

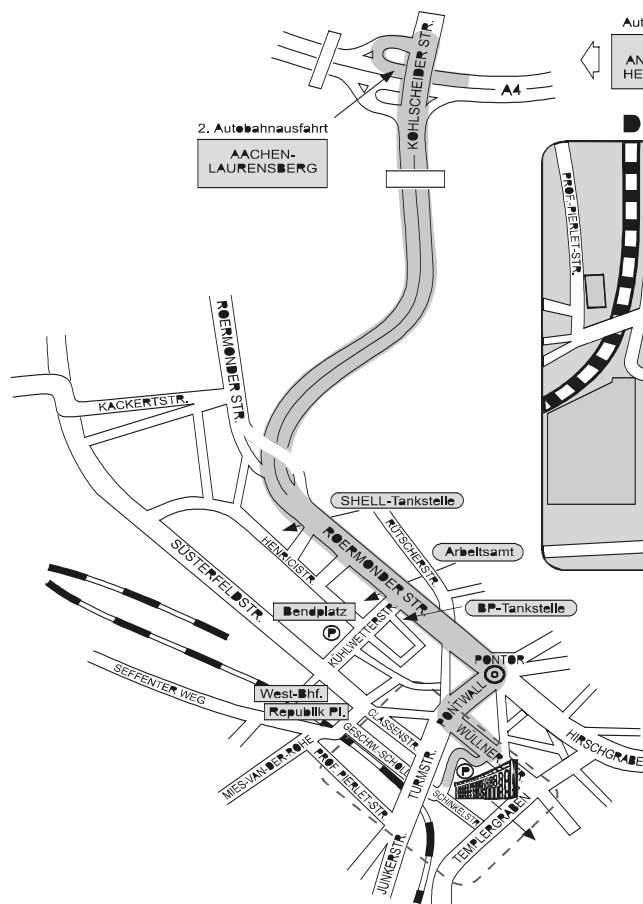


Jahresbericht 2002

*Institut für Hochspannungstechnik
Schinkelstraße 2
52056 Aachen*

*Telefon: 0241-80-94930
Fax: 0241-80-92135
e-mail: post@ifht.rwth-aachen.de
Internet: www.ifht.rwth-aachen.de*

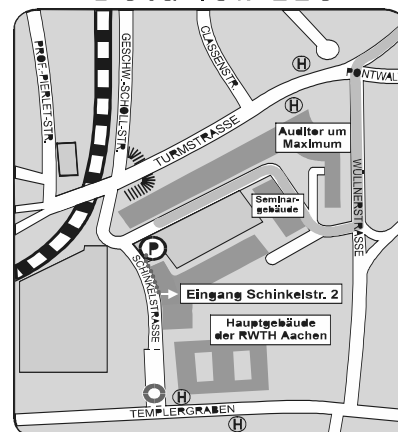
Anfahrtskizze



Autobahnkreuz Aachen:

Richtung
ANTWERPEN/Belgien
HEERLEN/Niederlande

Detailskizze



*Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
Institut für Hochspannungstechnik (ifht) der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
(RWTH) Aachen*

*Redaktion: Dipl.-Ing. Robert Dommerque
Redaktionsschluß: 03.12.2002*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Forschung am ifht

Berichte aus der laufenden Forschung

Automatisierung der Ultraschalldiagnostik polymerer Isolierstoffe	10
Kinetische Modellierung des Vakuumlichtbogens	14
Untersuchungen zur HF-Strom-Konditionierung von Vakuumschaltern . . .	18
Vergleich physikalischer Modelle zur Beschreibung von Strahlung und Gasströmung in SF ₆ -Selbstblasschaltern	22
Modellierung und Simulation des abklingenden SF ₆ Lichtbogens in Hochspannungsleistungsschaltern	26
Aufbau eines synthetischen Prüfkreises zur Untersuchung von Hochleistungsschaltern	30
Untersuchungen zur Beherrschung von Störlichtbögen in Luft	34
Reduktion von Schwefeldioxid mit Barrierenentladungen	38
Einsatzspannung in koplanaren Barrierenentladungsanordnungen	42
Untersuchung zur Zustandsüberwachung an Leistungsschaltern	46
Entwicklung leichter, kompakter Hochspannungsisoliersysteme	50
Ökobilanzierung von Energieversorgungsnetzen	52

Dissertationen

Experimentelle Untersuchung der Heißgasströmung in einem SF ₆ -Selbstblasschaltermodell mittels Particle Image Velocimetry	54
Modellierung des dynamischen Verhaltens von Oberflächen-Barrierenentladungen und der Ozonerzeugung	62
Modellierung der Auswirkungen von Störlichtbögen in elektrischen Anlagen	70

Diplom-, Staats- und Studienarbeiten - 2002 abgeschlossen

Veröffentlichungen

Lehre am ifht

Vorlesungen und Praktika	79
------------------------------------	----

Das Institut

Chronik	91
VDE Seminar	98
Kabelkolloquium	100
Betriebsausflug	102
Exkursion Hochspannungstechnik	104
Schweiz/Italien Exkursion	106
Mitarbeiter 2002	109

Contents

Preface

Research at ifht

Scientific Reports

Automated Ultrasonic Diagnosis of Polymeric Insulation Materials	12
Simulation of Vacuum Arcs in Circuit Breakers Based on Kinetic Modelling	16
Investigations on HF-Current Conditioning of Vacuum Breakers	20
Comparison of different Physical Models to simulate Radiation Transfer and Gas Flow in SF ₆ -Selfblast Circuit Breakers	24
Modelling and simulation of the decaying SF ₆ arc in modern self-blast circuit breakers	28
Construction of a Synthetic Test Setup to Investigate the Thermal Recovery Strength of SF ₆ -Circuit-Breakers	32
Investigations on the Control of Fault Arcs in Electrical Installations	36
Sulphur Dioxide Reduction in Barrier Discharges	40
On the Ignition Voltage of Coplanar Barrier Discharges	44
Non Invasive Condition Monitoring of High Voltage Circuit Breakers	48
Development of Light and Compact High Voltage Insulation Systems	51
Life Cycle Assessment of Power Grids	53

PhD Theses

Experimental Investigation on the Hot Gas Flow inside an SF ₆ Selfblast Circuit Breaker using Particle Image Velocimetry	58
Modelling of the Dynamic Behaviour of Surface Barrier Discharges and Ozone Generation	66
Diploma- and Project Theses	74
Publications	76

Teaching at ifht

Lectures and Laboratories	79
-------------------------------------	----

The Institute

Chronicle	91
VDE Seminar	98
Cabel Colloquium	100
Aktivities 2002	102
Excursion High-Voltage Lectures	104
Excursion Italy	106
Staff 2002	109

Sehr geehrte Freunde des Instituts,

der Ihnen vorliegende Jahresbericht dokumentiert einerseits laufende Arbeiten, Resultate und Ereignisse des Institutes für Hochspannungstechnik und andererseits verdeutlicht er, dass bereits wieder ein Jahr seit der letzten ausführlichen Berichterstattung vergangen ist. Ein Jahr, das geprägt war von schwierigeren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im Allgemeinen und von vielen größeren und kleineren Fortschritten in unseren Aktivitäten im Speziellen. Zurückblickend bin ich erfreut, Ihnen mitteilen zu können, dass wir auf ein arbeitsreiches aber auch erfolgreiches Jahr 2002 zurückblicken können.

