of the nozzle and tungsten copper (W/CU), respectively in case of the electrodes.

The electrode distance can be varied by moving one electrode in axial direction. In this paper electrode distances of 50 mm and 60 mm are investigated. In order to be able to perform optical investigations different nozzle length are used (60 mm and 80 mm). For this investigation, a digital camera (Sensi Cam 370LF) is used.

Figure 1 shows the two arrangements 60 mm-D60 and 60 mm-D80, where D de-

notes the nozzle length. Between the electrode and the nozzle there is an annular gap of 1 mm. The protective ring constructed of aluminium (AL) ensures an inhomogeneous field distribution between the two electrodes. The arc is ignited by a thin ignition wire (CU) with a diameter of 0.05 mm connecting both electrodes. After current zero (CZ) a fast rising transient recovery voltage (TRV) is applied by a triggered spark gap. By variation of the trigger delay compared with CZ, the dielectric strength of the test arrangement can be determined at different times after CZ. Hence, the dielectric recovery characteristic results from the measured breakdown values.

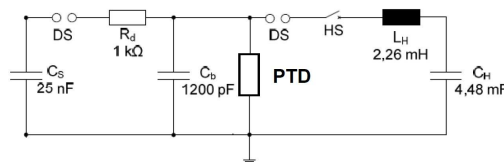


Fig. 2: Test circuit

### Results

As an example the results obtained for an electrode distance of 50 mm and 60 mm and a nozzle length of 80 mm are shown in figure 3.

Here a current of  $2 \text{ kA}_{peak}$  is applied to the PTD. It can clearly be seen that after a first fast take off up to a breakdown voltage of approx. 25 kV the breakdown voltage increases with a significant lower steepness. During the first phase which last approx. 1 ms no significant difference between the measured breakdown voltages for both arrangements can be recognised. In contrast to the second phase here the measured breakdown voltage for the longer electrode distance is approx. 8 kV above the breakdown voltage measured for a electrode distance of 60 mm. For time delays greater

than 10 ms this difference becomes less.

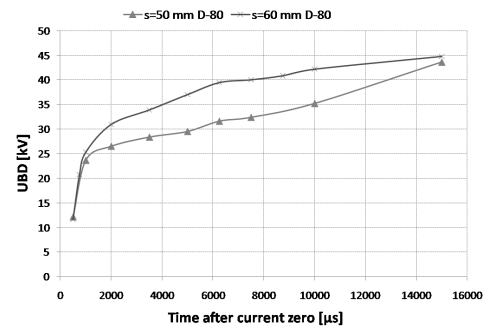


Fig. 3: Results of the measurement

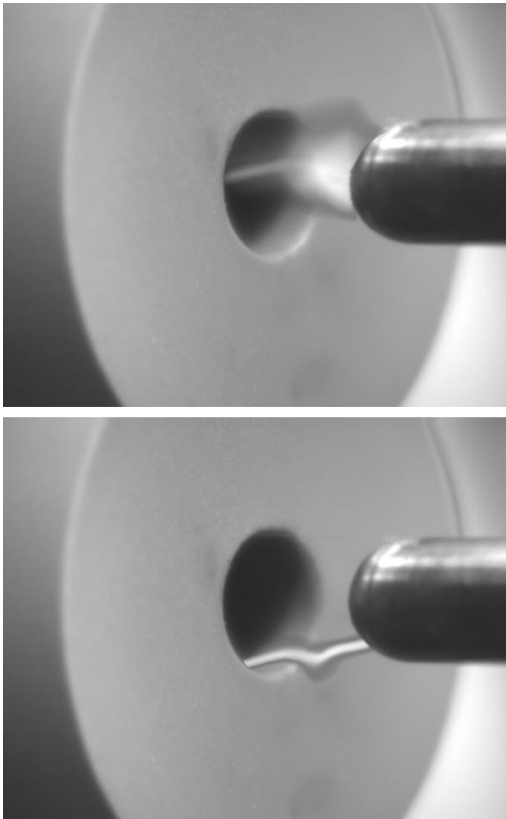
### Discussion

In order to understand the characteristics of the breakdown processes shown above a knowledge of the temperature development after CZ inside the nozzle is indispensable. The results obtained by the use of a two colour ratio pyrometer show that the sharp increase of the dielectric recovery within the first milliseconds is related to a sharp decrease in the temperature.

The main reason for this behaviour is that after the arc is extinguished the only heat source is immediately gone. Thus, a fast cooling of the gas inside the insulating nozzle is possible. Within the next milliseconds the decrease in temperature slows down and continues to stay almost constant. This can also be seen in the measured breakdown voltages. The low steepness indicates an almost constant temperature. It can be assumed that the nozzle surface is responsible for this characteristic behaviour, because the evaporation temperature of PTFE is fixed.

Consequently the breakdown path should occur along the nozzle surface at the time, when the gas inside the nozzle is cooled down to the evaporation temperature of PTFE. This can be proven by the optical investigations. Two characteristic examples are shown in figure 4. For a better understanding the recorded breakdown photos

are superimposed to a reference picture. On the upper one a characteristic picture for a short time delay (2 ms) is given, whereas on the lower picture an example for a long time delay (7.5 ms) is given. This behaviour is equal for all investigated time delays of the corresponding phases.



*Fig. 4:* Comparison of a breakdown at 2 ms (upper) and at 7.5 ms (lower). Frames with and without discharge path were superimposed.

## Acknowledgments

The author thanks the Corporate Research Centre of ABB Switzerland for the fruitful discussions and the financial support of this work. I am also thankful to the Institute for Heat and Mass Transfer of the RWTH Aachen University for providing the fibre optic two colour ratio pyrometer.

## References

- [1] R. Dommerque: *Einfluss des Elektrodenabbrandes auf das Schaltverhalten eines SF6-Selbstblusschalters*, Dissertation, 2006
- [2] M. Seeger, G. Naidis, A. Steffens, H. Nordborg and M. Claessens: *Investigation of the dielectric recovery in synthetic air in a high voltage circuit breaker*, J. Phys. D: Appl. Phys.38, pp. 1795-1804, 2005

## Contact

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

# Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Ultraschalldiagnostik an Energiekabeln

*Bei der Herstellung moderner Isoliersysteme kommen häufig polymere Kunststoffe zum Einsatz. Für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb dieser Systeme werden höchste Ansprüche an die Qualität des Isolierstoffes gestellt. Der Herstellungsprozess polymerer Isolierstoffe ist dabei im großen Maße durch die Vernetzung der Polymere geprägt. Dabei ist die Temperatur während der einzelnen Produktionsschritte von erheblicher Bedeutung. Unter Ausnutzung des Einflusses der Temperatur auf die akustischen Materialparameter eines Polymers wird untersucht, in wie weit sich die Temperatur im Inneren eines Energiekabels überwachen lässt.*

## Einleitung

Die Kosteneffizienz und eine einwandfreie Qualität ist in der Produktion von Energiekabeln eine grundlegende Voraussetzung. Da die Vernetzung polymerer Kunststoffe maßgeblich von der Temperatur des Kabels während der Produktion abhängt, dient diese als Schlüsselparame- ter [1]. Die Kenntnis der Temperatur im Inneren des Kabels stellt eine Möglichkeit dar, die Qualität des Kabels während der Produktion direkt zu überwachen. Des Weiteren kann die Information über die Temperatur zur Optimierung des Produktionsprozesses genutzt werden. Am Beispiel von XLPE, welches in Energiekabeln als Basispolymer eingesetzt wird, wird der Einfluss der Temperatur auf die akustischen Materialparameter untersucht. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Schallreflexion an der inneren Grenzfläche zwischen Isolation (XLPE) und Leitschicht des Kabels und ihrer Auswertbarkeit hinsichtlich einer Bestimmung der inneren Kabeltemperatur.

## Temperaturabhängigkeit des Reflexionsverhaltens

Eine Betrachtung des thermischen Einflusses auf die Ultraschalldiagnostik steht im direkten Zusammenhang mit den aku-

stischen Materialeigenschaften von Polymeren. Dabei ist jedes Medium, in dem sich Schall ausbreitet, durch eine Schallkennimpedanz charakterisiert. An einer Grenzfläche zwischen zwei Medien unterschiedlicher Schallkennimpedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  tritt eine Schallreflexion auf. In Abb. 1 sind die Schallkennimpedanzen von XLPE und Leitschichtmaterial dargestellt. Die Schallkennimpedanzen zeigen über der Temperatur eine deutliche Abnahme von ca. 24% pro 50°C für XLPE und 21% pro 50°C für das Leitschichtmaterial.

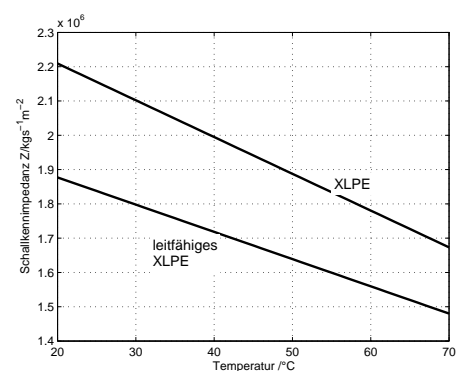


Abb. 1: Schallkennimpedanzen von XLPE und leitfähigem XLPE in Abhängigkeit der Temperatur

Der sich aus den Schallkennimpedanzen ergebene Reflexionsfaktor stellt das Maß der Reflexion an der Grenzfläche dar

[2]. Wird aus den Schallkennimpedanzen das Reflexionsverhalten an der Grenzfläche XLPE und Leitschicht modelliert, ergibt sich das in Abb. 2 dargestellte Verhalten. Über den Temperaturbereich von 20°C bis 70°C zeigt sich eine verhältnismäßig geringe Reflexion von ca. 8% bis 6%.

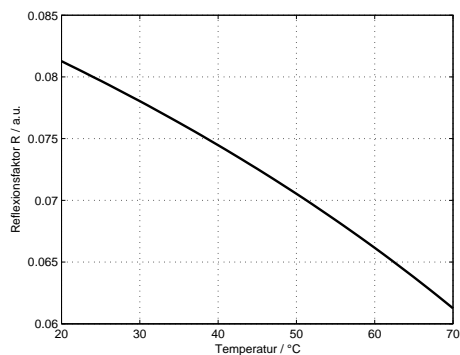


Abb. 2: Reflexionsfaktor der Grenzfläche XLPE und Leitschicht

Die geringe Reflexion liegt darin begründet, dass es sich bei den aneinandergrenzenden Medien um die gleiche Polymermatrix handelt. Die halbleitende Schicht unterscheidet sich nur durch die Füllung der polymeren Matrix mit Kohlenstoff. Zusätzlich besitzt XLPE eine betragsmäßig hohe Schalldämpfung von bis zu 1600 dB/m, welche ebenfalls eine Temperatur-, sowie zusätzlich eine Frequenzabhängigkeit zeigt (Abb. 3) [2,3].

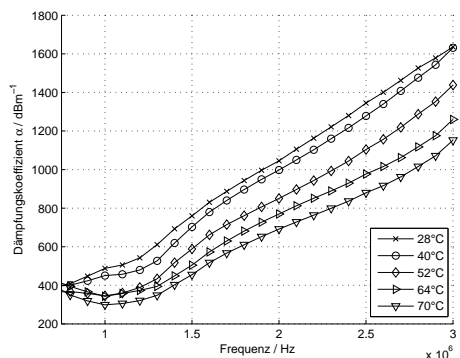


Abb. 3: Dämpfungskoeffizient von XLPE in Abhängigkeit der Frequenz und Temperatur

Das empfangene Ultraschallsignal stellt somit eine Überlagerung zweier Einflussfaktoren, der Dämpfung und der Reflexion, dar. Es ist zu erwarten, dass die gemessene Amplitude des Ultraschallsignals über der Temperatur eine ansteigende Charakteristik zeigen wird [3].

### Zusammenfassung und Ausblick

In den akustischen Materialparametern von XLPE ist eine Temperaturabhängigkeit der Reflexion an inneren Grenzflächen und der Schalldämpfung nachweisbar. Das Reflexionsverhalten wird dabei durch die Abnahme der Schalldämpfung über der Temperatur im Ausbreitungsmedium vor der Grenzfläche überlagert. Für eine Messung der absoluten Temperatur der Grenzfläche ist eine Kompensation des Dämpfungseffektes notwendig. Die Entwicklung eines Verfahrens zur Schalldämpfungskompensation von Ultraschallmesssignalen sowie ein Verfahren zum Temperaturmonitoring in der Kabelproduktion ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

### Quellen

- [1] H.Dominghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Springer 2005
- [2] J.Krautkrämer, H.Krautkrämer *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer 1986
- [3] G.Schütte, *Jahresbericht 2008*, Institut für Hochspannungstechnik 2008

### Kontakt

Dipl.-Ing. Gregor Brammer  
 brammer@ifht.rwth-aachen.de  
 +49 241 80-94910

# On temperature influence on ultrasonic diagnostics of power cables

*For production of modern insulation systems polymer materials are applied. For economical and reliable operation of insulation systems the polymers have to fulfill highest requirements. A major part in production of polymer insulation is the cross linking and therefore the temperature of the polymer during the several production steps. Using the thermal influence on acoustic parameters of polymers the measurement and the online monitoring of the inner temperature of a power cable is investigated.*

## Introduction

During production process of power cables cost efficiency and faultless quality are basic requirements. Due to the temperature dependency of the polymers there is a special attention to the temperature of the cable after cross linking. In this case the temperature can be regarded as a key parameter of quality for cable insulation [1]. The knowledge of the temperature inside the cable gives an opportunity to control the conductor temperature during production and to optimize the production process. Using the example of XLPE, which is used in power cables, the thermal influence on the acoustic parameters of the polymers is investigated. Concerning the measurement of the inner temperature of the cable, special attention is turned to the sound reflection at the inner semiconducting layer.

## Thermal dependency of the sound reflection

There is a direct correlation between thermal influence on ultrasonic diagnostics and the thermo-acoustical material parameters. Any material, in which sound is propagating, is characterised by a sound impedance. An interface between two materials of different sound impedances  $Z_1$  and  $Z_2$  causes a sound reflection. Fig. 1 shows the sound impedances of XLPE and semiconducting XLPE. The impedance of XLPE show a decrease over temperature of

about 24% per 50°C and 21% per 50°C for semiconducting XLPE. The gradient of the two impedances are similar to each other.

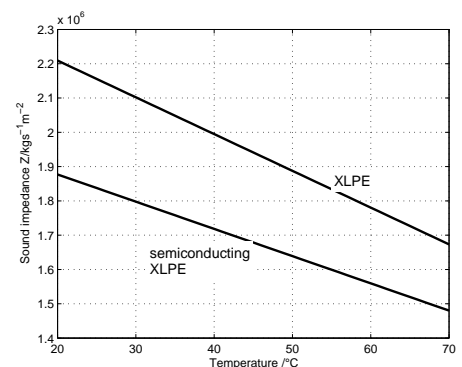


Abb. 1: Sound impedances of XLPE and semiconducting XLPE depending on temperature

The magnitude of reflection at the interface between XLPE and semiconducting XLPE is defined by the reflection coefficient [2]. The calculation of the reflection coefficient, using the two sound impedances shown above, lead only to small values of reflection over temperature (Fig. 2). The reflected amplitude over temperature is between 8% and 6% over 50°C.

The reason for such a low reflection is the same polymer matrix of XLPE and semiconducting XLPE, which only differ in the filling with carbon particles for creating the conductivity. Additionally XLPE has a high sound attenuation up to 1600 dB/m, which

also depends on temperature and frequency.

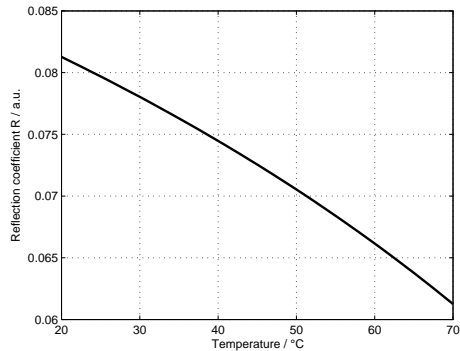


Abb. 2: Sound reflection at the interface XLPE and semiconducting XLPE dependent on temperature

An ultrasonic measurement of the acoustic attenuation leads to the characteristics shown in figure 3. This behavior is in common with current information from literature [2,3].

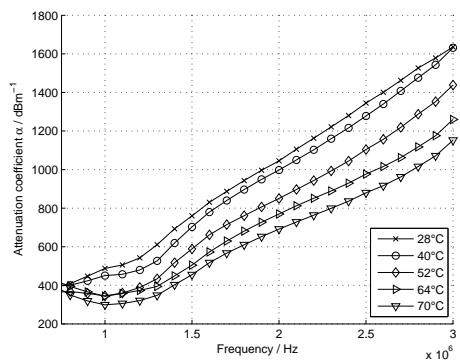


Abb. 3: Acoustic attenuation of XLPE depending on temperature and frequency

Hence, the received ultrasonic signal is influenced by the attenuation, due to the propagation through the XLPE material on the

one hand and on the other hand it is influenced by the reflection at the interface between XLPE and semiconducting XLPE. The superposition of these two factors leads to the expectation that the amplitude of the received ultrasonic signal shows an increasing characteristic over temperature [3].

### Conclusions and Outlook

Due to the acoustic material parameters of XLPE the sound reflection and the sound attenuation show a dependency on the temperature. For an analysis of the reflection at the interface it is necessary to compensate the effect of attenuation on the ultrasonic signal. The development of an algorithm for compensation of the attenuation and a proceeding for monitoring the inner cable temperature in production is a topic of current investigations.

### References

- [1] H.Dominghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Springer 2005
- [2] J.Krautkrämer, H.Krautkrämer *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer 1986
- [3] G.Schütte, *Annual Report 2008*, Institute for High Voltage Technology 2008

### Contact

Dipl.-Ing. Gregor Brammer  
 brammer@ifht.rwth-aachen.de  
 +49 241 80-94910

# Untersuchung neuartiger Zündsysteme für Ottomotoren

*Bedingt durch strenge Emissionsvorschriften, steigende Treibstoffkosten und einem allgemein gestiegenen Umweltbewusstsein der Kunden hat die Automobilindustrie in den letzten Jahren ihr Engagement bei der Entwicklung sparsamer Antriebstechnologien weiter verstärkt. Neben alternativen Technologien wird der Verbrennungsmotor weiterhin eine dominante Rolle spielen. Die dabei verwendeten Maßnahmen zur Verbrauchsminimierung, wie beispielsweise eine stärkere Aufladung oder eine geschichtete Treibstoffeinspritzung, stellen neue und härtere Anforderungen an das verwendete Zündsystem. Am Institut für Hochspannungstechnik werden moderne Multisparkzündsysteme bezüglich ihrer Eignung, Optimierungsmöglichkeiten und Einschränkungen beim Betrieb im Kfz-Antriebsstrang untersucht.*

## Einleitung

Mit Ausnahme moderner HCCI-Motoren wird in allen handelsüblichen Ottomotoren der Treibstoff über Funkenzündungen zur Entflammung gebracht. Neben Sonderlösungen wie der Hochspannungskondensator-Zündung oder der Wechselspannungszündung ist die Transistor-Spulen-Zündung (TSZ) die am Markt am häufigsten zu findende Bauform. Das Funktionsprinzip der TSZ ähnelt dem eines Sperrwandlers aus der Energietechnik. Abbildung 1 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild der TSZ.

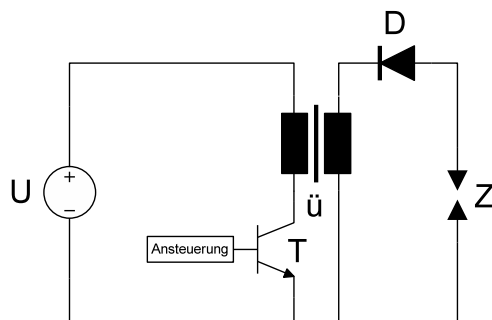


Abb. 1: Transistor-Spulen-Zündung

In eine niederspannungsseitig über einen Transistor  $T$  geschaltete Transformatorwicklung wird mit kurzen Pulsen (bis 3 ms) Energie aus dem 12 V-Bordnetz  $U$  einge-

speist. Beim Abschalten des Transistors wird aufgrund des hohen  $dI/dt$  eine hohe Gegenspannung induziert und über einen Magnetkern auf eine zweite Transformatorwicklung transferiert. Multipliziert mit dem Wicklungsverhältnis  $\ddot{u}$  werden dabei Spannungen im Bereich einiger 10 kV erreicht. Die so erzeugte Spannung reicht aus, einen Zündfunken zwischen den Elektroden der an die Zündspule angeschlossenen Zündkerze  $Z$  zu erzeugen. Der unvermindert anhaltende Trend zum so genannten „Downsizing“ bei gleichzeitig steigender Luft-Kraftstoff-Kompression wirkt sich dabei negativ auf die Zündanlage aus, da bei sinkendem Platzangebot immer größere Zündspannungen bereitgestellt werden müssen. Gleichzeitig erfordern einige Motorsysteme mit besonders mageren und somit zündunwilligen Gemischen, insbesondere die so genannten Schichtladesysteme, eine erhöhte Zündenergie und eine längere Zünddauer zur sicheren Entflammung des Kraftstoffgemischs.

## Multisparkzündung

Eine Möglichkeit, die zur Gemischentflammung benötigte Energie in der geforderten Menge und über den geforderten Zeitraum bei gleichzeitig verringerter Spulen-



größe zur Verfügung zu stellen, ist die so genannte Multisparkzündung[2]. Bei diesem System wird der brennende Zündfunke in sehr kurzen Abständen (einige Mikrosekunden) unterbrochen, um dem System auf der Niederspannungsseite neue Energie hinzuzufügen. Dieses Nachladen ermöglicht eine Steigerung der Energiedichte pro Bauvolumen und somit eine Reduzierung der Bauteilgröße bei gleichzeitiger Erhöhung der Funkenenergie. Abbildung 2 zeigt die Strom- und Spannungsverläufe einer Multisparkzündung mit vier seriell aufeinanderfolgenden Funken.

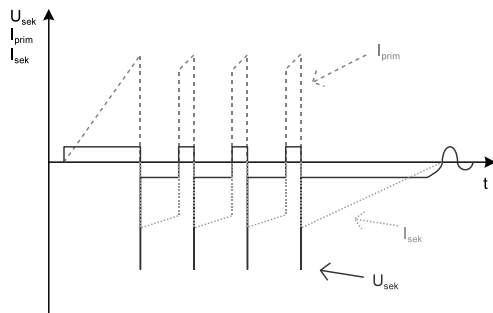


Abb. 2: Multisparkzündung

In Abbildung 3 ist die Langzeitbelichtung einer Multisparkzündung mit 16 Einzelfunken dargestellt. Die Entladungskanäle wurden im Bild von rechts mit Gas beblasen und so zur erkennbaren Auslenkung gezwungen. Die zeitliche Abfolge der seriell nacheinander zündenden Funken ist von rechts nach links zu verstehen.

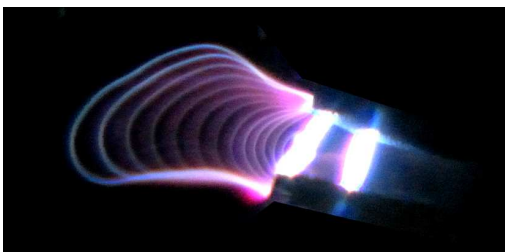


Abb. 3: Langzeitfotografie einer Multisparkzündung

Die Untersuchungen am IFHT konzentrieren sich auf das Verständnis der Auswirkung verschiedener Parameter auf Zielgrö-

ßen wie die Zündspannung und die Funkenlänge. Dabei wird zwischen elektrisch einstellbaren Parametern, wie den zeitlichen Abständen zwischen zwei Folgefunkens oder der Brenndauer eines Einzelfunkens sowie den aerodynamischen Parametern, wie dem Umgebungsdruck und der Gasgeschwindigkeit, unterschieden.

### Untersuchung der Spannungsbelastung

Eine direkte Folge der bewusst gesteigerten Turbulenz des Luft-Kraftstoffgemischs moderner Ottomotoren ist die starke Auslenkung des Zündfunken aus den Elektroden der Zündkerze entsprechend Abbildung 3. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Durchbruchspannung und die Brennspannung, also zweier für die Energieeffizienz und den Zündkerzenverschleiß wichtiger Größen. Über Untersuchungen mit verschiedenen Druckkammern wird das speziell für die Multisparkzündung wichtige Verhalten der Bogenlänge untersucht. Untersuchungen zeigen, dass die Durchbruchspannungen der Folgefunkens einer solchen Zündanlage anderen Gesetzmäßigkeiten unterliegen, als der initiale Durchbruch. Die zum ersten Durchbruch erforderliche Spannung wird durch das Paschengesetz beschrieben [1].

$$U_d = \frac{B \cdot pd}{\ln \frac{A \cdot pd}{\ln(1+\gamma^{-1})}}$$

Dabei beschreiben  $A$  und  $B$  experimentell ermittelte Gaskonstanten,  $p$  den Gasdruck,  $d$  die Schlagweite und  $\gamma$  den Rückwirkungsfaktor. Im für Verbrennungsmotoren relevanten Bereich lässt sich dieses Gesetz auf eine lineare Abhängigkeit der Zündspannung vom Umgebungsdruck und der Schlagweite reduzieren, wobei üblicherweise noch ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der inhomogenen Elek-

trodengeometrie einer Zündkerze beachtet werden muss.

$$U_d \propto pd$$

In Abbildung 4 ist der Verlauf der Durchbruchspannungen einer Multisparkzündung mit 16 Funken dargestellt. Deutlich erkennbar ist darin die im Betrag gesunkene Zündspannung der Funken 2 bis 16, also der Funken, die nicht mehr ausschließlich durch das Paschengesetz bestimmbar sind.

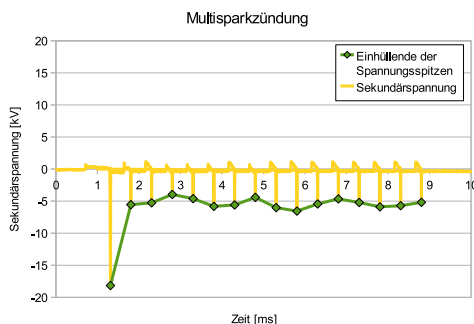


Abb. 4: Durchbruchspannungen einer Funkenreihe

In Abbildung 5 ist der Verlauf der Brennspannung eines Einzelfunkens mit beblasem Lichtbogen dargestellt.

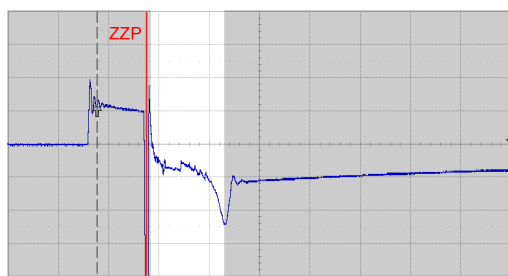


Abb. 5: Spannungsverlauf Einzelfunken (1 kV/div; 0,2 ms/div)

Im hervorgehobenen Bereich ist unmittelbar nach dem Zündzeitpunkt ZZP eine im Betrag wachsende Brennspannung erkennbar. Der Vergleich dieser Brennspannung mit Highspeed-Mikroskopaufnahmen bestätigt den linearen Zusammenhang zwischen Bogenlänge und Brennspannung [1]. Damit ist es möglich, aus der Brennspan-

nung Rückschlüsse auf die Bogenauslenkung zu ziehen. Das Induktionsgesetz in seiner differentiellen Form beschreibt den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an Induktivitäten:

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Daraus lässt sich durch Integration die Spannungsabhängigkeit der Stromstärke im zeitlichen Verlauf ermitteln. Kombiniert mit den Erkenntnissen über die Brennspannung ergibt sich eine bei steigender Bogenauslenkung schneller fallende Stromstärke und damit eine kürzere Gesamtentladungsdauer. Bei den untersuchten Geometrien liegen diese Werte im Bereich von ca. 0,1 ms bis 1,5 ms. Die genaue Kenntnis der zu erwartenden Brennspannungen, Stromverläufe und Entladezeiten ermöglicht eine optimierte Definition der Spulensteuerung ebenso wie eine angepasste Isolierstoffauswahl. Ein weiterer Vorteil der Kenntnis der Bogenauslenkung liegt in einer besseren Vorhersagbarkeit des Elektrodenverschleißes.

### Ausblick: Energieeffizienz

Die allgemeine Kenntnis der Spannungs- und Stromverläufe einer Zündfunkenentladung ermöglicht die elektrotechnische Optimierung der beteiligten Komponenten. Zur Optimierung der Funktion als Entflammungsinitiator im Verbrennungsmotor ist es darüber hinaus erforderlich, einige thermodynamische Eigenschaften der Funkenzündung in Kombination mit diesen elektrischen Kennwerten zu analysieren. Hierzu laufen am IFHT weiterführende Untersuchungen an Druckmesskammern, die den Einfluss verschiedener Steuerparameter auf die thermodynamischen Effekte der Multisparkzündung ermitteln sollen.

Untersuchungen von [3] zeigen, dass der Anteil der vom Zündsystem in das um-

gebende Gasgemisch übertragenen Energie stark vom Zustand des Funkens bzw. des Entladungskanals abhängt. In Verbrennungsmotoren ist es notwendig, die eingespeiste elektrische Energie konzentriert an einem Ort als thermische Energie einzuspeisen. Ein diffuses Abstrahlen in den gesamten Kolbeninnenraum ist nicht sinnvoll. Daher ist es wichtig, die Entladung der Spule derart zu steuern, dass sich der Bogen möglichst lange oder oft in einem Zustand mit hoher thermischer Effizienz befindet. Nach [3] sind dies insbesondere die Durchbruch- und die Bogenphase. Zusammen mit den allgemein bekannten Verlustmechanismen der elektrischen Bauteile lassen sich mit diesem Wissen diejenigen Betriebspunkte identifizieren, in denen bei minimalen elektrischen Verlusten die maximale thermische Leistung erzeugt wird. Vorabergebnisse zeigen, dass unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wärmeübertragungseffizienz, speziell für den Fall der Multisparkzündung, ein direkt proportional angenommenes Verhältnis zwischen der eingespeisten elektrischen Energie und der thermisch vom Gasgemisch aufgenommenen Energie nicht uneingeschränkt gültig ist. Das Ziel der laufenden Untersuchungen ist somit unter Anderem die Definition eines Schätzers, welcher die Vorhersage der durch eine Multisparkzündung in das Gemisch übertragenen thermischen Energie relativ zur dem Bordnetz entnommenen elektrischen Energie ermöglicht.

## Quellen

- [1] A. Küchler: *Hochspannungstechnik*, Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8
- [2] P. Weyand: *Bedarfsgerechte Mehrfachzündung für kritische Entflammungsbedingungen*, MTZ 07/08-2008
- [3] H. Albrecht, R. Maly, B. Saggau, E. Wagner: *Neue Erkenntnisse über elektrische Zündfunken und ihre Eignung zur Entflammung brennbarer Gemische (1. Teil)*, Automobil-Industrie 4/77, 1977

## Kontakt

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

Dipl.-Ing. Benjamin Preidecker  
benjamin.preidecker@rwth-aachen.de  
+49 241 80-94945

Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf  
roggendorf@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-93032

Dipl.-Ing. Sascha Schulte  
sascha.schulte@rwth-aachen.de  
+49 241 80-94945

## Investigations on new ignition systems for internal combustion engines

*Due to strict emission laws and regulations, rising fuel costs and a general increased environmental awareness of the customers, the automotive industry has intensified its efforts in developing economic powertrain technologies over the last years. Even though there have been some major breakthroughs in the field of alternative drive technologies, the internal combustion engine is not going to lose its importance within the next years. The measures taken to minimize the fuel consumption like turbocharging or stratified direct injection result in higher stresses on the ignition system. At the Institute for High Voltage Technology modern multispark ignition systems are tested with special focus on applicability, optimizations and limitations.*

### Introduction

All common gasoline engines, with the exception of modern HCCI engines, use spark ignition systems to inflame the fuel. Apart from the capacitor-discharge ignition system and the AC-spark ignition system used in selected applications, the transistor coil ignition system (TCI), which works comparable to a flyback converter, is the most commonly used system. Figure 1 shows a simplified equivalent circuit of the TCI.

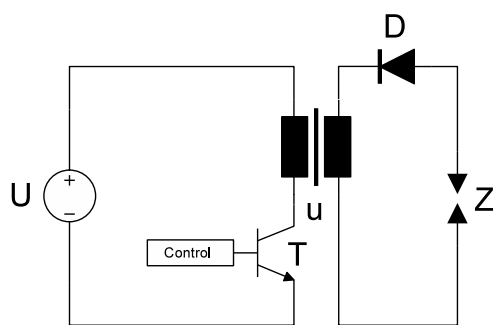


Fig. 1: Transistor coil ignition system

The primary transformer winding is connected to the vehicle's power supply  $U$  via a transistor  $T$ . Due to the triggering of the transistor, the coil is charged with short current pulses (less than 3 ms). When the transistor is turned off, a countervoltage is induced by the large  $dI/dt$ . The transformer transforms this countervoltage to the sec-

ondary winding, multiplying it by the factor  $u$ , reaching voltages up to several 10 kV. This high voltage causes a spark between the electrodes of the spark plug  $Z$ . Ongoing efforts in downsizing engines and engine components and to increase the charge compression have negative effects on the ignition system. An example is the need of higher voltages at reduced component sizes. At the same time higher ignition energies are required over longer periods for reliable ignitions in engines with very lean or even stratified mixes.

### Multispark ignition system

The multispark ignition system is one possibility to increase the ignition energy and duration with smaller coil dimension [2]. The burning arc is interrupted for a short time (several microseconds) in order to recharge the coil on the primary side. This technique allows smaller ignition coils while increasing the spark's energy. Figure 2 shows the current and voltage curves of a multispark ignition with four consecutive sparks.

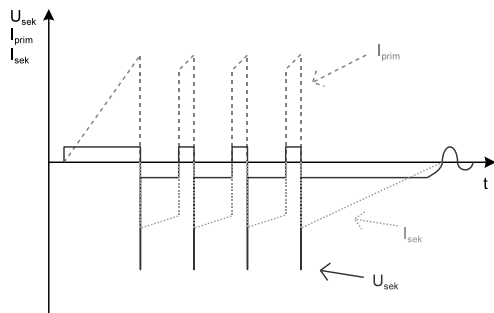


Fig. 2: Multispark ignition

Figure 3 shows a long term exposure of a multispark ignition with 16 consecutive sparks. The arcs were exposed to a laminar flow of nitrogen coming from the lower right corner of the image, causing a deflection. The first spark is identical to the right bright line, the 16th spark is identical to the broad line on the left.

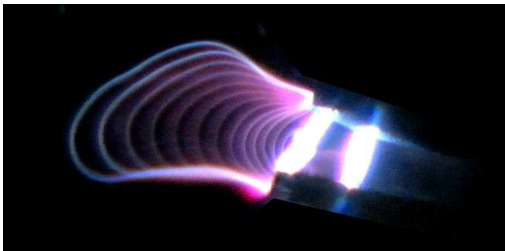


Fig. 3: Long term exposure of a multispark ignition

The research at the IFHT focuses on the effects of different electrical and aerodynamic parameters on the ignition voltage and the arc length. Examples for electrical parameters are the time span between two consecutive sparks or the arc duration of a spark. Aerodynamic parameters are the ambient pressure and the velocity of the gas flow.

### Analysis of the voltage stress

One consequence of the increased turbulences of the fuel mixture in modern gasoline engines is the strong deflection of the arcs (Fig. 3). This has a direct influence on the breakdown and arc voltage, two im-

portant factors of the energy efficiency and the erosion of the spark plug. The characteristics of the arc length are analyzed in several pressure chambers. Analyses show that the breakdown voltages of the consecutive sparks follow different laws than the primary spark. The voltage needed for the primary spark is specified by Paschen's law [1].

$$U_d = \frac{B \cdot pd}{\ln \frac{A \cdot pd}{\ln(1 + \gamma^{-1})}}$$

The constants  $A$  and  $B$  depend on the composition of the gas,  $p$  is the pressure,  $d$  is the arcing distance and  $\gamma$  is the secondary ionization coefficient. Within the operational range of gasoline engines, this law can be simplified to a linear correlation between the breakdown voltage and the product of pressure and arcing distance. In some cases a corrective factor might need to be added due to the inhomogeneity of the electric field between the spark plug's electrodes.

$$U_d \propto pd$$

Figure 4 shows the breakdown voltages of a multispark ignition with 16 consecutive sparks.

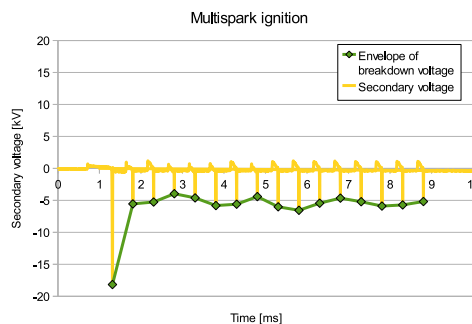


Fig. 4: Breakdown voltages of a multispark ignition

Evidently the breakdown voltages of the consecutive sparks, which do not perfectly follow Paschen's law, are signifi-

cantly lower than the voltage of the first breakdown.

Figure 5 shows the breakdown voltage curve of a single spark ignition with an arc exposed to a laminar gas flow.

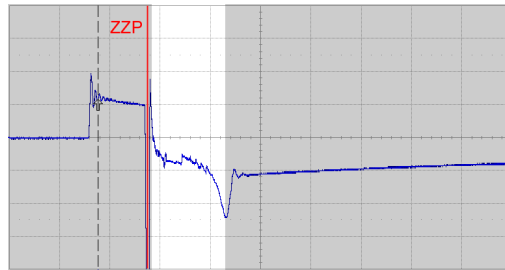


Fig. 5: Voltage curve, singlespark (1 kV/div; 0,2 ms/div)

The highlighted area shows an increasing arc voltage, directly after the arc ignition *ZZP*. A comparison of this arc voltage with high-speed videos confirms the linear correlation between arc length and arc voltage [1]. With this knowledge, measurements of the arc voltage can be utilized to estimate the arc deflection width. The law of induction describes the correlation between current and voltage at inductivities.

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

By integrating the law of induction, the current's dependency of the voltage over time can be determined. In combination with the knowledge of the arc voltage, the result is a decreasing current with increasing deflection and, consequently, a shorter arc time. For the examined geometries, the arc times range between 0,1 ms and 1,5 ms. The exact knowledge of the expected arc voltages, the current curves and the discharging time allow an optimization of the ignition control as well as an improved prediction of the spark plug's erosion.