Am 4. November 2002 wurde - nach kurzen, intensiven Gesprächen - der Kooperationsvertrag zwischen der „Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft FGH e.V.“ und der RWTH Aachen feierlich unterzeichnet. Mit Wirkung zum 1. Januar 2003 wird die FGH e.V. als An-Institut der RWTH Aachen unter der Leitung von Herrn Professor Haubrich und mir als Vorstände geführt. Die Kooperation mit der FGH verstärkt noch mehr die bereits sehr enge Zusammenarbeit der energietechnischen Institute mit der Industrie und wird als Kristallisationspunkt und solides Fundament für das angestrebte „Europäische Kompetenzzentrum für Energiewirtschaft und Hochspannungstechnik“ angesehen. Die seit Veröffentlichung eingegangenen Rückmeldungen aus dem weiten Kreis der Energietechnik sind überaus positiv und vielversprechend. Alle Mitarbeiter freuen sich auf eine herausfordernde und erfolgreiche Zusammenarbeit mit der FGH e.V. und deren Mitgliedsunternehmen.

Auch in wissenschaftlicher Hinsicht

können wir auf ein erfolgreiches Jahr zurückblicken. Vier abgeschlossene Dissertationen (Dr.-Ing. Roland von Starck, Dr.-Ing. Ralf Puffer, Dr.-Ing. Christof Humpert, Frau Dr.-Ing. Xiang Zhang) sowie eine größere Zahl von Publikationen und Vorträgen dokumentieren unsere Aktivitäten. Den damit verbundenen Abgang von wissenschaftlichen Mitarbeitern konnten wir teilweise durch den Zugang von Herrn Dipl.-Ing. Michael Schwinne kompensieren, müssen aber feststellen, dass weiterhin ein Mangel an energietechnisch interessierten und hochqualifizierten Mitarbeitern besteht. Umso mehr danken wir unseren neuen Alumni für ihr großes Engagement und wünschen Ihnen auch weiterhin viel Erfolg in ihren neuen Aufgaben. Besonders bedanken wir uns bei Dr.-Ing. Alexander Schmitz, der als Oberingenieur maßgeblich zum reibungslosen Institutsbetrieb beigetragen hat sowie Frau Suttner und Herrn von Felde, die uns nach vielen Jahren Betriebsverbundenheit in den Ruhestand verlassen haben. Die Nachfolge von Frau Suttner als Leiterin des Geschäftszimmers hat Frau Zakowski übernommen, deren Team seit Mitte 2002 durch Frau Böhm tatkräftig unterstützt wird.

Besonders stolz sind wir auf unsere VDE/ETG-Preisträger Dr.-Ing. Markus de Hesselle und Dr.-Ing. Ralf Puffer, die für ihre Veröffentlichung „Strömungssimulation als Werkzeug in der Entwicklung von Hochspannungsleistungsschaltern“ im Rahmen des VDE-Kongresses 2002 mit dem ETG-Literaturpreis ausgezeichnet wurden. Zudem wurden für Ihre hervorragenden Leistungen an der RWTH Aachen Dr.-Ing. Ralf Puffer mit der Borchers-Plakette und Dipl.-Ing. Michael Schwinne mit der Springorum-Gedenkmünze geehrt.

Im November haben wir uns im Rahmen eines „Kabelkolloquiums“ von unserem langjährigen Lehrbeauftragten, Herrn Professor Wolf-Dieter Schuppe gebührend verabschieden können. Über 25 Jahre hat Prof. Schuppe Studenten und auch wissenschaftlichen Mitarbeiter in anschaulicher und interessanter Weise das Fachgebiet „Energiekabel“ näher gebracht. Für sein außergewöhnliches Engagement sowie seine langjährige Unterstützung danken wir Prof. Schuppe auch an dieser Stelle sehr herzlich. Mit Beginn des Wintersemesters 2002/03 hat Dr.-Ing. Dietmar Meurer als Lehrbeauftragter die Vorlesung „Energiekabel / Power Cable Engineering“ übernommen. Hierbei wünschen wir ihm viel Erfolg und freuen uns auf eine angenehme und langjährige Zusammenarbeit.

Erfreulicherweise können wir über eine weiter steigende Nachfrage durch Studenten der Diplom- und Masterstudiengänge berichten. Etwa 60 Studenten pro Semester in den Vorlesungen Hochspannungstechnik I/II bzw. High Voltage Engineering I/II bilden einen angenehmen Zuhörerkreis. Die steigende Nachfrage manifestiert sich auch in einer steigenden Zahl von Studien-, Master- und Diplomarbeiten (z.B. derzeit 7 parallel laufende Diplomarbeiten), über die wir gerne im nächsten Berichtszeitraum näher informieren wollen.

Ebenfalls erfolgreich verlief im Juni unsere Blockvorlesung „Schaltgeräte und Schaltanlagen“, die erstmalig als gemeinsames VDE-RWTH-Seminar unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Martin Schumacher, ABB, stattfand. Über 80 Teilnehmer, zu ungefähr je einem Drittel von Netzbetreibern, Herstellerunternehmen und Hochschulen, fanden sich in Aachen ein, um an zwei intensiv genutzten Tagen die Thematik der Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen kennen zu lernen.

Aufgrund der guten Resonanz werden wir das Seminar jährlich mit leicht erweitertem Inhalt anbieten; die nächste Durchführung ist für die erste Juliwoche 2003 vorgesehen.

Die umfangreichen Umbau- und Renovierungsmaßnahmen gehen stetig voran. Die Installation einer neuen Krananlage, eines neuen Versuchsstandes sowie der Neubau der Mechanischen Werkstatt in der Mittelspannungshalle läuft, die Automatisierung der Wechselspannungsanlage sowie die Inbetriebnahme des neuen Stossspannungsgenerators in der Hochspannungshalle wurden erfolgreich abgeschlossen, während die „Hochspannungsklimakammer“ (15 m³ nutzbares Volumen; -40°C..+150°C) gerade in Betrieb genommen wird. Des Weiteren konnte in einen neuen automatisierten 100 kV-Prüfplatz investiert sowie die bestehenden 100 kV-Prüfplätze automatisiert werden. Parallel werden fünf Laboratorien umgebaut, über deren Einsatzgebiet später näher berichtet wird.

Abschließend möchte ich auch in diesem Jahr allen Freunden und Geschäftspartnern und insbesondere allen Mitarbeitern des Institutes für Hochspannungstechnik meinen Dank für die persönliche, ideelle, materielle und finanzielle Unterstützung aussprechen. Ich freue mich auf eine weiterhin angenehme und erfolgreiche Zusammenarbeit.

Mit den besten Wünschen für eine friedliche und erholsame Weihnachtszeit sowie einem guten Jahr 2003
Ihr



Aachen, im Dezember 2002

Dear friends,

it is again time to inform you more in detail about content and results of our research projects, other activities and events we had at our Institute for High Voltage Technology during the year 2002. Despite quite challenging business conditions I am pleased to tell you about significant progress and promising results which is in brief documented in this annual report.

First of all, on Nov. 4th, 2002, we signed a cooperation agreement between the „FGH e.V. - Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft“ (the well-known research center for power systems and power economics located in Mannheim) and Aachen University (RWTH). With effect of Jan 1st, 2003 FGH e.V. will be managed by Prof. Haubrich and myself acting as the managing directors. Using synergy effects out of this close and intensive cooperation we are on the way to establish the „European Center of Excellence for Power Systems and Power Economics“. Based on a remarkable number of responses and contacts we got from all relevant industries since the cooperation agreement has been signed, we are confident to implement our Center of Excellence on a very solid basis. We are looking forward to an interesting, challenging and powerful cooperation with FGH and its present and coming member organizations!

Beside these strategic aspects we have been quite active in our scientific work as well. Four successfully completed PhD-Theses (Dr.-Ing. Roland von Starck, Dr.-Ing. Ralf Puffer, Dr.-Ing. Christof Humpert, Ms. Dr.-Ing. Xi-ang Zhang) and a significant number of publications and presentations give a broad overview on our research ac-

tivities. Although Dipl.-Ing. Michael Schwinne joint our team we could not expand our scientific staff as planned - we have to report that the number of highly qualified young engineers still does not match our demands. However, we do hope to get this issue solved during 2003 and we would like to thank our new alumni for their engagement and to express our best wishes for their future career. Special thanks we send to Dr.-Ing. Alexander Schmitz who has contributed significantly to our overall success as well as to Gisela Suttner and Uwe von Felde - both have been an important part of us for quite a long time and retired beginning of the year. Succeeding Miss Suttner, Hannelore Zakowski took over the lead of our administration office and, since mid 2002, well assisted by Erika Böhm.

In addition, we are proud to announce that Dr.-Ing. Markus de Hesselle and Dr.-Ing. Ralf Puffer have been selected for the VDE/ETG Literature Award 2002 which is based on their publication „Computational fluid dynamic simulations as an important tool for the development of high voltage circuit breakers“. Both of them received their award during the VDE-Kongress 2002, (the biannual general meeting of the German association for electrical, electronic and information technologies) in Dresden. I am pleased to announce that both Dr.-Ing. Ralf Puffer (Borchers medal) and Dipl.-Ing. Michale Schwinne (Springorum medal) received additional awards for extraordinary results for their PhD - theses resp. Diploma program.

During a „Power Cable Colloquium“ we took the opportunity to express our special thanks to Professor Wolf-Dieter Schuppe, who stepped back from his task as lecturer for „Power Cables“.

For more than 25 years Prof. Schuppe has been able to train a huge number of students about business and technologies of power cables. Starting with the winter courses 2002/03 Dr.-Ing. Dietmar Meurer took over the challenging task to motivate and inform/train students about „Power Cable Engineering“ - we wish him all the best for his lectures and are looking forward to a close and long lasting cooperation.

We are glad to report a continuously increasing number of students interested in our lectures (out of the diploma and master programs). Approximately 60 students per semester in the Hochspannungstechnik/ High Voltage Engineering courses are an excellent basis to recruit people for our scientific staff. In addition, we see a rising demand for our research projects (e.g. currently 7 Diploma-Theses in process) which we take as a preliminary and positive feedback from students on our activities.

In close cooperation with the VDE/ETG we carried out our course on „High- and Medium Voltage Breakers and Substations“ which has been established as a two days seminar headed by Dr.-Ing. Martin Schumacher, ABB, and supported by very experienced lecturers from industrial companies. Some 80 participants 1/3rd each from utilities, manufacturers and universities attended the seminar. Based on the positive feedback, we decided to offer the seminar regu-

larly; the next execution is scheduled for beginning of July 2003.

Beside this, we have seen significant progress in our renovation and reconstruction activities. Right now, we are in the process to install a new crane, a new laboratory and a new mechanical workshop within our medium voltage hall. We finished the automation of our High Voltage Laboratory including the delivery of a new Marx Generator while the final acceptance test of our „high-voltage climatic chamber“ (15 m³ effective volume; -40°C..+150°C) is expected by year end 2002. Additionally, a new 100 kV test set up could be installed, all other 100 kV test set ups have been automated and another 5 laboratories have been reconstructed.

Finally, I would like to express my special thanks to all friends, partners and especially to all co-workers of the Institute for High Voltage Technology. Without your engagement, commitment and support we would not be where we are right now! I am looking forward to continuing our close and successful cooperation.

With all my best wishes for a peaceful Christmas time and a Happy New Year!

Sincerely yours



Aachen, December 2002

Berichte aus der Forschung
Dissertationen
Diplom- und Studienarbeiten
Veröffentlichungen

9

Research at ifht
PhD Theses
Diploma- and Project Theses
Publications

Automatisierung der Ultraschalldiagnostik polymerer Isolierstoffe

An Energiekabelsystemen wird die Anwendbarkeit der Ultraschalldiagnostik und der Kernspinresonanz als neue, nicht-destruktive Verfahren der Zustandsbewertung erprobt. Die Detektierbarkeit und Lokalisierbarkeit der wesentlichen Ursachen und Symptome nachhaltiger Schädigungen werden dabei untersucht. Die bereits gewonnenen Ergebnisse rühren aus der Analyse singulärer Fehlstellen (z.B. Microvoids) und volumenbehafteter Phänomene (inhomogene Vernetzungsdichte u.ä.) her und bestätigen die Einsatzfähigkeit dieser Verfahren zur Zustandsbewertung. Ein momentan im Aufbau befindliches System zur automatisierten Messwerterfassung, -verarbeitung und -bewertung ist ein weiterer Schritt in Richtung einer potentiellen industriellen Anwendung.

Einleitung

In Energiekabelsystemen kommen heute überwiegend polymere Isolierstoffe (Polyethylen, Silikonkautschuke etc.) zum Einsatz. Unter mechanischer, thermischer und elektrischer Beanspruchung kann es bei diesen Materialien langfristig zu irreversiblen Schädigungen kommen, die zu einem Versagen der Isolierfunktion führen.

Die Ursachen für das Voranschreiten dieses Schädigungsprozesses sind sehr vielfältig. Produktionsbedingte Fehler wie Bereiche unvollständiger Vernetzung und Microvoids können beschleunigend wirken. Auch Grenzflächen spielen aufgrund der komplizierteren Produktionsbedingungen eine wesentliche Rolle.

Im Rahmen einer Zustandsbewertung ist daher eine frühzeitige Erkennung derartiger Fehler gefordert, was jedoch mit etablierten Verfahren (z.B. Teilentladungsdagnostik) oftmals nicht möglich ist. Aus diesem Grund werden als alternative Methoden die Ultraschalldiagnostik und die Kernspinresonanz (NMR) untersucht, wobei die NMR-Messungen am Institut für Makromolekulare Chemie durchgeführt werden, mit dem eine enge Forschungs Kooperation besteht [1].

Ultraschalldiagnostik

Das Standardverfahren in der Ultraschalldiagnostik ist die Impuls-Echo-Methode: Ein Piezokristall erzeugt Ultraschall-Impulse, die in den Probekörper eindringen und aufgrund der unterschiedlichen Schallimpedanzen an der Rückwand sowie an Fehlstellen im Material reflektiert werden (Abb. 1). Das Reflektionssignal wird aufgefangen und visualisiert. Es ist so möglich, Aussagen über die Größe, Lage und Art der Fehlstelle zu treffen [2].

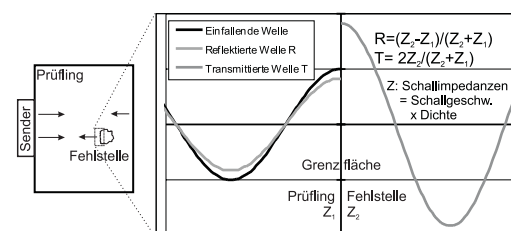


Abb. 1: Impuls-Echo-Methode: Verhalten an Grenzflächen

Um auch großvolumige Objekte (z.B. industriell gefertigte Muffen) systematisch untersuchen zu können, befindet sich momentan ein System im Aufbau, mit dessen Hilfe ein automatisches Ultraschall-Scanning derartiger Prüflinge möglich ist. Die gewonnenen Messdaten werden automatisch auf die wesentlichen Kenngrößen reduziert und sollen mittels Musterer-

kennungsverfahren und Datenbankabgleich bewertet werden.