## Outlook: Energy efficiency

The knowledge of the voltage and current characteristics of a spark ignition allows an electrical optimization of the components used. To optimize its usage as an igniter in combustion engines, it is necessary to analyze the thermodynamic properties in combination with these electrical characteristics.

To achieve these goals, the IFHT is conducting further studies using pressure chambers. The task of these studies is to understand the thermal impact of different control parameters of multispark ignitors on pressurised gas.

The analysis of [3] shows that the amount of energy transferred from the ignition system into the fuel mixture largely depends on the condition of the spark and the arc respectively. In combustion engines, it is necessary to feed the electrical energy into a concentrated spot as thermal energy. A diffuse radiation into the cylinder is not desirable. Consequently it is necessary to control the ignition system in a way to keep the arc in a state of high thermal efficiency as long and as often as possible. According to [3], these states are the breakdown and arcing phases. By measuring the pressure in pressure chambers, the thermal energy which was injected by a series of sparks, can be determined. In this analysis the focus lies on the control parameters of the multispark ignition system. Together with the commonly known losses of the electric components, operating points can be identified in which the maximum thermal energy is injected with minimal electric losses. For multispark ignition systems, ongoing experiments indicate that there is no linear proportional correlation between the injected electrical energy and the thermal energy absorbed by the gas. First results show that if the arc time and consequently the electrical energy is doubled, significantly less than twice the amount of thermal energy is injected into the gas. Thus one inten-

tion of these ongoing experiments is the approximation of the thermal energy supplied to the gas by different multispark ignitors in relation to the electrical energy taken from the onboard power supplies.

## References

- [1] A. Küchler: *Hochspannungstechnik*, Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8
- [2] P. Weyand: *Bedarfsgerechte Mehrfachzündung für kritische Entflammungsbedingungen*, MTZ 07/08-2008
- [3] H. Albrecht, R. Maly, B. Saggau, E. Wagner: *Neue Erkenntnisse über elektrische Zündfunken und ihre Eignung zur Entflammung brennbarer*

*Gemische (1. Teil)*, Automobil-Industrie 4/77, 1977

## Contact

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

Dipl.-Ing. Benjamin Preidecker  
benjamin.preidecker@rwth-aachen.de  
+49 241 80-94945

Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf  
roggendorf@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-93032

Dipl.-Ing. Sascha Schulte  
sascha.schulte@rwth-aachen.de  
+49 241 80-94945

# Einfluss von oberflächenbeschichteten Mikrohohlkugeln auf die elektrischen Eigenschaften von syntaktischem Schaum

*Syntaktischer Schaum ist ein Verbundmaterial aus einer Polymermatrix, welche mit Glasmikrohohlkugeln (MHK) gefüllt ist. Zwischen Hohlkugeln und Matrix kommt es im Inneren des Verbundmaterials zu Grenzflächen, deren Beschaffenheit sich auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Gesamtmaterials auswirken kann. Durch eine Oberflächenbeschichtung der Mikrohohlkugeln kann eine Verbesserung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Schaums erzielt werden. Die für die Anwendung von derart modifiziertem syntaktischen Schaum erforderliche Kenntnis der elektrischen Eigenschaften, hierzu zählen die Durchschlagfestigkeit bei Wechsel-, Gleich- und Stoßspannung sowie die Leitfähigkeit, die Permittivität und der Verlustfaktor, wird im Rahmen dieser Untersuchungen spezifiziert.*

## Einleitung

Zur Isolation von hochspannungstechnischen Geräten können sowohl feste, flüssige als auch gasförmige Isolationsmaterialien verwendet werden. Heutzutage werden vermehrt Polymere eingesetzt. Im Vergleich zu den flüssigen und gasförmigen Materialien können sie auch mechanisch stützende Aufgaben übernehmen. Ein Nachteil ist jedoch die vergleichsweise hohe Dichte der Polymere, so dass sie ein hohes Gewicht aufweisen. Syntaktischer Schaum, welcher aus Epoxidharz und Glasmikrohohlkugeln besteht, verbindet die Vorteile von festen und gasförmigen Materialien. Er weist ähnlich gute elektrische und mechanische Eigenschaften wie Epoxidharz auf, ist jedoch wesentlich leichter. Aus diesem Grund bietet er eine Alternative zu herkömmlichen Epoxidharzen und kann vor allem dort eingesetzt werden, wo eine leichte und kompakte Bauweise gefordert ist. Der Name *syntaktischer Schaum* resultiert aus der mikroskopischen Schaumstruktur, welche durch das Einbringen der Mikrohohlkugeln in eine Polymermatrix entsteht. Abb. 1 zeigt eine Schnittfläche des Materials.

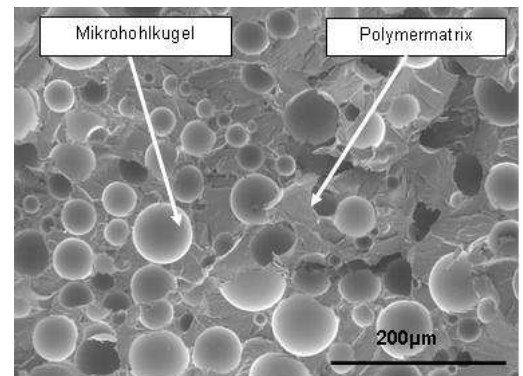


Abb. 1: Struktur von syntaktischem Schaum

In gefüllten Polymeren kommt es zwischen Füllstoff und Polymer zu inneren Grenzflächen. Es ist bekannt, dass sich die Beschaffenheit dieser Grenzflächen direkt auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften auswirken können. Bei syntaktischem Schaum kommt es durch den Verbund von Mikrohohlkugeln und Epoxidharz ebenfalls zu solchen Grenzflächen. Ziel der in diesem Jahr durchgeführten Untersuchungen ist daher die Bestimmung des Einflusses von verschiedenen Oberflächenbeschichtungen der Mikrohohlkugeln auf die elektrischen Eigenschaften syntaktischer Schäume. Es soll untersucht werden, ob sich die verschiedenen Beschichtungen positiv oder



negativ auf die elektrischen Eigenschaften auswirken. Mittels der gewonnenen Ergebnisse kann eine gezielte elektrische Optimierung des Materials ermöglicht werden.

### Versuchsmethodik

Zur Charakterisierung des elektrischen Kurzzeitverhaltens von Isolierstoffen werden üblicherweise die Durchschlagspannung bei Wechsel- und Gleichspannung sowie die Leitfähigkeit, die Permittivität und der Verlustfaktor des Materials angegeben. Bisherige Untersuchungen zum Verhalten von syntaktischem Schaum mit unbehandeltem MHK haben gezeigt, dass dieses neue Verbundmaterial vielversprechende elektrischen Eigenschaften aufweist. Im Rahmen der in diesem Jahr durchgeführten Forschungsarbeiten sollte untersucht werden, ob die elektrischen Eigenschaften durch geeignete Oberflächenbeschichtung der MHK noch verbessert werden können. Es werden drei verschiedene Oberflächenmodifikationen sowie unbehandelte MHK als Referenzmaterial verwendet:

- **„Material Ref“**  
Unbehandelte MHK, welche als Referenzproben verwendet werden
- **„Material A“**  
Silanisierte MHK zur besseren Anbindung zwischen MHK und Harzmatrix
- **„Material B“**  
Elastomerbeschichtete MHK zur flexiblen Anbindung zwischen MHK und Harzmatrix
- **„Material C“**  
Speziell beschichtete MHK zur Viskositätsverringerung der Gießmasse bei der Herstellung des Materials

Zur Herstellung des syntaktischen Schaums werden die verschiedenen Glasmikrohohlkugeln, welche alle einen mittleren Durchmesser von  $40\ \mu\text{m}$  aufweisen, dem noch

flüssigen Harz-Härter Gemisch beige-mischt. Der Anteil der Mikrohohlkugeln am Gesamtmaterial beträgt 55 Vol.-%.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Die Messungen des Verlustfaktors und der relativen Permittivität werden bei einer Frequenz von 50 Hz und einer Umgebungstemperatur von  $20^\circ\text{C}$  durchgeführt. Der Messaufbau erfolgt nach DIN VDE 0303-4. Die angelegte Wechselspannung beträgt 500 V. Die Leitfähigkeitsmessungen werden nach DIN VDE 0303-30 bei einer Gleichspannung von 500V durchgeführt. Da von Untersuchungen an unbehandeltem Schaum bekannt ist, dass die Leitfähigkeit stark von der Temperatur abhängt, und üblicherweise Isolierstoffe in Hochspannungskomponenten im Betriebszustand eine höhere Temperatur aufweisen, werden die Messungen sowohl bei  $20^\circ\text{C}$  als auch bei einer erhöhten Temperatur von  $60^\circ\text{C}$  und  $90^\circ\text{C}$  durchgeführt. Für die Durchschlaguntersuchungen bei Gleich- und Wechselspannung werden Stufentest durchgeführt. Dabei kommen Materialproben mit eingebetteten Kugelelektroden mit 3 mm Elektrodenabstand zum Einsatz. Die Stufenhöhe beträgt bei den Gleichspannungsversuchen 5 kV und bei den Wechselspannungsversuchen 10 kV. Startspannung ist jeweils 30 kV. Die Spannung wird solange erhöht, bis es bei den Proben zu einem Durchschlag kommt. Für die Stoßspannungsuntersuchungen wird eine  $1,2/50\ \mu$  Impulsform (Blitzstoßspannung nach DIN Norm) gewählt. Die Startspannung beträgt hier 75 kV. Die Spannung wird nach drei Impulsen um 9 kV erhöht. Dies wird solange wiederholt, bis es bei der Materialprobe zu einem Durchschlag kommt.

### Ergebnisse der Untersuchungen

Die Ergebnisse der Messungen des Verlustfaktors und der Permittivität werden in Tabelle 1 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen

keinen wesentlichen Einfluss der Beschichtungsart auf die dielektrischen Kennwerte des syntaktischen Schaums.

	Verlustfaktor	Permittivität
Ref	6,30e-3	2,60
A	6,73e-3	2,55
B	5,53e-3	2,65
C	10,5e-3	2,58

Tabelle 1: Dielektrische Kennwerte

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen bei 20°C, 60°C und 90°C. Es ist zu erkennen, dass bei allen Materialien der spezifische Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt. Dies ist gleichbedeutend mit einer steigenden Leitfähigkeit. Ein wesentlicher Einfluss der Beschichtung auf den spezifischen Widerstand bzw. die Leitfähigkeit ist hier allerdings ebenfalls nicht erkennbar.

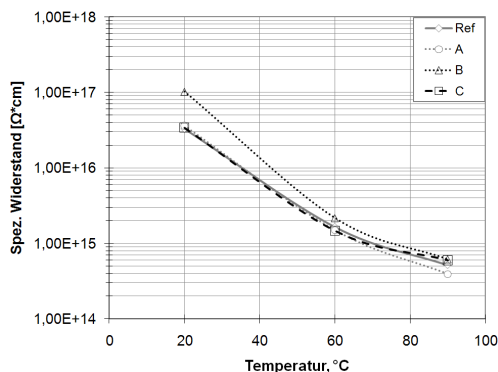


Abb. 2: Spezifischer Widerstand

Die Abb. 3 und 4 zeigen die Ergebnisse der Wechsel- und Gleichspannungsuntersuchungen. Die Diagramme zeigen die mittlere Durchschlagfeldstärke mit 95% Vertrauensbereich. Es ist zu erkennen, dass alle Materialproben sowohl für Wechsel- als auch für Gleichspannung eine ähnliche Durchschlagfeldstärke aufweisen. Material B zeigt tendenziell eine höhere Feldstärke, jedoch sind aufgrund der sich überlappenden Vertrauensbereich keine statistisch abgesicherten Aussagen möglich.

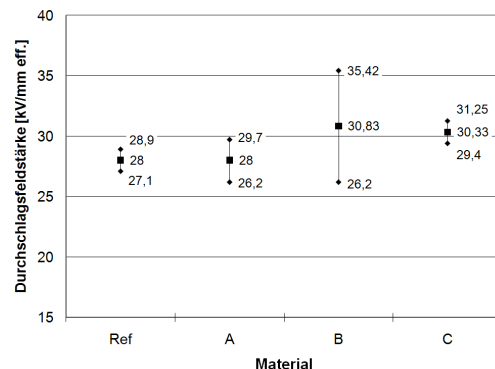


Abb. 3: Wechselfeldstärke

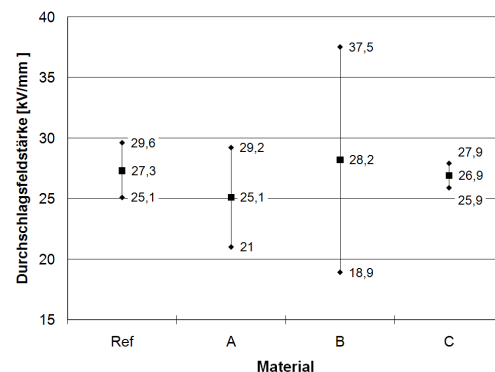


Abb. 4: Gleichspannungsfeldstärke

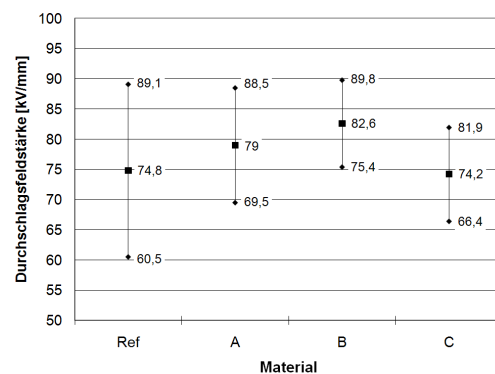


Abb. 5: Stoßspannungsfeldstärke

Abb. 5 zeigt die Ergebnisse der Stoßspannungsversuche. Auch hier gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Durchschlagspannung. Material B weist wieder tendenziell eine höhere Durchschlagfeldstärke auf, jedoch sind wie im Fall der Wechsel- und Gleichspannung aufgrund der

sich überlappenden Vertrauensbereich keine statistisch abgesicherten Aussagen möglich.

### Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche bei Wechsel-, Gleich- und Blitzstoßspannung zeigen, dass die Proben mit den verwendeten Beschichtungen im Vergleich zum Referenzmaterial keinen signifikanten Unterschied in der Durchschlagfeldstärke aufweisen. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, denn in bereits früher durchgeführten Untersuchungen [1] wurde mittels einer ausgewählten Silanbeschichtung gezeigt, dass es im Kurzzeitbereich zu einer 25% höheren Durchschlagspannung bei Wechselspannung und einer 15% höheren Durchschlagspannung bei Gleichspannung kommt im Vergleich zu unbehandelten MHK. Diese unterschiedlichen Ergebnissen lassen darauf schließen, dass ggf. die Qualität und die Zusammensetzung der Beschichtung bei der Durchschlagspannung ebenfalls eine Rolle spielen. Bei der Untersuchung der Leitfähigkeit, des Verlustfaktors und der Permittivität können ebenfalls keine Unterschiede bei den einzelnen Beschichtungen im Vergleich zum Referenzmaterial festgestellt werden.

### Zusammenfassung und Ausblick für 2010

Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene elektrische Untersuchungen an syntaktischem Schaum mit modifizierten Mikrohohlkugeln durchgeführt. Mittels der erzielten Erkenntnisse sollten Aussagen dazu getroffen werden, ob sich die verschiedenen Oberflächenbeschichtungen positiv auf die elektrischen Eigenschaften auswirken und somit eine elektrische Optimierung des Materials möglich ist. Die Ergebnisse der Kurzzeituntersuchungen haben gezeigt, dass es je nach Art der Beschichtung kei-

nen signifikanten Einfluss auf das elektrische Verhalten von syntaktischem Schaum gibt. Soll also eine Beschichtung der Mikrohohlkugeln verwendet werden, ist eine mögliche elektrische Optimierung des Gesamtmaterials stets für jede einzelne Beschichtung zu überprüfen. Die im Rahmen diesen Jahres untersuchten Beschichtungen konnten keine Verbesserung der elektrischen Eigenschaften hervorrufen. Bisher unklar ist jedoch, ob diese Beschichtungen einen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Materials haben. Hierzu sollen in 2010 weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Geplant sind Langzeituntersuchungen zum Durchschlagprozess bei Wechsel- und Gleichspannungsbelastung. Es ist denkbar, dass die Beschichtung in diesem Fall einen Einfluss auf die Lebensdauer der Materials aufweist. Desweiteren sollen Untersuchungen zur Freilufttauglichkeit des Materials durchgeführt werden. Erste Voruntersuchungen in 2009 haben gezeigt, dass eine Beschichtung der MHK die Lebensdauer unter Freiluftbedingungen potentiell verlängert. Eine Ausweitung dieser Untersuchungen auf verschiedene Beschichtungen soll durchgeführt werden.

### Quellen

- [1] A. Strauchs et al.: *Mechanische Untersuchungen zum Vergleich der Haftung an inneren Grenzflächen in syntaktischem Schaum*

### Kontakt

Dipl.-Ing. Anja Strauchs  
strauchs@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94920

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

# Impact of surface coated hollow microspheres on the dielectric properties of syntactic foam

*Syntactic foam is a composite material consisting of a polymer matrix filled with hollow microspheres (HMS) of glass. It is well-known that the inner interphases between filler and matrix influence the electrical and mechanical properties of the composite material. The electrical as well as the mechanical properties can be improved by microspheres with a special surface coating. For design criterias of syntactic foam with modified microspheres, the knowledge of the impact of these modifications on the electrical properties is inevitable. Therefore, the aim of this investigation is the specification of the electrical breakdown strength at ac, dc and impulse stress as well as the permittivity, the loss factor and the conductivity of modified syntactic foam.*

## Introduction

For the insulation of high voltage components solid, liquid as well as gaseous materials can be used. Nowadays, polymers are increasingly used. Compared to liquid or gaseous materials, polymers can, in addition to their electrical properties, also support mechanical loads. The main disadvantage of polymers is their high weight, as a result of their high density. Syntactic foam, which is a composite material of epoxy resin and hollow glass microspheres, combines the advantages of solid and gaseous insulation materials. The electrical and mechanical properties of syntactic foam are similar to those of pure epoxy resin, but its weight is much lower due to the hollow microspheres. Therefore, syntactic foam is an advantageous alternative to pure epoxy resin and can be applied as insulation material, when a light and compact design of high voltage components is required. The name *syntactic foam* results of the microscopic structure of the material, which is generated by the casting of HMS into the polymer matrix and strongly resembles a foam structure. Fig. 1 shows a cutting area of the material.

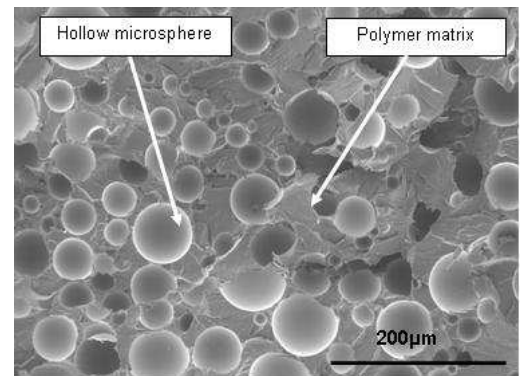


Abb. 1: Inner structure of syntactic foam

If polymers are filled with microparticles, inner interphases occur within the material between polymer and filler material. It is well-known that the quality of these inner interphases influence the electrical as well as the mechanical properties of the composite material. A similar behaviour of syntactic foam with modified interphases is expected. Therefore, the aim of this investigation is the determination of the impact of surface modified microspheres on the electrical properties of syntactic foam. It has to be investigated, if the different modifications have a positive or negative effect on the electrical properties. The achieved results can help to improve the electrical performance of the material.

## Measurement approach

Generally, the electrical breakdown strength at ac and dc voltage stress as well as the permittivity, the loss factor and the conductivity are determined to characterise the electrical behavior of insulation materials. Previous investigations on the behaviour of syntactic foam with untreated hollow microspheres have shown good electrical properties of this new composite material. The studies done this year focus on the question, if the electrical properties of syntactic foam can be improved by the use of different surface coated hollow microspheres. Three different surface modifications of the hollow microspheres as well as untreated hollow microspheres are used for the syntactic foam:

- **„Material Ref“**  
Untreated HMS are used as reference
- **„Material A“**  
Silane coated HMS for a higher adhesion between hollow microspheres and epoxy resin
- **„Material B“**  
Elastomer coated HMS for a flexible bonding between hollow microspheres and epoxy resin
- **„Material C“**  
HMS with a special coating to decrease the viscosity of the liquid composite material in order to reach an easier manufacturing process

For the experimental investigations specimens of syntactic foam with different surface modified hollow microspheres are manufactured. The hollow microspheres, which have all a mean diameter of  $40\ \mu\text{m}$ , are mixed to the liquid epoxy resin before the material is heated for curing process. The filling degree of the hollow microspheres is 55 Vol.-%.

## Measurement setup

The measurements of the loss factor and the permittivity are carried out at a frequency of 50 Hz and a room temperature of  $20^\circ\text{C}$ . The measurement setup is given by DIN VDE 0303-4. The applied ac voltage is 500 V. The measurements of the conductivity are carried out with a dc voltage of 500 V. The corresponding standard for the measurement setup is described in DIN VDE 0303-30. Generally, insulation materials, which are applied in high voltage equipment, have a service temperature higher than  $20^\circ\text{C}$ . Previous investigations on syntactic foam have shown a strong dependency of the conductivity on the temperature. Therefore, the measurements of the conductivity are carried out at  $20^\circ\text{C}$  as well as at higher temperatures of  $60^\circ\text{C}$  and  $90^\circ\text{C}$ . The electrical breakdown strength under ac and dc stress of the materials is determined in a voltage step test. For this test material specimens with casted electrodes are used. The distance between the electrodes is 3 mm. Under ac stress each step is 5 kV, whereas under dc stress each step is 10 kV. Both tests start at a voltage of 30 kV. The high voltage is increased until breakdown of the material happens. To investigate the breakdown strength at lightning impulse voltage stress with  $1,2/50\ \mu$  shape, a test setup according to DIN Norm is used. The electrical breakdown strength is determined in a voltage step test. Each step counts three voltage impulses before the voltage is increased by 9 kV. The step test is carried out until a breakdown event is recorded.

## Measurement results

The measurement results for the permittivity and the loss factor are shown in Table 1. The determined values of the dielectric properties show no dependency to coating variation.

	Loss Factor	Permittivity
Ref	6,30e-3	2,60
A	6,73e-3	2,55
B	5,53e-3	2,65
C	10,5e-3	2,58

Table 1: Dielectric properties

Fig. 2 shows the determined resistivity values for 20°C, 60°C and 90°C. A strong dependency from the applied temperature can be ascertained. The resistivity decreases with increasing temperature. This is equivalent with an increasing conductivity. However, the resistivity or conductivity values for different coatings are similar.

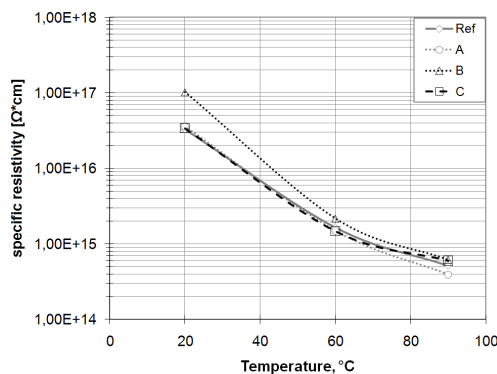


Abb. 2: Specific resistance

The breakdown field strengths under ac and dc stresses as mean value and the 95% confidence interval are given in Fig. 3 and 4. The breakdown field strengths under ac and dc stress are similar for the materials investigated here. Material B features a higher mean value of the breakdown field strength. However, due to its wide confidence band statistical verified statements are not feasible.

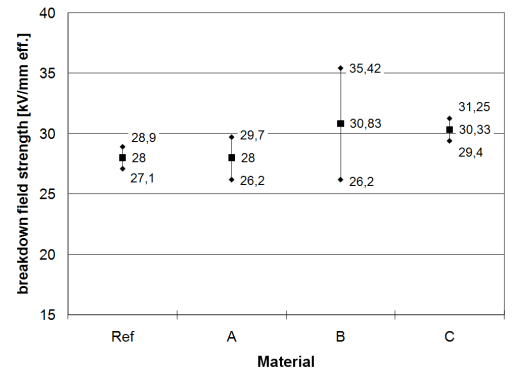


Abb. 3: ac

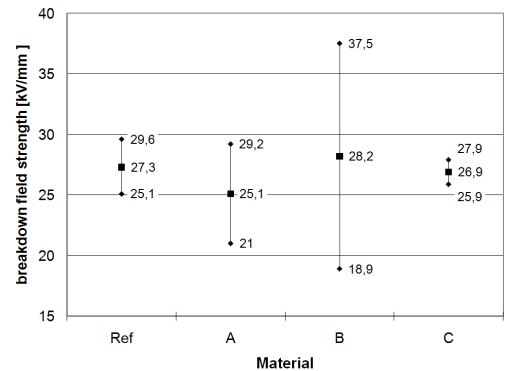


Abb. 4: dc

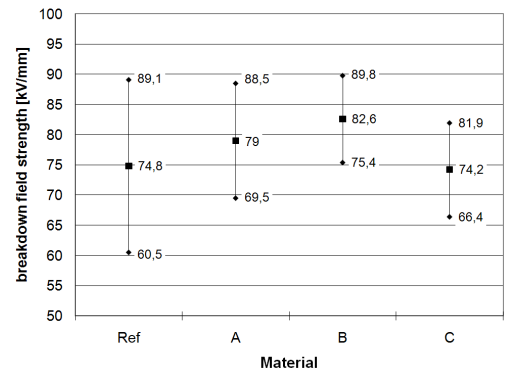


Abb. 5: impulse voltage

The breakdown strength at lightning impulse voltage stress is given in fig. 5. Similar to the breakdown strength at ac and dc, the values scatter in a wide range. Nevertheless, material B tends to feature a higher breakdown strength.

### Discussion of results

The results of the breakdown investigations carried out under ac, dc and lightning impulse voltage stress show similar breakdown strengths for modified and reference syntactic foam. This gained knowledge is essential for the evaluation of surface coated hollow microspheres. Previous investigations [1] showed an increase of breakdown strengths by 25% for syntactic foam with silane coated microspheres under similar short term ac stress, compared to untreated material. For dc stress the breakdown strength of syntactic foam with silane coated hollow microspheres was increased by 15%. The difference between ongoing and previous investigations indicates that the quality and the composition of the treatment could play a major role for the breakdown properties of the entire syntactic foam. Unlike breakdown characteristics, the permittivity, the loss factor and the conductivity of syntactic foam in previous investigations remained the same by using microsphere coatings. This effect can also be observed in the ongoing results.

### Summary and Outlook 2010

In the investigations carried out in the present study, the electrical properties of syntactic foam with modified hollow microspheres were determined. Based on the investigation results the impact of different surface coatings had to be studied to achieve better electrical properties and further optimisation of syntactic foam. The results of the short term tests showed that, depending on coating, modification of hollow microspheres have no significant impact on the properties of syntactic foam. Hence, if

a specific coating should be applied to syntactic foam, its impact has to be explicitly proved. Surface coatings of hollow microspheres investigated here yield to no significant improvement of syntactic foam in short term tests. Until now, no knowledge of modified syntactic foam behavior under long term stress is gained. This behavior will be analyzed in further studies. Long-term tests under ac and dc stress are planned to be started in 2010. Especially at long term stress further improvements of syntactic foam by using of surface coated microspheres are expected. Furthermore, electrical properties of syntactic foam under outdoor conditions have to be investigated in 2010. First investigations, carried out 2009, showed a better sustainability of modified syntactic foam under outdoor stress. A continuation of this investigation under consideration of further coatings is planned for further studies.

### References

- [1] A. Strauchs et al.: *Mechanische Untersuchungen zum Vergleich der Haftung an inneren Grenzflächen in syntaktischem Schaum*

### Contact

Dipl.-Ing. Anja Strauchs  
strauchs@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94920

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

# Untersuchung der Alterungsmechanismen polymerer Isolierstoffe unter klimatischer Belastung

Polymere Isolierstoffe sind neben dem elektrischen Betrieb in vielen Anwendungen während ihrer Lebensdauern unterschiedlichsten klimatischen Belastungen ausgesetzt. Durch Variation der Parameter Temperatur, Feuchtigkeit und Druck wird der Einfluss dieser Faktoren auf die Alterung polymerer Isolierstoffe untersucht. Neben der Referenzlagerung in einer Klimakammer werden die Isolierstoffe weiter in einem Dampfdruckkessel (dem sog. „Pressure Cooker“) unter extremen Bedingungen gealtert. Durch die Erhöhung der relevanten Parameter ist eine drastische Beschleunigung der Alterung möglich. Im Anschluss wird an gealterten Proben der Einfluss der klimatischen Belastung auf den spezifischen Durchgangswiderstand des Isolierstoffes untersucht.

## Einleitung

Eine negative Eigenschaft der meisten Polymere ist die Reaktion mit Wasser unter erhöhten Temperaturen. Dieser Effekt wird Hydrolyse genannt und beschreibt eine Aufspaltung der Hauptkette, wodurch das Material nachhaltig geschädigt wird [1]. Durch die Spaltung der hydrolysierbaren Gruppen des Kunststoffes kommt es zu einem Molmassenabbau und dadurch zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften. Die durch die Hydrolyse gebildeten Säure- bzw. Basengruppen beschleunigen den Abbau durch ihre autokatalytische Wirkung weiter.

Sorption und Diffusion spielen für den Schädigungsverlauf eine wichtige Rolle. Daher ist die physikalische Struktur für diesen Schädigungsmechanismus von großer Bedeutung. Dieser Zusammenhang veranschaulicht sich daran, dass die Hydrolyse an unbelasteten Bauteilen verhältnismäßig langsam abläuft. An belasteten Strukturen, z. B. in einem Riss, kann allerdings eine deutlich beschleunigte Hydrolyse beobachtet werden [2].

In Abb. 1 werden beispielsweise die Hydrolyseprodukte eines Polyamids beschrieben. Durch das Aufbrechen der C-N - Bindung entstehen ein 1,4-Diaminobutan und

eine Adipinsäure.

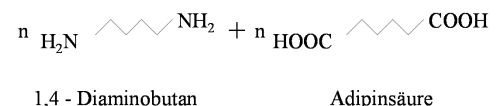


Abb. 1: Hydrolyseprodukte eines Polyamids

Als Folge der Hydrolyse ergeben sich Verschlechterungen, sowohl der mechanischen und chemischen, als auch der elektrischen Eigenschaften des Kunststoffes.

Eine Erhöhung der Temperatur führt neben einer direkten physikalischen Auswirkung auch generell zu einer Beschleunigung der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse. Somit erfolgt auch eine Beschleunigung der Hydrolyse. Nach Arrhenius steigt die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante  $k$  exponentiell mit der Temperatur  $T$  an:

$$k = \alpha \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}}$$

mit der Aktivierungsenergie  $E$ , der allgemeinen Gaskonstante  $R$  und dem präexponentiellen Faktor  $\alpha$ .

Für den einfachsten Fall einer monomolekularen Reaktion gilt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit proportional der gerade vorhandenen Konzentration  $c_A$  des Stoffes  $A$  ist:



$$-\frac{d}{dt}c_A = k \cdot c_A$$

Wird der Konzentration  $c_A$  eine bestimmte Eigenschaft  $P$  zugeordnet, ergibt sich nach Verknüpfung und Integration der vorangegangenen Gleichung für die Zeit der Eigenschaftsänderung vom Ausgangszustand  $P_0$ :

$$t = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{f(P_0)}{f(P)} \right] \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}}$$

Es ist zu entnehmen, dass die Ablaufzeit  $t$  einer Eigenschaftsänderung zu höheren Temperaturen exponentiell abnimmt. Somit erfolgt eine überproportionale Beschleunigung der Alterung durch Hydrolyse in Folge einer Temperaturerhöhung.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Plattenproben aus glasfaserverstärkten Polyamid werden zunächst in der Klimakammer (KK) bzw. im Pressure Cooker (PC) unter den folgenden Bedingungen gealtert:

- Temperatur 85°C
- Relative Luftfeuchtigkeit 85 %
- Absoluter Luftdruck 1 bar

Pressure Cooker:

- Temperatur 120°C;
- Relative Luftfeuchtigkeit 100 %
- Absoluter Luftdruck 2 bar

Abb. 2 zeigt den Aufbau des Pressure Cookers, welcher sich auf einer Heizplatte befindet. Die Durchführung  $D_1$  enthält die Kontaktierung für zwei Thermoelemente  $T_{1;2}$  und einen Feuchtesensor  $C_\rho$ , welcher im Kessel unterhalb von  $D_1$  angebracht wird. Die doppelte Ausführung an Thermoelementen dient der Überwachung einer homogenen Temperaturverteilung im Kessel. Die Durchführung  $D_2$  enthält einen temperaturbeständigen Druckluftschlauch, der außerhalb des Kessels einen Drucksensor

kontaktiert. Auf dem Boden des Kessels befindet sich ein Gitterrost, auf dem die Proben abgelegt werden um einen direkten Kontakt mit dem Wasser zu vermeiden.

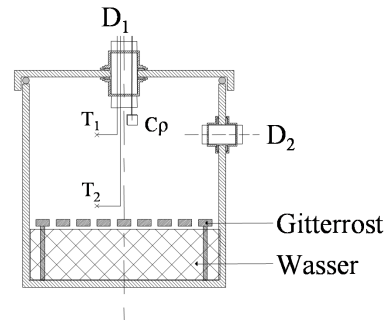


Abb. 2: Schematische Darstellung des Pressure Cookers

Mittels einer *LabView* Routine wird der Pressure Cooker nach der Temperatur geregelt. Der Druck- und der Feuchtesensor dienen lediglich als Sicherheitselement und schalten den Versuch im Falle von Wassermangel in Folge eines Dichtungsfehlers ab. Mit dem dargestellten Versuchsaufbau wird eine Temperaturwelligkeit kleiner 0,5 % erzielt.

Aufgrund des Überdruckes im Pressure Cooker, der zur Erhöhung der Temperatur unvermeidbar ist, ist mit einer verstärkten Diffusion des Wassers in das Material zu rechnen. Um diesen Effekt ausschließen zu können und nur den Einfluss der Hydrolyse auf den spezifischen Widerstand zu ermitteln, wird zunächst die Wasseraufnahme des Materials für beide Lagerarten bestimmt.

Zur Bewertung der Alterung der Plattenproben aus Polyamid wird im Anschluss an die Alterung in der Klimakammer bzw. im Pressure Cooker der spezifische Durchgangswiderstand nach VDE 0303 - 30 [3] ermittelt. Die Plattendicke beträgt hierbei 2 mm und die Gleichspannung 500 V. Aufgrund der gemessenen Wassereinlagerung werden die Platten zuvor bei 80°C für 24 h in einem Vakuumofen getrocknet.

## Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3 zeigt die Wasseraufnahme der Plattenproben aus der Klimakammer und dem Pressure Cooker über der Belastungsdauer.

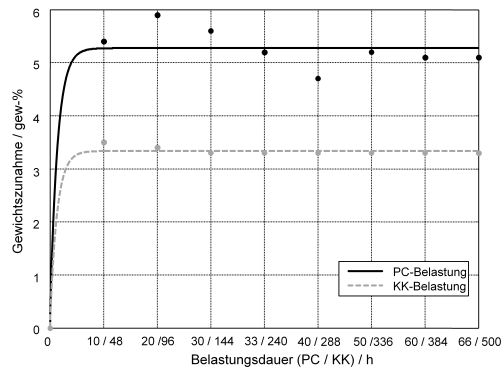


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Gewichtszunahme durch Wassereinlagerung

Es zeigt sich, dass im Pressure Cooker bereits nach weniger als zehn Stunden die maximale Wassereinlagerung erreicht wird und somit wesentlich schneller verläuft als in der Klimakammer. Weiter wird durch den hohen Druck im Pressure Cooker über 50 % mehr Wasser eingelagert als in der Klimakammer.

Die Entwicklung des spezifischen Durchgangswiderstandes für verschiedene Alterungsstufen der beiden Lagerarten ist in Abb. 4 dargestellt.

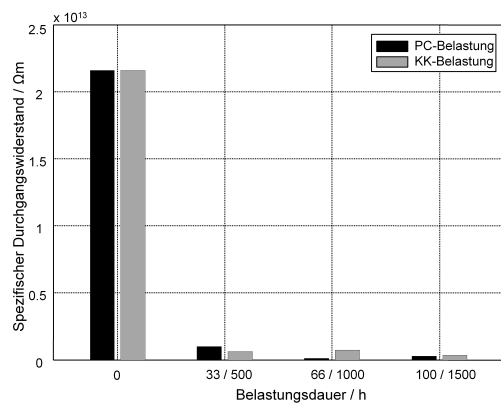


Abb. 4: Spezifischer Durchgangswiderstand in Abhängigkeit der Belastungsdauer

Bereits nach 33 Stunden im Pressure Cooker ist genauso wie nach 500h in der

Klimakammer ein Abfall des spezifischen Durchgangswiderstandes um eine Größenordnung zu vernehmen. Ähnlich wie bei der Wassereinlagerung ist auch für diesen Parameter die Alterung des Materials bereits nahezu abgeschlossen.

Es ist festzuhalten, dass die Alterung im Pressure Cooker auf Grund der Erhöhung der relevanten Parameter drastisch beschleunigt wird. Trotz der erhöhten Wassereinlagerung ist aber darüber hinaus keine stärkere Absenkung des Durchgangswiderstandes als in der Klimakammerlagerung zu verzeichnen.

## Quellen

- [1] P. Elsner, P. Eyerer, T.Hirth: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*, Springer Verlag, 2007, ISBN: 3540724001
- [2] GW. Ehrenstein, S. Pongratz: *Die Beständigkeit von Kunststoffen*, Hanser Verlag, 2007, ISBN: 3446218513
- [3] VDE 0303 Teil 30, *Prüfverfahren für Elektroisierstoffe - Spezifischer Durchgangswiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, elektrisch isolierenden Werkstoffen*, (IEC 60093:1980); Deutsche Fassung DIN IEC 60093

## Kontakt

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

Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf  
 roggendorf@ifht.rwth-aachen.de  
 +49 241 80-93032

# Investigation of the Ageing Mechanisms of Polymers exposed to Climatic Stress

*In addition to electrical stress, insulating polymers are exposed to several types of climatic stress during their lifetime. Varying parameters such as temperature, humidity and pressure have a significant influence on the ageing behavior of polymers. These parameters are subject of current investigations. Storage of samples in a climatic chamber is used as reference ageing process. A new strong accelerating ageing process consists of storage of test samples in a steam boiler under extreme conditions (so called "pressure cooker"). Intensifying relevant parameters leads to a drastic acceleration of ageing. These ageing methods are compared with regard to the specific resistivity of the test samples.*

## Introduction

Many polymers show the negative characteristic to react under presence of water and high temperature. This effect is called hydrolysis. It describes the splitting of the basis chains leading to a change in behavior of this material [1]. Due to splitting of the hydrolysable groups, a degradation of the molar mass of the polymer takes place leading to a deterioration of performance. Acids and bases build up by the hydrolysis process additionally accelerate the autocatalytic effect. Sorption und diffusion plays an important role for the degradation process. Hence, the physical structure of the polymer is important. In this context, the hydrolysis for unstressed components proceeds slowly. For stressed structures such as cracks, a strong acceleration of hydrolysis can be found [2].

Fig. 1 shows the hydrolysis products of polyamide. 1,4-diamine butane and an adipic acid result from the breaking of the C-N-bond.

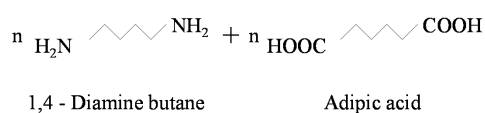


Fig. 1: Hydrolysis products of polyamide

Chemical, mechanical and electrical properties of the polymer deteriorate due to hy-

drolisis.

Alongside a direct physical impact on the material properties, a raise of temperature also leads to an accelerated chemical reaction rate. Hence, the hydrolysis is also accelerated by high temperature. According to Arrhenius' equation, the constant of reaction  $k$  rises exponentially with temperature  $T$ :

$$k = \alpha \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}}$$

with activation energy  $E$ , ideal gas constant  $R$  and pre-exponential factor  $\alpha$ .

In the simplest case of a monomolecular reaction, the reaction rate is proportional to the concentration  $c_A$  of material A:

$$-\frac{d}{dt}c_A = k \cdot c_A$$

It is possible to assign a certain property  $P$  to the concentration  $c_A$ . After assignment and integration of the anteceded equation, the time  $t$  for the change of property from the initial state  $P_0$  can be defined as:

$$t = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{f(P_0)}{f(P)} \right] \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}}$$

It can be found that  $t$  decreases exponentially with higher temperature. Hence, a disproportionately high acceleration of ageing takes place as a result of hydrolysis at high temperature.

### Test Setup

Plate shaped samples of fiber-glass reinforced polyamide are situated in a climatic chamber (CC) and pressure cooker (PC) respectively, under following conditions:

Climatic chamber:

- Temperature 85°C
- Relative humidity 85 %
- Absolute pressure 1 bar

Pressure cooker:

- Temperature 120°C;
- Relative humidity 100 %
- Absolute pressure 2 bar

Fig. 2 shows the pressure cooker setup with heating plate. The bushing  $D_1$  contains two thermocouple elements  $T_{1;2}$  and the humidity sensor  $C_p$ , situated in the boiler below  $D_1$ . The use of two thermocouple elements ensures a homogeneous temperature distribution. The bushing  $D_2$  contains a temperature resistant compressed-air hose contacting a pressure sensor outside the boiler. The samples are placed upon a grid at the boiler's bottom to prevent a direct contact of the samples with water.

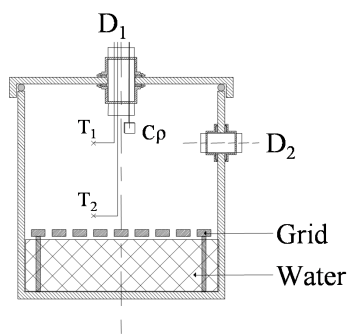


Fig. 2: Schematic design of the pressure cooker

The temperature in the pressure cooker is regulated using a *LabView* routine. The pressure and humidity sensors act as security elements. The test is interrupted should a boiler leakage lead to a lack of water. The presented test setup is able to perform with

a temperature ripple of less than 0.5 %.

Due to the overpressure to reach a higher temperature, a higher diffusion rate of water into the polymer has to be expected. To take this effect into account for the determination of the influence of hydrolysis on the specific resistivity, the water absorption of the samples is investigated depending on the type of storage.

For the evaluation of the ageing state of the polyamide, the specific resistivity is determined for plate shaped samples according IEC 93 [3] standard after storage in CC or PC. The thickness of the plates is 2 mm and DC voltage is set to 500 V. Due to the determined ability of water absorption of the polymers, the samples are dried in a vacuum furnace at 80°C for 24 h before testing.

### Results and Discussion

Fig. 3 shows water absorption of the samples over time of climatic chamber and pressure cooker storage.

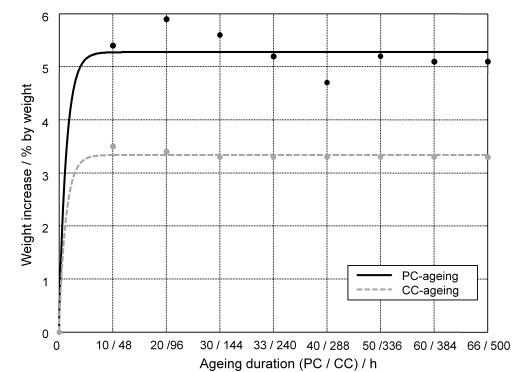


Fig. 3: Chronological sequence of weight increase due to water absorption

It is shown, that the samples reach their maximum water absorption within 10 h in the pressure cooker and therefore much faster than for the climatic chamber. Due to the high pressure inside the pressure cooker, a 50 % higher water absorption can be found in relation to the climatic chamber storage.

The development of the specific resistivity depending on the ageing duration is pre-

sented in Fig. 4 for the two considered test methods.

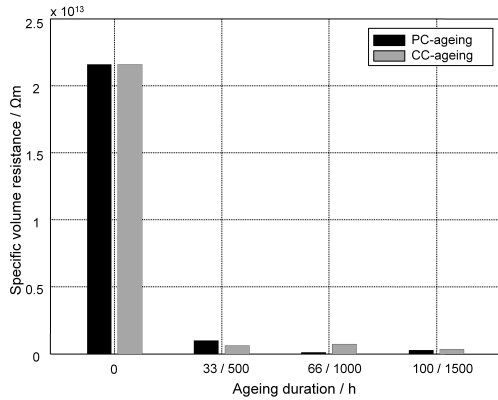


Fig. 4: Comparison of the specific resistivity

A strong decrease of the specific resistivity can be seen both after 33 h pressure cooker storage and 500 h climatic chamber storage. Similar to the water absorption, the ageing process of this parameter is already completed after a short time.

Finally, it can be found, that the ageing process inside a pressure cooker is accelerated drastically due to the raise of relevant test parameters. Although there is higher water absorption during pressure cooker storage, there is no significant difference to the decrease of the specific resistivity in comparison to climatic chamber storage.

## References

- [1] P. Elsner, P. Eyerer, T.Hirth: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*, Springer Verlag, 2007, ISBN: 3540724001
- [2] GW. Ehrenstein, S. Pongratz: *Die Beständigkeit von Kunststoffen*, Hanser Verlag, 2007, ISBN: 3446218513
- [3] IEC 60093, *Methods of test for insulating materials for electrical purposes; Volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials*, (IEC 93:1980); German version HD 429 S1:1983

## Contact

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

Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf  
roggendorf@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-93032

# Ökoeffizienzbewertung zur Szenarioanalyse dezentraler Energieversorgungssysteme

*Die ökologischen Analysen einer verstärkten Integration von dezentralen Energiewandlungsanlagen (DEA) aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Verteilungsnetzen aus vergangenen Arbeiten am IFHT werden um eine ökonomische Komponente erweitert. Mittels eines integrierten Bewertungsmodells wird anhand der Verbrauchsdaten eines realen Mittelspannungsnetzes eine Ökoeffizienzbewertung für eine Reihe von Szenarien durchgeführt, wobei ein besonderes Augenmerk auf die wirtschaftlich optimale Anzahl und die Auslegung der Versorgungsquellen sowie den nötigen Wärmenetzausbau gelegt wird.*

54

## Einleitung

Durch die simultane Bereitstellung von Strom und Wärme aus demselben Energiewandlungsprozess bietet die Kraft-Wärme-Kopplung eine vielversprechende Möglichkeit Kostenvorteile bei minimaler Umweltbelastung durch einen effizienteren Umgang mit Primärenergieressourcen zu erzielen und dadurch eine aktive Rolle in zukünftigen Energieversorgungsszenarien zu spielen. Für eine umfassende Bewertung der elektrischen und thermischen Energieversorgung in Verteilungsnetzen auf Basis von Blockheizkraftwerken (BHKW) ist es erforderlich, dass neben den Emissionen, die im Verbrennungsprozess entstehen, die Kosten für Investitionen in Anlagen und Wärmenetze sowie verbrauchsgebundene Kosten für Brennstoffe und fremdbezogenen Strom in Betracht gezogen werden.

## Modellbildung

Für die Ökoeffizienzbewertung der elektrischen und thermischen Energieversorgung unter möglichen Szenarienausprägungen werden die Energie- und Emissionsflüsse mithilfe der Software MATLAB modelliert. Der Strom- und Wärmebedarf wird an jedem Netzknoten, im Ausgangspunkt sind das alle Ortsnetzstationen des MS-Netzes,

von einer KWK-Anlage auf Erdgas-Basis soweit wie möglich abgedeckt. Zu Starklastzeiten wird zusätzliche elektrische Energie aus dem Verteilungsnetz bezogen bzw. wird analog zu Schwachlastzeiten überschüssiger Strom ins Netz zurückgespeist. Die Emissionen, die in diesem Zusammenhang in den Bilanzraum eintreten oder diesen verlassen, werden ihrer Wertigkeit entsprechend hinzuaddiert bzw. gutgeschrieben. Die Anlagen werden wärmegeführt betrieben, d.h. ihre tägliche Laufzeit orientiert sich am lokalen Wärmebedarf. Für Wärmespitzenlasten zu besonders kalten Perioden sind zusätzliche Erdgas-Heizkessel installiert. Für die Stromverbräuche werden dynamisierte, viertelstündlich aufgelöste Standardlastprofile zu Grunde gelegt an denen sich ebenfalls der Fremdbezug bzw. die Einspeisung orientiert. Die jährlichen Wärmebedarfe, die sich aus dem Warmwasser- und Raumwärmebedarf zusammensetzen, werden mithilfe eines am IFHT entwickelten Tools abgeschätzt und anhand der durchschnittlichen Temperaturwerte im Raum Aachen und der sich daraus ergebenden Gradtagzahlen auf Tageswerte aufgeteilt. Das Verhältnis von Wärme- zu Stromverbrauch (engl. Heat to Power Ratio) ergibt sich im Beispielnetz zu 3,45, wird aber für die Untersuchungen variiert.

Das Systemmodell ist durch die folgenden Einflussfaktoren gekennzeichnet:

- Stromverbrauch
- Wärmeverbrauch
- Brennstoffpreis
- Strompreis
- Emissionen des Strommixes
- Wärmenetzausbaukosten
- Heat to Power Ratio

Im ersten Schritt erstellt das Bewertungsmodell unter Angabe der Parameter und der Anzahl der Versorgungsknoten einen wirtschaftlich optimalen KWK-Anlagenpark. Dabei wird an jedem Knoten des betrachteten Netzes unter Berücksichtigung des lokalen Verbrauchs die Anlage ausgewählt, die im Zusammenhang mit der Energieversorgung die geringsten jährlichen Gesamtkosten aufweist, aufgeteilt in Investitions- und verbrauchsabhängige Kosten. Die jeweilige Anlage versorgt dann die umliegenden Verbraucher abhängig von ihrer errechneten Laufzeit mit Strom und Wärme. Die hierfür benötigten Verbrauchsdaten werden dabei durchgängig viertelstündlich abgebildet. Wo dies möglich war wurden reale Daten herangezogen. Dem Modell stehen eine Reihe von Referenzanlagen, die auf Basis von realen, am Markt erhältlichen Erdgas-BHKWs konzipiert wurden, in verschiedenen Leistungsklassen von 1kW bis 10MW zur Verfügung. Im nächsten Schritt ermittelt das Modell die jährlichen Kosten und Emissionen, die mit der Strom- und Wärmeversorgung des betrachteten Verteilungsnetzes entstehen und weist diese mithilfe eines Bewertungsverfahrens anteilig den beiden Energieformen zu. Durch die Variation der Einflussparameter und der Energieversorgungsszenarien kann eine Reihe von Szenarien bewertet werden. Abb. 1 zeigt das Analyseraster der Szenarioanalyse.

Versorgungsszenario		Strompreis	Brennstoffpreis	HPR
Keine KWK		Niedrig	Niedrig	4:1
KWK	Dezentral	Referenz	Referenz	3.45:1
	Fernwärme	Hoch	Hoch	2:1

Abb. 1: Analyseraster der Szenarioanalyse

Die Energieversorgungsszenarien werden hier in drei Arten unterteilt:

- *KWK Dezentral*: Je eine KWK-Anlage an jeder Ortsnetzstation des MS-Netzes versorgt die untergliederten Verbraucher.
- *KWK Fernwärme*: Ein Heizkraftwerk versorgt das ganze Verteilungsnetz. Ein effizient ausgelegtes Wärmenetz verbindet die Verbrauchssenden.
- *Keine KWK*: Der Strom wird vollständig aus dem Netz zum Industrietarif und die Wärme ausschließlich aus den Heizkesseln bezogen.

Die Szenarioanalyse wird an einem realen Verteilungsnetz durchgeführt, deren wichtigste Merkmale in Abb. 2 dargestellt sind.

Verteilungsnetz	Vorstadt
Anzahl der Haushalte	15322
Anzahl der MS-Transformatoren	89
Gesamtlänge des Mittelspannungsnetzes [km]	40
Strombedarf [GWh/a]	59
Wärmebedarf [GWh/a]	203,62

Abb. 2: Übersicht der Daten des vorstädtischen Netzes

## Ergebnisse der Szenarioanalyse

Abb. 3 zeigt die spezifischen Emissionen und Kosten als Ergebnisse der Ökoeffizienzbetrachtung, die dem Strom zugewiesen werden.

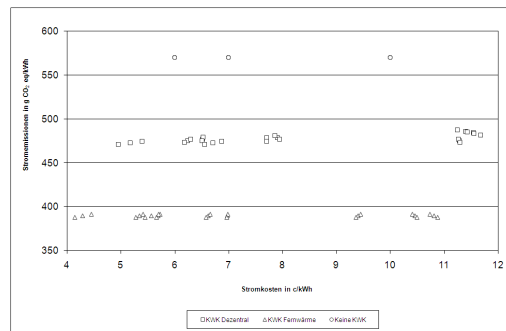


Abb. 3: Spezifische Stromemissionen und Stromkosten für die verschiedenen Szenarien im vorstädtischen Netz

Auf den ersten Blick zeigt sich eine höhere Ökoeffizienz der Szenarien mit Einsatz von KWK. Dabei sind die Fernwärme-Szenarien, trotz der zusätzlichen Investitionen in Wärmenetze in ökonomischer und ökologischer Hinsicht günstiger als die Dezentral-Szenarien. Dies ist auf den höheren elektrischen Wirkungsgrad von KWK-Anlagen größerer Leistungsklassen zurückzuführen, die für die Fernwärmeversorgung vom Optimierungsverfahren ausgewählt werden.

Unter Berücksichtigung der Kosten und Emissionen, die mithilfe des Bewertungsverfahrens der Wärme zugerechnet werden, schneidet die dezentrale Variante bei Betrachtung der Wärmekosten und Wärmeemissionen günstiger ab als die Fernwärmevariante. Dies lässt sich auf den abnehmenden thermischen Wirkungsgrad der BHKWs größerer Leistungsklasse zurückführen.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisinterpretation in hohem Maße vom Bewertungsverfahren abhängt. In diesem Fall wurde das Allokationsverfahren nach Exergiegehalt angewendet, um eine

technisch-naturwissenschaftliche Basis zu Grunde zu legen.

## Netzreduktion

Der Einfluss der BHKW-Leistung auf die Kosten und Emissionen und die erheblichen Unterschiede in den Berechnungen zwischen dem Dezentral- und dem Fernwärme-Szenario lassen darauf schließen, dass Kostenvorteile und ökologische Vorteile erzielt werden können, indem nah beieinander liegenden Verbrauchsknoten gebündelt und durch eine effizienter ausgelegte, größere KWK-Anlage ersetzt werden.

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Kostenersparnis und zusätzlichen Kosten für den Wärmenetzausbau ist anzunehmen, dass es eine wirtschaftlich optimale Anzahl von KWK-Anlagen für jedes Netz gibt. Das Optimierungsverfahren wurde in der Hinsicht erweitert, dass es in jedem Schritt die geografisch nächstgelegenen beiden Knoten über eine Wärmeleitung entlang des elektrischen Netzes verbindet, einen neuen Verbrauchsknoten mit einem neu ausgelegten BHKW generiert und die Gesamtkosten für das ganze Netz neu berechnet. Dieses Verfahren wird für jede mögliche Knotenanzahl wiederholt. Abb. 4 zeigt die jährlichen Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Versorgungsquellen angefangen von einer KWK-Anlage (Fernwärme-Szenario) bis max. 89 (Dezentrales Szenario) und alle Zwischenstufen. Trotz der zusätzlichen Kosten für den Ausbau der Wärmeleitungen ist eine deutlich fallende Tendenz der Gesamtkosten mit zunehmender Bündelung der Knoten erkennbar. Diese Ersparnis relativiert sich allerdings mit zunehmenden spezifischen Kosten für den Wärmenetzausbau. Im hier aufgeführten Beispiel verschiebt sich das Kostenminimum bei Wärmenetzausbaukosten von etwa 1500 Euro/m leicht,



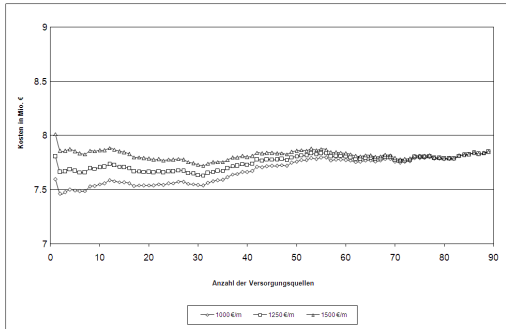


Abb. 4: Jährliche Gesamtkosten der Energieversorgung in Abhängigkeit von der Anzahl der Versorgungsquellen und spezifischen Wärmenetzausbaukosten

sodass eine zunehmende Dezentralisierung wirtschaftlicher wird.

### Zusammenfassung

Mit der entwickelten Methodik steht ein Verfahren zur Analyse von ökologischen Auswirkungen einer massiven Integration von KWK-Anlagen in Verteilungsnetzen um die ökonomische Komponente zur Verfügung. Mit dem Modell ist es möglich, un-

ter Zugrundelegung von realen Verbrauchs- und Kostendaten die Ökoeffizienzbewertung an Verteilungsnetzen durchzuführen. Insbesondere kann dabei die wirtschaftlich optimale Anzahl und Auslegung der Versorgungseinheiten und der dafür notwendige Wärmenetzausbau ermittelt werden. Am Beispielnetz zeigt sich aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades von BHKWs hoher Leistung eine ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit einer Energieversorgung durch Fernwärme. Die Ergebnisse weisen jedoch eine hohe Sensitivität hinsichtlich der Kosten für den Wärmenetzausbau auf.

### Kontakt

Dipl.-Wirt.-Ing. Koray Karaadak  
Koray.Karaadak@rwth-aachen.de

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

# Eco-Efficiency Evaluation for the Scenario Analysis of Distributed Energy Supply Systems

*The ecological analyses for an increased integration of distributed cogeneration systems in distribution grids derived from former studies at the IFHT are being expanded with an economic component. Using a model, which has been created within the framework of a diploma thesis, and the consumption data of a real medium voltage grid an eco-efficiency evaluation is been done for various scenarios with a special focus on the economically optimal amount and the dimensioning of energy supply units as well as the construction costs of the district heating system.*

## Introduction

While simultaneously providing heat and electricity from the same energy conversion process, combined heat and power technologies (CHP, also called cogeneration) offer a promising possibility to gain cost advantages and to reduce the environmental impacts by using primary energy resources more efficiently. CHP thus plays an important role in future energy supply scenarios. For a widespread evaluation of the electrical and thermal power supply in distribution grids on basis of CHP plants it is necessary to take into account the emissions resulting from the combustion process, the costs for investments in assets and the district heating network as well as consumption-related costs for fuels and external procurement of electrical energy.

## Modelling

For the eco-efficiency evaluation of the electrical and thermal energy supply for possible scenario developments the energy and emission flows are modeled with the software MATLAB. At every medium voltage node of the grid the electricity and heat demand is covered by a gas fired CHP plant as far as possible. In peak load times additional electricity is purchased from the grid and surplus electricity is fed back dur-

ing off-peak hours, respectively. The carbon dioxide emissions that enter or leave the balancing object are added or subtracted according to their value. The cogeneration plants are modeled in a heat-oriented operation mode, which means that their operating time depends on the daily heat demand at the node. As the heat delivered from the CHP plants is not sufficient, on extremely cold days there are additional heat boilers implemented within the heat supply system. To distribute the electricity consumption during a day and also to determine the external procurement as well as the feed-in, highly dissolved and standardised load profiles are taken as the basis. The annual heat demands, consisting of hot water and space heating, are estimated with the help of a tool developed at the IFHT and divided into daily values with regard to the average temperatures in the Aachen region. The Heat to Power Ratio, i.e. the ratio of the annual heat consumption to the annual electricity consumption for this exemplary grid results in 3,45, but is varied for different scenario analyses, thus varying the heat demand.

The system model is characterised by the following influencing factors:

- Electricity consumption
- Heat consumption
- Fuel prices

- Electricity prices
- Emissions of the electricity mix
- Construction costs for district heating network
- Heat to Power Ratio

At first the evaluation model creates an economically optimal cogeneration plant fleet under specification of the parameters and the number of supply nodes. Therefore, at every node of the concerned grid with regard to the particular local energy usage, the optimisation tool chooses the CHP plant that generates the lowest annual costs relating to the power supply, divided into investment costs and consumption-related costs. The chosen unit supplies the surrounding households depending on its identified operating time with electricity and heat. The demand modelling generally relies on input data for every quarter of an hour. Where available real consumption data has been used. For that purpose the model has a series of reference assets of different power classes ranging from 1kW to 10 MW at its disposal. In the next step, the model calculates the annual costs and the emissions related to the electric and thermal power supply of the grid and assigns these, with the help of an evaluation procedure, in proportion to the two different forms of energy. By varying the influencing parameters and the energy supply scenarios a variety of scenarios can be evaluated. Fig. 1 shows the analytical framework of the scenario analysis.

Versorgungsszenario		Strompreis	Brennstoffpreis	HPR
Keine KWK		Niedrig	Niedrig	4:1
KWK	Dezentral	Referenz	Referenz	3,45:1
	Fernwärme	Hoch	Hoch	2:1

Abb. 1: Analytical Framework of the scenario analysis

The energy supply scenarios can be divided in three variants:

- *CHP Decentralised:* Each CHP unit powers the underlying network of a medium voltage transformer.
- *CHP District Heating:* One CHP plant provides the whole network. An efficiently designed district heating system connects the supply nodes.
- *No CHP:* The electricity is completely purchased from the grid at industry prices and the heat comes solely from heat boilers.

The scenario analysis is done for a real suburban distribution network as described in Fig. 2

Verteilungsnetz	Vorstadt
Anzahl der Haushalte	15322
Anzahl der MS-Transformatoren	89
Gesamtlänge des Mittelspannungsnetzes [km]	40
Strombedarf [GWh/a]	59
Wärmebedarf [GWh/a]	203,62

Abb. 2: Figures of the considered distribution grid

### Results of the Scenario Analysis

Fig. 3 shows the specific carbon dioxide emissions and the costs as results of the eco-efficiency evaluation that are allocated to electrical power.

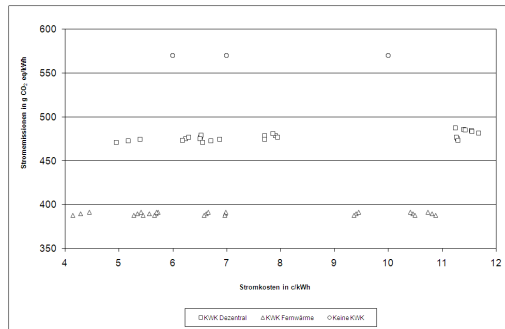


Abb. 3: Specific electricity emissions and electricity costs for various scenarios in the suburban grid

Instantaneously the superiority of the CHP-scenarios over those without CHP becomes evident. The District Heating scenarios are more favourable in terms of economical and ecological aspects despite the high investment costs in an additional district heating network compared with the corresponding Decentralised scenarios. The reason lies in the higher electrical efficiency of units of larger power capacity that are preferably chosen by the optimisation process in the District Heating scenarios, thus leading to lower costs and emissions related to electricity.

When looking at the specific emissions and costs that can be related to heat production the decentralised alternative shows better results in terms of heat-costs and heat-emissions compared to the district heating version. The explanation lies in the decreasing thermal efficiency of CHP plants with higher power capacity. In this context it should be noted that the interpretation of the results highly depends on the evaluation procedure. In this case the allocation procedure is applied according to exergy contents to take technical and natural scientific relations as a basis for the analysis.

### Grid Optimisation

The impact of the CHP unit's power classes on costs and emissions and the differing

results between the Decentralised and the District Heating Scenario lead to the assumption that economical advantages can be taken through merging supply nodes and replacing the former CHP units by one unit of bigger capacity. Due to the interaction between cost savings through cogeneration plants of higher efficiency and cost increases through further investments in the district heating network among the nodes, it is expected that there is an economically optimal number of CHP units for each distribution grid. The optimisation model is extended in a manner that it connects the two nearest supply nodes at every iteration step via district heating pipes along the existing medium voltage grid and then generates one new supply node with the added power consumption. A new optimal CHP plant is assigned to the node based on economical criteria. The additional construction costs for the district heating network are considered and the total energy supply costs for the whole grid are calculated. This process is repeated for every possible amount of nodes. Fig. 4 shows the annual total costs depending on the number of supply nodes beginning from one CHP unit (corresponding to the District Heating Scenario) to the maximum number of 89 (Decentralised Scenario) and all stages in between. Despite the additional construction costs in the district heating system with the growing concentration of nodes, a decreasing tendency in total costs is observable. These cost savings relativise with increasing specific construction costs. In the following example the minimum total costs move to the center for specific construction costs of 1500 Euro/m, which in consequence leads to the point that a further decentral-

isation becomes economically reasonable.

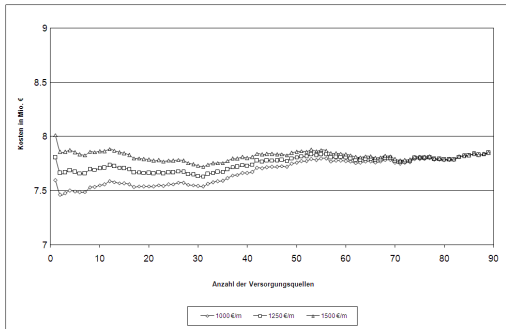


Abb. 4: Annual total energy supply costs dependent on the number of supply nodes and specific construction costs of district heating network

### Summary

In this work the existing analyses of the ecological impacts of a massive integration of CHP plants in distribution grids are expanded with an economical component. With the implemented model it is possible

to make an eco-efficiency evaluation for distribution networks with real consumption and cost data. In particular, the economically optimal number and size of supply units can be determined. For the exemplary grid it has been shown that an energy supply by district heating brings economical and ecological advantages due to the higher electrical efficiency of CHP units of larger capacity. These advantages can differ significantly depending on heat infrastructure costs.

### Contact

Dipl.-Wirt.-Ing. Koray Karaadak  
Koray.Karaadak@rwth-aachen.de

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

# Systemkonforme Integration von Elektromobilität

*Deutschland soll innerhalb von zehn Jahren - mit einer entsprechenden Flottengröße von einer Million Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 - zum Leitmarkt für Elektromobilität aufsteigen. Eine Flankierung der Ambitionen erfolgt durch gezielte Förderung derzeit insgesamt acht geplanter bzw. bereits in Umsetzung befindlicher Modellregionen, die durch räumlich konzentrierte Aktivitäten eine Vernetzung zwischen Kommunen und Unternehmen fördern sollen.*

*Die Integration der Elektromobile im Kontext erneuerbarer Energien setzt eine sorgfältige Analyse und Planung des Gesamtsystems voraus, um eine zukünftige Kommerzialisierung und Harmonisierung unterschiedlicher Technologiefelder gewährleisten zu können. Weiterhin ist vor dem Hintergrund einer steigenden Anzahl unrichter-gekoppelter Energie-wandlungseinheiten - vornehmlich in Verteilungsnetzen - eine frühzeitige Definition systemkonformer Netzanschlussregeln vorzunehmen, die im Rahmen von Forschungsprojekten am Institut für Hochspannungstechnik erarbeitet und in Form von Handlungsempfehlungen für Elektrofahrzeuge verabschiedet werden sollen.*

## Einleitung

Fehlende Synergien zwischen dem Verkehrssektor und der elektrischen Energieversorgung führten bislang zu einer völlig entkoppelten Betriebsweise. Eine zukünftig zunehmende Elektrifizierung des Personenkraftverkehrs eröffnet neue Möglichkeiten, eine eng kooperierende und verzahnte Marktpartizipation der beiden Sektoren zu erzielen. Neben einem Potenzial zur Senkung der Treibhausgase besitzen elektrifizierte Fahrzeugflotten zudem einen mobilen Speicher und könnten sich unter anderem deshalb als eine interessante Ergänzung für die Energieversorgung erweisen. Vor dem Kontext einer Zusammenführung des Energiesektors und des Verkehrs, werden gleichsam Herausforderungen an beide gestellt, die eine genaue Planung bedingen. Vor diesem Hintergrund werden am Institut für Hochspannungstechnik spezifische Fragen zur Systemintegration von Elektrofahrzeugen im Rahmen von Forschungsprojekten beantwortet, die zukünftig in Form von Netzanschlussregeln formuliert werden

sollen. Die Ausgestaltung zukünftiger Regularien ist ein essentieller Bestandteil zur Wahrung eines sicheren Netzbetriebs.

## Pentrationsszenarien zukünftiger Elektromobilität

Für die technische Analyse der Auswirkungen der Elektromobilität sind viele Faktoren entscheidend. Einer der wichtigsten, nicht technisch vorgegebenen Parameter ist die Durchdringungsrate der Elektrofahrzeuge, welche schwierig vorherzusehen ist, weil externe, nicht projizierbare Faktoren, wie beispielsweise der Öl-, Strom- und Batteriepreis, die Entwicklung stark beeinflussen. Darüber hinaus können politische Entscheidungen hinsichtlich Subventionen oder steuerliche Belastungen die Entwicklung behindern oder unterstützen.

Ein am IFHT entwickeltes Modell, welches auf einer rationalen Kaufentscheidung der Fahrzeughalter beruht, erstellt mit Hilfe der Szenarioanalyse und unter Be-

rücksichtigung der externen Faktoren mögliche Durchdringungsszenarien für die Jahre 2010 bis 2030 (Abb. 1). Es werden drei sich in ihrer Reichweite und Einsatzmöglichkeiten unterscheidende Elektrofahrzeuge untersucht:

- Battery Electric Vehicle (BEV), reines Elektrofahrzeug
- Stadt BEV, kleines Stadt-Elektrofahrzeug für Kurzstrecken
- Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV), Fahrzeug mit Elektromotor und Verbrennungsmotor, um ein konventionelles Fahrzeug vollwertig zu ersetzen.

Die Abbildung zeigt eine sehr positive Entwicklung der Durchdringungsrate bei hohem Ölpreis, niedrigem Strompreis und sich stark reduzierenden Batteriekosten. Jedoch waren für die Fahrzeugwahl nicht allein monetäre Aspekte relevant, sondern ebenfalls soziale Aspekte, wie z.B. der Wunsch nach uneingeschränkter Mobilität. Aus diesem Grund besitzt der PHEV z.B. eine größere mögliche Klientel als der kleine Stadt-BEV.

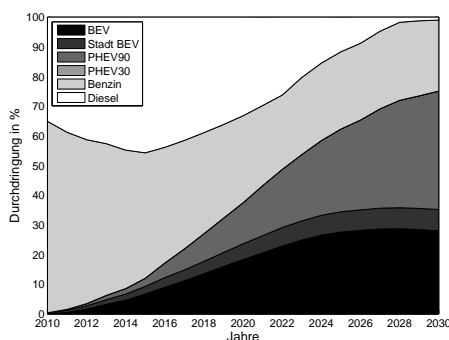


Abb. 1: Best-Case Entwicklung der Durchdringungsrate von Elektrofahrzeugen bis 2030

Darüber hinaus wurde die ökologische Vorteilhaftigkeit von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen untersucht, um herauszufinden, wie hoch das

mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparpotential der Elektrofahrzeuge ist. Am Größten ist die Ersparnis der Fahrzeuge in Kombination mit erneuerbaren Energien.

## Netztechnische Bewertung von Implikationen

Die Bewertung der technischen Folgen einer Elektrofahrzeugintegration auf eine Vielzahl verschiedener Netze unterschiedlicher Spannungsebenen erfordert die Abbildung der Wechselwirkungen von Verkehr und Energieversorgung. Mittels eines dreiteiligen Ansatzes mit den Modellkomponenten Netz, Last und Fahrzeugen wurde eine Analyseplattform geschaffen, die durch große Flexibilität die Grundlage für vielfältige Untersuchungen von Wechselwirkungen bieten kann. Alle Teile werden im Folgenden vorgestellt.

Das Netzmodell ermöglicht die Repräsentation von Netzen beliebiger Spannungsebenen und eignet sich für automatisierte Lastflussrechnungen, mit denen die Belastungen aller vorhandenen Betriebsmittel sowie die Spannungshaltung untersucht werden können, die zu einer Abschätzung ggf. notwendiger Netzverstärkungsmaßnahmen sowie weiterer Handlungsempfehlungen zur Integrierung von Elektromobilität oder dezentralen Wandlungseinheiten führen.

## Methodik der Untersuchungen

Zur Darstellung der Elektrofahrzeuge wurde ein Modell entwickelt, welches die Möglichkeit bietet, die Vielzahl technischer Eigenschaften der Fahrzeuge darzustellen und für verschiedene Szenarien frei zu parametrieren. Dabei stehen die Parameter Batteriekennlinie und Anschlussleistung im Mittelpunkt, da von ihnen der größte Einfluss auf die Netze erwartet werden darf. Die implementierte Batteriekennlinie wird dabei der für Lithium-Ionen-Batterien bekannten, typischen Ladekurve nachempfunden.

Des Weiteren ist es für die Auswirkungen auf das Netz entscheidend, wie viele Fahrzeuge an welchem Ort und zu welcher Zeit laden. Dazu wurden Auswertungen der Studie Mobilität in Deutschland durchgeführt und hieraus fünf verschiedene Fahrerklassen gebildet, welche sich hinsichtlich der Tagesfahrstrecken sowie der Abfahrts- und Ankunftszeiten zu Hause unterscheiden (Abb. 2). Entsprechend der jeweiligen Fahrleistung und derzeit verfügbarer Elektrofahrzeugtechnologien, werden die individuell resultierenden Energieverbräuche für jedes Fahrzeug ermittelt.

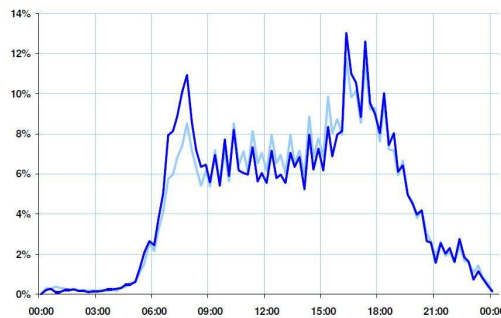


Abb. 2: Anteil bewegter Fahrzeuge im Tagesverlauf

Ferner wurden im Zusammenhang mit einer zunehmenden Elektromobilität unterschiedliche Ladeinfrastrukturmaßnahmen betrachtet. Insbesondere wurden die Auswirkungen von Batteriewechselstationen auf das Mittelspannungsnetz den Auswirkungen des Ladens an der Steckdose zu Hause gegenübergestellt. Weitere Szenarien - etwa das Laden am Arbeitsplatz oder während des Einkaufens - sollen nach Auswertung entsprechender Fahrprofile zeitnah Berücksichtigung finden.

Darüberhinaus besteht in den elektrischen Netzen eine Belastung, welche durch den Bedarf der Haushalte, Gewerbe und Industrie an elektrischer Energie hervorgerufen wird. Um diese gegenwärtig bereits existierende Auslastung abzubilden, wurde ein probabilistisches Modell typischer Verbraucher der Niederspannungsebene erstellt. Hiermit können auf Basis typischer

Geräteausstattungen und Verhaltensmuster Tageslastgänge einzelner Verbraucher erzeugt werden, welche die gegenwärtige Auslastung der Verteilungsebene detailliert widerspiegeln.

Um mit diesem Modell aussagekräftige Ergebnisse für die in Deutschland vorhandenen Netze zu generieren, ist es notwendig, das Modell auf möglichst viele Netze anzuwenden. Hierzu wurde eigens ein Verfahren entwickelt, welches in der Lage ist, in kurzer Zeit eine Vielzahl synthetischer Niederspannungsnetze zu generieren. Die so erstellten Netze gleichen in den für die Bewertung von Betriebsmittelbelastung und Spannungshaltung relevanten Parametern statistisch den realen deutschen Niederspannungsnetzen. Hierzu zählen etwa die typischen Transformatorleistungen, die Anzahl der an einen Transformator angeschlossenen Verbraucher, die Länge der Stränge und die Querschnitte und Materialien der Leitungen. Somit ergibt sich die Möglichkeit, den Einfluss der Fahrzeuge auf die Niederspannungsebene genau zu untersuchen.

## Ergebnisse und Ausblick

Mit diesen Ausgangsdaten wurden Berechnungen durchgeführt, aus denen zuverlässig auf die in der Gesamtheit deutscher Niederspannungsnetze zu erwartenden Implikationen geschlossen werden kann.