Ergebnisse

Volumenwirksame Einflüsse

Unvollständige Vernetzung ist ein Beispiel für einen volumenwirksamen Einfluss auf die Lebensdauer eines Betriebsmittels. Die Analyse der Detektierbarkeit von Unterschieden im Vernetzungsgrad mit Hilfe der Ultraschall-diagnostik hat ergeben, dass eine Sensibilität auf diesen Parameter vorliegt. Diese soll nun in systematischen Folgeuntersuchungen an industriell gefertigten Prüfobjekten genauer quantifiziert werden.

Singuläre Inhomogenitäten

Bei der Untersuchung singulärer Inhomogenitäten hat sich bezüglich des Auflösungsvermögens gezeigt, dass sphäroidische Inhomogenitäten bis zu einem Durchmesser von 0,25 mm detektiert werden können [3].

Befindet sich die Fehlstelle nahe vor einer Grenzfläche, so wird die Ultraschallmessung aufgrund des benachbarten Grenzschnittsignals problematischer. Es wird jedoch bei einem Abstand von 3 mm zwischen Fehlstelle und Grenzschnitt weiterhin die oben genannte Auflösung erreicht, für kleinere Werte wird das Auflösungsvermögen momentan ermittelt. Zudem wird die Detektierbarkeit von Inhomogenitäten *hinter* Grenzflächen untersucht, deren Signalstärke zusätzlich vermindert ist (vgl. Abb. 1). Abb. 2 zeigt exemplarisch eine derartige Messung.

Erste Untersuchungen zum Einfluss des Materials und der Geometrie der Fehlstelle deuten auch hier auf eine Anwendbarkeit des Verfahrens hin.

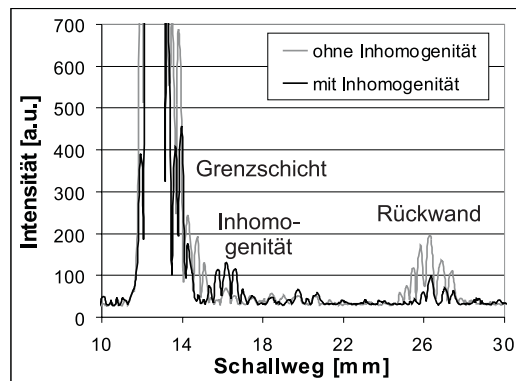


Abb. 2: Ultraschallmessung einer Inhomogenität *hinter* einer Grenzschnitt

Ausblick

Die bisher gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Anwendbarkeit beider Verfahren zur Fehlerartenkennung. Ihr Potential - insbesondere im Hinblick auf einen Einsatz zur automatisierten industriellen Zustandsbewertung - wird in fortlaufenden Untersuchungen im Detail analysiert.

Quellen

- [1] C. Cornelissen, A. Wiesmath, A. Schnettler, B. Blümich; Nicht-destruktive Verfahren zur Zustandsbewertung von Kabelsystemen: Ultraschall und Kernspinresonanz; EW 101 (2002), Nr. 10, S. 38-43
- [2] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer; Werkstoffprüfung mit Ultraschall; Springer-Verlag, 1986
- [3] C. Cornelissen, A. Schnettler; Neue Verfahren zur Zustandsbewertung von Kabelsystemen; ETG-Fachbericht 87 (2002)

Kontakt

Dipl.-Phys. Christian Cornelissen
 Cornelissen@ifht.rwth-aachen.de
 ++49/(0)241/80-94940

Automated ultrasonic diagnosis of polymeric insulation materials

Ultrasonic and Nuclear Magnetic Resonance are considered as new non-destructive methods for quality assessment in power cable systems. The investigations focus on the detection and localization of essential symptoms and causes of lasting damages. Recent results are based on the analysis of singular inhomogenities (e.g. microvoids) and voluminous phenomena (inhomogeneous crosslinking density etc.). They confirm the applicability of these techniques. A recently built-up system for automated recording, processing and evaluation of measurement data is a further step towards a possible industrial application.

Introduction

Nowadays in power cable systems mainly polymeric insulation materials (polyethylene, silicone rubber etc.) are used. Due to mechanical, thermal and electrical stress, long-term irreversible damages can occur, which lead to a breakdown of the insulating system.

The reasons for a progress of these damaging processes are multifaceted. Failures during the production process like areas of incomplete crosslinking and microvoids may be accelerative. Also boundary layers play a major part due to the more complicated production conditions. Regarding quality assessment, an early detection of such faults is necessary, but often not possible using established techniques like PD measurements. For this reason Ultrasonic and Nuclear Magnetic Resonance (NMR) are considered as alternative methods. Thereby the NMR-measurements are carried out in the *Institute of Macromolecular Chemistry*, to which a close contact exists [1].

Ultrasonic diagnosis

The mainly used method in ultrasonic diagnosis is the pulse-reflection-method: a piezoelectric transducer generates ultrasonic impulses, which penetrate the test object. These are

reflected at the back plane as well as at any fault in the specimen due to changes in the wave resistance Z (fig. 1). The signal of reflectance is detected and visualized. Thereby it is possible to obtain information about the dimension, position and character of the enclosed fault [2].

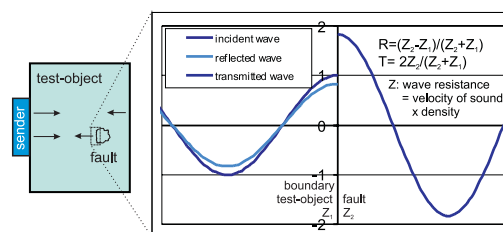


Fig. 1: Pulse-reflection-method: behaviour at boundaries

In order to investigate also larger objects (e.g. industrial produced HV-joints) systematically, a measurement system for an automated scanning of such objects has recently been built-up. The recorded data are automatically reduced to the most important characteristic values and an evaluation by using pattern recognition and database-comparison is planned.

Results

Volume-effective influences

Incomplete crosslinking is an example of a volume-effective influence on

the life cycle of utilities. The analysis of the measurability of differences in the crosslinking density by use of ultrasonic shows a sensibility on this parameter. This will now be investigated more in detail using industrial produced test objects.

Singular inhomogeneities

Recent investigations regarding the resolution of ultrasonic measurements have shown, that spherical inhomogeneities with a diameter of 0.25mm can be detected [3]. If the faults are close to a boundary layer, a detection is more complicated due to the high ultrasonic signal from the boundary. If the distance between fault and boundary is about 3mm, the mentioned resolution of 0.25mm is still available. For smaller gaps correspondent measurements are currently carried out. The detection of inhomogeneities behind boundary layers is also analysed, since in this case the ultrasonic signal is additionally decreased (refer fig. 1). Fig. 2 shows an example of a correspondent measurement.

First investigations concerning the influence of the material and the geometry of the enclosed fault here also point to a measurability of the ultrasonic technique.

Outlook

The results obtained so far confirm the applicability of both techniques for the detection of different kinds of failures.