Es zeigt sich, dass besonders die Höhe der Anschlussleistung entscheidenden Einfluss auf die auftretenden Grenzwertverletzungen hat, wohingegen die Höhe der Durchdringung untergeordnete Bedeutung hat. Während mit den angenommenen Fahrprofilen der Elektrofahrzeuge keine Überlastungen an Ortsnetztransformatoren erwartet werden müssen, kommt es mit steigender Anschlussleistung der Fahrzeuge auch schon bei Durchdringungsraten von wenigen Prozent zu Überlastungen von Nie-



derspannungsleitungen sowie zu Verletzungen des nach DIN 50160 vorgegebenen Spannungsbandes. Um dies zu quantifizieren wurde ermittelt, welche Gesamtlänge an Leitungen in der deutschen Niederspannungsebene zur Behebung der zu erwartenden Implikationen ersetzt werden müsste. Abb. 3 ist zu entnehmen, dass die zu ersetzenden Leitungslänge bei 44 kW Anschlussleistung bis zu 15 mal größer sind als bei 3,7 kW, während sie sich für Durchdringung von 2% (Prognose für 2010 in Abb. 3) und 80 % (2025 in Abb. 3) höchstens um den Faktor 2 unterscheiden

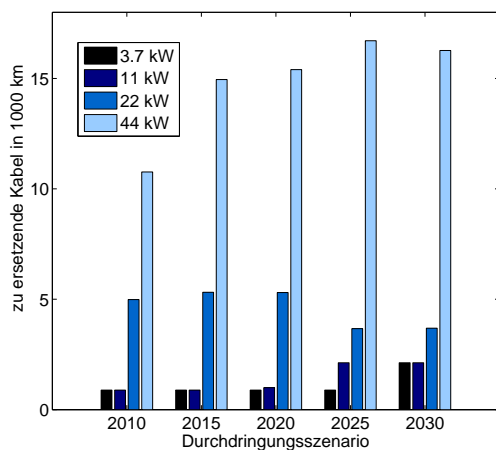


Abb. 3: Zu ersetzende Kabel in verschiedenen Szenarien

Zeitgleich wurde die Möglichkeit untersucht, die Belastung der Ortsnetzstationen durch gezielte Steuerung des Ladeverhaltens der Fahrzeuge zu beeinflussen, ohne dabei eine für den Fahrzeugnutzer spürbare Einschränkung - z. B. durch Verringerung der Reichweite - zu provozieren. Dabei wurden sowohl Szenarien mit zentraler Steuerung als auch Szenarien mit dezentraler Steuerung, sog. Multi-Agenten-Systeme, implementiert. Innerhalb dieser Szenarien gab es wiederum verschiedene Strategien zur Beeinflussung der Ladeleistungen, wobei sich die dezentrale Steuerung als besonders vorteilhaft für den Fahrzeugnutzer, bei gleichzeitiger Einhaltung aller technischen Anforderungen, herausge-

stellt hat. Bisher konnte so die Wirksamkeit einer gezielten Beeinflussung der Ladeleistung zur Reduktion der Trafobelastung gezeigt werden. Daher wird in Zukunft die Wirksamkeit des Verfahrens zur Reduktion von Überlastungen in der Mittelspannungsebene sowie für die Reduktion der Kabelbelastung in der NS-Ebene weiter untersucht werden.

## Projektschwerpunkte am IFHT

Den Schwerpunkt der Untersuchungen am Institut für Hochspannungstechnik im Bereich Elektromobilität bilden derzeit öffentlich geförderte Forschungsprojekte mit dem Ziel einer intelligenten Integration von Elektrofahrzeugen im Zusammenhang mit Erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung netztechnischer Randbedingungen. Ausgehend von einer Identifikation restriktiver Eigenschaften in Verteilungsnetzen durch zusätzlich induzierten Strombedarf, werden Obliegenheiten an Elektrofahrzeuge gestellt, die zukünftig gemeinsam mit neuen Netzbetriebsführungskonzepten harmonisieren.

## Flottenversuch Elektromobilität - Netzintegration

Der Flottenversuch wird von insgesamt acht deutschen Kooperationspartnern aus Forschung und Wirtschaft getragen. Das Ziel der im Rahmen des Flottenversuches am IFHT durchgeführten Untersuchungen besteht in der technischen Identifikation von Rahmenbedingungen einer Integration der Elektromobilität in die elektrische Netzinfrastruktur und der Wirkungen der im Verbundprojekt entwickelten Ausgestaltungsoptionen einer zukünftigen Elektromobilität auf die Betriebsführung der Verteilungs- und Übertragungsnetze zu analysieren. Auf Grundlage dieser Wirkungen werden Handlungsempfehlungen zukünftiger System-

führung von Verteilungsnetzen sowie eine Anpassung von Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge abgeleitet. Das Vorhaben liefert über die Definition der technischen Rahmenbedingungen (auch: Netzanschlusskriterien) für die Einbindung von Elektrofahrzeugen in die elektrischen Energieversorgungsnetze Beiträge zur Integration großer Windstromenergien in das Stromnetz.

### **Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen**

Begleitet durch mehrere Verbundpartner, wird im Rahmen des Forschungsprojektes die Darstellung der mittel- bis langfristigen energiewirtschaftlichen Perspektiven von Elektromobilität in einem Versorgungssystem mit stetig steigendem Anteil erneuerbarer Energiequellen erarbeitet. Unter Berücksichtigung eines zeitlichen Betrachtungsraumes bis 2050 sind die Rückwirkungen und technischen Gestaltungsoptionen einer Integration von Elektrofahrzeugen sowie erneuerbarer Energien in einem transeuropäischen Versorgungssystem zu betrachten. Der Betrachtungsbereich ist dabei ausgedehnt auf die Netze der Nieder- bis zur Hochspannungsebene, um mögliche Implikationen für jede Ebene quantifizieren zu können.

Weiterhin werden im Rahmen einer Potenzialanalyse - aufgrund einer zukünftig möglichen transkontinentalen Vernetzung zur Einbindung des nordafrikanischen Solarstromimports - grundlegende Netzarchitekturen zur Anbindung von HGÜ-Anlagen nach Europa erarbeitet. Diese werden unter Berücksichtigung europaweiter Potenziale erneuerbarer Energiequellen technisch sowie wirtschaftlich beleuchtet.

### **IEA - Erneuerbare Energien im Transportsektor**

Die Kombination zwischen erneuerbaren Energien und Elektrofahrzeugen verspricht viele technische und ökologische Vorteile zu besitzen. Aus diesem Grund hat das durch die Abteilung für die Verbreitung erneuerbarer Energietechnologien (RETD) der internationalen Energieagentur (IEA) durchgeführte Projekt zum Ziel, politische Empfehlungen zu entwickeln, die die Synergien zwischen diesen Technologien fördern. Ein internationales Konsortium mit unterschiedlichen Kernkompetenzen im Bereich von Fahrzeugtechnologien, politischen Empfehlungen, der Integration von Elektrofahrzeuge ins elektrische Netz und Erneuerbaren Energien hat im Rahmen dieses Projekts eine Roadmap entwickelt, die die Grundlage für politische Entscheidungen sein soll.

Der Kern der Arbeit enthält einen Überblick über die technischen Herausforderungen, die im Zusammenhang einer massiven Integration von Erneuerbaren Energien, im speziellen Wind, und Elektrofahrzeugen unabhängig voneinander entstehen können. Im Anschluss werden die Lösungsmöglichkeiten durch die Kombination der beiden Technologien beschrieben und die dafür notwendigen technischen Netzausbauten dargelegt.

### **Kontakt**

Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz  
 szczechowicz@ifht.rwth-aachen.de  
 +49 241 80-94916

Thomas Pollok, M. Sc.  
 pollok@ifht.rwth-aachen.de  
 +49 241 80-94958

Dipl.-Ing. Claas Matrose  
 matrose@ifht.rwth-aachen.de  
 +49 241 80-94912

# System conform Integration of Electro-Mobility

*Within ten years it is said that Germany will be the lead market in electro-mobility with a corresponding fleet size of one million electric vehicles until the year 2020. These ambitions are accompanied by a well-directed promotion of altogether eight model-regions being planned or being currently in the phase of implementation with the intention to support the crosslinking between communities and enterprises by locally concentrated activities. The integration of electric vehicles within the context of renewable energies requires a careful analysis and design of the complete system to ensure a future commercialisation and harmonisation of different fields of technology. Against the background of an increasing number of converter-connected energy supply units, mainly in distribution grids, there is furthermore the necessity of defining system compatible grid connection rules at an early stage that shall be worked out at the Institute for High Voltage Technology within research projects leading to recommendations of action.*

## Introduction

Missing synergies between the transport sector and the electrical energy supply led to completely decoupled methods of operation up to now. A growing electrification of road traffic in the future opens up new possibilities to achieve a close cooperating and connected market participation for the two sectors. Besides the potential of reducing greenhouse gas emissions, electrified vehicle fleets also possess a mobile storage hence, among other things, they turn out to be an interesting extension to the energy supply. In the context of a combination of the energy and the transport sector, both are confronted with challenges that require a precise planning. Against this background specific questions regarding systems integration of electric vehicles are answered at the Institute for High Voltage Technology within the framework of research projects that shall be formulated in terms of grid connection rules in the future. The definition of future regulations is an essential component for ensuring a safe grid operation.

## Penetration scenarios for future Electro-Mobility

Many factors are crucial for the technical analysis of the impacts of electro-mobility. One of the most important non-technical given parameters is the penetration rate of electric vehicles, which is difficult to anticipate as many external, non-predictable factors like e.g. the prices for oil, electricity and batteries can highly influence this development. Moreover political decisions regarding subsidies or fiscal handicaps can hinder or support this development. A model created at the IFHT, which is based on rational buying decisions by the vehicle owners, generates with the help of the scenario analysis and with regards to the external factors possible penetration scenarios for the years from 2010 to 2030 (Fig. 1). Three types of electric vehicles differing in range and fields of application are analysed:

- Battery Electric Vehicle (BEV), pure electric vehicle
- City BEV, small electric vehicle for cities and short distances

- Plug-In Hybrid Vehicle (PHEV), vehicle with electric motor and combustion engine able to replace a conventional automobile completely

The figure shows a very positive development for the penetration rate at high oil prices, low electricity prices and strongly reducing battery costs. However, not only monetary aspects were relevant for the choice of the vehicle but also social aspects like e.g. the desire for unrestricted mobility. For that reason the PHEV for example has a larger possible clientele than the small City BEV.

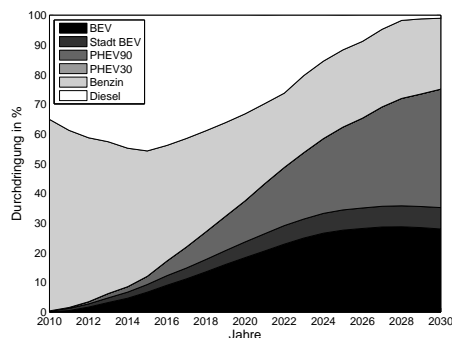


Fig. 1: Best-Case scenario of electric vehicle penetration until 2030

Furthermore the ecological benefits of electric vehicles compared to conventional vehicles were analysed to figure out the amount of the potential CO<sub>2</sub> savings. The highest savings can be achieved in combination with renewable energies.

### Grid-based assessment of implications

The assessment of the technical consequences for the integration of electric vehicles for various grids of different voltage levels requires the modelling of the interdependencies between traffic and power supply. Using a three part approach with the model components grid, load and vehicles a structure has been created, that can build the basis for a multitude of analyses of interde-

pencies due to its large flexibility. All parts are presented in the following.

The grid model allows the representation of grids of any voltage level and is suitable for load flow calculations to analyse the impacts on the electrical equipment and the maintenance of voltage leading to an estimation of possibly needed grid enhancement measures as well as recommendations of action for the integration of electromobility.

### Methodology of the analyses

For the representation of the electric vehicles a model has been implemented that offers the possibility to represent the various technical characteristics of the vehicles and to parameterise them for different scenarios. The parameters connection power and battery characteristic curve (charging curve) are in the focus as they are expected to have the biggest influence on the grid. The implemented battery characteristic curve orientates itself on the known typical load curve of the lithium-ion battery. Furthermore it is essential for the impacts on the grid to know how many cars are charging at which location and at what time. For that purpose the survey Mobility in Germany has been analysed and from that five driver classes have been deduced that differ in daily driving distances as well as departure and arrival times (Fig. 2). According to the particular kilometrage and the electric vehicle technologies available at the moment the resulting individual energy consumptions for each vehicle are calculated.

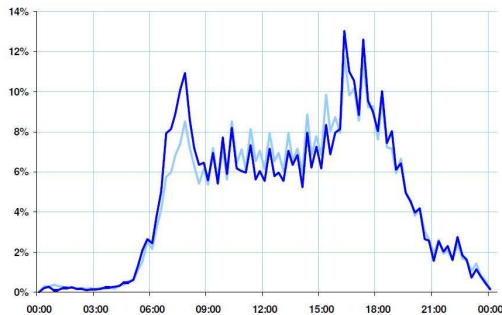


Fig. 2: Share of vehicles used at different times of day

Furthermore different measures for a charging infrastructure have been examined. Especially the impacts of battery switch stations on the medium voltage grid have been compared to the impacts of battery charging at home. Further scenarios like e.g. the charging at work or while shopping will be regarded in future after the examination of corresponding driving profiles.

In addition the load within the electrical grid, generated by the demand of the households, the businesses and the industry is considered. To represent this actual existing load a probabilistic model of typical low voltage consumers has been implemented. Hereby it is possible to create daily load profiles of individual consumers on the basis of typical household equipments and behavioural patterns that represent the actual utilisation at the distribution level.

To generate meaningful results for the grids in Germany with this model it is necessary to apply the model to as many grids as possible. For that purpose a special model has been implemented, which is able to generate a multitude of synthetic low voltage grids in a short time. These grids equal the real german low voltage grids statistically with regard to the parameters relevant for assessment of impacts on electrical equipment and the maintenance of voltage. These are e.g. typical transformer power capacities, the number of consumers connected to a transformer, the length of the lines and the cross-section and the material

of the cables. That offers the possibility to analyse the impact of the vehicles on the low voltage grid in a detailed way.

## Results and outlook

With this data, calculations have been made and from the results obtained one can reliably deduce expectable challenges for the overall german low voltage grids. It has been shown that especially the extent of the connected load has a crucial impact on the appearing threshold violations whereas the extent of the penetration has a lower significance. While overload of substations is not expected with the underlying driving pattern, overload of low voltage lines and violations of the voltage limits defined in DIN EN 50160 are to be expected for increasing connection power ratings, even at penetration rates of only a few percent. The total length of lines that have to be replaced in german low voltage grids to overcome these problems has been calculated as measure for the challenges that have to be faced. It can be seen in fig. 3 that the total length of lines to be replaced at a connection power rating of 44 kW is 15 times higher than at 3,7 kW, whereas there is only a factor of 2 between a penetration rate of 2% (as proposed for 2010 fig. 3) in and 80% (2025 in fig. 3).

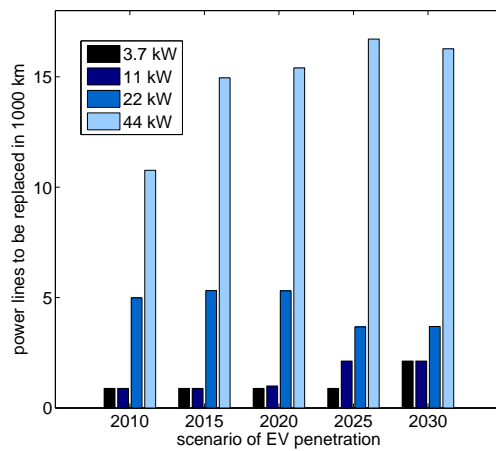


Fig. 3: Lines to be replaced in different scenarios

At the same time, the possibility of influencing the load at the substation by systematically controlling the vehicle charging behaviour without having a noticeable effect for the user e.g. through a decreasing range is analysed. Thereby scenarios with a central control have been implemented as well as scenarios with a decentralised control, so called multi-agent systems. Within these scenarios there were different strategies for influencing the charge power capacity, at which the decentralised control turned to be notably advantageous for the vehicle user, simultaneously in compliance with all technical requirements. The effectiveness of systematically controlling the charge power capacity to reduce the transformer burden could be shown so far. Hence the effectiveness of the method for reducing overloads in the medium voltage level and reducing cable loads in the low voltage level will be analysed further in future research.

### Project foci at the IFHT

The focus of the researches at the Institute for High Voltage Technology in the field of electro-mobility lies currently on publicly-aided research projects with the aim of an intelligent integration of electric

vehicles in connection with renewable energies and with regards to grid-based boundary conditions. Beginning with an identification of restrictive characteristics in distribution grids by an additionally evoked electricity demand, obligations are made on the electric vehicles that harmonise in future together with new concepts of operating grids.

### Fleet test Electromobility - Grid Integration

The project is upheld by a total of eight german cooperation partners from research and industry. The aim of the studies that are made within the fleet test at IFHT is the technical identification of general conditions for an integration of electro mobility in the existing electrical infrastructure and the analysis of the effects of the design options developed within the joint project on the operational management of transmission and distribution grids for a future electro mobility. On basis of these effects recommendations of action are deduced for the future systems operation of distribution grids as well as an adjustment of operational strategies for electro vehicles. The project delivers, by defining the technical general conditions for the integration of electric vehicles in electrical grids, contributions for the integration of large wind power capacities in the grid.

### Perspectives for Electro-/Hybrid-Vehicles in a Supply System with a high proportion of decentralised and renewable Energy Sources

Accompanied by several related partners the illustration of the middle- and long-term perspectives of electro-mobility in the energy sector with a continuously increasing share of renewable energies is worked out. Regarding a period under consi-

deration until 2050, the reactions and the technical design options of an integration of electro mobility and renewable energies in a trans-european interconnected network system are to be observed. The field of observation is thereby expanded from the low voltage grids to the high voltage grids to be able to quantify possible implications for each level. Furthermore within an analysis of potential - due to a possible trans-continental interconnectedness for the integration of north african solar power imports in the future - elemental network architectures for the connection of HVDC facilities to Europe are worked out. These are examined technically and economically regarding Europe-wide potentials of renewable energies.

### **IEA - Renewable Energies in the Transport Sector**

The combination of renewable energies and electric vehicles promises to imply many technical and ecological advantages. For that reason the project carried out by the Renewable Energy Technology Development (RETD), being part of the International Energy Agency (IEA), the aim of developing political recommendations that can support the synergies between those two technologies. An international con-

sortium with different core competencies in the field of vehicle technologies, political recommendations, the integration of electric vehicles in the power grid and renewable energies has developed a roadmap within the framework of this project that shall build the basis for political decisions. The core of this work contains an overview of the technical challenges that can occur in combination with a massive integration of renewable energies, wind power in particular, and electric vehicles, indenpendently of each other. Subsequently the possible solutions by combining the to technologies are described and the necessary technical network expansions are pointed out.

### **Contact**

Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz  
szczechowicz@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94916

Thomas Pollok, M. Sc.  
pollok@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94958

Dipl.-Ing. Claas Matrose  
matrose@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94912

# Prognose von Betriebsmittelstörungen m2M-Modell

*Angesichts des wachsenden Kostendrucks müssen Betriebsmittel heute noch besser ausgenutzt werden. Der Beitrag befasst sich daher mit der Nutzung von historischen Informationen, die im Hinblick auf die Modellierung des Betriebsmittelverhaltens genutzt werden, um neue Erkenntnisse über den Einfluss einer IH-Maßnahme auf das Verhalten von Betriebsmitteln abzuleiten. Somit lässt sich für jedes Betriebsmittel einer Schaltanlage eine Strategie ableiten, welche hinsichtlich Kosten und/oder Betriebsmittelqualität optimiert werden kann.*

## Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein Verfahren entwickelt, das, basierend auf Instandhaltungsinformationen und Expertenwissen, einen möglichen Instandhaltungsverzug berechnet und dessen Auswirkungen auf das Betriebsmittelverhalten bewertet. Innerhalb des Verfahrens beruhen die benötigten Informationen auf Betriebsdaten, die Störungen und Schäden umfassen. Eine Störung beschreibt dabei ein Ereignis, das während des Betriebes aufgetreten ist (= Major Failure) und ein Schaden beschreibt eine Unregelmäßigkeit, die während einer Instandhaltungsmaßnahme inspiert wurde (= minor failure). Das Verfahren kann in die folgenden drei Schritte aufgeteilt werden:

- Berechnung einer Modellkurve zur Beschreibung des Störungsgeschehens bei aktueller IH-Strategie
- Aufbereitung von Instandhaltungsinformationen zur Generierung von Schadensdaten
- Anwendung des m2M-Modells zur Bewertung einer veränderten Instandhaltungsstrategie

In diesem Beitrag liegt der Fokus auf den beiden letzten Schritten, da zur Berechnung von Modellkurven schon verschiedene Ansätze bekannt sind [2,5].

## Datenbasis

Grundlage für die Analyse und Auswertungen sind die am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen (IFHT) vorhandenen Betriebsmitteldaten, die von deutschen Netzbetreibern zur Verfügung gestellt wurden. Sie umfassen im Wesentlichen detaillierte Informationen zu den Betriebsmitteln, sowie digitale Störungs- und Instandhaltungsdaten für bestimmte Netzbereiche der Hoch- und Höchstspannungsebene. Digital verfügbare Informationen sind in Tabellenform übergeben (Datenstand: August 2008) und in eine relationale Datenbank - namens OCEAM - integriert worden, wobei Inkonsistenzen manuell korrigiert, fehlende Daten ergänzt sowie zusätzliche Informationen hinzugefügt wurden. Abb. 1 stellt den Zugriff auf die Datenbank schematisch dar.

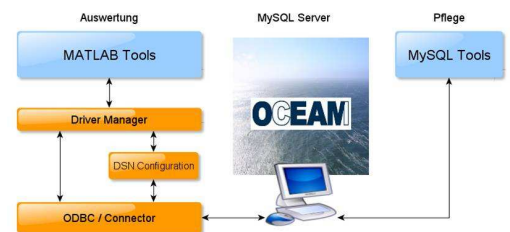


Abb. 1: Zugriff auf die Datenbank OCEAM

OCEAM ist eine auf einem MySQL-Server basierende Datenbank, auf die über eine ODBC-Schnittstelle von verschiedenen Anwendungen (z.B. MATLAB oder Microsoft Access) zur Auswertung der Da-



ten zugegriffen werden kann. Im Hinblick auf die Pflege der Datenbank ist es vorteilhaft direkt mit SQL-Software (z.B. SQL Maestro oder EMS SQL Manager) auf den Server zuzugreifen, um die Datenbank zu administrieren.

### Störungsinformation

Die vorhandenen Störungsinformationen in OCEAM können typspezifisch ausgewertet werden. Im Gegensatz zu vielen öffentlich verfügbaren Statistiken (z.B. FNN) kann hier auch ein Bezug zum Alter bzw. zur Betriebszeit hergestellt werden. Voraussetzung ist jedoch die Kenntnis über das entsprechende Mengengerüst zum Störungszeitpunkt [4]. Alle Störungseinträge in OCEAM können zusätzlich nach

- Isoliermittel,
- Antrieb,
- Steuerung,
- Hochspannung und
- Sonstiges

differenziert werden. Weiterhin besitzt jeder Störungseintrag einen so genannten Störungstext, der gegebenenfalls ausführlichere Informationen zu Ursache oder gestörten Bauteilen beinhaltet.

### Schadensinformation

Die verfügbaren Informationen aus der Instandhaltung basieren auf den Ergebnissen von digitalisierten Instandhaltungsprotokollen (Inspektionen und Wartungen), aus denen die gewünschten Schadensinformationen gewonnen werden. Da nicht zu jeder durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme das entsprechende Ergebnisprotokoll verfügbar ist, wurden zusätzlich einige Ergebnisse synthetisch generiert [1]. Die auswertbaren Wartungsprotokolle von Leistungsschaltern basieren auf 1963 Datensätzen.

Von diesen Protokollen - die zuvor lediglich in Papierform verfügbar waren - hat das IFHT über 1000 Protokolle in die Datenbank eingepflegt. Damit konnte die Datenbasis für die Schadensanalyse wesentlich erweitert werden. Bei der Aufbereitung von IH-Informationen werden ausgefüllte Instandhaltungsprotokolle im Hinblick auf eine Interpretation von erkannten Schäden bewertet. Demzufolge werden alle Protokollpunkte auf ihren Informationsgehalt untersucht. Das Ergebnis jedes Protokollpunkts kann somit lediglich zu drei Aussagen führen (siehe Abb. 2):

- O.K - Es ist kein Schaden vorhanden. Das Betriebsmittel ist bezogen auf diesen Punkt in Ordnung.
- Schaden - Es ist ein Schaden vorhanden. Das Betriebsmittel ist bezogen auf diesen Punkt nicht in Ordnung.
- Unbekannt - Der Protokollpunkt erlaubt keine Interpretation.

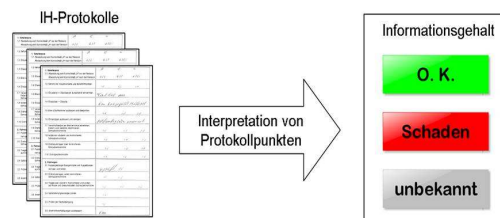


Abb. 2: Interpretation der IH-Protokolle

Um die Ergebnisse der Schadensanalyse besser mit einander vergleichen zu können und zusätzlich die räumliche (Schaltgeräte-ID) und zeitliche (Betriebsjahr) Lage direkt erkennbar zu machen, werden die Ergebnisse für jedes Protokoll in Form von sogenannten Bitmasken gespeichert. Abb. 3 veranschaulicht die Bitmasken in einer dreidimensionalen Darstellung. Jedem Schadenbit (hier: Lackschaden, Porzellanschaden, Steuerbefehl und SF6-Druck) wird somit eine Bitwertigkeit zugeordnet. Aus jedem Protokoll entsteht somit eine Art individueller Zustandsvektor (z-Achse) für einen

bestimmten Schalter (Leistungsschalter ID) zu einem bestimmten Zeitpunkt (Betriebsjahr bzw. Zeitpunkt der IH-Maßnahme). Mit Hilfe der Schadenbits können außerdem die relativen Häufigkeiten der entdeckten Schäden berechnet werden. Dabei kann zum Beispiel auch zwischen der ersten und zweiten Maßnahme unterschieden werden.

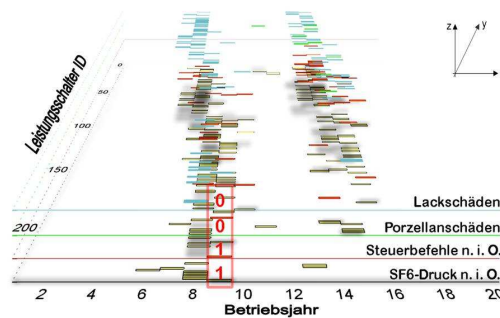


Abb. 3: Visualisierung der Bitmasken

## Entwicklung des m2M-Modells

Um den Einfluss einer veränderten Instandhaltungsstrategie auf das Betriebsmittelverhalten bewerten zu können, wurde das sogenannte m2M-Modell entwickelt. Erste Ergebnisse des Modells wurden in [1,3] veröffentlicht. In diesem Modell werden durch einen möglichen Verzug einer IH-Maßnahme die üblicherweise entdeckten Schäden nicht behoben und können sich in der Folgezeit (Zeit nach der ursprünglich geplanten IH-Maßnahme) zu einer Störung entwickeln. Somit können die ermittelten Schadenshäufigkeiten einer IH-Maßnahme als Ansatz für die zukünftige Störungsentwicklung verwendet werden und somit das Alterungsverhalten negativ beeinflussen. Das prognostizierte Störungsaufkommen nach Überschreitung des üblichen Instandhaltungsintervalls ergibt sich nun als Überlagerung des bisher errechneten Störungsgeschehens (Ergebnis aus Schritt 1 des Verfahrens) mit den aufgrund von Schäden entstehenden zusätzlichen Störungen.

Der Übergangsprozesse von einem Schaden zu einer Störung nicht-regenerativ und zeitabhängig. Das heißt, wenn ein Schaden zu einer Störung geführt hat, ist der Schaden nicht mehr vorhanden, da aufgrund des Störungseintritts eine Instandsetzungsmaßnahme durchgeführt wird. Abb. 4 zeigt ein Beispiel für eine bis 40 Jahre linear ansteigende Störungswahrscheinlichkeit. Demzufolge hat der nicht behobene Schaden spätestens nach 40 Jahren mit Sicherheit zu einer Störung geführt. In diesem einfachen Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Schaden keine besondere zeitliche Entwicklung aufweist. Basierend auf Expertenwissen kann jedoch für jeden Schadentyp eine spezifische Entwicklung angenommen werden [1]. Beispielsweise können für Schäden aufgrund von Korrosion oder Undichtigkeiten schnell oder langsam ansteigende Exponentialverteilungen verwendet werden. Weiterhin wird deutlich, dass sich aufgrund des nicht-regenerativen Prozesses in diesem Beispiel (s. Abb. 4) schon nach etwa 7,5 Jahren die Hälfte aller Schäden zu Störungen entwickelt hat.

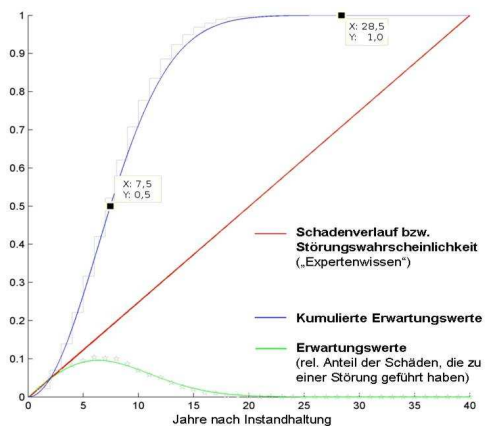


Abb. 4: Übergangswahrscheinlichkeit (bsp.)

## Auswertung und Verifikation

Anhand eines bestimmten Leistungsschalter-Typs (123 kV Pufferschalter mit Hydraulikantrieb, Abk. 1PH1a) wird das Verfahren exemplarisch angewendet

und diskutiert, wobei an dieser Stelle auf eine Schadens- und Störungsanalyse nicht näher eingegangen wird.

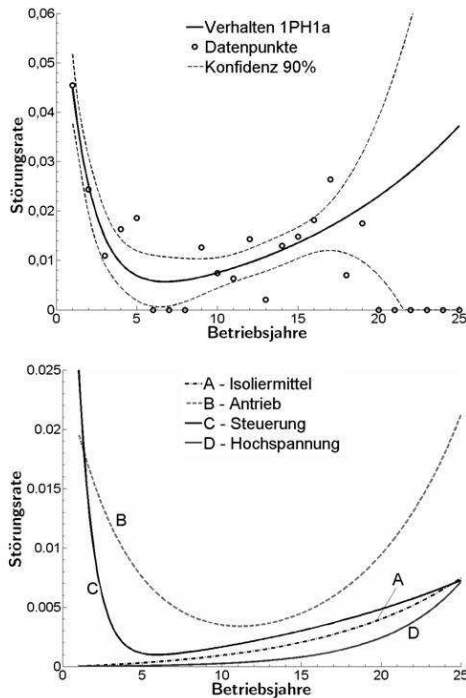


Abb. 5: Störungsgeschehen des Leistungsschalters 1PH1a - gesamt (oben) und unterteilt nach Komponenten (unten)

Mit Hilfe der vorhandenen historischen Störungsdaten in OCEAM ist es möglich, das typspezifische Alterungsverhalten abzuleiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Störungsdaten lediglich das vergangene Verhalten darstellen. Das zukünftige Verhalten des Betriebsmittels kann jedoch teilweise mit Hilfe der ermittelten Modellfunktion extrapoliert und abgeschätzt werden [2]. Abb. 5 zeigt beispielhaft das Verhalten des betrachteten Schalters. In diesem Fall liegen Störungsdaten für etwa 20 Betriebsjahre vor, was auch durch das Konfidenzintervall deutlich wird. Es ist es möglich, anhand der Komponenten die Schwachstellen des Schalters zu analysieren. Ohne weiter die Störungsanalyse zu vertiefen, spiegeln die Modellfunktionen das Verhalten des Schalters 1PH1a bei derzeitig angewendeter Instandhaltung wider.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines Forschungsprojektes hat das Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen (IFHT) etwa 1000 Wartungsprotokolle in eine Datenbank eingepflegt. Basierend auf diesen und weiteren historischen Störungs- und Instandhaltungsinformationen, wurden benötigte Informationen in die Datenbank OCEAM zusammengeführt. Die über einen SQL-Server abrufbaren Daten bilden für umfassende Auswertungen eine sehr gute Datenbasis. Weiterhin ist im Rahmen des Projektes ein 3-stufiges Verfahren zur Bewertung von Instandhaltungsmaßnahmen entwickelt worden. Innerhalb des Verfahrens sind zahlreiche Instandhaltungsprotokolle in Bezug auf dessen Informationsgehalt systematisch ausgewertet worden. Heute stehen sogenannte Bitmasken, die die inspezierten Schäden an Betriebsmitteln widerspiegeln, in OCEAM zur weiteren Nutzung zur Verfügung steht. Das integrierte m2M-Modell innerhalb des Verfahrens ermöglicht die Berechnung des Störungsaufkommens in verschiedenen Szenarien, in dem ein möglicher Instandhaltungsverzug simuliert wird. Hierdurch können Instandhaltungsmaßnahmen aus technischer Sicht bewertet werden, in dem Ihr Einfluss auf das zukünftige Verhalten der Betriebsmittel untersucht wird. Das m2M-Modell zeigt sich somit als hilfreiches Werkzeug, wobei gut protokollierte Resultate von IH-Maßnahmen vorausgesetzt werden müssen. Zusätzlich können die neu gewonnenen Alterungsmodelle für eine Asset Simulation zur Abschätzung der Langzeit-Investitionen nützlich sein. In zukünftigen Berechnungen wird dieses Modell im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf weitere Anwendungen untersucht. Mit einem besseren Wissen über die Parametrierung des Modells könnten weitere Szenarien im Zusammenhang mit einer veränderten IH-

Strategie simuliert werden, um dessen Einfluss auf das Betriebsmittelverhalten besser abbilden zu können. Darüber hinaus ist es möglich, nicht nur zeitliche, sondern auch inhaltliche Veränderungen von Instandhaltungsmaßnahmen zu bewerten und damit die Effizienz einer Maßnahme zu steigern.

## Quellen

- [1] S. Federlein, C. Hille, A. Schnettler, A. J. Gaul: *New methods to assess the impact of maintenance and the condition of network*, CIREN 2009, Session 1, No. 0870; Prague 2009
- [2] C. Neumann, G. Balzer, S. Federlein, B. Rusek, J. Schneider, A. Schnettler, C. Schorn, U. Zickler: *Strategy for End of Life Assessment for High Voltage Circuit Breakers*, CIGRE Session, A3-101; Paris 2008
- [3] S. Federlein, C. Hille, A. Schnettler, A. J. Gaul: *Prognose des Störungsaufkommens eines 123 kV Leistungsschalters bei längeren Wartungszy-*

*klen*, Internationaler VDE-Kongress, ETG-P1; München 2008

- [4] S. Federlein, J. Schneider, A. Schnettler, U. Zickler: *Asset management processes for future substation technologies*, CIGRE SC B3 Colloquium, PS1 Substation 2020; Berlin 2007
- [5] G. Balzer, D. Drescher, F. Heil, P. Kirchesch, R. Meister, C. Neumann: *Evaluation Of Failure Data Of HV Circuit-Breakers For Condition Based Maintenance*, Cigre Session, A3-305; Paris 2004.

## Kontakt

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

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

# Prognosis of asset-behavior m2M-model

*Increased cost-pressure, also due to the launched incentive regulation, forces grid operators to operate their assets to full capacity. This article deals with the usage of historical information in terms of modeling asset-behavior and how the latter influenced by maintenance. Doing this, an optimal strategy with regard to costs and/or quality can be derived. An example of a circuit breaker demonstrates the resultant ageing behaviour in case of modified maintenance cycles.*

## Introduction

This article deals with new methods to assess the impact of maintenance on the ageing behaviour of network components. On the basis of data provided by network operators, this article examines the influence of a deferred maintenance cycle on ageing behaviour. Based on heuristic knowledge, the progression of an inspected damage to an occurrence of a failure is simulated with probability calculation tools. Knowledge about the influence of changed maintenance strategies ideally enables network operators to reduce uncertainty in future investment and operating costs. Thus, a new model - called m2M-model - with the ability to simulate the progression of an inspected damage to a failure was developed during a research projekt. In this case a minor failure describes a defect, which was found during maintenance procedures. A major failure is an event which requires an immediate shut down when equipment is in service. The complete method can be divided into three phases:

- Calculation of current failure frequencies (Reference-Scenario)
- Preparation of maintenance information for the generation of minor failure data
- application of the m2M-model for the assessment of modified maintenance-strategies

In this article the focus is on the last two steps, because the calculation of failure frequencies for the reference scenario has been published previously [2,5].

## Database

The database - named OCEAM - at the Institute for High Voltage Technology (IFHT) comprises data of an important European grid operator. It contains detailed information of all assets in high- and ultra-high-voltage substations (except transformers) and the related failure and maintenance data.

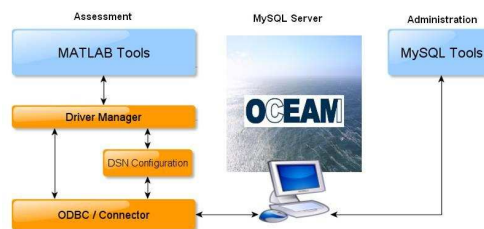


Fig. 1: Access to database OCEAM

The access to this database is presented in fig. 1. OCEAM is based on a MySQL-Server structure and can be accessed by an ODBC-interface using various applications (e.g. MATLAB or Microsoft Access).

## Major failure information

Failure data in OCEAM can be assessed with regard to the type of asset. Mixing of different technologies should be avoided. In

case of circuit-breakers (c.b.) for example it is important to sort them not only according to their quenching technology. Drive type and manufacturer also have to be considered. In contrast to other public statistics (such as FNN), this can additionally be done related to age or service-time, which is an important advantage. A pre-condition for these assessments is the presence of the quantity structure at failure occurrence time [4]. All failure data can be assigned to a certain component of the equipment. For c.b. these are:

- isolating medium,
- drive,
- control mechanism,
- high-voltage part,
- others

### Minor failure information

Operated maintenance measures are the most important influencing factor on the condition of equipment. Therefore all gathered information during these procedures is precious for further assessment. The current maintenance strategy for c.b. in the considered network comprises two main measures: Visual inspection and servicing. Both procedures are based on maintenance protocols. As not all protocols were found, synthetic information was generated [1]. Every protocol consists of several single points. Each point can be interpreted in only three ways:(see Fig. 2):

- O.K - no damage. This component of the equipment has no defect.
- Damage - There is a defect. This component of the equipment has a defect.
- Unknown - Missing information

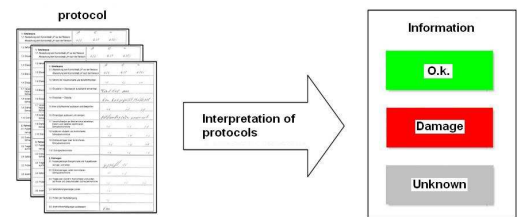


Fig. 2: Interpretation of servicing protocols

To enable a comparison and for a visualization of damaged components in relation to service-age and c.b. ID, results of each protocol are transformed into so-called bitmasks and stored in bit-vectors. Fig. 3 illustrates these vectors in three dimensions. Each bit represents one point of the servicing protocols. Thus, each protocol is converted into an individual condition-vector (z-axis) for a specific c.b. (ID) at a certain service time.

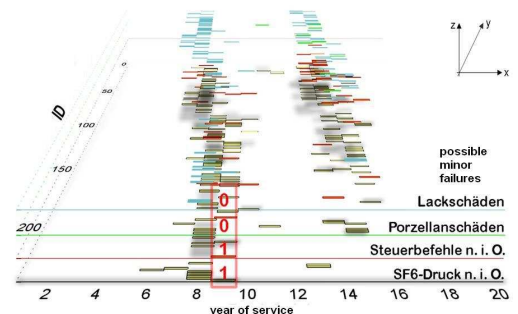


Fig. 3: Visualization of bit-vectors

### Development of m2M-model

To consider the whole life time of network components, it is necessary to extrapolate the available maintenance data. This is the main task of the m2M-model. First results were already published in [1,3]. As a result of the deferred servicing, the damage (or minor failure) which is normally discovered is not remedied and can subsequently develop into a (major) failure occurrence. The estimated failure occurrence after the normal service interval is exceeded as a superposition of the previously calculated failure occurrence with the additional

failures which occur as a result of damage that is not remedied. These additional failures are generated synthetically applying the m2M-model. Eight different probability functions for the progression from damage to failure were connected to the detected damage classes. An inspection measure can detect 20 out of 46 damage classes. Thus inspections are also taken into account during the simulation process.

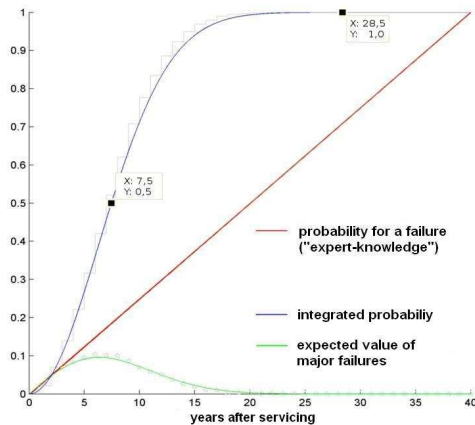


Fig. 4: Probability for the progression in m2M (e.g.)

Fig. 4 shows an example of a linear increasing probability over 40 years. Thus, after 40 years this failure will definitely have occurred. In this simple illustration, a minor failure with no time-dependency was chosen. Based on expert-knowledge, it is also possible to assign a specific development to each failure (e.g. based on leakage rates) [1].

### Application and verification

On basis of a particular c.b. type (123 kV puffer-type circuit breaker with a hydraulic drive, abbr. 1PH1a) the method is applied exemplarily and discussed. The c.b. is one specific construction line of one manufacturer. The population in the network under consideration is about 230 units with an average age of 17 years. At this point, however, further consideration regarding the analysis

of minor and major failures is left out.

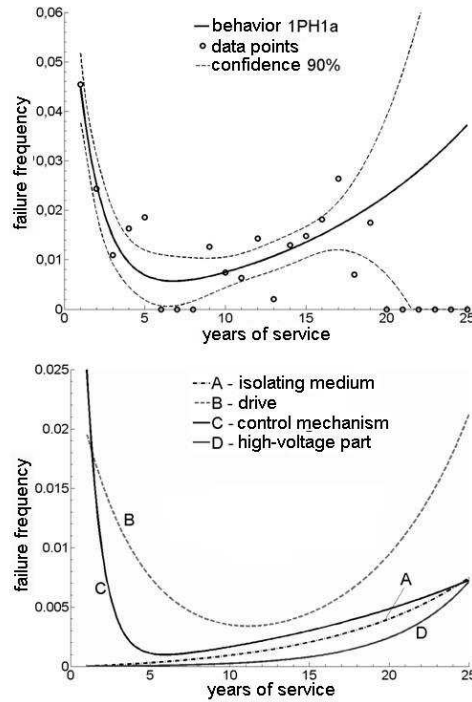


Fig. 5: Failure behaviour of c.b. 1PH1a - in total (top) and for each component (bottom)

Using historical failure statistics provided in OCEAM, the specific wear and tear characteristics can be determined for each circuit breaker type. Although failure statistics only give an indication of the wear and tear characteristics observed in the past, future behavior can be derived by extrapolation and estimation using established model-functions [2]. Fig. 5 depicts the exemplary behavior of the circuit breaker. In this case, failure statistics from approximately 20 years have been applied, which also becomes apparent in the confidence interval. By means of components, it is possible to analyze the weaknesses of the circuit breaker. Without going into further detail of failure analysis, the model-functions, indicate the behavior of the circuit breaker 1PH1a given the current maintenance strategy.

## Summary and perspective

During a research project, the IFHT at RWTH Aachen University has established a database incorporating nearly 1000 maintenance protocols. Based on these protocols and additional failure and maintenance statistics, all relevant information has been joined to form the OCEAM database. This database, which can be accessed via SQL server, provides a very good basis for comprehensive analysis. Furthermore, a 3-staged method has been developed for the evaluation of maintenance measures during the course of the research project. With this method numerous maintenance protocols have been evaluated systematically regarding their content of information. As of today, OCEAM provides so-called bitmasks, which denote the examined defects of the inspected equipment. The integrated m2M-Model allows calculating the occurrence of failures in different scenarios by simulating a potential delay of maintenance. Hereby a technical assessment of maintenance measures can be conducted by studying the effect of the equipment's future behavior. The m2M-Model proves to be a helpful tool under the premises of well documented maintenance measures. Additionally the newly gained ageing models can be utilized in order to estimate long-time investments within the scope of an Asset Simulation. In future calculations, additional applications are explored in the realm of a sensitivity analysis. With better knowledge concerning the parameterization of the model, further scenarios regarding alternative maintenance strategies could be simulated, in order to improve the representation of asset behavior. Moreover, it is possible not only to assess variations regarding maintenance intervals, but also the content of maintenance measures.

## References

- [1] S. Federlein, C. Hille, A. Schnettler, A. J. Gaul: *New methods to assess the impact of maintenance and the condition of network*, CIRED 2009, Session 1, No. 0870; Prague 2009
- [2] C. Neumann, G. Balzer, S. Federlein, B. Rusek, J. Schneider, A. Schnettler, C. Schorn, U. Zickler: *Strategy for End of Life Assessment for High Voltage Circuit Breakers*, CIGRE Session, A3-101; Paris 2008
- [3] S. Federlein, C. Hille, A. Schnettler, A. J. Gaul: *Prognose des Störungsaufkommens eines 123 kV Leistungsschalters bei längeren Wartungszyklen*, Internationaler VDE-Kongress, ETG-P1; München 2008
- [4] S. Federlein, J. Schneider, A. Schnettler, U. Zickler: *Asset management processes for future substation technologies*, CIGRE SC B3 Colloquium, PS1 Substation 2020; Berlin 2007
- [5] G. Balzer, D. Drescher, F. Heil, P. Kirchesch, R. Meister, C. Neumann. *Evaluation Of Failure Data Of HV Circuit-Breakers For Condition Based Maintenance*, Cigre Session, A3-305; Paris 2004.

## Contact

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

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



# Effekte und Wirkungsgrad von Lichtbogenenergieabsorbern in elektrischen Anlagen

Lichtbogenenergieabsorbern werden in elektrischen Anlagen eingesetzt, um im Störlichtbogenfall den Überdruck in und die Wärmebelastung von z.B. Schaltanlagenräumen zu reduzieren sowie das Austreten von Flammen und glühenden Metallspritzern zu verhindern. Die Wirkung von Lichtbogenabsorbern auf die Druck- und Temperaturbelastung in einer Schaltanlage wird mit Hilfe von CFD-(Computational-Fluid-Dynamics)-Simulationen untersucht. Der Absorber besteht aus mehreren Schichten gelochter Metallplatten. Die Druck- und Temperaturentwicklung in der Schaltanlage sowie die Effektivität des Absorbers in Abhängigkeit vom Einbauort und der Anzahl der Absorberschichten werden untersucht.

## Einleitung

Für eine optimale Nutzung von Lichtbogenabsorbern ist es sinnvoll, den Einfluss des Einbauorts und der Anzahl von Absorberschichten auf die Effektivität zu kennen. Dazu wird ein Absorber untersucht, der in einer kompakten Schaltanlage eingebaut ist. Die Schaltanlage besteht aus einem SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltgeräteraum und einem Kabelanschlussraum mit einem Druckentlastungskamin. Der Absorber befindet sich im Kamin (Abb. 1). Die Lage des Absorbers im Kamin und die Anzahl der gegeneinander versetzten Lochplatten werden variiert [1].

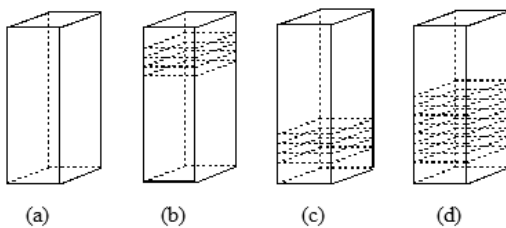


Abb. 1: Skizze der verschiedenen Anordnungen der Absorberschichten (Anzahl vier und acht) im Kamin

## Druckberechnung

Um die Wirkung des Absorbers bestimmen zu können, werden Gastemperatur und Druckanstieg im Störlichtbogenfall mit ei-

nem CFD-Programm berechnet. Die Parameter für die Druckberechnungen basieren auf einem Störlichtbogenversuch (20 kA, 1 s), der mit einem Vier-Lagen-Absorber durchgeführt wurde. Das Heißgas strömt durch eine Berstscheibe in den Kabelanschlussraum und von dort über den Kamin ins Freie.

Zur Beschreibung des Anteils  $P_{therm}$  der elektrische Leistung  $P_{el}$ , der zum Druckaufbau beiträgt, wird der thermische Transferkoeffizient  $k_p$  verwendet:

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

Der  $k_p$ -Wert hängt von mehreren Parametern wie z.B. Elektrodenmaterial, Gasart und insbesondere Gasdichte ab. Er wird durch die Anpassung von berechneten an gemessene Druckverläufe bestimmt.

Um SF<sub>6</sub>-Luft-Gemische mit sich ständig ändernder Konzentration zu berücksichtigen, müssen zuverlässige Gasdaten verwendet werden [2].

## Simulationsergebnisse

In Abb. 2 sind die berechneten Druckverläufe im Schaltgeräteraum für alle Anordnungen dargestellt (Abb. 1 (a) ohne Absorber, (b) und (c) mit Absorber oben bzw. unten im Kamin, (d) mit acht Lagen).

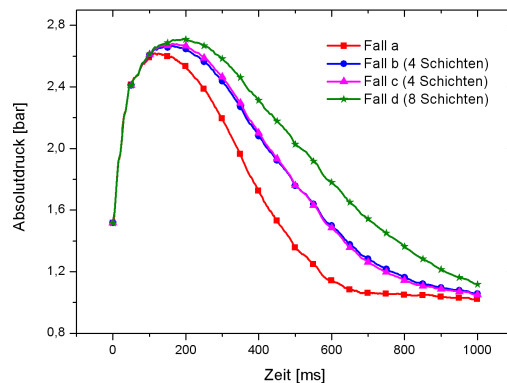


Abb. 2: Berechnete Druckverläufe im Schaltgeräteraum

Hieraus folgt, dass sich der Absorber wie ein Strömungswiderstand verhält. Je größer die Anzahl der Absorberschichten, desto höher ist der Überdruck im Schaltgeräteraum. Auf der anderen Seite verringert sich der Überdruck hinter dem Absorber bei erhöhtem Strömungswiderstand.

In Abb. 3 ist die mittlere Gastemperatur am Ausgang des Kamins für alle Anordnungen wiedergegeben.

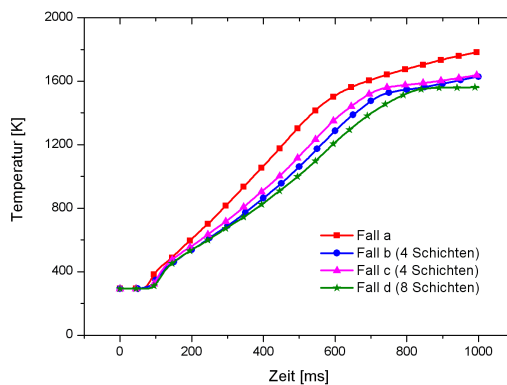


Abb. 3: Mittlere Gastemperatur am Ausgang des Kamins für alle Anordnungen

Nach Abb. 3 wird am Kaminausgang eine Temperaturverringerung aufgrund der Wärmeaufnahme durch den Absorber beobachtet. Je höher die Anzahl der Metallplatten, desto niedriger ist die Gastemperatur.

Um die Wirkung der Wärmeaufnahme zu quantifizieren, wird ein Absorberwirkungsgrad  $\eta$  eingeführt. Er ist das Verhältnis

der absorbierten Wärmeenergie  $\Delta Q$  zum Anteil der Lichtbogenenergie  $W_{therm}$ , der zum Druckaufbau beiträgt:

$$\eta = \frac{\Delta Q}{W_{therm}}$$

Bei bekannten Temperaturentwicklungen der Metallplatten wird die absorbierte Wärmeenergie anhand der Masse und der spezifischen Wärme der Platten ermittelt.

Es zeigt sich, dass die Gastemperatur und damit der Temperaturgradient desto größer ist, je näher sich der Absorber an der Wärmequelle (Lichtbogenort) befindet. Dieses resultiert in einer besseren Wärmeleitung zwischen Heißgas und Absorber. Mit zunehmender Anzahl der Absorberschichten aufgrund der höheren Wärmekapazität erhöht sich der Absorberwirkungsgrad. Der Wirkungsgrad einer einzelnen Schicht ist umso geringer, je weiter die Schicht von der Wärmequelle entfernt ist. Dieses ist auf den verringerten Temperaturgradienten mit zunehmendem Abstand vom Lichtbogen zurückzuführen.

## Quellen

- [1] K. Anantavanich, et al.: *Effect of arc energy absorber in a wind turbine switch unit*, IEEE Trans. Power Del., TPWRD-00307-2009, im Druck
- [2] K. Anantavanich, et al.: *Modelling of SF<sub>6</sub>-air mixtures in MV switchgear during internal arcing using a CFD tool*, XV<sup>th</sup> Int. Symp. on High Volt. Eng., Ljubljana, Aug. 2007, T3-282

## Kontakt

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

# Effect and efficiency of arc energy absorber in electrical installations

*Arc energy absorbers are used in electrical installations to reduce overpressure and thermal stress during internal arcing in relief rooms e.g. installation rooms and to avoid the escape of flames and glowing particles. The effect of an arc energy absorber installed in a switch unit on pressure and temperature rise has been investigated by CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations. The absorber is composed of several layers of perforated metal plates. In order to optimize the use of the absorber, pressure and temperature developments within the switch unit as well as the absorber efficiency are investigated depending on the location of the absorber and numbers of metal plates.*

## Introduction

For an efficient application of arc absorbers, it is useful to know the influence of absorber location and the number of absorber layers on temperature and pressure rise. For this purpose, the effect of an arc absorber installed in a compact switch unit has been investigated. The switch unit under consideration consists of an SF<sub>6</sub>-insulated switch compartment and an attached cable compartment with a chimney. The absorber consisting of several layers of perforated metal plates staggered to each other is installed in the chimney (Fig. 1). The location of the absorber within the chimney and the number of metal plates are varied [1].

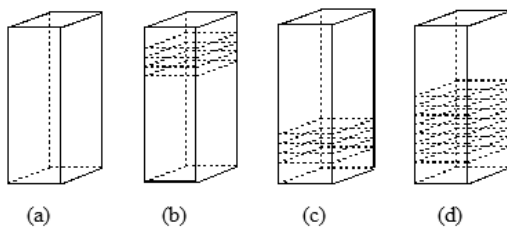


Fig. 1: Sketch of different locations and numbers of the absorber layers (four and eight) in the chimney

## Pressure calculation

To be able to determine the effect of the absorber, gas temperature and pressure rise during internal arcing are calculated using

a CFD solver. The conditions for the calculations are taken from an arc test performed with a four-layer absorber. During the test, a three-phase arc fault (20 kA, 1 s) is ignited in the switch compartment. The hot gas escapes via a rupture disc into the cable compartment and from there through the chimney into the surroundings.

The thermal transfer coefficient  $k_p$  is used to describe the portion  $P_{therm}$  of the electric arc power  $P_{el}$  leading to overpressure:

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

The  $k_p$  value depends on several parameters such as electrode material, kind of gas, and particularly gas density. It is determined by fitting calculated pressure developments to experimental ones.

In order to consider SF<sub>6</sub>-air mixtures with continuously varying concentration due to the mixing of exhausted SF<sub>6</sub> from the switch compartment with air in the cable compartment, reliable gas data have to be used [2].

## Simulation results

In Fig. 2, the calculated (absolute) pressure developments in the switch compartment for all cases are presented (Fig. 1 (a) without absorber, (b) and (c) with absorber at the top and at the bottom of the chimney, (d) with eight layers).

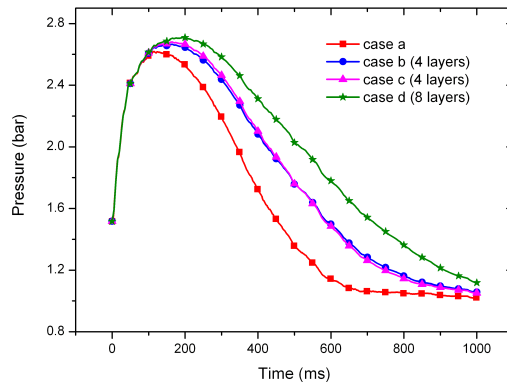


Fig. 2: Calculated pressure development in the switch compartment for all cases under consideration

From this it follows that the absorber acts as flow resistance. The higher the number of absorber layers, the higher the overpressure in the switch compartment. On the other hand, the overpressure behind the absorber is reduced due to the enlarged flow resistance.

In Fig. 3, the mean gas temperature at the exit of the chimney for all cases is depicted.

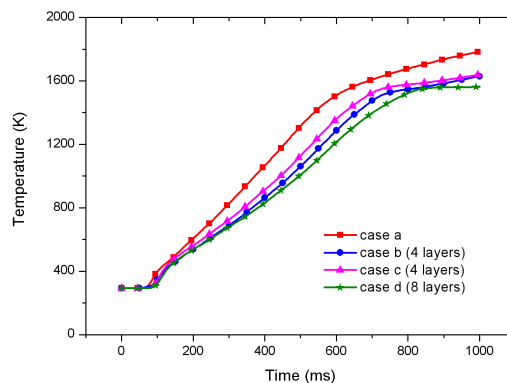


Fig. 3: Mean gas temperature at the exit plane of the chimney for all cases

According to Fig. 3, a temperature reduction is observed behind the absorber due to the heat accumulation of the absorber. The higher the number of metal plates, the lower the gas temperature.

In order to quantify the effect of heat ab-

sorption, the absorber efficiency  $\eta$  is introduced. It is defined as the ratio of absorbed heat energy  $\Delta Q$  to the part of arc energy leading to overpressure  $W_{therm}$ :

$$\eta = \frac{\Delta Q}{W_{therm}}$$

With known temperature developments of the metal plates, the absorbed heat energy is determined using the mass and the specific heat of the plates.

It has been shown that the closer the absorber to the heat source (arc location), the higher the gas temperature and consequently the temperature gradient and thus heat conduction. Furthermore, the efficiency of the absorber increases with the number of absorber layers due to increased heat capacity. However, the efficiency of a single layer becomes lower, the farther the layer from the heat source. This is attributed to reduced temperature gradients with increased distance from the arc.

## References

- [1] K. Anantavanich, et al.: *Effect of arc energy absorber in a wind turbine switch unit*, IEEE Trans. Power Del., TPWRD-00307-2009, accepted for publication
- [2] K. Anantavanich, et al.: *Modelling of SF<sub>6</sub>-air mixtures in MV switchgear during internal arcing using a CFD tool*, XV<sup>th</sup> Int. Symp. on High Volt. Eng., Ljubljana, Aug. 2007, T3-282

## Contact

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

# Ökoeffizienz von Flexibilisierungsmaßnahmen in Energieversorgungsnetzen unter Berücksichtigung der Integration von Windenergie

Dissertation: Dipl.-Ing. Uwe Macharey

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juni 2009

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler  
Univ.-Prof. Dr. ir. Rik W. De Doncker

*Der Einsatz von Maßnahmen zur Steigerung der Dynamik von elektrischen Energieversorgungssystemen (Flexibilisierungsmaßnahmen) wird unter anderem notwendig, weil die regionale Windenergieeinspeisung die regionale Verbraucherlast zum Teil deutlich übersteigt, so dass der Windstrom aus den Regionen mit überschüssiger Energie exportiert und in lastferne Gebiete transportiert werden muss. Im Rahmen der Dissertation wird eine abstrakte Methode zur Bewertung der Ökoeffizienz des Einsatzes von Flexibilisierungsmaßnahmen in elektrischen Energieversorgungssystemen entwickelt und exemplarisch angewendet.*

## Einleitung

Die Auswahl geeigneter Standorte für Windenergieanlagen (WEA) hängt häufig nicht von der regionalen Verbraucherstruktur ab. Vielmehr dient das Winddargebot als Orientierung. Die Lastdichte in den betroffenen Regionen liegt zum Teil deutlich unter der installierten Leistung. Die Umsetzung des EEG sieht die vollständige Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien vor. Daher kommt es bei starker Einspeisung der WEA zu einer Umkehrung des Lastflusses und zur Rückspeisung ins Hoch- bzw. Höchstspannungsnetz. Der als notwendig identifizierte Netzausbau kann mit der Anschlussrate von WEA nicht Schritt halten. Ein wesentliches Hemmnis ist, dass der Netzausbau bei Teilen der Gesellschaft auf Kritik und Widerstand stößt. Vor dem Hintergrund der Vermeidung von Netzengpässen werden daher neben dem Netzausbau und der

übergangsweise zulässigen Drosselung der Windenergieeinspeisung (Erzman) weitere Flexibilisierungsmaßnahmen wie der Einsatz eines Freileitungs-Monitoring-Systems (FLM) und der Einsatz von Hochtemperaturfreileitungsseilen (ACCR) diskutiert. Diese Maßnahmen werden im Rahmen der Dissertation mit der entwickelten Bewertungsmethode vergleichend analysiert.

## Methodisches Vorgehen

Neben der Herleitung einer Methode zur Ökoeffizienzbewertung der Flexibilisierungsmaßnahmen liegen Schwerpunkte auf der Beschreibung des entwickelten Modellsystems und der Analyse des Versorgungsgebiets. Hierbei werden strukturelle und technische Eigenschaften des Referenznetzes, die Laststruktur sowie die Entwicklung der installierten WEA-Leistung aufgezeigt. Weiterhin wird die Festlegung auf drei verschiedene Bewertungsstandorte erläutert,

die sich durch ihr Winddargebot unterscheiden. Zur Herleitung der Bewertungsmethode wurde zunächst aufgezeigt, welche technischen Kenngrößen vorbereitend für die Ökoeffizienzanalyse notwendig sind; die eingespeiste Energie in das 110-kV-Verteilungsnetz, die Netzverluste sowie die in die 380-kV-Ebene exportierte WEA-Energie. Für die monetäre Bewertung wurden in der Arbeit die Barwerte der Investitionskosten zur Umsetzung der jeweiligen Flexibilisierungsmaßnahme, die jährlichen Wartungs- und Verlustkosten sowie die Kosten für Entschädigungszahlungen infolge des Einsatzes von Erzm an identifiziert, d. h. ausschließlich Kosten, die innerhalb des Bilanzraums direkt durch die Umsetzung der jeweiligen Maßnahme auftreten. Die Diskussion zur ökologischen Bewertung zeigte, dass im Rahmen der Ökobilanzierung lediglich eine direkte Bewertung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Treibhausgas)-Emissionen erforderlich ist. Weitere Umweltwirkungen müssen durch eine Umweltverträglichkeitsprüfung projektspezifisch überprüft werden. Diese ist Teil eines Planfeststellungsverfahrens und wurde in der Dissertation über den Realisierungszeitpunkt der Maßnahmen als Sensitivität berücksichtigt. Berücksichtigt wurden Emissionen, die durch die Deckung der Verbraucherlast, die infolge von Netzverlusten und des verstärkten Teillastbetriebs thermischer Kraftwerke entstehen sowie Emissionen infolge von ausbleibendem Windenergieexport.

### Beispielhafte Ergebnisse

Die exemplarischen Untersuchungen erfolgten für die genannten Bewertungsstandorte mit einem im Rahmen der Dissertation entwickelten, beispielhaften 110-kV-Netz und werden hier anhand von ausgewählten Ergebnissen für einen windstarken Standort vorgestellt. Einleitend zeigt Abb. 1 den Vergleich der insgesamt in das 110-kV-Netz eingespeisten

Energie in Abhängigkeit von den verschiedenen Maßnahmen zur Steigerung der Dynamik und dem Umsetzungszeitpunkt.

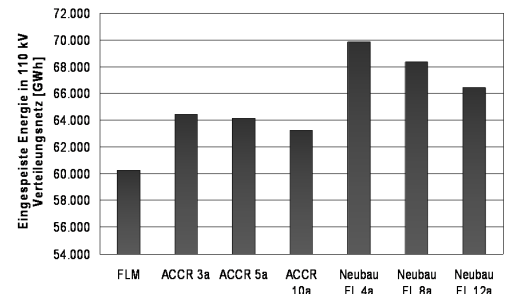


Abb. 1: Ins 110-kV-Netz eingespeiste Energie

Die eingespeiste Menge Windenergie steigt beim Neubau wegen der höheren Übertragungskapazität; weniger Erzm an ist notwendig. Gleichzeitig kann mehr überschüssige WEA-Energie in die überlagerte 380-kV-Höchstspannungsebene exportiert werden (Abbildung 2).

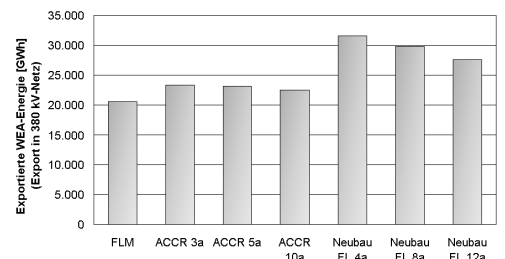


Abb. 2: Exportierte WEA-Energie

Die ökologischen Untersuchungen zeigen, dass der wesentliche Unterschied der Treibhausgasemissionen aus dem Export von Windenergie resultiert (Abbildung 3).

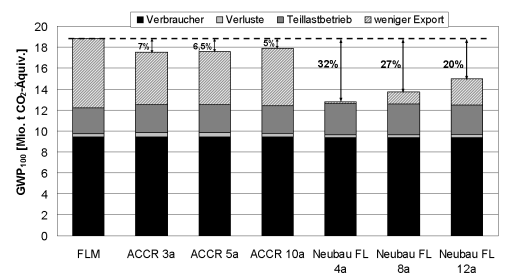


Abb. 3: Gesamtemissionen

Die Treibhausgasemissionen bei der Umsetzung des Freileitungs-Monitorings sind mit 18,8 Millionen t CO<sub>2</sub>-Äquivalent 7,5% höher als beim Einsatz von ACCR-Freileitungsseilen nach 3 Jahren und um gut 47% höher als beim Neubau einer Freileitungstrasse nach 4 Jahren.

Die Ergebnisse der ökonomischen Untersuchung werden maßgeblich durch Entschädigungszahlungen für nicht einspeisbare Windenergie beeinflusst (Abbildung 4).

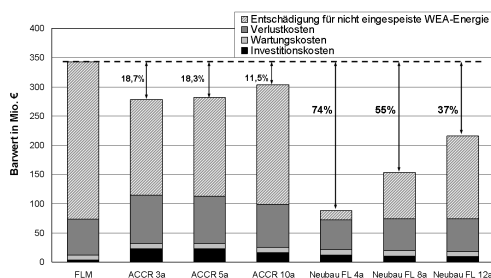


Abb. 4: Gesamtbarwerte der Kosten

Die Barwerte der Kosten der Szenarien von FLM und Erzman zeigen einen Anteil der Entschädigungszahlungen von etwa 79%. Bei den ACCR-Szenarien beträgt der Anteil mindestens ca. 59%.

Die Ökoeffizienzbewertung führt die Ergebnisse der monetären Bewertung mit denen der ökologischen Bewertung zusammen. Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Ökoeffizienz der verschiedenen bewerteten Maßnahmen zur Erhöhung der Übertragungskapazität im Versorgungsgebiet.

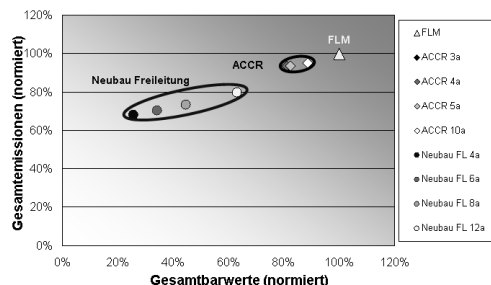


Abb. 5: Vergleich der Ökoeffizienz der Maßnahmen zur Erhöhung der Übertragungskapazität; bezogen auf FLM;

Zu berücksichtigen ist, dass die Ergebnisse auf die maximalen Emissionen und den maximalen Gesamtbarwert bezogen sind. Offensichtlich ist der Neubau einer Freileitungstrasse nach 4 Jahren ökoeffizienter als die anderen Szenarien.

### Zusammenfassung

Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen zur Bewertung alternativer Übertragungstechnologien, die ausschließlich konkrete Vergleiche der Investitionskosten oder der entstehenden Umweltwirkungen vor dem Hintergrund der Übertragungskapazität verfolgten, wurde in dieser Arbeit eine abstrakte Methode zur Bewertung der Ökoeffizienz des Einsatzes von Flexibilisierungsmaßnahmen in elektrischen Energieversorgungssystemen entwickelt. Die Anwendung der Bewertungsmethode zeigte, dass der Neubau einer Freileitungstrasse unabhängig vom betrachteten Standort die höchste Ökoeffizienz aufweist. Sie variiert jedoch zum Teil signifikant mit dem Realisierungszeitpunkt des Neubaus. Die angenommene Realisierung nach 12 Jahren muss hierbei keine Worst-Case Annahme sein. Falls im Betrachtungszeitraum kein Neubau möglich ist, weisen die ACCR-Szenarien eine höhere Ökoeffizienz im Vergleich zum Freileitungs-Monitoring auf. Zu berücksichtigen ist, dass der skizzierte Vorteil bei der Kostenbewertung ausschließlich auf politisch motivierten Kosten basiert. Ein Wegfall der Entschädigungszahlungen führt unter Berücksichtigung der monetären und ökologischen Bewertung bei gleicher Gewichtung zu einer geringeren Ökoeffizienz der ACCR-Leiterseile im Vergleich zum Freileitungs-Monitoring.

### Kontakt

Dr.-Ing. Uwe Macharey  
uwe.macharey@bet-aachen.de  
+49 241 47062-453

# Analyse der elektrischen Durchschlagmechanismen in syntaktischen Schäumen

Dissertation: Dipl.-Ing. Alexander Tröger

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Juli 2009

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler

Univ. Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

*Bei der Entwicklung von Geräten und Anlagen der Hochspannungs- und Energietechnik ist neben den Anforderungen in Bezug auf Zuverlässigkeit, Funktionalität und langer Lebensdauer auch eine möglichst leichte und kompakte Bauweise ein immer wichtiger werdendes Kriterium. Die dazu notwendige Gewichtseinsparung wird häufig durch Verwendung eines möglichst leichten und leistungsfähigen Isoliersystems zu erzielt. Für solche Systeme bietet sich der Einsatz von syntaktischen Schäumen an. Die Herstellung dieses Materials erfolgt durch das Einbringen von gasgefüllten Hohlkugeln in ein geeignetes Polymer. In dieser Arbeit werden die elektrischen Eigenschaften eines syntaktischen Schaums auf Basis von Epoxidharz als Matrix und Glashohlkugeln als Füllstoff für den Kurzzeitbereich ermittelt und untersucht, welche Effekte sich bei einer gezielten Variation verschiedener Herstellungsparameter ergeben. Schwerpunkt der Untersuchungen sind die elektrische Festigkeit und das Teilentladungsverhalten des Schaums. Die gesammelten Erkenntnisse werden abschließend dazu verwendet, um ein heuristisches Modell für den elektrischen Durchschlag im Kurzzeitbereich zu entwickeln [1]. Um sowohl Gewicht als auch Volumen eines Isoliersystems zu reduzieren, sind Materialien notwendig, die mechanisch belastbar und elektrisch isolierend sind. Gleichzeitig sollten sie eine möglichst geringe spezifische Dichte aufweisen. Ein vielversprechender Ansatz ist hier die Verwendung von syntaktischem Schaum in geschichteten Isoliersystemen.*

## Syntaktischer Schaum

Der hier untersuchte syntaktische Schaum besteht aus einer Epoxidharzmatrix, in die Hohlkugeln aus Borsilikatglas eingemischt werden. Der Volumenanteil der Kugeln beträgt hierbei 50%. Dieses Material kombiniert die niedrige Dichte eines Gases mit der hohen mechanischen Festigkeit eines Feststoffs. Die Durchmesser der Hohlkugeln sind, wie in der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Materialbruchs in Abb. 1 erkennbar, kleiner als  $200 \mu\text{m}$ , deswegen werden sie in der Regel als Mikrohohlkugeln bezeichnet.

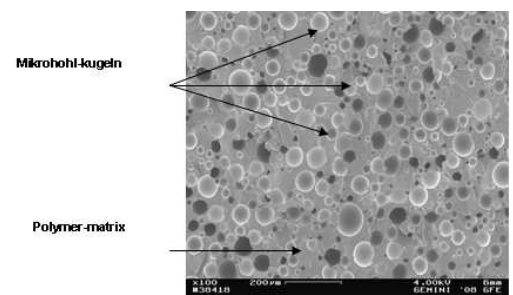


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahme eines Bruchbilds einer Probe aus syntaktischem Schaum

Bei syntaktischem Schaum handelt es sich um einen geschlossenporigen Schaum, da durch den strukturellen Aufbau sichergestellt wird, dass jeder einzelne Hohlraum



in Inneren des Schaums komplett von Feststoff umschlossen ist. Die Größe des Hohlraums wird durch den Durchmesser der eingemischten Mikrohohlkugeln bestimmt, so dass Gaseinschlüsse mit einem undefinierten größeren Durchmesser, wie sie bei der physikalischen oder chemischen Verschäumung von Polymeren auftreten können, vermieden werden. Dies wirkt sich positiv auf die elektrische Durchschlagfeldstärke des Schaums aus und begünstigt damit einen Einsatz dieses Materials als Isolierstoff in der Hochspannungstechnik.

### Motivation und Ziel der Arbeit

Damit dieser Werkstoff in Zukunft für ein breites Feld von Anwendungen in der elektrischen Energietechnik verwendet werden kann, muss das elektrische Materialverhalten bei Gleich- und Wechselspannungsbelastung bekannt sein. Gerade für diese Formen der Spannungsbelastung sind bislang aber nur vereinzelt systematische Untersuchungen durchgeführt worden. Es ist bisher ungeklärt, wie eine Materialschädigung bei elektrischer Überbelastung in syntaktischem Schaum abläuft und durch welche Parameter sie beeinflusst wird.

Die wichtigsten Einflussparameter auf die Durchschlagfeldstärke des Schaums werden in einer Parameterstudie ermittelt, deren Ergebnisse hier nicht wiedergegeben sind, da dies den Umfang des gegebenen Rahmens an dieser Stelle sprengen würde. Die Erkenntnisse über den Verlauf einer elektrischen Schädigung werden durch Untersuchungen gewonnen, bei denen der Schaum lokal elektrisch überlastet wird, um den geschädigten Bereich anschließend mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen zu analysieren. Hierbei wird insbesondere der Frage nachgegangen, ob sich die Ausbreitung einer elektrischen Schädigung an den Hohlräumen in den Mikrohohlkugeln oder entlang der Grenzflächen zwischen den Kugeln und der Harz-

matrix orientiert.

Abschließend werden heuristische Modellvorstellungen entwickelt, welche die Ausbreitung einer elektrischen Schädigung nach einer kurzzeitigen elektrischen Überbelastung von syntaktischem Schaum mit Gleich- oder Wechselspannung beschreiben und welche auf den ermittelten Einflussparametern und den hier vorgestellten Untersuchungsergebnissen basieren.

### Materialschädigung bei Wechselspannungsbelastung

Vorversuche mit Prüflingen aus syntaktischem Schaum haben gezeigt, dass bei Belastung mit einem ausreichend hohen elektrischen Wechselfeld erwartungsgemäß Teilentladungen in den Hohlräumen der Mikrohohlkugeln gezündet werden können. Die gemessene Teilentladungsaktivität steigt bei der Entwicklung von Vorschädigungen im Material sprunghaft an. Dieses Erkenntnis kann dazu genutzt werden, Prüflinge aus syntaktischem Schaum mit einer Nadel-Nadel-Konfiguration elektrisch gezielt zu überlasten ohne dass ein Durchschlag der Proben erfolgt.

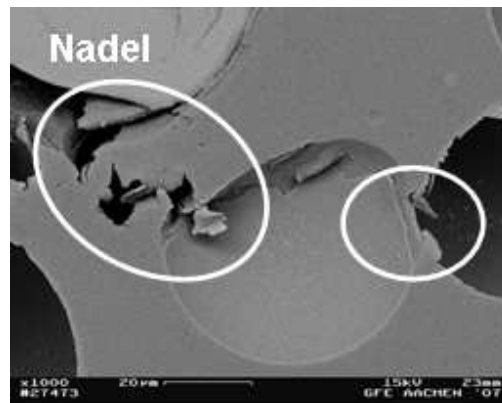


Abb. 2: Entwicklung einer Wechselspannungsschädigung durch eine Mikrohohlkugel hindurch.

Die Vorschädigungen in der Materialstruktur können anschließend mit Rasterelektronenmikroskopaufnahmen sichtbar gemacht werden. Abb. 2 zeigt die Aufnahme eines

entsprechenden Schliffbildes in einem Bereich mit geschädigter Materialstruktur in unmittelbarer Nähe einer der Nadelelektroden.