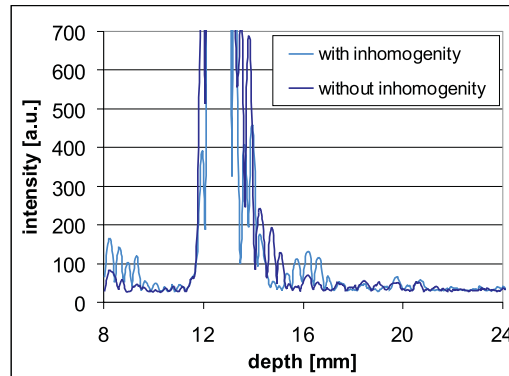


Fig. 2: Ultrasonic measurement of an inhomogeneity *behind* a boundary layer

Their potential - especially regarding an application for automated industrial quality assessment - will be exactly analysed in forthcoming investigations.

References

- [1] C. Cornelissen, A. Wiesmath, A. Schnettler, B. Blümich; Nicht-destruktive Verfahren zur Zustandsbewertung von Kabelsystemen: Ultraschall und Kernspinresonanz; EW 101 (2002), Nr. 10, S. 38-43
- [2] J. Blitz, G. Simpson; Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing; Chapman & Hall, 1996
- [3] C. Cornelissen, A. Schnettler; Non-destructive diagnostic facilities for cable systems 2002 IEEE ISEI, Boston [USA], 2002

Contact

Dipl.-Phys. Christian Cornelissen
Cornelissen@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94940

Kinetische Modellierung des Vakuumlichtbogens

Die Unterbrechung von Kurzschlussströmen, die in Mittelspannungsnetzen Werte bis 50 kA erreichen können, stellt die größte Beanspruchung für Leistungsschalter dar. Um die Ausschaltleistung so weit wie möglich zu steigern, ist eine genaue Kenntnis des Lichtbogenverhaltens unerlässlich. Die heute üblicherweise verwendeten Simulationswerkzeuge basieren auf der Annahme eines lokalen thermodynamischen Gleichgewichtes und lassen damit gewisse, für den Schaltprozess relevante Instabilitäten unberücksichtigt. Um diese Einschränkungen bei der Beschreibung des Vakuum-Lichtbogens zu überwinden, wurde ein kinetisches Modell des Schaltlichtbogens entwickelt, das keiner thermodynamischen Relationen bedarf.

Einführung

In Mittelspannungs-Schaltgeräten stellt der Lichtbogen, der aus dem verdampften Metall der Kontakte gespeist wird, das eigentliche Schaltelement dar. Verschiedene Schalter und Kontaktformen kommen zum Einsatz, mit dem Ziel, die thermisch-elektrische Belastung auf eine möglichst große Kontaktfläche zu verteilen und damit die Materialerosion zu vermindern. Die Wirkung sogenannter Axialmagnetfeldkontakte (AMF) beispielsweise beruht auf der Stabilisierung des Lichtbogens durch das axiale Magnetfeld, das der Lichtbogenkontraktion entgegenwirkt [1].

Ziel und Motivation

Für die Entwicklung und weitere Verbesserung von AMF-Kontakten ist die Optimierung der axialen Feldverteilung von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die theoretischen Grundlagen und deren Implementierung in ein Simulationsprogramm erarbeitet werden, um eine Alternative zu den üblicherweise verwendeten Simulationen des Lichtbogens zu schaffen. Die weit verbreiteten Flüssigkeitsmodelle basieren auf der Annahme eines lokalen thermody-

namischen Gleichgewichtes und lassen damit einige Instabilitäten unberücksichtigt, die für den Schaltprozess von Bedeutung sind. Folglich wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, das auf einer kinetischen Modellierung beruht und damit keine thermodynamischen Relationen erfordert. Auf diese Weise soll durch die hier beschriebene Arbeit ein entscheidender Beitrag zur Charakterisierung des Schaltlichtbogens zwischen AMF-Kontakten geleistet werden.

Physik und Numerik

Die Lösung der kinetischen Gleichung 2, die aus der Boltzmann-Gleichung und dem Stoßterm K besteht, erfolgt nach der Methode der Charakteristiken, der Semi-Lagrange Methode.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f - \frac{q}{m} (\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})) \cdot \nabla_v f = K \quad (1)$$

Dabei wird die Verteilungsfunktion f der Teilchen als Dichtefunktion einer inkompressiblen Flüssigkeit im Phasenraum angesehen. Die Lösung der kinetischen Gleichung erfolgt in einzelnen Schritten für jeden Phasenraumkomponente einzeln (Operator Splitting). Zur Einsparung von Re-

chenzeit wird Driftkinetik für die Elektronen und Electron-Sub-Cycling für die Ionen verwendet.

Exemplarisches Ergebnis

Für ein AMF-Kontakt-System, bestehend aus einem Topf mit vier Schlitzzen, sagt die Simulation eine beginnende Kontraktion vor der Anode bei einem Strom von etwa $I = 21 \text{ kA}$ voraus. In Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen [2] kann die simulierte Kontur des Lichtbogens in zwei Regionen unterteilt werden: ein kegelförmiges Gebiet nahe der Kathode und ein zylindrisches vor der Anode. Während die konische Region nicht vom Strom abhängt, verbreitert sich die zylindrische mit wachsendem Strom. Fig. 1 zeigt die berechnete Lichtbogen-Kontur für einen Strom von 26 kA . Die Anode befindet sich auf der rechten Seite des Bildes.

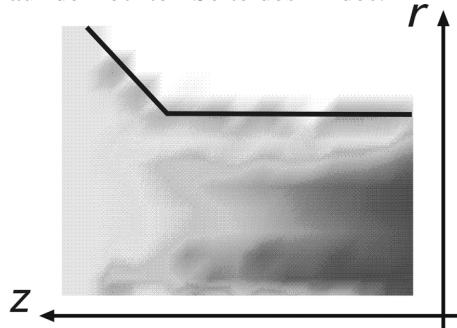


Abb. 1: Simulierte Kontur

Klassifikation

Das beim Stromfluss durch die AMF-Kontakte erzeugte axiale Magnetfeld wird bei der Modellierung extern vorgegeben, da das Simulationsprogramm nicht das Kontaktsystem beschreibt, sondern ausschließlich das Lichtbogenplasma im interelektrodischen Raum. Verwendet werden dazu Simulationsergebnisse des Simulationsprogrammes *Maxwell*. Schulman

et al. [3] definierten einen kritischen Wert B_{crit} für das axiale Magnetfeld, der erforderlich ist, um den Bogen diffus zu halten. Das Gebiet auf der Kontakt-Oberfläche A_{crit} , wo das mit Maxwell berechnete Feld größer als B_{crit} ist, quantifiziert die Güte des Kontaktsystemes. Startet man die Plasma-Simulation für eine bestimmte Kontaktgeometrie, so sollte der Strom I_{crit} , der zu einer Bogenkontraktion vor der Anode führt, der eben beschriebenen Klassifizierung entsprechen, sofern das Programm richtig funktioniert. Fig. 2 zeigt das normierte Gebiet A_{crit} und den normierten Strom I_{crit} in Abhängigkeit von der Anzahl der Schlitze in Kontakt und Kontaktplatte. Beide Graphen stimmen gut überein.

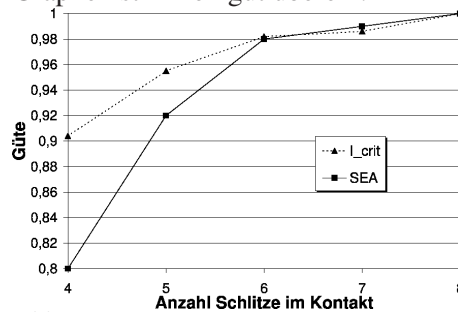


Abb. 2: Güte

References

- [1] S. Yanabu et. al.; IEEE Trans. Plasma Science; vol. 15, no. 5, pp 524–532, 1987.
- [2] H. Schellekens, M. B. Schulman; IEE Transactions on Plasma Science; vol. 29, no. 3, 2001.
- [3] M. B. Schulman, J. A. Bindas; IEEE Trans. Components; vol. 17, no. 1, pp 53–57, 1994.

Kontakt

Dipl.-Phys. Kerstin Jenkes
jenkes@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94941

Simulation of Vacuum Arcs in Circuit Breakers Based on Kinetic Modelling

The interruption of short circuit currents, reaching values of about 50 kA in medium voltage power systems, can be seen as the greatest stress of circuit breakers. In order to come closer to their physical limits detailed knowledge on the behaviour of vacuum arcs is absolutely necessary. State of the art simulation tools are based on the assumption that a local thermodynamic equilibrium exists, but they do not consider certain instabilities, which are important for the switching process. In order to overcome some of these constraints a simulation tool based on kinetic modelling of the vacuum arc has been developed, which does not require any thermodynamic relations.

Introduction

In medium voltage vacuum circuit breakers the electrical arc, which consists of the vaporized metal of the contacts, is the substantial switching element. Different breaker and contact designs are used in order to harmonize the thermal-electrical stress on the contact surface and therefore to reduce erosion effects. E. g. modern so called axial magnetic field (AMF) contact designs use the arc stabilization effect, which is based on the axial magnetic field and counteracts against the arc constriction [1].

Objective and Motivation

For the development and further improvement of AMF contacts the optimization of the axial magnetic field is essential. Within the scope of this work the theoretical basis and their implementation in a plasma simulation tool as an alternative to the generally utilized simulations of the switching arc are to be developed. The widely used fluid models for vacuum arcs are based on a local thermodynamic equilibrium and hence they do not consider some important instabilities, which are rele-

vant for the switching process. Consequently a simulation program has been developed, resulting from a kinetic modelling of the arc, which does not require any thermodynamic relations. For this reason, a substantial contribution to the characterization of the switching behaviour of AMF contacts is done by this project.

Physical Equation and its Numerical Solution

The solution of the kinetic equation 2, which consists of the Boltzmann-equation and the collision operator K , results from the method of characteristics, the Semi-Lagrange method.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f - \frac{q}{m} (\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})) \cdot \nabla_v f = K \quad (2)$$

Thereby the distribution function f of the particles is regarded as a density function of an incompressible fluid in phase space. The solution of the kinetic equation is carried out in single steps for each phase space component separately (Operator Splitting). In order to save computing time, the driftki-

netic approach is done for the electrons and Electron-Sub-Cycling for the ions.

Exemplarily Result

For an AMF-contact system, which consists of a slotted cup with four slices, the simulation predicts a starting constriction of the arc in the region of the anode at a current of about $I = 21 \text{ kA}$. In correspondance to experimental results [2] the simulated arc contour can be divided into two regions: a conical region near the cathode and a cylindrical one in front of the anode. While the conical region does not depend on the current, the cylindrical one broadens with an increasing current. Fig. 1 shows the calculated arc contour for a current of 26 kA . The anode is situated on the right hand side of the picture.

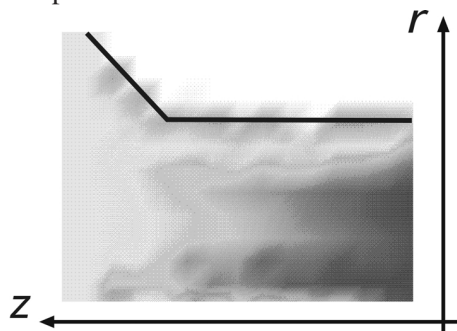


Fig. 1: Simulated Arc contour at $I = 26 \text{ kA}$

Classification

The axial magnetic field, which is produced by the plasma flowing through the AMF-contacts is needed as an input parameter for the modelling of the arc, because the simulation program does not describe the contact system but exclusively the arc plasma in the inter-electrode space. The necessary field computations are done by the software package Maxwell. Schulman et al. [3]

defined a critical value B_{crit} for the axial magnetic field, which is necessary to keep the arc in the diffuse mode. The area on the contact surface A_{crit} , where the magnetic field, calculated by the program Maxwell, is bigger than B_{crit} , quantifies the quality of the contact system. Running the plasma simulation for a certain contact geometry, the current I_{crit} , which leads to an arc constriction in front of the anode, should correspond to the just described classification, if the program works properly. Fig. 2 shows the normalized area A_{crit} and the normalized current I_{crit} in dependance of the number of slots in contact and contact plate. Both graphs are in a good agreement.



Fig. 2: Quality in dependance on the number of slots

References

- [1] S. Yanabu et. al.; IEEE Trans. Plasma Science; vol. 15, no. 5, pp 524–532, 1987.
- [2] H. Schellekens, M. B. Schulman; IEE Transactions on Plasma Science; vol. 29, no. 3, 2001.
- [3] M. B. Schulman, J. A. Bindas; IEEE Trans. Components; vol. 17, no. 1, pp 53–57, 1994.

Contact

Dipl.-Phys. Kerstin Jenkes
jenkes@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94941

Untersuchungen zur HF-Strom-Konditionierung von Vakuumschaltkammern

Die Spannungsfestigkeit von Vakuumleistungsschaltern wird wesentlich durch die Oberfläche der Schaltkontakte bestimmt. Durch Rauigkeiten und Verunreinigungen wird die Spannungsfestigkeit stark herabgesetzt. Die erforderliche Spannungsfestigkeit neuer Vakuumschaltkammern wird erst durch eine Konditionierung erreicht. Hierzu wird ein neues Verfahren vorgestellt und erste Messergebnisse werden präsentiert.

Einleitung

Vakuumleistungsschalter werden in der Mittelspannungsebene zur Unterbrechung von Betriebsströmen und Kurzschlussströmen eingesetzt. Nach der Stromunterbrechung im Stromnulldurchgang wird die Schaltstrecke dielektrisch durch die transiente wiederkehrende Spannung beansprucht. Rauigkeiten und Verunreinigungen der Schaltkontakte können zu einem Wiederzünden führen. Insbesondere bei neuen Vakuumschaltkontakten wird die erforderliche Spannungsfestigkeit erst durch eine Konditionierung erreicht, bei der mit Hilfe eines Stromschwachen Lichtbogens Rauigkeiten der Schaltkontakte beseitigt werden.

Versuchsaufbau

Bei der HF-Stromkonditionierung wird eine hochfrequente Wechselspannung über den geöffneten Kontakten der Vakuumschaltkammer angelegt. Die Spannungsamplitude ist dabei höher als die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke. Die Wechselspannung wird durch einen Schwingkreis generiert, der auf eine Frequenz von 7 kHz abgestimmt ist (Bild 3). Ein Stoßkondensator liefert die erforderliche Energie zur Aufrechterhaltung des Konditionierungslichtbogens. Bei einer Ladespannung von 50 kV beträgt die Stromamplitude 2,3 kA. Ein optional paral-

lel zur Vakuumschaltkammer liegender Kondensator bildet mit der Leitungsinduktivität einen weiteren Schwingkreis mit einer Frequenz von 300 kHz. Durch die höhere Frequenz wird die Anzahl der Lichtbögen bei gleicher Konditionierungsdauer erhöht, da der einzelne Lichtbogen im Stromnulldurchgang verlöscht.