Ausgehend von der Nadelspitze entwickelt sich ein Treeing-Kanal bis zu einer nahegelegenen Mikrohohlkugel. Diese wird beim weiteren Fortschreiten des Erosionsprozesses zerstört.

Auf der rechten Seite ist ein Durchbruch zur nächsten Mikrohohlkugel zu erkennen. Die elektrische Schädigung zwischen einer Nadelelektrode und einer Mikrohohlkugel bildet sich demnach als Treeing-Kanal aus, zwischen den Kugeln dagegen als Durchbruch. Dies lässt sich auch anhand von Aufnahmen von weiteren Bereichen mit elektrischen Schädigungen belegen.

### Materialschädigung bei Gleichspannungsbelastung

Da bei Gleichspannungsbelastung von syntaktischem Schaum keine nachweisbaren Anzeichen einer Vorschädigung aufgetreten sind, wird für die Untersuchung von entsprechenden Schädigungsstrukturen ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem sich ein unvollständiger Durchschlag (Teildurchschlag) in syntaktischem Schaum generieren lässt. Ein Teildurchschlag hat im Vergleich zu einem kompletten Durchschlag der Isolierstrecke keine thermische Aufweitung des Durchschlagskanals durch den Kurzschlussstrom zur Folge. Nach Erzeugung des Teildurchschlags werden die elektrischen Schädigungen im Material erneut mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von mineralogischen Schliffbildern durch die Proben analysiert. In Abb. 3 sind Schädigungen zu sehen, die durch den Teildurchschlagskanal in ein-

zelnen Kugeln verursacht worden sind.

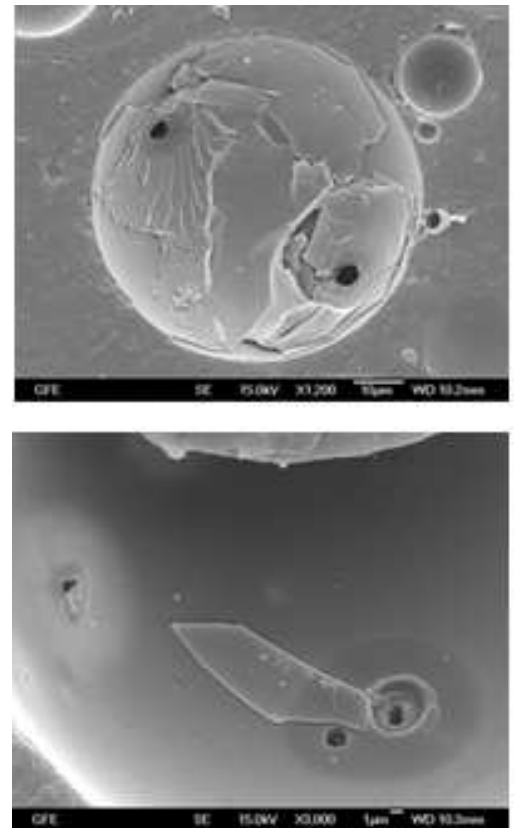


Abb. 3: Schädigungen in einzelnen Mikrohohlkugeln nach einer DC-Überbelastung des Schaums

### Modellbildung

Aus den Untersuchungen zur elektrischen Schädigung von syntaktischem Schaum können sowohl für Gleich- als auch für Wechspannungsbelastung Modellvorstellungen entwickelt werden, die den elektrischen Durchschlag bei Kurzzeitbelastung beschreiben. Die aufgestellten Modelle lassen sich durch weitere (hier nicht vorgestellte) experimentelle Untersuchungsergebnisse und durch Abschätzungen auf Basis geeigneter Feldberechnungen verifizieren.

- Bei Gleichspannungsbelastung verläuft der Durchschlag raumladungsbasiert: Aufgrund der unipolaren Feldstärkebelastung kommt es im

Inneren von Mikrohohlkugeln zu einem Lawinenprozess, kombiniert mit einer räumlichen Trennung der entstehenden Ladungen. Die Ladungsträger lagern sich an der Innenseite des Kugelhohlraums an und bauen ein Gegenfeld auf, das die Feldstärke im Kugelhohlraum herabsetzt. Wenn diese Vorgänge in benachbarten Mikrohohlkugeln ablaufen, kann die Feldstärkebelastung an den Berührungspunkten beider Kugeln so stark erhöht werden, dass die elektrische Festigkeit der Glaswand und der Harzschicht zwischen den Kugeln überschritten wird. Der folgende Teildurchschlag verbindet die beiden Kugelhohlräume. Die Verbindung mehrerer Kugelhohlräume führt schließlich zu einem Gesamtdurchschlag.

- Es hat sich gezeigt, dass der Durchschlag bei Wechselladung teilentladungsbasiert verläuft: Im Inneren einer Mikrohohlkugel werden raumladungsbeschwerte Entladungen initiiert. Diese Teilentladungsaktivität triggert wiederum Entladungen in benachbarten Mikrohohlräumen. Die Kugelwände der Mikrohohlkugeln werden durch die elektrische Belastung zerstört und es entstehen Verbindungen zwischen den Hohlräumen. Die Entwicklung von schädigenden Entladungen im Material

wird dadurch erleichtert, so dass sich dieser Prozess soweit fortsetzt, bis die gesamte Strecke zwischen beiden Elektroden durch einen durch die Mikrohohlkugeln verlaufenden Kanal überbrückt ist. Die Folge ist der elektrische Durchschlag der Anordnung. Bei stark inhomogenen Elektrodenanordnungen können sich im Vorfeld des Durchschlags Electrical Trees entwickeln, die vom Bereich der größten Feldstärkebelastung vorwachsen und die Kugelwände bei einem Teildurchschlag der Anordnung durchbrechen. Im Anschluss daran verläuft der Durchschlagsmechanismus wie bei einer homogenen Feldbelastung.

## Quellen

- [1] K.A. Tröger, Analyse der elektrischen Durchschlagmechanismen in syntaktischen Schäumen, Aachener Beiträge zur HOCHSPANNUNGSTECHNIK, Verlagshaus Mainz GmbH, 2009

## Kontakt

Dr.-Ing. Karl Alexander Tröger  
alexander.troeger@ch.abb.com  
+41 58 588 32 86

# Nicht-invasive Methoden zur Abbranddiagnose in Leistungsschaltern

*Leistungsschalter stellen ein wichtiges Sicherungselement im elektrischen Übertragungs- und Verteilnetz dar. Besonders in der Hoch- und Höchstspannungsebene verlangt die Komplexität dieser Schaltelemente ausgereifte Instandhaltungsmaßnahmen, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Ein wesentlicher Punkt der Instandhaltung stellt die Kontrolle des Abbrandes in der Schaltkammer dar. Hier liegt das Augenmerk auf den Kontaktstiften, wie auch dem Düsenmaterial. Zur Diagnose des Abbrandes ist es bislang erforderlich, die Schaltkammer zu öffnen. Dies birgt die Gefahr des Einbringens von Fremdstoffen und der fehlerhaften Remontage. Die Entwicklung von nicht-invasiven, schnellen und in der Schaltanlage durchführbaren Diagnosemethoden ist somit eine Herausforderung, der sich im Rahmen dieses Artikels gestellt wird.*

## Einleitung

Der Abbrand von Schaltkontakten lässt sich bereits heute mit dynamischen Widerstandsmessungen beurteilen, so dass das Hauptaugenmerk auf der Entwicklung einer Methode zur Diagnose des Düsenabbrandes liegt. Das nicht leitfähige Düsenmaterial stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar, da es nicht direkt kontaktierbar ist. Der Abbrand von Düsenmaterial ist wesentlich am Aufbau des Gasdruckes in Leistungsschaltern beteiligt. Durch den oberflächlichen Abbrand und der damit verbundenen Aufweitung der Isolierstoffdüse wird der Druckaufbau im Schalter maßgeblich beeinflusst. Da der Druckaufbau und das maximale Ausschaltvermögen proportional zueinander sind, ist die Aufweitung nur bis zu einem gewissen Maß tolerabel.

## Frequency Response Analysis

Die so genannte Frequency Response Analysis (FRA) ist eine Methode, mit welcher u.a. mechanische Verformungen im Inneren von Transformatoren bestimmt werden. Es ist eine relativistische Messmethode, die z.B. bei der Diagnose von Transportschäden Anwendung findet. Dazu wird das Signal-Übertragungsverhalten einzelner Windungen zueinander oder zum Kes-

sel in der Frequenz-Domäne bestimmt. Ausgehend vom fabrikneuen Betriebsmittel ist es möglich, Änderungen im RLC-Netzwerk des Testobjektes zu detektieren. Diese können bei Transformatoren z.B. durch transport- oder strombedingte Abstandsänderungen der Windungen untereinander entstehen.

Die FRA kann aber auch als eine, nicht-invasive Maßnahme einer Beurteilung des Abbrandes von Kontaktelementen, oder Düsenmaterialien innerhalb der Schaltkammer eines Leistungsschalters herangezogen. Durch eine frequenzselektive Bestimmung von Reflexions- bzw. Transmissionskoeffizienten ist dies möglich. Das Prinzip der Messtechnik ist in Abbildung 1 gezeigt.

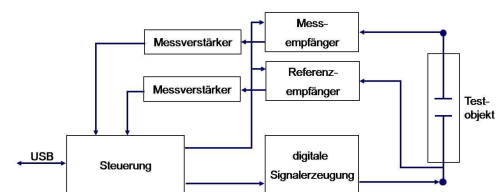


Abb. 1: Aufbau der Messtechnik

Mittels dieses bekannten Verfahrens kann somit auch der Abbrand von Düsenmaterial oder Kontaktstiften bestimmt werden, sofern dieser zu einer kapazitiven, indukti-

ven oder ohmschen Veränderung im Übertragungsweg führt.

### Experimentelle Untersuchung

Als Übertragungsweg wird im Fall des Leistungsschalters die Strecke zwischen den äußeren Kontakten (Anschlussfahnen) angesehen. Ein Düsenabbrand müsste zu einer Änderung der Kapazität zwischen den Schaltkontakten führen. Zur Verifizierung dieser Theorie wurden Messungen durchgeführt. Grundlage dieser ersten Messungen ist das stark vereinfachte, rotationssymmetrische Modell der Schaltkammer eines SF<sub>6</sub>-Selbstblausschalters nach Abbildung 2. Die Rotationsachse ist hier horizontal anzusetzen.

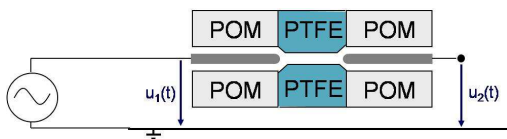


Abb. 2: Stark vereinfachte Modellschaltkammer

Die Abbranddüse des Schaltkammermodells besteht aus nur einem Teil, welches aus PTFE (gefüllt mit MoS<sub>2</sub>) gefertigt ist und im Neuzustand eine Öffnung mit einem Durchmesser von 10 mm aufweist. Durch das Abschalten hoher Ströme wird bei realen Leistungsschaltern eine Aufweitung dieser Düsen stattfinden. Aus diesem Grund werden an der Modellschaltkammer FRA-Messungen mit Düsen verschiedenen Durchmessers durchgeführt, auch um beurteilen zu können, wie sensitiv diese Messmethode auf Geometrieänderungen reagiert. Der Messanschluss wird über die, auch bei in Betrieb befindlichen Leistungsschaltern kontaktierbaren, Kontaktstifte realisiert. Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abbildung 3 dargestellt.

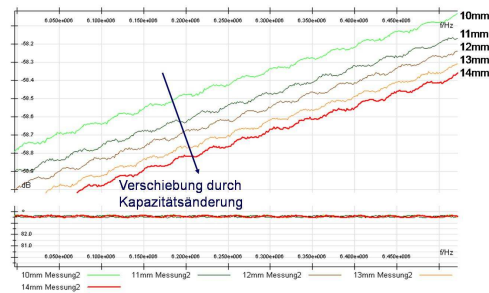


Abb. 3: Ergebnis einer FRA-Messung

Das Diagramm zeigt den Amplitudengang der Übertragungsfunktion in dB im Frequenzbereich von 6 bis 6,5 MHz. Es ist eine signifikante Änderung ersichtlich, welche durch den Düsenabbrand hervorgerufen wird. Der Durchmesser der Isolierstoffdüse wurde in diesem Fall in 1mm Schritten von 10 mm auf 14 mm aufgeweitet.

### CFD-Simulationen

Eine weitere nicht invasive Untersuchungsmethode stellen sogenannte CFD-Simulationen (Computational-Fluid-Dynamics) dar. Einzige Voraussetzung für die Anwendung dieser Methodik ist die genaue Kenntnis des durch den Leistungsschalter abgeschalteten Stroms. Ist dieser allerdings bekannt, so bietet diese Methodik zusätzlich den großen Vorteil, dass neben der reinen Bestimmung des Massenabbrands auch eine Aussage über die noch mögliche maximale Abschaltleistung des Schalters möglich ist.

Zur Modellierung wird das Isolierstoffsystem in verschiedene Segmente unterteilt, somit kann im weiteren Verlauf der Simulation ein diskretes Abbrandprofil der Düsenoberfläche erstellt werden. Im ersten Simulationsschritt dient der durch den Schalter abgeschaltete Strom als Eingangsgröße. Unter dessen Berücksichtigung werden die Gleichungen, welche sich unter dem Begriff der Magnetohydrodynamik zusammenfassen lassen, gelöst. Somit können die physikalischen Vorgänge die während des

Absschaltvorganges im Schalter ablaufen nachgebildet werden. Als Ergebnis dieser Simulation ergibt sich schließlich durch den Abbrand der Isolierstoffdüsen eine veränderte Geometrie. Diese wird in einem zweiten Simulationschritt herangezogen, um die durch den Abbrand reduzierte maximale Ausschaltleistung zu bestimmen. Dazu wird zunächst der maximale Druckaufbau bestimmt. Unter Anwendung des in Formel 1 dargestellten Zusammenhangs zwischen dem Druck und der maximalen Ausschaltleistung lässt sich schließlich das verbleibende maximale Ausschaltvermögen bestimmen.

$$\frac{di}{dt}_{limit} \propto p^\alpha$$

### Beispielrechnung an einer Modellschaltkammer

Als Modellschalter dient die in Abbildung 4 dargestellte Modellschaltkammer. Zunächst wird für die dargestellte Schaltkammer der Druckaufbau, hervorgerufen durch den Abbrand eines sinusförmigen Stroms mit einer maximalen Amplitude von 14 kA bestimmt. Es ergibt sich ein Druckaufbau von 21 bar. Wird im zweiten Schritt der Simulation angenommen, dass sich das Düsensystem im Laufe der Zeit kontinuierlich um 1 mm auf geweitet hat, so reduziert sich der Druckaufbau auf 18 bar. Dies ist in etwa gleichzusetzen mit einer Reduktion des Ausschaltvermögens um ca. 9 %.

### Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass in einem simplifizierten Laboraufbau Geometrieänderungen im Inneren einer Modellschaltkammer diagnostiziert werden können. Mit einer Amplitudenänderung von lediglich 0,5 dB bei einer Düsenaufweitung von 4mm stellt sich jedoch die Frage nach der Anwendbarkeit bei realen Leistungsschaltern in Schaltanlagen. Zur Untersuchung dieser Fragestellung werden aktuell Simulationen durchgeführt, welche die Kapazitätsänderung aufgrund des Abbrandes bestimmen. Des Weiteren ist ein Messaufbau mit einem realen Leistungsschalter in Vorbereitung.

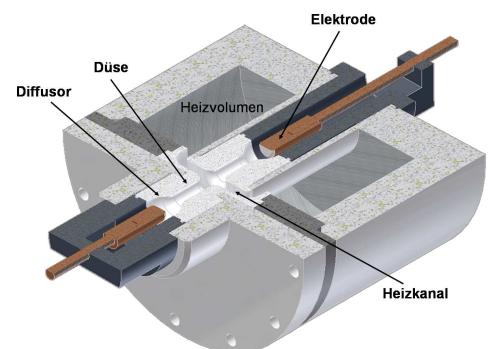


Abb. 4: Modellschaltkammer

### Kontakt

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

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



---

## **Lehre am IFHT**

## **Teaching at IFHT**

## Lehre am IFHT

### Hochspannungstechnik I (SS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler  
V2, Ü1, 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  
L2, E1, from 6<sup>th</sup> semester, International Master Program: 2<sup>nd</sup> 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  
V2, Ü1, 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  
L2, E1, from 7<sup>th</sup> semester, International Master Program: 3<sup>rd</sup> 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



## Komponenten und Anlagen der Elektrizitätsversorgung (WS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c.  
K. Hameyer

V2, Ü1, ab 5. Semester Bachelor-Studiengang

### Inhalt

Diese Vorlesung wird in Zusammenarbeit mit dem IEM angeboten. Die aufgeführten Inhalte beziehen sich auf den Teil der Vorlesung, der vom IFHT durchgeführt wird.

- Einführung in die elektrische Energietechnik
- Elektrisches Feld: Grundlagen der Feldtheorie; Feldberechnung ausgewählter Anordnungen; Abschätzung der Maximalfeldstärke mit Hilfe des Schwaiger-Faktors
- Durschlag in Gasen: raumladungsfreie und raumladungsbeschwerte Entladung; Durchschlagsmechanismen im homogenen und inhomogenen Feld
- Vorstellung der wichtigsten Komponenten der Elektrizitätsversorgung: Kabel und Leitungen; Leistungsschalter (SF<sub>6</sub>; Vakuum), Trennschalter, Messwandler, Überspannungsableiter
- Erzeugung von Prüfspannungen: Prüftransformatoren und Transformator-kaskaden zur Erzeugung von Prüfwechselspannung; ein und mehrstufige Schaltungen nach Marx zur Erzeugung von Stoßspannungen (Marx-Generator)

## Schutzmaßnahmen und Schutzeinrichtungen in elektrischen Netzen und Anlagen

Dozent: Dr.-Ing. B. Thies  
V2, Ü1, ab 5. Semester Master-Studiengang

### 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: Dr.-Ing. B. Thies  
L2, E1, 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  
L2, E1, Master program in Electrical Power Engineering

### 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, HTSC)

## Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen (SS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler  
Dr.-Ing. M. Schumacher  
(ABB AG),  
und weitere Referenten aus  
der Industrie

ab 6. Semester

### Inhalt

- Schaltlichtbögen
- SF<sub>6</sub>-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 119

## Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen (WS)

Dozent: Prof. Dr.-Ing. A. Schnettler  
Dr.-Ing. R. Puffer  
ab 5. Semester Bachelor-Studiengang

### Inhalt

- Schaltlichtbögen
- SF<sub>6</sub>-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

## Freileitungen (WS)

Dozent: Dr.-Ing. R. Puffer  
V2, Ü1, ab 5. Semester

### Inhalt

- Netze der elektrischen Energieversorgung, Komponenten in elektrischen Netzen
- Freileitungen: Übertragungstechnologien, Trends, Anforderungen
- Komponenten von Freileitungen: Maste, Leiter, Isolatoren, Armaturen, Gründungen, Erdungen
- Bauarten von Freileitungen: Drehstrom-Freileitungen, Gleichstrom-Freileitungen, Wechselstrom-Freileitungen, Masttypen, Mastbilder
- Bau von Freileitungen: Trassenwahl, Geländearbeiten, leitungstechnische Berechnungen, Genehmigungsverfahren, Montage, Inbetriebnahme
- Betrieb von Freileitungen: Strombelastbarkeit, Isolationskoordination, Erdung, Netzführung
- Instandhaltung von Freileitungen: Begehung, Inspektion, Sichtkontrolle, Zustandserfassungen, Verbindungen, Messung Erdübergangswiderstand
- Übertragungskapazität von Freileitungen: Strombelastbarkeit, Auslegungstemperatur, Berechnung Durchhang / Bodenabstand, natürliche Leistung
- Leiter für Freileitungen: Anforderungen an Leiter für Freileitungen, Aufbau von Leitern
- Optimierung der Übertragungskapazität von Freileitungen

## Unternehmensführung für Ingenieure (SS)

Dozent: Dr.-Ing. J. Schneider  
V2, Ü1

### Inhalt

- Unternehmensstruktur, Interne Organisation: Matrix, Profit und Cost Center; Logistik, Managementebenen; Externe Organisation: Rechtsformenvon Unternehmen
- Rechnungswesen: Internes und Externes Rechnungswesen: Buchhaltung, Kennzahlen (KPI), Liquiditätsplanung, Bewertung (z.B. Shareholder Value)
- Finanzmanagement: Investition und Finanzierung, Cash-Flow
- Elementare Management Funktionen: Strategische Planung, Budgetierung, Controlling, Shareholder-Value-Management
- Spezielle Management Funktionen: Project Management (Risk Analysis, Cost Planning), Marketing, Total Quality Management, Personalmanagement, Key Account Management, Corporate Governance
- Optimierung von Geschäftsprozessen: Prozessanalyse (Flow Charts, Process Mapping), Process Controlling (Customer Audits, Benchmarking), Quality Function Deployment
- Management Techniken: Methoden der Analyse (Portfolio-, Gap-, SWOT-Analyse), Prognose and Szenarioanalyse, Balanced Score Card

## Praktika am IFHT

### Energietechnisches Praktikum I (SS)

TÜ4, ab 6. Semester

#### Inhalt

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

- Wechsellspannungsmessung und Durchschlagsuntersuchungen
- Gleichspannungserzeugung und -messung
- Stoßspannungserzeugung

### Laboratory in Electrical Power Engineering I (Summer Term)

TÜ4, from 6<sup>th</sup> 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)

TÜ4, 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)

TÜ4, from 7<sup>th</sup> 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

TÜ4, ab 7. Semester für Elektrotechniker

### Inhalt

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

## Elektrotechnisches Praktikum I (SS)

TÜ3, 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

TÜ4, from 7<sup>th</sup> 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

## Messtechnisches Labor für Maschinenbauer (SS)

TÜ4, 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

# In 2009 abgeschlossene Diplom-, Master-, Bachelor-, Studien- und Projektarbeiten

## Diplomarbeiten

### Beerling, Ralf

*Analyse des Einflusses von Betriebsstrategien dezentraler Energiewandlungseinheiten auf elektrische Versorgungsnetze am Beispiel Vehicle-To-Grid*

Im Rahmen der Arbeit werden Betriebsstrategien definiert und vorgestellt, mit deren Hilfe die Belastung elektrischer Betriebsmittel in Versorgungsnetzen durch Vehicle-To-Grid minimiert werden sollen. Dabei soll insbesondere eine Überlastung der Betriebsmittel vermieden werden. Die Arbeit behandelt die Modellbildung eines Stranges an einer Ortsnetzstation mit Haushalten und diversen Fahrzeugen mit charakteristischen Eigenschaften für den Bereich der Elektromobilität. Zudem werden bei den Betriebsstrategien verschiedene Ansätze verfolgt, die von einer einfachen Steuerung über mehrere Regelstrategien bis hin zur Implementierung von Multiagentensystemen in den Fahrzeugen reichen. Die Auswirkungen dieser Betriebsstrategien werden im Rahmen einer Szenarioanalyse untersucht. Die abschließende Bewertung hin zur optimalen Betriebsstrategie findet aus zwei Sichtweisen statt. Auf der einen Seite aus der Perspektive des Energieversorgers und auf der anderen Seite eine mögliche Einschätzung der Fahrzeugbesitzer.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Phys. Bernhard Schowe-von der Brölie

### Behle, Mathias

*Theoretische und experimentelle Untersuchung von Lichtbogenanordnungen mit alternativer Beblasung für Leistungsschalter*

Für einen erfolgreichen Ausschaltvorgang in einem Leistungsschalter wird der Lichtbogen axial beblasen und somit zum Verlöschen gebracht. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine alternative Beblasungsart für den Lichtbogen untersucht. Dabei liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Lichtbogenverhalten in der Gasströmung und auf dem thermischen Ausschaltvermögen. Für diese Untersuchungen werden zunächst CFD-Simulationen entwickelt um darauf aufbauend einen Modellschalter zu erstellen. Der Modellschalter wird mit Hilfe eines Weil-Dobke-Kreises anhand hochauflösender Strom- und Spannungsmessungen sowie optischen Aufnahmen untersucht und ausgewertet. Ferner werden die CFD-Simulationen verwendet, um den Einfluss verschiedener variabler Parameter des alternativ beblasenen Lichtbogens zu betrachten und zu analysieren.

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

### Dupper, Arthur

*Entwicklung von zeitraffenden Tests von Kunststoffen für die Automobilindustrie*

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung zeitraffender elektrischer und klimatischer Tests von Kunststoffen und Kompositisoliermaterialien für die Automobilindustrie. Das Ziel der dargestellten Untersuchungen ist es, Aussagen über das Alterungsverhalten hochpolymerer Werkstoff-

fe zu treffen und die Definition eines Belastungstests zur beschleunigten Nachbildung einer in Lastenheften der Automobilindustrie definierten klimatischen Alterung anzufertigen. So wird untersucht, ob die Nachbildung einer Stoßspannungsbelastung durch eine prüftechnisch einfacher zu erzeugende netzfrequente Wechselspannung erfolgen kann. Aufgrund von hohen Prüfzeiten zur Ermittlung der Lebensdauer von Kunststoffen, wird eine beschleunigte klimatische Alterung entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierfür einige äußere Belastungsfaktoren des Zündsystems herangezogen wie Temperatur sowie Feuchtigkeit und Druck. Eine Erhöhung dieser Belastung führt zu einer weiteren Beschleunigung der Alterungsprozesse. Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Keßler, Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

#### **Düren, Klaus**

*Untersuchung von Einflussfaktoren auf den Zustand verschiedener Hochspannungsbetriebsmittel*

Im Rahmen der Diplomarbeit wird untersucht, welche Faktoren einen Einfluss auf den Zustand von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung haben. Dazu werden besonders solche Faktoren berücksichtigt, die bei aktuellen Instandhaltungsmaßnahmen bestimmt werden. Darüber hinaus wird beurteilt, ob zukünftige Maßnahmen zusätzliche Prüfungen beinhalten sollten, die wichtige, aber bislang unberücksichtigte Einflussfaktoren einbeziehen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

#### **Eichhoff, Daniel**

*Untersuchungen des Einflusses einer Beblasung auf die dielektrische Festigkeit von Heißgas in Isolierstoffdüsen*

Die in einem Selbstblasleistungsschalter eingesetzten Isolierstoffdüsen emittieren, aufgrund ihrer Aufheizung während des Abschaltvorgangs, auch einige Millisekunden nach dem Stromnulldurchgang noch heißes Gas. Bei einer schwachen axialen Beblasung des Lichtbogens kann dies zum dielektrischen Versagen führen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher geklärt, wie sich eine Beblasung des Lichtbogens auf die Charakteristik der dielektrischen Widerverfestigung auswirkt. Dabei wird der Einfluss für verschiedene Beblasungsgeschwindigkeiten experimentell ermittelt und die Erkenntnisse fließen in einen Ansatz zur Modelbildung ein.

Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz

#### **El Ouadhane, Harethe**

*Bewertung von Modellierungsansätzen für Störlichtbogen-Energieabsorber*

Störlichtbogen-Energieabsorber werden in Schaltanlagen eingebaut, um im Störlichtbogenfall die Wärme- und Druckbelastung von Gebäuden zu reduzieren sowie den Flammenaustritt zu verhindern. Sie sind Kühlgitter bestehend i.A. aus Streckmetall. Um die Wirkung von Absorbern mit Hilfe der Druckberechnungen zu untersuchen, ist eine geeignete Modellierung von Absorbern in Berechnungsverfahren notwendig. In der vorliegenden Arbeit werden Ansätze zur Modellierung der zwei hauptsächlichen Wirkungen von Absorbern, Wärmeaufnahme und Strömungswiderstand, vorgestellt, implementiert und bewertet. Die Druckberechnungen unter Berücksichtigung von Absorbern werden hier mit Hilfe eines CFD-Programms durchgeführt. Die Bewertung der Modellansätze erfolgt durch Vergleich zwischen berechneten und experimentellen Ergebnissen.

Betreuer: M. Sc. Kittipong Anantavanich



**Elrashid, Mussab**

*Untersuchung des Einflusses der Anreizregulierung auf das operative Asset Management*

Im Rahmen der Diplomarbeit wird die Anreizregulierung im Hinblick auf ihren Einfluss auf das operative Asset Management bzw. einer effizienten Instandhaltung von Hochspannungs-Betriebsmitteln analysiert. Dabei wird die Regulierungsformel zuerst grundlegend erörtert, um anschließend die möglichen Einflussfaktoren auf eine effiziente Instandhaltungsstrategie ableiten zu können. Weiterhin wird beispielhaft ein mögliches Effizienzpotential in der Instandhaltung von Hochspannungsschaltgeräten bestimmt, wobei die Qualität des derzeitigen Störungsgeschehens berücksichtigt wird.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein, Dipl.-Ing. Christian Hille

**Exner Arizaga, Juan Andrés**

*Theoretische und experimentelle Untersuchung einer alternativen Beblasungsart für Leistungsschalter*

Innerhalb eines Leistungsschalters wird der Lichtbogen in einer Isolierstoffdüse geführt. Der Abbrand dieser Düsen ist maßgeblich für den Druckaufbau und das Schaltverhalten des Leistungsschalters. Die heutige Generation von Leistungsschaltern ist so konstruiert, dass hauptsächlich zylindersymmetrische Isolierstoffdüsen verwendet werden, um den Lichtbogen zu führen. Der Lichtbogen wird zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs mit dem verwendeten Löschgas axial beblasen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden Anordnungen mit einer nicht-axialen Beblasung des Lichtbogens untersucht.

Betreuer: Dipl.-Ing. Mathias Hoffacker, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

**Helmschrott, Thomas**

*Integrierte Modellierung und Analyse der Interaktion von Elektrizitätsnetzen und Transportsystemen*

Die vorliegende Arbeit untersucht das Potential zum Energietransport mit Hilfe von Elektrofahrzeugen zur Substitution von leitungsgebundenen Lastflüssen. Dies soll als Dienstleistung verstanden werden, die von Elektrofahrzeugbesitzern dem Netzbetreiber angeboten wird. Ziel ist es durch deren Vergütung die Gesamtkosten für Anschaffung und Betrieb von Elektrofahrzeugen zu senken, so dass diese konkurrenzfähig zu konventionellen kraftstoffbetriebenen Fahrzeugen werden. Zur Ermittlung der transportierbaren Energiemengen wurde ein Modell für den PKW-Verkehr entwickelt und mit einem Modell eines Elektrizitätsnetzes kombiniert. Eine intelligente Ladesteuerung sorgt dafür, dass sowohl die Interessen der Fahrzeugbesitzer, als auch die des Netzbetreibers gleichermaßen berücksichtigt werden. Die Analyse von zwei möglichen Einsatzszenarien hat ergeben, dass sowohl Lastflüsse auf stark ausgelasteten Leitungen für begrenzte Zeiträume reduziert werden können, als auch die Integration von erneuerbaren Energien in Regionen mit schlechter Netzanbindung gesteigert werden kann.

Betreuer: Dipl.-Ing. Martin Scheufen, Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

**Kamewe, Alexis**

*Analyse und Bewertung elektrochemischer Speichertechnologien zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen in Verteilungsnetzen*

Die vorliegende Arbeit untersucht das Potenzial elektrochemischer Speichertechnologien zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen in Verteilungsnetzen. Der

Schwerpunkt dabei liegt auf einer detaillierten Untersuchung des Regelenergiemarktes, anhand dessen eine anschließende ökonomische Bewertung einer Teilnahme von elektrochemischen Speichern erfolgt. Berücksichtigung finden dabei gegenwärtige elektrochemische Speichertechnologien, die zunächst im Hinblick auf ihr technisches Einsatzpotenzial untersucht werden.  
Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

**Karaadak, Koray**

*Implementierung einer Ökoeffizienzbewertung zur Szenarioanalyse dezentraler Energieversorgungssysteme*

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel ein Modell zur ökonomischen und ökologischen Bewertung von dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) bei deren Integration in Verteilungsnetzen zu erstellen. Dafür werden unter Berücksichtigung des lokalen Strom- und Wärmebedarfs die vorhandenen Verbrauchsdaten aufbereitet, die Einflussparameter identifiziert und anhand wirtschaftlicher Kriterien ein optimaler Park von dezentralen Energiewandlungsanlagen erstellt. Insbesondere ist dabei die optimale Anzahl an KWK-Anlagen in Abhängigkeit der Kosten für den Wärmenetzausbau von Bedeutung. Am Beispiel eines realen Verteilungsnetzes werden die jährlichen Kosten und Emissionen der elektrischen und thermischen Energieversorgung für eine Vielzahl von Szenarien simuliert und anhand der Ergebnisse werden eine Reihe von Schlussfolgerungen zur Wirtschaftlichkeit von KWK abgeleitet.  
Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

**Knaak, Mathias**

*Untersuchung des Einflusses der Löschgastemperatur auf das thermische Ausschaltvermögen und der Widerstandsverteilung*

*für ein nicht-SF6 Leistungsschaltermmodell*

In heutigen Selbstblas-Leistungsschaltern wird Schwefelhexafluorid (SF6) als Isolier- und Löschmedium eingesetzt. Aufgrund des hohen Treibhauspotenzials von SF6 gewinnt die detaillierte Untersuchung alternativer Lösch- und Isoliergase zunehmend an Bedeutung. Diese alternativen Gase weisen verglichen mit SF6 jedoch teilweise ein anderes Löschverhalten auf. Diese Abweichungen müssen bekannt sein, um Leistungsschalter ohne SF6 verwenden zu können. Im Rahmen der Diplomarbeit wird der Einfluss der Löschgastemperatur auf das thermische Ausschaltvermögen eines Selbstblasleistungsschaltermodells mit einem alternativen Füllgas theoretisch und experimentell untersucht. Weiterhin wird die Widerstandsverteilung im Düsenbereich ermittelt um Rückschlüsse auf die wirkenden Kühlmechanismen zu ermöglichen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Mathias Hoffacker, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

**Knauel, Jens**

*Entwicklung und Umsetzung einer Methode zur Messung der ortsabhängigen Widerstandsverteilung von Lichtbögen*

In Hochspannungs-Leistungsschaltern werden Lichtbögen innerhalb von Isolierstoffdüsen geführt und durch die Beblasung mit Gas gekühlt. Diese Beblasung sorgt kurz vor dem natürlichen Stromnulldurchgang für einen Anstieg des Lichtbogenwiderstands. Die zeitliche Entwicklung des Widerstands ist entscheidend für eine erfolgreiche Schalthandlung des Leistungsschalters. Bisherige Untersuchungen berücksichtigen zur Bewertung des Ausschaltvermögens lediglich den Gesamtwiderstand über der Schaltstrecke. Neue Betrachtungen zeigen jedoch, dass auch die örtliche Verteilung des Widerstands entlang der Lichtbogenachse eine bedeutende Rolle

für das physikalische Verständnis des Ausschaltvorganges spielt. Im Rahmen der Diplomarbeit wird eine Messeinrichtung entwickelt, die es erlaubt, die örtliche Verteilung des Lichtbogenwiderstands zu messen. Betreuer: Dipl.-Ing. Mathias Hoffacker

### **Krengel, Stefan**

*Technische Ökoeffizienzbewertung eines virtuellen Energieversorgungssystems mit verteilten Wandlungs-einheiten in ländlichen Siedlungsgebieten*

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Herausforderungen der Integration von dezentraler Energiewandlung in die Verteilungsnetze. Als möglicher Lösungsansatz wird das Virtuelle Energieversorgungssystem vorgestellt und auf seine Eignung für eine wirtschaftliche, ökologisch vorteilhafte und technisch sinnvolle Energieversorgung untersucht. In einem Virtuellen Energieversorgungssystem werden dezentrale Energiewandlungsanlagen auf Basis Erneuerbarer Energien und fossiler Brennstoffe, Speichereinheiten für elektrische Energie und beeinflussbare Lasten zentral gesteuert. Es wird ein Modell zur Untersuchung von Zusammenschlüssen dieser dezentralen Einheiten entwickelt, das beliebige Anlagenparks und verschiedene Betriebsstrategien für ein Virtuelles Energieversorgungssystem analysieren kann. Dieses Modell wurde mit Hilfe von Daten, die von den Allgäuer Überlandwerken bereitgestellt wurden, validiert. Die Analyse zeigt, dass sich durch die gezielte Steuerung und Vermarktung die Stromkosten innerhalb des modellierten Systems senken lassen und dabei ökologische und technische Vorteile erreicht werden können.

Betreuer: Dr.-Ing. Thomas Smolka, Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

### **Küstermann, Matthias**

*Konzipierung und Aufbau eines Messstandes zur Ermittlung der Lebensdauer von Isolierstoffen bei Wechselspannungsbelastung*

Um die Sicherheit von Hochspannungsbetriebsmitteln zu gewährleisten, ist es wichtig die elektrische Festigkeit der verwendeten Isolierstoffe zu kennen. Dabei ist nicht nur die Festigkeit des Isolierstoffes im Neuzustand, sondern auch der Festigkeitsverlust über die Nutzungsdauer des Betriebsmittels von Interesse. Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzepts für einen Wechselspannungsversuchsstand zur Lebensdaueruntersuchung neuer Isolierstoffe. Dazu werden die Anforderungen an den Versuchsstand festgelegt und Konzepte zusammengestellt, welche die gestellten Anforderungen erfüllen. Um einen unbeaufsichtigten Betrieb zu ermöglichen, werden Möglichkeiten zur Überwachung der Probenspannung und des Probenzustands vorgestellt. Durch Simulationen und Experimente wird das Verhalten der Konzepte für verschiedene Bauteile und Bauteilparameter untersucht. Auf Basis dieser Untersuchungen werden zwei Konzepte für Prototypen ausgewählt. Diese werden gebaut und auf Funktion getestet. Unter Berücksichtigung der Funktionstests wird anschließend ein Konzept zum Aufbau des Versuchsstandes ausgewählt. Abschließend wird der Versuchsstand aufgebaut und für die Komplettierung und anschließende Inbetriebnahme vorbereitet.

Betreuer: M. Sc. Andrey Mashkin, Dipl.-Ing. Anja Strauchs

### **Landt, Martin**

*Untersuchungen zur dielektrischen Festigkeit von Heißgas in Isolierstoffdüsen für verschiedene Feldbedingungen*

Die dielektrische Wiederverfestigung in einem Leistungsschalter wird durch die Emission von Heißgas aus den Isolierstoffdüsen und der damit verbundenen Aufheizung der Düsenwand beeinflusst. Bei einer schwachen axialen Beblasung des Lichtbogens kann dies zu einem elektrischen Durchschlag führen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher der Einfluss des elektrischen Feldes auf den Prozess der Wiederverfestigung untersucht.

Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz

**Mannebach, Andreas**

*Erprobung neuer Isoliermaterialien für den Einsatz im Automobilbereich unter Einfluss von klimatischen, mechanischen, chemischen und elektrischen Beanspruchungen*

Gegenstand dieser Arbeit ist die Erprobung eines neuen kompressiblen Isoliermaterials für den Einsatz im Automobilbereich. Die Isolierung in einem Automobil ist im Betrieb thermischen, mechanischen und elektrischen Belastungen ausgesetzt. Daraus ergeben sich verschiedene Anforderungen an ein neues Isoliermaterial. Eine weitere Anforderung besteht zudem in der Reduzierung des Gewichts. Im Rahmen der Arbeit werden in Grundlagenuntersuchungen elektrische, mechanische, physikalische und thermische Eigenschaften möglicher neuer Materialien untersucht und miteinander verglichen. So wird u.a. eine Parameterstudie mit Hilfe von Impulsspannungsversuchen durchgeführt. Zudem sollte das Isoliermaterial ein ausreichendes Adhäsionsvermögen aufweisen, um Ablösungen zu vermeiden. Näher betrachtet wird auch die Viskosität des noch unvernetzten Isoliermaterials, da diese einen wichtigen Parameter für das Vergießen darstellt. Außerdem geben Druckversuche Aufschluss zum Kompressionsvermögen der Materialien.

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Keßler, Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

**Matrose, Claas**

*Analyse der Einflüsse einer massiven Integration von Elektrofahrzeugen auf die europäischen Übertragungs- und Verteilungsnetze*

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit werden die möglichen Wechselwirkungen von Elektrofahrzeugen mit den Netzen der elektrischen Energieversorgung identifiziert und mittels eines Simulationsmodells wird der Einfluss elektrischer Fahrzeuge auf Netze der Nieder- und Mittelspannungsebene bestimmt. Dabei finden sowohl die Vielzahl möglicher Varianten dieser Netze als auch das Fahrverhalten der PKW-Nutzer und die spezifischen technischen Eigenschaften der Fahrzeuge Berücksichtigung. Zur Ermittlung der bei verschiedenen Anschlussleistungen elektrischer Fahrzeuge oder Aufbau eines Netzes von Batteriewechselstationen entstehenden Kosten werden die notwendigen Ausbaumaßnahmen in deutschen Netzen an Hand einer repräsentativen Population synthetischer Niederspannungsnetze ermittelt. Diese werden mit den ermittelten Werten für ein Mittelspannungsreferenznetz in Beziehung gesetzt und auf diese Weise wird die finanziell beste Alternative für den ungesteuerten Ladebetrieb von Elektrofahrzeugen ermittelt. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass der Aufbau von Batteriewechselstationen gegenüber dem vor allem bei hohen Anschlussleistungen notwendigen Ausbau der Netze in der Regel keine finanziellen Vorteile bietet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

**Nobis, Philipp**

*Entwicklung eines Modells zur Spannungs-*

*regelung dezentral verteilter, umrichtergekoppelter Elektrofahrzeuge in Verteilungsnetzen*

Vor dem Hintergrund der Auswirkungen dezentraler Anlagen auf den Netzbetrieb wird im Rahmen dieser Arbeit betrachtet, wie sich umrichtergekoppelte Elektrofahrzeuge durch stützende Maßnahmen an der statischen Spannungshaltung in Verteilungsnetzen beteiligen können. Hierfür findet zunächst eine Gegenüberstellung aktueller Mechanismen zur Spannungsregelung in Verteilungsnetzen statt. Aus diesen Mechanismen werden Verfahren abgeleitet und entwickelt, die es Elektrofahrzeugen ermöglichen sich an der Spannungshaltung zu beteiligen. Zudem wird untersucht, inwiefern Ortsnetztransformatoren mit automatischen Stufenstellern notwendig sind, wenn sich die Fahrzeuge selbst zur Spannungshaltung verpflichten. Es folgt eine Simulation des möglichen Verhaltens von Elektrofahrzeugen während Spannungseinbrüchen, die durch Fehler in einer höheren Spannungsebene bedingt sind. Abschließend wird anhand dieser Resultate das spannungsstützende Verhalten von Elektrofahrzeugen im Fehlerfall bewertet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

**Özalay, Baris**

*Szenarioanalyse der Entwicklung des europäischen Kraftwerksparkes unter ökologischen Gesichtspunkten*

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel ein Modell für die Kraftwerksausbauplanung zu erstellen, Szenarien zu entwickeln und diese ökologisch, ökonomisch und technisch zu bewerten. Dafür wird ein Algorithmus entwickelt, dessen Optimierung auf der Basis der Volllaststunden eines Kraftwerks beruht, und mit den deutschen Übertragungsnetzbetreiber vier

Agenten implementiert. Anhand dessen ist es möglich die Entwicklung des Kraftwerksparkes zeitlich hoch aufgelöst zu berechnen. Der Einbau der geografischen Komponente bei Kraftwerksneubauten mit einem Bonus/Malus System und die abschließende Lastflussberechnung erfordern zusätzlich die Modellierung eines Netzes, das auf die 380 kV-Ebene begrenzt wird. Im Rahmen einer Szenarioanalyse werden signifikante Einflussfaktoren auf Kraftwerksinvestitionen analysiert und deren mögliche zukünftige Entwicklungen bis 2030 projiziert. Mithilfe des Modells werden für verschiedene, ausgewählte Szenarien die Kraftwerksparkzusammensetzungen bestimmt und anschließend mit dem Netzmodell auf ihre tendenziellen technischen Auswirkungen geprüft. Bei der Untersuchung der Ergebnisse werden besonders die ökologischen Fragestellungen mit den Treibhausgasemissionen analysiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Ing. Martin Scheufen

**Preidecker, Benjamin**

*Untersuchungen zum Gleichspannungsdurchschlagmechanismus in elastischem syntaktischem Schaum*

Elastische syntaktische Schäume bestehen aus einer Matrix aus Silikongel, in die mit Calciumcarbonat beschichtete thermoplastische Kunststoffmikrohohlkugeln eingebettet sind. Um die Mechanismen, die zu einem elektrischen Versagen des Schaums führen zu identifizieren, werden eine Reihe von elektrischen und optischen Untersuchungen durchgeführt. So wird der Durchmesser der verwendeten Mikrohohlkugeln sowie der Füllgrad an Hohlkugeln variiert und die Auswirkungen auf Kurzzeitspannungsfestigkeit, Langzeitverhalten und Teilentladungseinsatzspannung untersucht. Proben mit einzelnen Mikrohohlkugeln werden im Kurz- und Langzeitbereich

optisch auf Schäden und Veränderungen untersucht, um somit Rückschlüsse auf den vollständigen Schaum zu ziehen. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Trockenheit auf die Grenzflächen zwischen Kugelwand und Silikongel wird untersucht und es werden Entladungsstrukturen im stark inhomogenen Feld erzeugt. Des Weiteren werden die Ölaufnahmefähigkeit des Schaums und die Auswirkungen auf die Spannungsfestigkeit dargestellt. Abschließend wird aus den erlangten Erkenntnissen ein Modell für den Durchschlagmechanismus bei Gleichspannung entworfen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Keßler

#### **Proksch, Benjamin Martin**

*Untersuchung von Materialdaten zur Simulation des Ausschaltvorganges von Selbstblas-Leistungsschaltern*

Die Simulation des Ausschaltvorganges eines Leistungsschalters erfolgt mit sogenannten Computational-Fluid-Dynamic (CFD) Software-Tools. Hierbei werden neben der Berechnung der Fluideigenschaften weitere Phänomene wie z.B. Strahlung, Materialabbrand und die Dissoziation des Gases berücksichtigt. Grundlage für diese Simulationen sind Materialdaten, die verschiedene Eigenschaften von Gas im Plasmazustand in Abhängigkeit vom Druck und von der Temperatur beschreiben. Diese Materialdaten müssen sowohl für das Füllgas, für das aus den Düsen entstehende Abbrandgas als auch für verschiedene Mischungen dieser Gase vorliegen. Im Rahmen der Diplomarbeit werden Gaseigenschaften an Hand physikalisch-chemischer Grundeigenschaften der beteiligten Moleküle berechnet sowie die physikalischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Gaseigenschaften betrachtet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Mathias Hoffacker, Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

#### **Pütz, Sven**

*Untersuchungen zur Erzeugung von Funken im Wasser*

Sogenannte „borehole sparker“ finden Verwendung zur Lokalisierung von Bodenschätzen. Die dazu erforderliche Druckwelle kann im Bohrloch unter Wasser durch elektrische Entladungen erzeugt werden. In dieser Arbeit wird die vorhandene Theorie auf diesem Gebiet zusammengefasst und eine Modellierung der Entladung unter Wasser durchgeführt. Des Weiteren wird eine experimentelle Anordnung entwickelt die es ermöglicht die Modellierungsansätze zu prüfen und weiter zu entwickeln.

Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz, M. Sc. Kittipong Anantavanich

#### **Pyttlik, Oliver**

*Entwicklung eines dynamischen Erzeugungsmodells zur Ökoeffizienzbewertung der Elektrizitätsversorgung*

Die vorliegende Arbeit stellt ein Modell vor, mit dem es möglich ist, bei gegebenen Eingangsparametern wie Stromverbrauch, Kraftwerkspark, Wetter und Brennstoffkosten, den wirtschaftlich optimierten Kraftwerkseinsatz in einem Netz zu berechnen. Mit diesem Modell wird anschließend eine Ökoeffizienzbewertung der Elektrizitätsversorgung in Deutschland durchgeführt. Aufgrund des öffentlichen Bestrebens, den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu verringern, befasst sich diese Arbeit mit Treibhausgasmissionen, die in Deutschland durch die Produktion elektrischer Energie entstehen. Zu diesem Zweck wurde ein Erzeugungsmodell entwickelt, das dazu dient, den Energiemix, der sich aus dem Einsatz der verschiedenen Kraftwerke ergibt, dynamisch und mit hoher zeitlicher Auflösung zu ermitteln. Im Rahmen einer Szenarioanalyse werden mögliche zukünftige Ent-

wicklungen signifikanter Einflussparameter auf den Einsatz der Kraftwerke in Deutschland analysiert. Mithilfe des Modells wird für verschiedene Szenarien der Kraftwerkeinsatz in den Jahren 2010, 2020 und 2030 berechnet und in Bezug auf Treibhausgasemissionen, die bei der Energiewandlung entstehen, bewertet.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

### Rüberg, Sven

*Untersuchung von Teilentladungen in syntaktischem Schaum bei Gleichspannungsbelastung*

Syntaktischer Schaum ist ein Verbundwerkstoff aus einer Epoxidharzmatrix, in die Glas-Mikrohohlkugeln eingebettet werden. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die theoretische, experimentelle und simulative Untersuchung des Materials. Es zeigt sich, dass sich bei Beaufschlagung mit Gleichspannung innere Teilentladungen im Prüfling ereignen, der Durchschlag jedoch ohne erkennbare Veränderung im Teilentladungsbild abläuft. Die gemessenen Teilentladungen können sowohl auf Teildurchschlägen der Epoxidharzmatrix zwischen benachbarten Mikrohohlkugeln als auch auf Ladungstrennungen im Inneren der Mikrohohlkugeln zurückgeführt werden. Als eine wesentliche Aussage der Arbeit kann festgehalten werden, dass das bisherige Durchschlagmodell um eine Zeitkonstante erweitert werden muss, da sich unmittelbar nach Aufschaltung einer Gleichspannung zunächst eine Feldaufteilung anhand der relativen Permittivitäten einstellt, die exponentiell mit der Zeitkonstanten in die Feldverteilung anhand der spezifischen Leitfähigkeiten übergeht. Die bisherige Annahme, dass der Durchschlagprozess durch Ladungstrennung im Inneren der Mikrohohlkugeln eingeleitet wird, kann mittels der erzielten Ergebnisse nur teilweise bestätigt werden.

Betreuer: M. Sc. Andrey Mashkin, Dipl.-Ing. Anja Strauchs

### Runge, Andreas

*Design und Optimierung eines Mikrocontroller-gesteuerten Lastmanagers für intelligente Stromnetze*

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Design und der Optimierung eines Mikrocontroller-gesteuerten Lastmanagers für intelligente Stromnetze (Smart Grids). Hier werden Dienste speziell für das elektrische Netz vorgestellt. Der in dieser Arbeit entwickelte Prototyp eines Lastmanagers ermöglicht die Bereitstellung von Primärregelleistung. Zur Erreichung dieses Ziels ist ein verteiltes System von gesteuerten Lasten vorgesehen. Das Regelpotential wird in dieser Arbeit exemplarisch an einem zyklisch aktivierten, handelsüblichen Kühlschranks aufgezeigt. Es wurde festgestellt, dass die Netzfrequenz halbständlichen zyklischen Schwankungen unterliegt. Die Eingangsgröße für die Regelung des verteilten Systems ist die Netzfrequenz. Der Einsatz von verteilten Lastmanagern kann zu einer Glättung der Netzfrequenz beitragen. Die Regelleistung wird durch eine Zyklusvariation der verteilten Speicher bereitgestellt. Im Notfall, bei extremen Frequenzabweichungen, können Lasten über ein Relais ganz abgeworfen werden. Der Lastmanager zeichnet sich durch seine vielseitige Fähigkeit als Sensor- und Aktuatorssystem aus. Sensordaten werden mit einem exakten Zeitstempel versehen und auf einer Speicherkarte gespeichert. Die genaue Uhrzeit kann über eine drahtlose Internetverbindung von einem Zeitserver oder über einen zukünftigen Smart-Grid-Server bezogen werden. An Sensoren sind Temperatur-, Strom- und Frequenzsensoren vorgesehen, die softwareseitig implementiert sind. Über eine Auswertung der Frequenz wird die Leistungs-Frequenz-Regelung aus öko-

nomischer und ökologischer Sicht betrachtet. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können in einer Steigerung der Netzeffizienz durch eine Anpassung der Last an die generierte Leistung genutzt werden. Das Netz wird sich zu einem intelligenten Stromnetz entwickeln.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

### Schmidt, Tilman

*Konzeptionierung eines Prüflabors zur Untersuchung netztechnischer Anforderungen an dezentrale Erzeugungs- und Speichereinheiten in Verteilungsnetzen*

Um zur Definition der Anforderungen an ein Prüflabor beitragen zu können, wird im Rahmen der Diplomarbeit ein Beitrag zur Konzeptionierung der zukünftigen Anforderungen an dezentrale Akteure in Verteilungsnetzen geleistet. Das Ziel der Arbeit wurde deshalb auf die Entwicklung von Werkzeugen und Methoden zur Quantifizierung der Gefährdung der bestehenden typischen Netzschutzstrukturen des Niederspannungsverteilungsnetzes durch die Integration dezentraler Einspeiser im Netzparallelbetrieb präzisiert. Die Ergebnisse bilden die Basis zur Definition zukünftiger Anforderungen an Einspeiser und Netzschutzkonzepte.

Betreuer: M.Sc. Thomas Pollok, Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

### Shen, Cong

*Untersuchung des Einflusses von Druck und Netzwerkimpedanz auf das thermische Ausschaltvermögen eines nicht-SF<sub>6</sub> Leistungsschaltermodells*

In heutigen Selbstblas-Leistungsschaltern wird Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) als Isolier- und Löschmedium eingesetzt. Aufgrund des hohen Treibhauspotenzials von SF<sub>6</sub> gewinnt die detaillierte Untersuchung alterna-

tiver Lösch- und Isoliergase zunehmend an Bedeutung. Diese alternativen Gase weisen verglichen mit SF<sub>6</sub> jedoch teilweise ein anderes Löschverhalten auf. Diese Abweichungen müssen bekannt sein, um Leistungsschalter ohne SF<sub>6</sub> verwenden zu können. Im Rahmen der Diplomarbeit werden der Einfluss des Druckes des beblasenden Gases sowie der Einfluss der Netzimpedanz auf das thermische Ausschaltvermögen eines Selbstblasleistungsschaltermodells mit alternativem Füllgas theoretisch und experimentell untersucht.

Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker, Dipl.-Ing. Andreas Kurz

### Solvi, Julien

*Untersuchung der technischen Auswirkungen einer massiven Integration von Elektrofahrzeugen auf den Betrieb der elektrischen Verteilungsnetze*

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den hervorgerufenen technischen Auswirkungen auf die die elektrischen Niederspannungsnetze durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Daher werden mittels lastflussbasierter Berechnungen, Betriebsmittelauslastungen sowie weitere technische Randbedingungen zur Sicherstellung eines sicheren Betriebes untersucht. Die Berechnungen geben Aufschluss über die Netzaufnahmefähigkeit durch zusätzlich induzierten Strombedarf der Elektrofahrzeuge. Weiterhin werden anhand einer modellhaften Ableitung unterschiedlicher Netzstrukturen, Charakteristika analysiert, die eine möglichst allgemeine und auf weitere Formationen übertragbare Aussage hinsichtlich des Aufnahmevermögens schließen lassen. Zu diesem Zweck werden Modelle erstellt, die die elektrischen Lasten in der Niederspannungsebene nachbilden. Neben der Modellierung des Energiebedarfs der Fahrzeuge werden Haushaltprofile generiert, die eine Bewertung der Leistungs-



flüsse für unterschiedliche Szenarien in der Niederspannungsebene ermöglichen.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

**Still, Michael**

*Optimierung und Anwendung eines Modells zur Bestimmung des typspezifischen Störungsgeschehens von Schaltgeräten unter Variation der Instandhaltung*

Aufbauend auf vorangegangenen Arbeiten wird das Störungsgeschehen von Hochspannungs-Schaltgeräten bei einer veränderten Instandhaltungsstrategie prognostiziert. Das m2M-Modell zur Abschätzung des Störungsaufkommens bei einem Instandhaltungsverzug wird optimiert und angewendet. Anschließend wird das Modell auf sensitive Parameter und Grenzen untersucht. Im Hinblick auf eine Veränderung von Zyklen, Inhalt und Methodik der Instandhaltung sowie die Betrachtung verschiedener Typen von Schaltgeräten werden verschiedene Instandhaltungsszenarien mit Hilfe des Modells simuliert und graphisch dargestellt.

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Federlein

**Stüeken, Johannes**

*Untersuchung der Potenziale von Elektromobilität zur Integration erneuerbarer Energien in die elektrischen Netze*

Das angestrebte Ziel dieser Arbeit ist eine qualitative und quantitative Aussage über das Verfügbarkeits- und Speicherpotenzial der Elektromobilität zur Integration Erneuerbarer Energien in die elektrischen Netze. Arbeit untersucht worden. Dazu wurden Verkehrserhebungsdaten aus einer Mobilitätsstudie für Deutschland analysiert. Auf Basis dieser Daten ist ein Modell erstellt worden, welches das Nutzerverhalten des privaten, motorisierten Individual-

verkehrs über einen beliebigen Zeitraum abbildet. Die Zusammenführung mit der Energieversorgung erfolgt über ein Netzmodell der Hochspannungsebene. Über diese Verknüpfung können die Potenziale der Elektromobilität zur Integration der Erneuerbaren Energien in die elektrischen Netze abgeschätzt und bewertet werden. Es wurden Betriebsstrategien für einen optimierten Einsatz der mobilen Speicher entwickelt. Dabei ist eine intelligente, möglichst überregionale Steuerung notwendig, um das System nicht zusätzlichen Ladelastspitzen auszusetzen. Durch Koordination und Abstimmung der Ladevorgänge auf die Windleistungseinspeisung kann eine Verbesserung der Integration erreicht werden.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

**Szczechowicz, Eva**

*Szenarioanalyse zur technischen Ökoeffizienzbewertung von Elektrofahrzeugen in Verteilungsnetzen*

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Abschätzung des möglichen Einflusses der Integration von Elektrofahrzeugen in die Fahrzeugflotte hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Emissionen, Kosten und technischer Aspekte. Mithilfe des Verfahrens der Szenarioanalyse wird ein Modell entwickelt, welches mögliche Zusammensetzungen der Fahrzeugpopulation bestimmt. Das zentrale Element dieses Modells für die Szenarioanalyse ist die Kaufentscheidung der Fahrzeugbesitzer. Die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Parametrisierung des Modells ist detailliert beschrieben. Insbesondere die Implementierung der Kaufentscheidung erfolgt so realistisch wie möglich, indem entscheidungstheoretische Kenntnisse umgesetzt werden. Die signifikanten Einflussfaktoren der Szenarioanalyse werden bestimmt und ihre weitere Entwicklung bis ins Jahr

2030 extrapoliert. Die möglichen Szenarios ergeben sich aus zahlreichen Kombinationen dieser Einflussfaktoren, welche als Eingangsparameter für die Berechnungen fungieren. Die Ergebnisse werden hinsichtlich möglicher Einflüsse durch Vehicle-To-Grid Einnahmen, die Akzeptanz der Bevölkerung oder politische Einflussmaßnahmen untersucht. Die Ergebnisse der Szenarioanalyse werden verwendet, um die technische Ökoeffizienzbewertung der untersuchten Antriebstechnologien durchzuführen.  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

**Ubl, Andreas**

*Konzeption und Entwicklung eines universellen Teilentladungskalibrators unter Berücksichtigung typischer Anforderungen im Labor und vor Ort*

Die Integrität einer Messung wird durch die Kalibrierung der Messgeräte nach international definierten Standards festgelegt. In der Teilentladungsmesstechnik bestimmt die Norm der IEC60270 die Rückführbarkeit der Messungen. Die TE-Kalibrierung benötigt einen Kalibrator, der einen definierten Ladungswert zur Überprüfung des Messsystems in den Prüfling injiziert. Unterschiedliche Messaufbauten besitzen differenzierte Anforderungen und verlangen somit unterschiedliche Kalibratortypen. Die Entwicklung eines Kalibrators, dessen Funktionsumfang erweiterbar und universell auf die jeweilige Messtechnik anwendbar ist, ist das Ziel dieser Arbeit. Dafür wird eine Anforderungsliste durch die genaue Betrachtung der die Kalibrierung definierenden Eigenschaften aufgestellt. Das entwickelte Produkt wird schließlich im Labor des Deutschen Kalibrierdienst verifiziert. Die Linearität und die Einhaltung des minimalen Quasiintegrationsfehlers der Messgeräte werden überprüft.

Betreuer: Dipl.-Ing. Markus Söller (PDix), Dipl.-Ing. Anja Strauchs

**Wang, Cheng**

*Untersuchung zum Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur Optimierung des Betriebes von Betriebsmitteln in Schaltanlagen*

Im Rahmen der Diplomarbeit wird ein künstliches neuronales Netz implementiert, welches zur Optimierung des Betriebes von Komponenten in Schaltanlagen genutzt werden kann. Hierbei kann sowohl die Zustandserfassung als auch die zukünftige Instandhaltungsplanung für Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung abgebildet werden. Zur Bewertung eines möglichen Einsatzes des neuronalen Netzes werden vorhandene Betriebsmitteldaten zur Verfügung gestellt.

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

**Winkel, Daniel**

*Untersuchung der elektrischen Feldverteilung in syntaktischem Schaum bei Gleichspannungsbelastung*

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die simulative und experimentelle Untersuchung der elektrischen Feldverteilung in syntaktischem Schaum nach Aufschalten einer Gleichspannung. Bei syntaktischem Schaum handelt es sich um einen Verbundwerkstoff aus Glas-Mikrohohlkugeln, die in eine Epoxidharzmatrix eingebettet sind. Es wird untersucht, inwieweit der Hohlraum der Kugeln, sowie der Alkaligehalt des Glases den Durchschlagmechanismus des Schaumes beeinflussen. Im Rahmen der Arbeit werden Leitfähigkeitsmessungen, Durchschlagversuche und Teilentladungsmessungen mit anschließenden REM-Aufnahmen durchgeführt. Parallel zu den experimentellen Untersuchun-

gen werden numerische Feldsimulationen durchgeführt. Ihre Ergebnisse werden in Bezug zu den experimentellen Ergebnissen gesetzt, um weitere Erkenntnisse zum Durchschlagsmechanismus im syntaktischen Schaum bei Gleichspannungsbelastung zu gewinnen. In Folge der Untersuchungsergebnisse wird das Durchschlagsmodell dahingehend modifiziert, dass zwischen syntaktischen Schäumen aus alkaliarmen Mikrohohlkugeln und alkalihaltigen Mikrohohlkugeln differenziert werden muss. Wegen der unterschiedlichen Umverteilung des elektrischen Feldes mit einer Zeitkonstanten von einem quasistationären zu einem stationären Strömungsfeld verläuft der Durchschlag im Schaum aus alkaliarmen Hohlkugeln teilentladungs-basiert, der Durchschlag im Schaum aus alkalihaltigen Hohlkugeln hingegen nicht.  
Betreuer: M. Sc. Andrey Mashkin, Dipl.-Ing. Anja Strauchs

## Masterarbeiten

### Bi, Haojie

*Bewertung der Anforderungen an Schalttechnologien in zukünftigen Energieversorgungsnetzen*

Zukünftige Energieversorgungsnetze werden in ihrer Struktur und ihren Betriebsparametern möglicherweise deutlich von den heute existierenden Netzen abweichen. Entwicklungen die hierzu beitragen sind z.B. der weiter steigende Ausbau der Windenergie im Offshore-Bereich, die steigende Anzahl dezentral und volatil einspeisender Erzeuger sowie die geplante Anbindung Europas an Solarkraftwerke aus dem Mittelmeerraum. Aus diesen sich wandelnden Netztopologien resultieren geänderte Anforderungen an die dort eingesetzten Schalttechnologien. So kann mit heute verfügbaren Produkten das sichere Schal-

ten z.B. in vermaschten DC-Netzen nicht bewerkstelligt werden. Unter Berücksichtigung der neu entstehenden Anforderungen werden im Rahmen der Arbeit verschiedene Technologien in Bezug auf ihre Anwendbarkeit als Schaltelement in zukünftigen Energieversorgungsnetzen hin bewertet.  
Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Hoffacker

### Chedjo, Michel

*Technische Analyse des Einsatzes von Elektrofahrzeugen als frequenzabhängige Regelreserve*

Im Rahmen der Arbeit wird das Potenzial netzstabilisierender Maßnahmen durch Elektrofahrzeuge untersucht. Basierend auf dem Prinzip der virtuellen Synchronmaschine werden Regelalgorithmen weiterentwickelt, die eine automatische Beteiligung von Elektrofahrzeugen an der Systemstützung ermöglichen. Das damit verbundene frequenzabhängige Ladeverhalten sowie einhergehende Rückwirkungen auf den Systembetrieb, werden unter Berücksichtigung gemessener Frequenzverläufe simuliert und analysiert.

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, M.Sc. Thomas Pollok

### Nabi Chaudhry, Ashique

*Investigation of the Impact of Nanofiller on Electrical Treeing in Syntactic Foam*

Conventional syntactic foam consists of epoxy resin filled with hollow microspheres. The density of syntactic foam is much lower than that of pure epoxy resin. Therefore, it is possible to use this composite material in high voltage applications where a low weight of the insulation is of vital importance. The addition of nano-particles decreases the viscosity of the liquid epoxy resin during the manufacturing process. As a result, a higher volume fraction of

hollow microspheres can be achieved. This thesis provides an insight into the theoretical and practical analyses of the impact of nano-fillers on electrical treeing in syntactic foam. For the experiments, two kinds of specimens are made, one with conventional syntactic foam and the other with nano-filled syntactic foam. These two specimens are subjected to short time and long time testing. After deterioration of the material, the structure of the samples is analysed by means of scanning electron microscopy. There are two advantages of nano-fillers in syntactic foam: More hollow microspheres can be added, due to the decrease of the viscosity at manufacturing process. This makes the material lighter. Furthermore, the nano-fillers increase the resistance against electrical treeing and time to breakdown, making nano-filled syntactic foam a better alternative than conventional syntactic foam.

Supervisor: Dipl.-Ing. Anja Strauchs

#### **Votruba, Stanislav**

*Entwicklung optimaler Betriebsstrategien von Elektrofahrzeugen in Verteilungsnetzen*

Mit steigenden Durchdringungsraten von Elektrofahrzeugen entstehen neue Herausforderungen, die sich unter anderem in einem Anstieg von Lastspitzen widerspiegeln, was zu Überlastungen im Netz führen kann. Die Aufgabe dieser Arbeit besteht in der Entwicklung optimaler Betriebsstrategien, die eine massive Integration von Elektrofahrzeugen in Niederspannungsnetze ermöglicht. Dabei sollten Überlastungen möglichst vermieden und gleichzeitig darf die Individualmobilität nicht eingeschränkt werden. Hierfür wurden zwei Strategietypen entwickelt - Eine zentrale sowie eine Multiagenten-basierte Steuerung. Weiter wurden mögliche Auswirkungen von Ladevorgängen auf ein reales Niederspannungsnetz beim Einsatz von verschiedenen Stra-

tegien untersucht und eine optimale Strategie definiert. Allgemeine Empfehlungen bezüglich Ladung von Elektrofahrzeugen werden diskutiert und aufgelistet.

Betreuer: M.Sc. Thomas Pollok, Dipl.-Wirt.-Ing. Eva Szczechowicz

#### **Zafeiropoulos, Ioannis**

*Determination of the dielectric strength for hot gas in homogeneous electric fields inside a cylindrical arrangement*

In self-blast circuit breakers even some milliseconds after current zero (CZ) hot gas is evaporated from the nozzle surface. This effect is caused due to the heating of the nozzle material during the switch-off process of the circuit breaker and it has an impact on the dielectric strength of the circuit breaker. Therefore it is necessary to analyse and understand the breakdown process in the hot gas layer. In this thesis a cylindrical nozzle arrangement with a uniform-field distribution is investigated experimentally. Supervisor: Dipl.-Ing. Andreas Kurz

#### **Staatsarbeiten**

##### **Keller, Maximilian**

*Untersuchung der Widerstandsverteilung in einem Leistungsschaltermodell im Bereich des Stromnulldurchganges mit unterschiedlichen Füllgasen*

Während der Stromnulldurchgangsphase überführt der Selbstblasleistungsschalter die Schaltstrecke vom leitfähigen in den isolierenden Zustand und baut dabei einen Widerstand zwischen den Schaltkontakten auf. Im Rahmen dieser Arbeit wird die örtliche Widerstandsverteilung im Lichtbogen eines Schaltermodells im Stromnulldurchgang untersucht. Da die Widerstandsentwicklung direkt mit der Kühlung zusam-

menhängt, kann somit auf die Kühlmechanismen geschlossen werden. Um die Widerstandsentwicklung und verteilung innerhalb der Düse zu bestimmen, werden Teilspannungen im Lichtbogen des Leistungsschaltermodells aufgenommen und evaluiert.

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing Armin Schnettler, Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

## Bachelorarbeiten

**Honné, Thomas**

*Implementierung des MPC Strahlungsmodells zur Simulation von Leistungsschaltern*  
Betreuer: Dipl.-Ing. Ming-Chark Tang

## Studienarbeiten

**Bulla, Christopher**

*Analyse der Dispergierung von Füllstoffen in einer Kunststoffmatrix mittels Röntgen-Microcomputertomographie*  
Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Keßler, Dipl.-Ing. Klaus Berdel (IKV), Dipl.-Ing. Athanassios Elas (IKV)

**de Freitas, Roberto**

*Öko-Effizienzbewertung von elektrochemischen Speichern in Verteilungsnetzen*  
Betreuer: M.Sc. Thomas Pollok

**Dulisch, Fabian**

*Technische Analyse und Optimierung des Erzeugungsmanagements von Windenergieanlagen*  
Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs, Dipl.-Ing. Martin Scheufen

**Exner Arizaga, Juan Andrés**

*Konzeption und Realisierung eines Hochspannungsteilers für den universellen Messeinsatz*

Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz

**Filippidis, Stylianos**

*Untersuchung des Teilentladungsverhaltens von nanogefülltem syntaktischen Schaum im Homogenfeld*

Betreuer: Dipl.-Ing. Anja Strauchs, M.Sc. Andrey Mashkin

**Gödde, Markus**

*Analyse des Einsatzes von Smart Metering als Element zukünftiger Stromversorgung*  
Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

**Hack, Jan Willem**

*Der Einfluss von Stromimporten auf die Emissionsbehaftung des deutschen Strommixes*

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

**Küstermann, Matthias**

*Vergleich der elektrischen Schädigung an Isolierstoffen bei Belastung mit Sinus- und Pulsspannung*

Betreuer: Dipl.-Ing. Sascha Schulte

**Lu, Wei**

*Untersuchung der elektrischen Eigenschaften der Grenzfläche zwischen Epoxidharzen und Silikonschäumen*

Betreuer: Dipl.-Ing. Christoph Roggendorf

**Mbiazou Sandjong, Marcel Eric**

*Untersuchung der Auswirkung von Nanofüllstoff und oberflächenmodifizierten Glas-*

*Mikrohohlkugeln auf die elektrischen Eigenschaften von syntaktischem Schaum*  
 Betreuerin: Dipl.-Ing. Anja Strauchs

**Meinerzhagen, Ann-Kathrin**

*Potentialanalyse des Einsatzes von Biomasse als Teil einer zukünftigen europäischen Energieversorgungsstrategie*  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

**Natemeyer, Hendrik**

*Probabilistische Modellierung des Verhaltens von Verbrauchern auf Verteilnetzebene*  
 Betreuer: M.Sc. Thomas Pollok

**Nikolic, Paul Gregor**

*Untersuchung der Eignung eines faseroptischen Zwei-Farben Pyrometers zur Temperaturmessung in lichtbogenbeanspruchten Anordnungen*  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Andreas Kurz

**Still, Michael**

*Berechnung und Bewertung von Alterungsmodellen für verschiedene Hochspannungs-Schaltgeräte*  
 Betreuer: Dipl.-Ing Stefan Federlein

**Stüeken, Johannes**

*Untersuchung der Realisierbarkeit einer mobilen Kabelstrecke zur temporären*

*Überbrückung defekter Freileitungsabschnitte*  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Hille

**Votruba, Stanislav**

*Potentialanalyse von Objektnetzen als Teil einer zukünftigen Energieversorgungsstrategie*  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Dederichs

**Wafeu Tengwo, Sylvain**

*Elektrische Eigenschaften von syntaktischem Schaum unter Einfluss von Feuchtigkeit*  
 Betreuer: M.Sc. Andrey Mashkin, Dipl.-Ing. Anja Strauchs

**Winter, Sebastian**

*Verwendbarkeit von FETs im Sättigungsbereich zur Stromglättung in Zündkerzen*  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Sascha Schulte

**Projektarbeiten**

**Glinka, Felix und Neubert, Markus**

*Design einer Schutzringanordnung zur Untersuchung des Einflusses hoher elektrischer Feldstärken auf die spezifische Leitfähigkeit von syntaktischem Schaum*  
 Betreuer: Dipl.-Ing. Anja Strauchs

## Blockvorlesung / Seminar Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen

*Ziel des Seminars „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ ist die Vermittlung von Grundkenntnissen über den Aufbau und die Funktionsweise von Komponenten und Anlagen der Energieübertragung und -verteilung. Es werden die Schaltgeräte- und Anlagentechnik ausgehend von den physikalischen Grundlagen bis hin zu wirtschaftlichen Aspekten umfassend behandelt. Das Seminar richtet sich an Ingenieure und Interessierte aus Industrie, Energieversorgungsunternehmen sowie Fachhochschulen und Universitäten, aber auch an Studenten der RWTH Aachen.*

Auf Grund des positiven Feedbacks aus den Vorjahren, wurde auch dieses Jahr wieder am 22. und 23. Juni 2009 das Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ angeboten. Das Seminar wird seit einigen Jahren vom Institut für Hochspannungstechnik in Zusammenarbeit mit dem VDE Regio Aachen, der Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. Mannheim und der RWTH International Academy GmbH durchgeführt. Für diese zweitägige Weiterbildungsveranstaltung wurde der hauseigene Hörsaal Eph gebucht. Rund 150 Personen aus der Industrie und von Versorgungsunternehmen, sowie wissenschaftliche Mitarbeiter und Studenten des IFHT nahmen an der Veranstaltung teil.



Abb. 1: Veranstaltungsraum Hörsaal Eph

Während der zweitägigen Veranstaltung wurde der Themenbereich Schaltgeräte und Schaltanlagen von namhaften Referenten in

verschiedenen Fachvorträgen von den physikalischen Grundlagen bis hin zu wirtschaftlichen Aspekten präsentiert. Die Teilnehmer erhielten so einen umfassenden und vor allem auch praxisnahen Einblick in die Thematik und hatten in der an die Vorträge anknüpfenden Diskussion die Gelegenheit von den Kenntnissen und Erfahrungen der Referenten in den einzelnen Fachgebieten zu profitieren. In den Pausenzeiten bot sich den Teilnehmern dann sowohl die Gelegenheit sich untereinander auszutauschen und angeregte Diskussion zu führen, als auch noch einmal konkrete Fragen an die Referenten zu richten. Auch für die Studenten war dies eine gute Gelegenheit weitere Kontakte zur Industrie zu knüpfen.



Abb. 2: Get-together bei Kaffee und Kuchen

Es folgt ein Überblick über das diesjährige Seminarprogramm:

- **Begrüßung**  
Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler,  
RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik
- **Einführung in die Thematik**  
Dr.-Ing. Martin Schumacher,  
ABB Schweiz AG Hochspannungsprodukte, Zürich
- **Schaltlichtbögen**  
Dr. rer. nat. Christian Franck,  
ABB Schweiz AG Forschungszentrum, Baden-Dättwil
- **SF<sub>6</sub>-Hochspannungsleistungsschalter**  
Dipl.-Ing. Nils Werning,  
Siemens AG Energy Sector, Schaltwerk Berlin
- **Vakuumschalter**  
Dr.-Ing. Dietmar Gentsch,  
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen
- **Hochspannungssicherungen**  
Dipl.-Ing. Johannes-Georg Gödeke,  
SIBA GmbH & Co. KG, Lünen
- **Ortsnetzstationen**  
Dipl.-Ing. Gisbert Brüggemann,  
Schneider Electric GmbH, Ratingen
- **Leistungstransformatoren**  
Dipl.-Ing. Frank Hofmann,  
AREVA Energietechnik GmbH,  
Mönchengladbach
- **Einführung in die Anlagentechnik und gasisolierte Schaltanlagen**  
Dr.-Ing. Martin Schumacher,  
ABB Schweiz AG Hochspannungsprodukte, Zürich
- **Freiluftschaltanlagen**  
Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn,  
AREVA Energietechnik GmbH, Berlin
- **Anlagen der Hochspannungs-gleichstromübertragung**  
Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn,  
AREVA Energietechnik GmbH, Berlin
- **Mittelspannungsschaltanlagen**  
Dr.-Ing. Stefan Göttlich,  
ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, Ratingen
- **Kabel und Freileitungen**  
Dr.-Ing. Frank Merschel,  
RWE Energy AG, Dortmund
- **Störungsgeschehen von Betriebsmitteln der Elektrizitätsversorgung**  
Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler,  
RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik

Abschließend zum Seminar wurde eine Studentenexkursion zum Transformatorenwerk der Firma AREVA Schorch Energietechnik GmbH in Mönchengladbach und zur 400kV Schaltanlage Aachener Kreuz angeboten. Wir möchten uns noch einmal ganz herzlich bei STAWAG Aachen und AREVA Mönchengladbach für die hervorragende Betreuung während unseres Besuches bedanken. Einen großen Dank gilt ebenfalls allen Referenten für ihre interessanten Vorträge während des zweitägigen Seminars. Auf Grund der durchweg positiven Resonanz der Teilnehmer ist geplant auch nächstes Jahr wieder das Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ durchzuführen.