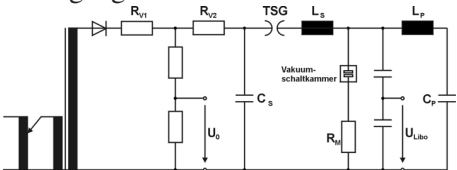


Abb. 1: Versuchsaufbau

Messergebnisse

Zunächst wurden Messungen mit dem einfachen Schwingkreis durchgeführt. Der parallel zur Vakuumkammer liegende Kondensator ist bei diesen Messungen nicht zugeschaltet. Bild 2 zeigt den Spannungsverlauf über der Vakuumschaltkammer bei einer Ladespannung des Kondensators von 20 kV. Da die Lichtbogenspannung nur ca. 20 V beträgt, ist sie in der dargestellten Auflösung nicht erkennbar. Nach dem Verlöschen des Lichtbogens im Stromnulldurchgang steigt die Spannung steil an, bis es zu einer Wiederzündung kommt. Auf Grund der Dämpfung des Schwingkreises sinkt die prospektive Spannungsamplitude kontinuierlich ab, bis sie die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke unterschreitet. Damit unterbricht die Va-

kuumschaltkammer den Strom endgültig.

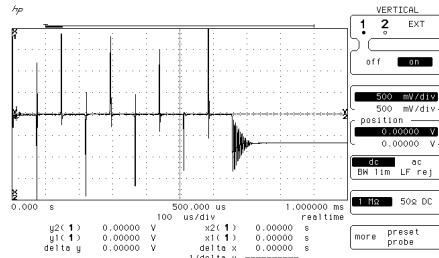


Abb. 2: Spannung über der Vakuumschaltstrecke

Mit dem zusätzlichen parallel zur Vakuumschaltkammer liegenden Kondensator ergibt sich ein typischer Spannungsverlauf über der Kammer wie ihn Bild 3 zeigt. Die Ladespannung des Kondensators beträgt ebenfalls 20 kV. Zusätzlich zu der ersten Schwingung von 7 kHz tritt hier eine Einschwingspannung über der Vakuumschaltkammer mit einer Frequenz von 300 kHz nach jedem Stromnulldurchgang auf.

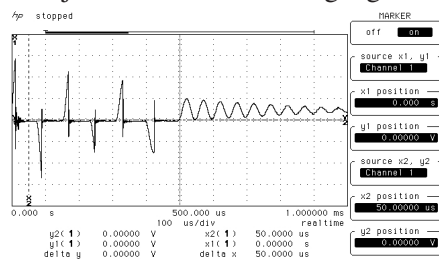


Abb. 3: Spannung über der Vakuumschaltstrecke

Den zeitlich höher aufgelösten Spannungsverlauf im Bereich eines Stromnulldurchgangs zeigt Bild 4.

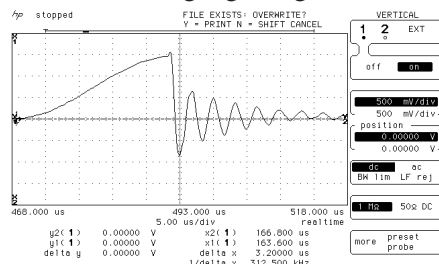


Abb. 4: Spannung im Bereich eines Stromnulldurchgangs

Ausblick

Die Konditionierung der Vakuumschaltkammern soll an Hand der Spannungsfestigkeit bei Beanspruchung mit Blitzstoßspannung überprüft werden. Durch systematische Untersuchungen soll die Effizienz des vorgestellten Konditionierungsverfahrens belegt und weiter gesteigert werden.

Quellen

[1] T. Shioiri, T. Kamikawaji, E. Kaneko, M. Homma, H. Takahashi, I. Ohshima, Influence of Elektrode Area on the Conditioning Effect in Yacuum, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 2, 1995

[2] T. Kamikawaji, T. Shioiri, T. Funahashi, M. Okawa, E. Kaneko, I. Ohshima, Generation of Microparticles from Copper-Chromium Contacts in Vacuum, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, 1995

Kontakt

Dipl.-Ing. Bernhard Heil
heil@ifht.rwth-aachen.de
++49 (0) 241 80 9 49 50

Investigations on HF-Current Conditioning of Vacuum Circuit Breakers

The withstand voltage of vacuum circuit breakers is determined substantially by the surface of the electrodes. The withstand voltage is strongly reduced e.g. by roughness. The necessary withstand voltage of new vacuum circuit breakers is only achieved by conditioning. For this a new procedure and first results of measurement are presented.

Introduction

Vacuum circuit breakers are used in the medium voltage level for the interruption of normed currents and short circuit currents. After the current interruption at current zero the circuit breaker is stressed dielectrically by the transient recovery voltage. Roughness of and pollution at the electrodes can cause a reignition. In particular for new vacuum circuit breakers the necessary withstand voltage is only achieved by a conditioning process. Thereby a low current arc eliminates the roughness of the electrodes.

an increase of the frequency, since the individual arc extinguish during current zero crossing.

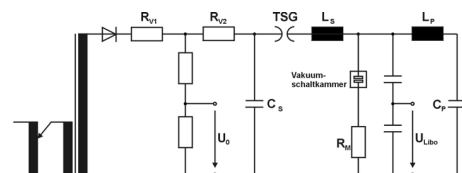


Fig. 1: test set-up

Test Set-Up

The HF-current conditioning uses a high frequency alternating voltage applied at the opened vacuum circuit breaker contacts. Thereby the test voltage amplitude is higher than the withstand voltage of the vacuum circuit breaker. The alternating voltage is generated by a resonant circuit with a frequency of 7 kHz (Fig. 1). A capacitor supplies the necessary energy for the maintenance of the conditioning arc. With a capacitor voltage of 50 kV the conditioning current is 2,3 kA. Optionally, a second capacitor connected in parallel to the vacuum circuit breaker can be used. Due to the line inductance, an additional resonant circuit with a frequency of 300 kHz is built up. The number of single arcs increases by

Results of measurement

First measurements with the simpler resonant circuit were executed. The capacitor situated in parallel to the vacuum circuit breaker was not connected during these measurements. Figure 2 shows the voltage at the vacuum circuit breaker. The DC voltage of the capacitor was 20 kV. Due to the low arc voltage of approximately 20 V, it is not recognizable in the represented dissolution. After extinction during current zero crossing the voltage rises steeply, until a reignition appears. Due to the damping of the resonant circuit the prospective voltage amplitude decreases continuously, until it is lower than the withstand voltage. Now, the vacuum circuit breaker interrupts the current finally.

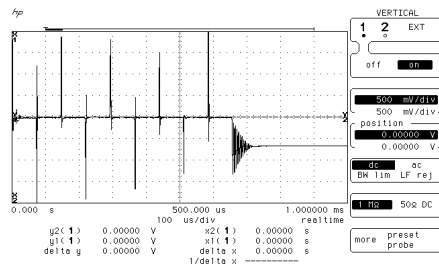


Fig. 2: voltage at the vacuum circuit breaker

Using the additional capacitor connected in parallel to the vacuum circuit breaker a typical voltage at the circuit breaker will be measured like shown in figure 3. The voltage of the capacitor is 20 kV. Additional to the first oscillation of 7 kHz a second one with a frequency of 300 kHz occurs at the vacuum circuit breaker after each current zero.