## Kontakt

Dipl.-Ing. Anja Strauchs  
strauchs@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94920





---

**Chronik**  
**Veröffentlichungen**  
**Exkursionen**

**Chronicle**  
**Publications**  
**Technical Excursions**

## Chronik 2009

02.01.09

Erster Arbeitstag von Ralf Puffer, Akademischer Rat

12.01.09

“Kick-Off Meeting“ zum AiF-Vorhaben  
“Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall“  
in Aachen

Teilnehmer: Gerhard Pietsch, Kittipong Anantavanich

20.01.09

Workshop BMWi „Energietechnologien 2050“

Teilnehmer: Martin Scheufen

22.01. - 23.01.09

CIGRÉ C1-16 Working Group Meeting

Teilnehmer: Stefan Federlein

23.01.09

Traditionelles Sprottenessen mit Rückblick auf das Jahr 2008

02.02. - 07.02.09

DAAD-Vorauswahlsitzung für Stipendientbewerber (Forschungsstipendien) aus der russischen Föderation und Auswahlgespräche mit Bewerbern für Studienstipendien (Masterprogramm) in Moskau

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

03.02.09

BMWi-Bonn “Netze für die Stromversorgung der Zukunft“

Teilnehmer: Martin Scheufen

03.02. - 04.02.09

IDEA League- Meeting in Delft

Teilnehmer: Armin Schnettler

17.02.09

Auswahlsitzung der Mummert-Stiftung (Führungskräftenachwuchs) für Stipendiaten aus osteuropäischen Staaten in Köln

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

25.02.09

Besuch einer russischen Delegation am Institut mit Prof. Bocharov, Dekan der Universität St. Petersburg, am IFHT

02.03.09

Auswahlsitzung zur Besetzung von DAAD-Fachlektoraten in Osteuropa in Bonn

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

05.03.09

Lunchtalk der MitarbeiterInnen des IFHT, Vortrag der Fachstudienberaterin Martina Dahm zu den neuen Bachelor- und Masterstudiengängen

Teilnehmer: MitarbeiterInnen des IFHT

19.03. - 20.03.09

Cigré-Working Group Meeting (A3.24) in Delft (Niederlande)

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

23.03. - 03.04.09

Anika Weiß vom ERFT Gymnasium, Lukas Hildebrand und Tobias Rave vom INDA-Gymnasium absolvieren ein Praktikum am IFHT

04.05. - 05.05.09

Workshop des BMWi „Energietechnologien 2050“ in Karlsruhe

Teilnehmer: Martin Scheufen

06.05. - 07.05.09

RCC-Tagung in Berlin

Teilnehmer: Anja Strauchs, Christoph Rogendorf

07.05. - 08.05.09

DAAD-Auswahlsitzung zu Studienstipendien für Absolventen deutscher Auslands- und Partnerschulen in Bonn

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

09.05.09

Mannheim Marathon

Teilnehmer: Daniel Eichhoff, Christian Hille, Christoph Hohmann, Christoph Kahlen,

Andreas Kurz, Andreas Mannebach, Thomas Pollok, Michael Reiter, Christoph Roggendorf, Jonas Rügemer, Martin Splettstößer, Hannes Walz, Daniel Winkel, Armin Schnettler

15.05.09

Ehemaligentreffen und Mitgliederversammlung der HTG

23.05. - 27.05.09

Auswahlsitzung zur Vergabe von Studienstipendien durch den DAAD/TEV (=türkische Erziehungsstiftung)- an türkische Graduierte in Istanbul

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

26.05.09

Energiotechnologien 2050, Konferenz in Berlin

Teilnehmer: Ralf Puffer

26.05.09

Internationale Konferenz im Allgäu - AlpEnergy trifft E-Energy, Impulse für die Energieszene des deutschsprachigen Raums BigBox in Kempten (Allgäu).

Teilnehmer: Thomas Smolka, Stefan Krenzel

01.06. - 05.06.09

Pfingstexkursion nach Zürich (Schweiz) Bregenz (Österreich), Friedrichshafen und Stuttgart

Exkursionsleiter: Anja Strauchs, Martin Scheufen

02.06.09

Erster Arbeitstag von Mathias Behle

08.06. - 11.06.09

CIREN 2009 „20th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution“ in Prag

Teilnehmer: Stefan Federlein, Thomas Pollok

15.06. - 16.06.09

Isolierstoffkolloquium 2009 in Darmstadt

Teilnehmer: Gregor Brammer, Michael Keßler, Christoph Roggendorf, Anja

Strauchs

17.06.09

Erster Arbeitstag von Eva Szczechowicz

22.06. - 23.06.09

Schaltanlagenseminar “Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“

Leiter: Martin Schumacher, Armin Schnettler

24.06.09

Ende der Ausbildung von Hanna Johnen am IFHT, Weiterbeschäftigung in der Personalabteilung der RWTH Aachen

25.06.09

70. Geburtstag von Gerhard Pietsch

29.06.09

Doktorprüfungen von Uwe Macharey zum Thema “Ökoeffizienz von Flexibilisierungsmaßnahmen in Energieversorgungsnetzen unter Berücksichtigung der Integration von Windenergie“

Referat: Armin Schnettler

29.06.09

Doktorprüfung von Andreas König zum Thema “High Temperature DC-to-DC Converters for Downhole Applications“

Referat: Rik de Doncker, Korreferat: Armin Schnettler

01.07.09

Erster Arbeitstag von Maximilian Keller

06.07.09

Doktorprüfung von Alexander Tröger zum Thema “Analyse der elektrischen Durchschlagsmechanismen in syntaktischen Schäumen“

Referat: Armin Schnettler

10.07.09

Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses zum AiF-Vorhaben “Störlichtbogen“ in Aachen

Teilnehmer: Gerhard Pietsch, Kittipong Anantavanich

13.07. - 31.07.0

Felix Schnettler, Schüler am INDA-

Gymnasium, absolviert ein Praktikum am IFHT

16.07. - 17.07.09

IDEA League "Operational Board Meeting" in Delft

Teilnehmer: Armin Schnettler

18.07. - 19.08.09

Gerhard Pietsch nimmt eine Gastprofessur an der McMaster University, Hamilton, ON, Canada wahr

12.08.09

Erfolgreiche Teilnahme am Fakultätsfußballturnier, Ergebnis: 2. Platz Teilnehmer: Stefan Buß, Mussab Elrashid, Alexander Gitis, Max Keller, Julian Langstädler, Thien-duc Nguyen, Christoph Roggen-dorf, Martin Splettstößer, Johannes Stücken, Ming Tang, Stanislav Votruba



*Die Teilnehmer des Turniers*

17.08.09

Erster Arbeitstag von Pascal Müller (Ausbildung zum Industriemechaniker, Feingereätbau) und Daniela Vitale (Ausbildung zur Kauffrau für Bürokommunikation)

18.08.09

Workshop "E-Tankstellen auf Stadtwerk-einfrastrukturen" im Super C, RWTH Aachen Teilnehmer: Armin Schnettler, Martin Splettstößer, Eva Szczechowicz, Thomas Dederichs

21.08. - 23.08.09

Segelwochenende des IFHT am Veerse

Meer (Niederlande)

23.08. - 28.08.09

ISH - Konferenz in Kapstadt (Südafrika)

Teilnehmer: Christian Hille

24.08. - 27.08.09

Durchführung von Experimenten zu Unterwasserentladungen unter hohem Druck in Falmouth Cornwall, Großbritannien

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

28.08.09

Betriebssausflug ins "Hohe Venn" und zur "Historischen Senfmühle" in Monschau

30.08.09

40-jähriges Dienstjubiläum von Leo Künzler, Elektroniklabor

31.08.09

Letzter Arbeitstag von Jermaine Storp

03.09.09

Ehrung von Hanna Johnen durch die IHK für ihre Abschlussprüfung mit der Note 1 als "Kauffrau für Bürokommunikation"



*Die Preisträger der IHK*

06.09. - 11.09.09

Symposium on Physics of Switching Arc in Nové Město na Moravě Tschechien

Teilnehmer: Matthias Hoffacker, Andreas Kurz, Ming Chark Tang

12.09.09

2009 Cage Club Conference High Voltage Engineering and Applied Electrostatics

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

12.09. - 15.09.09

Dr. M. Iwata vom Central Research Insti-

tute of Electric Power Industrie (CRIEPI), Japan, besucht das Institut im Rahmen der bestehenden Forschungszusammenarbeit

30.09.09

Letzter Arbeitstag von Christoph Kahlen

01.10.09

GIS-Fachtagung in Darmstadt

Teilnehmer: Christian Hille, Andreas Kurz

07.10.09

Verleihung des OTTO-JUNKER-PREISES für hervorragende Studienleistungen in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen an Herrn Dipl.-Ing. Stefan Post (IFHT) durch Herrn Werner Stegemann, Vorsitzender des Kuratoriums der Otto-Junker-Stiftung Aachen

09.10. - 10.10.09

IDEA League Operational Board Meeting am Imperial College in London

Teilnehmer: Armin Schnettler

16.10. - 23.10.09

Besuch bei G&W Electric Comp. in Chicago und Cigré-Working Group Meeting (A3.24) in Raleigh, USA

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

26.10. - 28.10.09

DAAD-Auswahlsitzung zur Vergabe von Stipendien für Kandidaten aus der Russischen Föderation nach dem Lomonossov-Programm in Moskau

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

27.10. - 28.10.09

Internationaler ETG-Kongress in Düsseldorf, Fachtagung "Intelligente Netze"

Teilnehmer: Stefan Federlein, Christian Hille, Thomas Pollok, Ralf Puffer, Thomas Smolka

02.11.09

Erster Arbeitstag von Claas Matrose

02.11. - 13.11.09

Linus Franke, Couven Gymnasium, Aachen, absolviert ein Praktikum am IFHT

04.11.09

CIGRE/CIRED Veranstaltung "Integrationsplattform Netze" in Erlangen

Teilnehmer: Armin Schnettler

10.11.09

Verleihung des SAG Award 2009 an Til Kristian Vrana für die Abschlussarbeit "Analyse und Definition technischer Anforderungen an dezentrale Umrichter-gekoppelte Energiewandlungseinheiten in Verteilungsnetzen"

14.11.09

"33. Hochwissenschaftliches Kolloquium" am IFHT mit Verleihung des Preises "Mann mit der ruhigen Kugel" an Ralf Puffer

17.11.09

Auswahlsitzung zum DAAD-Sonderprogramm Akademischer Neuaufbau Südosteuropa in Bonn-Bad Godesberg

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

23.11. - 25.11.09

IHRES 2009, 4. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien

Teilnehmer: Christoph Roggendorf

25.11.09

Aussprache des Deutschen Arbeitskreises CIGRE A3 in Ratingen

Teilnehmer: Gerhard Pietsch

01.12.09

Erster Arbeitstag von Stefan Federlein als OBERINGENIEUR

15.12.09

Erster Arbeitstag von Daniel Eichhoff

## Veröffentlichungen / Publications

**Stefan Federlein, Armin Gaul, Armin Schnettler**

*Einfluss des Wartungszyklus auf das Alterungsverhalten bei Leistungsschaltern*  
Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 1/2, 2009

**Stefan Federlein, Christian Hille, Armin J. Gaul, Armin Schnettler.**

*New methods to assess the impact of maintenance and the condition of network*  
CIRED 2009, Session 1, No. 0870, Prague (Czech Republic) 2009

**Matthias Hoffacker, Ming Chark Tang, Jan Christoph Kahlen, Andreas Kurz, Armin Schnettler**

*Influence of Additional Ablation Elements in a Non-SF6-Selblast Circuit Breaker Model on the Interruption Capability*  
XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, September 7 - 11, 2009

**Christian Hille, Stefan Federlein, Armin Schnettler**

*Tools to Assess Behaviour and Condition of Highvoltage Equipment*  
16th International Symposium on High Voltage Engineering, South Africa, August 24 -28, 2009

**Stefan Federlein, Christian Hille, Claus Neumann, Bartosz Rusek, Armin Schnettler**

*Nutzung historischer Instandhaltungsinformationen zur Modellierung des Betriebsmittelverhaltens (Using historical maintenance information to model equipment behaviour)*  
Internationaler ETG-Kongress, Düsseldorf, Oktober 27 -28, 2009

**Jan Christoph Kahlen, Martin Seeger, Ming Chark Tang, Andreas Kurz, Matthias Hoffacker, Armin Schnettler**

*Investigation of the Arc Behaviour in Alternative Nozzle Arrangements for Circuit Breakers*

XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, September 7 - 11, 2009

**Ming-Chark Tang, Matthias Hoffacker, Jan Christoph Kahlen, Armin Schnettler**

*Cooling Behaviour in the Current Zero Phase of SF6 Self-Blast Circuit Breakers with Different Nozzle Geometries*  
XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, September 7 - 11, 2009

**Andreas Kurz, Martin Seeger, Christoph Roggendorf, Jan Christoph Kahlen, Armin Schnettler**

*Determination of the Dielectric Recovery in an Insulating Nozzle*  
XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, September 7 - 11, 2009

**Christian Hille, Andreas Kurz, Armin Schnettler**

*Nicht-invasives Verfahren zur Beurteilung des Abbrandes in der Schaltkammer von Leistungsschaltern*  
GIS-Anwenderforum, Hochspannungsschaltanlagen, 2009

**Thomas Pollok, Thomas Dederichs, Thomas Smolka, Thomas Theisen, Bernhard Schowe-von der Brelie, Armin Schnettler**  
*Technical Assessment of Dispersed Electric Vehicles in Medium Voltage Distribution Networks*  
CIRED 2009, Session 1, No. 0887, Prague (Czech Republic) 2009

**Christoph Roggendorf, Tobias Blank, Stephan Thomas, Ionut Trintis**  
*Design and Constructions of a Test Bench to Characterize the Charging and Discharging Behaviour of Batteries in High Voltage Storage Systems*  
IRES 2009, Berlin, 24.-25. November 2009

**Claus Neumann, Bartosz Rusek, Ralf Puffer**  
*Witterungsabhängige Auslastung von Freileitungen basierend auf statistischen Auswertungen von Wetterdaten*  
Internationaler ETG-Kongress, FT4 - 7.3, Düsseldorf 2009

**Michael Schmale, Ralf Puffer, Hans-Joachim Dräger**  
*Optimierung der Strombelastbarkeit eines 220-kV Kabels*  
Internationaler ETG-Kongress, FT4 - 2.6, Düsseldorf 2009

**Michael Schmale, Hans-Joachim Dräger, Ralf Puffer, Reinhold Kliegel**  
*Freileitungs-Monitoring - Entwicklung und Einführung eines Systems zur witterungsabhängigen Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen*  
Internationaler ETG-Kongress, FT4 - 7.4, Düsseldorf 2009

**Uwe Macharey**  
*Ökoeffizienz von Flexibilisierungsmaßnahmen in Energieversorgungsnetzen unter Berücksichtigung der Integration von Windenergie*  
Dissertation, RWTH-Aachen 2009, Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-ir. Rik W. De Doncker

**Karl Alexander Tröger**  
*Analyse der elektrischen Durchschlagsmechanismen in syntaktischen Schäumen*  
Dissertation, RWTH-Aachen 2009, Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

**S. Joosten, Martin Splettstößer, Jiri Silny**  
*Probandenstudie zur Ermittlung von Spannungen am Ableitort kardialer Implantate mit bipolarem Sensing in elektrischen 50 Hz-Feldern einer Hochspannungsanlage Femu - Forschungsbericht 2009, S. 11-27*

**Thomas Markus Smolka**  
*Ökologisch-technische Auswirkungen dezentraler Energieversorgungsszenarien mit Blockheizkraftwerken in elektrischen Verteilungsnetzen Ecological-technical assessment of decentralized energy supply scenarios with combined heat and power systems*  
Dissertation, RWTH-Aachen 2009, Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, Korreferenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Univ.-Prof. Dr. Klaus Fröhlich

**Junliang Wu**

*Fremdschichtverhalten nanostrukturierter superhydrophober Isolierstoffoberflächen unter simultanen elektrischen und klimatischen Beanspruchungen*

Dissertation, RWTH-Aachen 2009, Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

**Thomas Dederichs, Thomas Smolka, Armin Schnettler, Bernhard Schowe-von der Brellie**

*Comparison of Future Energy Supply Scenarios with Dispersed Generation in Distribution*

CIREC 2009, Session 1, No. 0853, Prague (Czech Republic) 2009

**M. Wietschel, M. Arens, C. Dötsch, S. Herkel, W. Krewitt, P. Markewitz, D. Möst, M. Scheufen**

*Energiotechnologien 2050 - Identifizierung neuer Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte*

BWK - Das Energie-Fachmagazin - Ausgabe 10-2009

**M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch**

*CFD Calculation of Pressure Rise and Propagation due to Internal Arcing in a Closed Container*

XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, September 7 - 11, 2009

**R. P. P. Smeets, P. P. Leufkens, J. A. A. N. Hooijmans, N. Uzelac, P. Milovac, D. Kennedy, G. Pietsch, K. Anantavanich**

*On the Replacement of SF6 by Air in Internal Arc Testing of MV SF6 Insulated Switchgear*

20<sup>th</sup> Int. Conf. on Electricity Distribution, Prag, Czech Republic, 8-11 June 2009 (CIRED 2009), Paper 0392

**R. P. P. Smeets, J. Hooijmans, N. Uzelac, P. Milovac, D. Kennedy, G. J. Pietsch, K. Anantavanich**

*Störlichtbogenprüfungen von Mittelspannungsschaltanlagen*

Энергоэксперт No.2 -2009, pp. 90-94

**M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch**

*Simulation of pressure rise and propagation due to high current internal arcing in a closed container (in Japanese)*

IEE Japan, Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharges, Static Apparatus and Switching and Protecting Engineering, ED-09-56, SA-09-44, SP-09-13, Nagoya (Japan), pp. 59 - 62

**M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Miya-gi, T. Tadokoro, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch**

*Calculation of pressure rise and propagation due to high current fault arc in a closed container*

2009 Annual Meeting I.E.E. Japan, Sapporo, Japan, No. 6-236, p. 385



## Pfingstexkursion 2009

Wie jedes Jahr zur Pfingstzeit, wurde auch in 2009 vom IFHT eine Exkursion angeboten. An der Exkursion nahmen 43 Studierende und 7 wissenschaftliche Mitarbeiter sowie Prof. Schnettler teil. Dieses Jahr führte uns die Pfingstexkursion vom 1. bis zum 5. Juni durch die Schweiz, Österreich und Süddeutschland. Am ersten Tag stand ein Besuch bei der Pfiffner Messwandler AG und bei der Zentrale Mapragg der Nordost-Schweizerischen Kraftwerke auf dem Programm. Am nächsten Tag ging die Reise weiter Richtung Bregenz, wo wir die Omicron electronics GmbH besuchten. Der Besuch des neuen Porsche-Museums und eine Werksführung waren Grund des Aufenthalts in Stuttgart ehe wir zum Abschluss der Exkursion der Einladung der Siemens AG zum Schaltanlagenwerk in Frankfurt am Main folgten.

### Anreise

Am Montag den 1. Juni startete die Exkursion um 7:00 Uhr am IFHT. Trotz der frühen Uhrzeit fanden sich alle Teilnehmer pünktlich - wenn auch etwas verschlafen - am Bus ein, so dass wir uns auf die Reise Richtung Schweiz begeben konnten. Nach einer 8-stündigen Fahrt trafen wir an unserem ersten Zielort, der Züricher Jugendherberge ein. Um die müden Beine nach der langen Fahrt etwas zu lockern, lud Prof. Schnettler alle Teilnehmer am Abend zu einem kurzen Lauftraining durch Zürich ein - nicht jeder konnte dem „professoralem Tempo“ folgen. Die Züricher Innenstadt bildet eine gute Kulisse für das abendliche Freizeitprogramm.

### Zürich und Bad Ragaz

Am Dienstag den 2. Juni führte uns die Exkursion zur Pfiffner Messwandler AG in Hirschthal in der Nähe von Zürich. Nach einer kurzen Vorstellung der Firma Pfiffner wurde die anschließende Werksführung mit einer gelungenen theoretischen Einführung über Messwandler vorbereitet. Der anschließende Rundgang durch die Firma eröffnete uns interessante Einblicke in die Produktion des erfolgreichen mittelständischen Unternehmens. Nach der Stillung des Wissensdursts nahmen wir die Einladung zu einem reichhaltigen und liebevoll gestalteten Mittagessen mit Freude an, bevor uns

die Mitarbeiter der Firma verabschiedeten.



Abb. 1: Zentrale Mapragg

Nachdem sich alle Teilnehmer wieder im Bus eingefunden hatten, ging unsere Reise weiter zum Wasserkraftwerk Zentrale Mapragg der Nordost-Schweizerischen Kraftwerke in Pässers (bei Bad Ragaz).



Abb. 2: Nordost-Schweizerische Kraftwerke

Die Gruppe angehender Jungingenieure

schenkte der installierten Hochspannungstechnik besondere Aufmerksamkeit, bevor uns interessante technische Rahmendaten und Aspekte der Betriebsführung der Wasserkraftwerke vorgestellt wurden. Noch am Abend führte die Reise nach Bregenz zur Firma Omicron, welche uns zu einem gemütlichen Grillabend eingeladen hatte.



Abb. 3: Kickern am Grillabend

Unsere Gruppe zeigte sich von dem Firmengelände durchaus beeindruckt. Welche Bedeutung die Vielzahl der Einrichtungen zur Steigerung des sozialen Wohlbefindens in der Firmenphilosophie hat, sollten wir am nächsten Tag erfahren dürfen.

### Bregenz und Friedrichshafen

Am Mittwoch den 3. Juni schloss sich der am Vorabend stimmungsvoll eingeleitete Besuch der Firma Omicron an.



Abb. 4: Teilnehmer der Pfingstexkursion

Neben dem Rundgang durch die Firma und der Demonstration der Entwicklungsabteilung und Teile der Fertigung standen vor allem die fachlich fundierten und didaktisch sehr gut aufbereiteten interaktiven Vorträgen zum Thema Teilentladungs-

messung und dielektrische Messungen an Transformatoren im Mittelpunkt des Aufenthalts. Die Möglichkeit eigene Messungen durchzuführen, bereitete den angehenden Ingenieuren sichtlich Freude. Die Wahrnehmung einer wiederum anderen Firmenphilosophie und ein gänzlich anderes Motivations- und Führungssystem einer ingenieurwissenschaftlich geprägten Firma waren eine weitere gewinnbringende Erfahrung, welche sich nahtlos in die Diskussionen der letzten Tage einfügte. Wiederum nahmen wir die freundliche Einladung zum abschließenden Mittagessen vor der Weiterreise gerne an. Während der Nachmittagsstunden konnte die Gruppe die Vorzüge des Schifftransports genießen, da die Fahrt von Bregenz zu unserem nächsten Ziel Friedrichshafen per Schiff von statten ging.



Abb. 5: Eindrücke der Schifffahrt Bregenz-Friedrichshafen

Bei gutem Wetter wurde die Zeit zur fachlichen Diskussion auf dem „Sonnendeck“ von den Teilnehmern gerne und intensiv genutzt. Den Abend verbrachten alle in kleinen Gruppen in der Nähe des Bodensees.

### Stuttgart

Am Donnerstag den 4. Juni brachen wir schon früh Richtung Stuttgart auf, wo wir den Tag im Porsche Museum und im Porsche Werk selbst verbringen sollten. Im gerade erst eröffneten Porsche Museum konn-

ten über 80 geschichtsträchtige Fahrzeuge bestaunt werden. Die futuristische Architektur des neuen Museums beeindruckte ebenso, wie die technischen Leistungen der Fahrzeugbauer - auch wenn diese wohl eher dem Maschinenbau zugeordnet werden müssen, wie sich die Gruppe der angehenden Elektrotechnik-Ingenieure ungern eingestand.



Abb. 6: Besuch im Porschemuseum

Nach Besichtigung des Museums wurden wir zur Stärkung zu einem leckeren Mittagessen eingeladen. Nach dieser kleinen Pause ging es auch schon weiter mit einer Führung durch das Porschewerk. Hier durften wir die moderne Fertigung nach dem 'Porsche-Prinzip' bestaunen. Ein Konzept, welches aus den Fertigungsprinzipien des Toyota-Konzerns Anfang der Neunziger hervorging und weiterentwickelt wurde. Eben die für den Porsche-Konzern bedeutenden Einflüsse des „Toyotismus“ wurde den Aachener Gästen dann im anschließenden Vortrag von Herrn W. Strauss eindrucksvoll und hoch dynamisch demonstriert. Mit großem Interesse und anschließend begleitet durch einige Diskussionen auf der Fahrt zur JHB Stuttgart wurde die Darstellung einer im Vergleich zu den letzten erfolgreichen Unternehmen konträren Firmenphilosophie verfolgt. Nach dem Check-in in der Jugendherberge Stuttgart, forderte Prof. Schnettler die Teilnehmer

zu einer zweiten Laufrunde durch Stuttgart auf. Auch in diesem Jahr freuten sich die Teilnehmer über die Einladung zum gemeinsamen Abschlussessen durch Prof. Schnettler. In gemeinschaftlicher Atmosphäre ließ man bisherige Erlebnisse und Eindrücke Revue passieren und so bedankten sich die Teilnehmer der Exkursion herzlich mit einer kleinen Aufmerksamkeit bei Prof. Schnettler für die Exkursion und die Möglichkeit der Teilnahme.

### Frankfurt am Main

Am Freitag, den 5. Juni, verbrachten wir unseren letzten Besuch der diesjährigen Exkursion beim Schaltanlagenwerk der Siemens AG in Frankfurt am Main. Unser Besuch startete mit einer Präsentation der verschiedenen am Standort produzierten Mittelspannungsschaltanlagen. Im Anschluss wurden wir in kleinen Gruppen durch das Werk geführt, wo wir sowohl die Produktion als auch die Prüflabore besichtigen konnten. Unserer Gruppe wurde ein weiteres Produktionsprinzip innerhalb weniger Tage vor Augen geführt. Bei dem darauffolgenden gemeinsamen Mittagessen bestand für alle Teilnehmer die Möglichkeit Fragen an die Mitarbeiter der Siemens AG zu richten. Im Anschluss traten wir unsere Heimreise Richtung Aachen an. Nach einer anstrengenden, sehr interessanten und vielseitigen Woche erreichten wir das IFHT um ca. 20:00 Uhr.

### Organisation

Dipl.-Ing. Anja Strauchs  
strauchs@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94920

Dipl.-Ing. Martin Scheufen  
scheufen@ifht.rwth-aachen.de  
+49 241 80-94941

# Betriebsausflug ins „Hohe Venn“ und zur „Senfmühle“ in Monschau am 28. August 2009

*Die Mitarbeiter des Institutes erlebten ca. 4 Stunden die fantastische Natur in der Hochmoorlandschaft des Hohen Venn, einem Teil des Deutsch-Belgischen Naturparks. Nach dem Mittagessen fand eine Besichtigung der 100 Jahre alten Historischen Senfmühle in Monschau statt. Abgeschlossen wurde der Tag mit dem traditionellen gemütlichen Grillen bei Familie Schnettler.*

## Wanderung ins „Hohe Venn“

Um 8:15 Uhr fuhr der Bus vom IFHT zum Parkplatz Grenzweg bei Mützenich los. Auf dem Parkplatz wurden wir von zwei sachkundigen Naturführerinnen empfangen, die uns über eine Strecke von 10 km Naturweg durch das Hohe Venn führten. Am Anfang gingen wir durch das Schutzgebiet auf Holzstegen. Dort konnten wir vor allem Torfmoose sehen. Diese Pflanze wächst nur 1mm pro Jahr. Die Naturführerinnen stellten uns Lupen zur Verfügung, um die Pflanzen näher anzuschauen.



### Erklärungen zu den Hochmooren

Diese Torfmoose spielen eine sehr wichtige Rolle bei der Entstehung von Hochmooren. Die Hochmoore bilden ein einzigartiges Ökosystem, das aus der letzten Eiszeit vor etwa elf Tausend Jahren stammt. Zu dieser Zeit sind die sogenannten Palen entstanden, die wir entlang des Weges sehen konnten. Leider war die Jahreszeit

der Wanderung ungünstig für die Beobachtung der außergewöhnlichen Flora. Allerdings war die typische Fauna dieser Region, wie z.B. Libellen und kleine Kröten zu sehen. In der Nähe der deutsch-belgischen Grenze erreichten wir eine besondere Sehenswürdigkeit in Form eines Quarzitfelsens, der der Legende nach als improvisierte Übernachtungsmöglichkeit einem verirrtten Kaiser Karl dem Großen diente. Dieser Ort wurde daher Kaiser Karl Bettstatt benannt.



### Kaiser Karls Bettstatt

Die Wanderung endete an einem Aussichtsturm, von dem die Landschaft eindrucksvoll zu sehen war. Anschließend gab es ein reichhaltiges Mittagessen im „Venn-gasthof zur Buche“.



*IFHT-Mitarbeiter von der Ansichtsturm-Perspektive*

### **Besichtigung der „Senfmühle“**

Zum Abschluss besichtigten wir die 100 Jahre alte Senfmühle, die ursprünglich mit einem Wasserrad angetrieben wurde, später aber durch Maschinen ersetzt wurde. Direkt nach Betreten des Herstellungsraums spürten wir das starke Aroma des reinen Senfs. Die Führerin zeigte und erklärte uns die Geschichte des Produktes Senf.



*Senfmühle*

Ferner wurde uns der ganze Entwicklungsprozess gezeigt. Am Anfang hatten wir die Möglichkeit, die Senfsamen zu sehen und zu schnuppen. Danach werden die Senfkörner zwei Mal hintereinander gemahlen, um das Aroma des Endprodukts zu intensivieren. Zum Ende der Besichtigung konn-

ten wir den frisch gepressten Senf probieren. Es gab unterschiedliche Senfsorten für alle Geschmacksrichtungen, und manche Kollegen kauften mehrere Senfgefäße. Die Rückfahrt nach Aachen erfolgte nach einem außergewöhnlichen und interessanten Betriebsausflug. Leo Künzer hatte anlässlich seines 40jährigen Dienstjubiläums Getränke mitgebracht, so dass wir mit anstoßen konnten.

### **Ausklang bei Familie Schnettler**

Anschließend wurden alle IFHT-Angehörigen von Familie Schnettler zum Grillen im Garten ihres Hauses in Kornelimünster eingeladen. Ob mit Fahrrad oder Auto, es nahmen fast alle Kollegen gerne an diesem Abend teil und brachten unterschiedliche Beilagen mit. Wir konnten genügend Essen und Trinken genießen und außerdem die aufgenommenen Kalorien bei spannenden Spielen wieder abtrainieren. So endete dieser angenehme Tag in einer äußerst gemütlichen Atmosphäre.



*Tischtennis bei Familie Schnettler*

### **Organisation**

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

## Hochspannungstechnische Gesellschaft (HTG) an der RWTH Aachen e.V.

Im ersten Jahr nach der Gründung der "Hochspannungstechnischen Gesellschaft an der RWTH Aachen e.V." (kurz: HTG) im November 2008 musste sich zeigen, ob die Struktur des Ehemaligenvereins an Form gewinnt und ob erste Schritte zur Erreichung der gesetzten Ziele getätigt werden können.

Zunächst konnten einige wichtige Formalien zu Beginn des Jahres 2009 erledigt werden: Der Verein wurde in das Vereinsregister eingetragen und das Finanzamt hat anerkannt, dass die HTG ausschließlich und unmittelbar steuerbegünstigten Zwecken dient. Inhaltlich wurde die Arbeit mit einer offenen Vorstandssitzung im Februar 2009 und vor allem mit der ersten, außerordentlich gut besuchten Mitgliederversammlung am 15.05.2009 gestartet (Abb. 1 bis 3). Die Versammlung war in das Ehemaligentreffen des IFHT eingebettet und die Gelegenheit wurde genutzt, den Verein einem größeren Kreis von Ehemaligen direkt vorzustellen (Abb. 4).



Abb. 1: Mitgliederversammlung 2009: Mitglieder

Auf der Mitgliederversammlung wurde zudem der erste Beirat der HTG gewählt, der sich aus dem Beiratsvorsitzenden, Prof. Schnettler sowie den Mitgliedern Dr. Heil, Dr. Lennertz, Dr. Puffer und Dr. Saveliev zusammensetzt.

Der Vorstand (Dr. Cornelissen, Prof. Schnettler, Dr. Walter) des Vereins, der im Jahre 2009 weiter gewachsen ist und nunmehr 35 Mitglieder umfasst, befasst sich zusammen mit dem Beirat aktuell mit folgenden Aktivitäten:

- Der Aufbau einer vereinsinternen Mitgliederdatenbank, über welche die Mitglieder in einfacher Weise Kontakt zueinander aufnehmen können, befindet sich kurz vor dem Abschluss.
- Eine Strategieguppe wird das Institut künftig hinsichtlich der strategischen Ausrichtung beraten.
- Der wissenschaftliche und berufliche Kontakt zwischen den Ehemaligen und den studentischen und wissenschaftlichen Institutsangehörigen wird gestärkt. Hierzu werden zwei Angebote auf den Webseiten der HTG realisiert: In einer auch für Nichtmitglieder einsehbaren Datenbank können HTG-Mitglieder Firmen-Kurzprofile und Stellenangebote einstellen. In einer geschlossenen, zweiten Datenbank können Studenten und Doktoranden des Instituts eigene Ge-

suche für Arbeitsstellen, Master-/Diplomarbeiten, Praktika, Werkstudententätigkeiten etc. aufgeben, die an Mitglieder des Vereins versendet werden.

- Es soll eine finanzielle Förderung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Institutsangehörigen erfolgen. Auch der Druck der Dissertationen wird gefördert, sofern der Doktorand Mitglied der HTG wird.
- Zur ideellen Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses soll HTG-Mitgliedern die Möglichkeit eröffnet werden, fachliche und praxisbezogene Vorträge zu halten.



Abb. 2: Mitgliederversammlung 2009: Vorstand

Die Arbeitspakete für das Jahr 2010 sind also geschnürt und Beirat sowie Vorstand freuen sich auf die Bearbeitung und Realisierung der oben aufgeführten Ansätze. Noch mehr freuen wir uns jedoch über Ehemalige, die Interesse haben, in der HTG ak-

tiv mitzuwirken - und sei es "nur" für ein kleines, zeitlich begrenztes Projekt.

Die nächste Mitgliederversammlung, zu der auch noch unentschlossene Nichtmitglieder aus dem Kreis der Ehemaligen herzlich eingeladen sind, wird voraussichtlich am 11.06.2010 stattfinden, wobei sich ein geselliger Abend anschließen soll.



Abb. 3: Ehrung für ein 25jähriges Promotionsjubiläum



Abb. 4: Vorstellung der HTG beim Ehemaligentreffen

Weitere Informationen wie immer unter [www.htg-aachen.de](http://www.htg-aachen.de).

## Girls'day 2009 - Wir lassen es krachen!

*Am 23. April beteiligte sich das IFHT vertreten durch Herrn Hille unter dem Motto „Hochspannung - Wir lassen es krachen!“ am Girls'day 2009.*

Der Girls'day fand dieses Jahr zum 9. Mal in ganz Deutschland statt. 2001 wurde dieser Aktionstag ins Leben gerufen um den Schülerinnen der Jahrgangsstufen 5 bis 10 aller Schultypen die Gelegenheit zu geben einen kleinen Einblick in technische, naturwissenschaftliche und ingenieurwissenschaftliche Berufe zu gewinnen. Die RWTH Aachen und das Universitätsklinikum haben sich dieses Jahr ebenfalls wieder am Girls'day mit rund 40 Veranstaltungen beteiligt. Insgesamt folgten ca. 420 Mädchen aus der Stadt und dem Kreis Aachen der Einladung, um an attraktiven Workshops teilzunehmen. Der Tag begann für die Mädchen mit einer Einführungsveranstaltung im Fo2 des Karmán-Auditoriums. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Schmachtenberg, Rektor der RWTH, ließ es sich nicht nehmen die zahlreichen Schülerinnen in einer kleinen Rede persönlich zu begrüßen. Anschließend erfolgte die Zuteilung in die einzelnen Workshops. Die Gruppe des IFHTs bestand aus insgesamt 15 Mädchen im Alter von 14 bis 16 Jahren.

Unter der Leitung von Herrn Hille erfolgte im Rogrowski-Gebäude eine kurze Vorstellung des Institutes, sowie eines Studiums an der RWTH mit dem Schwerpunkt E-Technik. Zur Veranschaulichung des Alltags eines Studenten an der RWTH wurde im Anschluss der größte Hörsaal der RWTH-Aachen, das Audimax, vorgestellt. Zum Glück begann gerade eine HöMa-Vorlesung, so dass die Mädchen einen sehr vollen Hörsaal sahen.

Fortgeführt wurde der Girls'Day anschließend im Seminargebäude. Dort hatte Herr Hille einen kleinen Versuchsaufbau für die Mädchen vorbereitet. Die Schülerinnen sollten hier einmal selbst erleben kön-

nen, wie elektrische Messungen durchgeführt werden können. Hierbei konnten ihnen einige wesentliche Punkte eines Ingenieursstudiums auf praktische und anschauliche Weise näher gebracht werden. Zugleich konnten die Mädchen so auch ihr eigenes Verständnis für elektrotechnische Sachverhalte, den Umgang mit einer wissenschaftlichen Software und dem Eigenständigen Bearbeiten von Problemstellungen testen.

Nach erfolgreichem absolvieren des Versuches, alle Mädchen hatten ohne Probleme die richtige Lösung erzielt, endete der Girls'day am IFHT mit einer etwa einstündigen Vorführung in der Hochspannungshalle, an der auch zwei Organisatorinnen des Girls'days teilnahmen. Bei Durchschlägen und Überschlägen bei mehr als 300 kV fand somit der Girls'day am IFHT einen beeindruckenden und würdigen Ausklang.



*Abb. 1: Teilnehmer und Organisatoren des Girls'day 2009 am IFHT*

### Kontakt

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