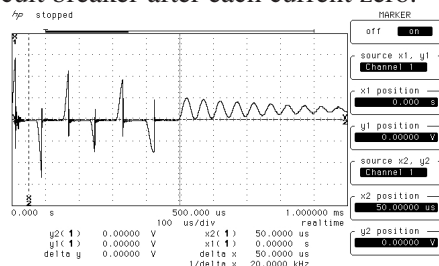


Fig. 3: voltage at the vacuum circuit breaker

Figure 4 shows the zoomed voltage within the area of a current zero.

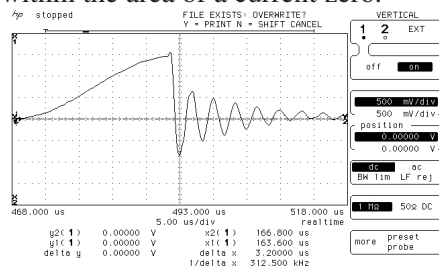


Fig. 4: voltage within the area of a current zero

Outlook

The conditioning of the vacuum circuit breakers is to be checked on the basis of the withstand voltage using lightning impulse voltage. The efficiency of the presented conditioning procedure has to be verified and increased by systematic further investigations.

References

- [1] T. Shioiri, T. Kamikawaji, E. Kaneko, M. Homma, H. Takahashi, I. Ohshima, Influence of Elektrode Area on the Conditioning Effect in Yacuum, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 2, 1995
- [2] T. Kamikawaji, T. Shioiri, T. Funahashi, M. Okawa, E. Kaneko, I. Ohshima, Generation of Microparticles from Copper-Chromium Contacts in Vacuum, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, 1995

Contact

Dipl.-Ing. Bernhard Heil
heil@ifht.rwth-aachen.de
++49 (0) 241 80 9 49 50

Vergleich physikalischer Modellbeschreibungen zur Simulation von Strahlung und Gasströmung in SF₆-Selbstblausschaltern

Zur Entwicklung und Optimierung der Schaltkammer sowie der Ausblasvolumina von SF₆-Selbstblausschaltern sind effiziente und leistungsfähige Berechnungstools notwendig.

Zur Erweiterung der Simulationsumgebung der Hochstromphase eines Schalters erfolgt eine transiente Erfassung der Gasströmung durch CFD (Computational Fluid Dynamics) Gleichungslöser, die um die Berücksichtigung der Wechselwirkung des Lichtbogens mit seiner Umgebung erweitert werden müssen.

Einleitung

Das zentrale Element während einer Kurschlussabschaltung in Energieversorgungsnetzen ist der abbrandbestimmte Schaltlichtbogen, der mit Hilfe der in Bild 1 dargestellten Modelle physikalisch beschrieben werden kann.

Physikalische Modellbildung

Wie Bild 1 zu entnehmen ist, stehen neben der Simulation von Gasströmung, Elektroden-Abbrand, Elektromagnetisches Feld, Turbulenz und Düsen-Abbrand zur Simulation der Strahlung verschiedene Modelle zur Verfügung. Das bisher eingesetzte Zwei-Zonen-Modelle basiert auf der Annahme einer heißen, leitfähigen zylindrischen Lichtbogenzone und einen diese Zone umgebenden, nicht leitfähigen Dampfmantel. Dem großen Vorteil kurzer Rechenzeiten stehen jedoch Einschränkungen bzgl. der Lichtbogenstruktur und der Ermittlung des ortsabhängigen Düsenabbrandes gegenüber.

Die Methode der partiellen Charakteristiken erlaubt die Simulation der Strahlung mit Hilfe der Terme $\Delta SIM(T_P, T_\xi, |P - \xi|)$ und $SOM(T_P, T_S, |P - S|)$, die im vor-

aus berechnet werden können und die Volumenintegration durch eine Strahlverfolgung vereinfachen [1]. Dieses Modell ermöglicht eine genaue Simulation des Düsen-Abbrandes, da die einzelnen Strahlen jeweils bis zum Rand der Geometrie verfolgt werden und der Strahlungsfluss an den Randpunkten zur Berechnung des Abbrandes dient.

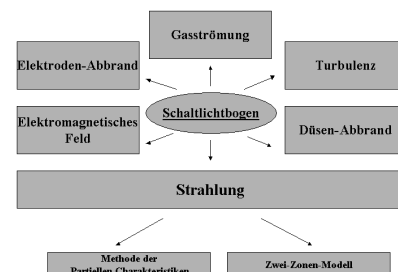


Abb. 1: Bausteine der Simulation, die zur Modellierung des Schaltlichtbogens und seiner Umgebung notwendig sind.

Implementierung

Die Implementierung der physikalischen Modelle (außer der Gasströmung) erfolgt über frei programmierbare Schnittstellen. Das in [2] und [3] verwendete Programm CFX4 der Firma AEA wurde durch die Version CFX5 ersetzt, die einige wesentliche Verbesserungen enthält:

- CFX5 stellt u.a. ein unstrukturiertes Gitters zur Verfügung, das zur Simulation komplizierter 3D-Geometrien besser geeignet ist.
- In Bereichen, in denen eine besonders feine Gitterauflösung notwendig ist, können sogenannte Mesh-Controls verwendet werden, die es ermöglichen, die Gitterqualität entlang eines Punktes, einer Linie oder einer Fläche zu verbessern.
- Das zur Verfügung stehende Turbulenzmodell schaltet zwischen dem $k-\omega$ Modell, welches zur Simulation von Turbulenzeffekten in wandnahen Bereichen gut geeignet ist und dem $k-\epsilon$ Modell, welches die Turbulenzeffekte besser im Innern des Schalter beschreibt, automatisch um.
- Das Memory-Management-System erleichtert den Datenaustausch bei parallelem Rechnen.
- Moving Grids können zu einer realistischeren Simulation der Schaltstiftbewegung verwendet werden. Die einzelnen Gitterelemente werden zunächst auseinandergezogen, wie in Bild 2 und 3 gezeigt. Sobald die Winkel der Elemente zu klein werden, muss eine neue Diskretisierung durchgeführt werden.

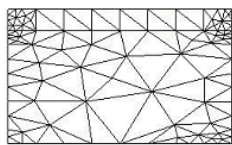


Abb. 2: Unstrukturiertes Gitter zum Zeitpunkt 1

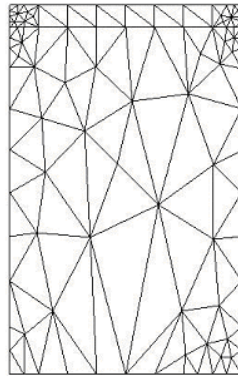


Abb. 3: Unstrukturiertes Gitter zum Zeitpunkt 2

Zusammenfassung & Ausblick

Bei der durchgeführten Erweiterung der Simulationsumgebung wurde zunächst das Zwei-Zonen-Modell verwendet. Im folgenden soll das Simulationstool unter Verwendung der Methode der Partiellen Charakteristiken u.a. auch im Hinblick auf eine systematische Untersuchung der Alterung von Leistungsschaltern weiterentwickelt werden.

Quellen

- [1] Aubrecht, V., Protasevich, E.T. Radiative Transport of Energy in SF₆ Arc Plasma, Tomsk 2000
- [2] Claessens, Max: Simulation von Gasströmungen in SF₆-Selbstblaschaltern bei Kurschlussabschaltung, Dissertation 1997
- [3] de Hesselle, Markus: Modellierung von Strahlung und Gasströmung in SF₆-Selbstblaschaltern, Dissertation 2001

Kontakt

Dipl.-Ing. Carsten Lüders
lueders@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94914

Comparison of different Physical Models to simulate Radiation Transfer and Gas Flow in SF₆-Selfblast Circuit Breakers

Simulation tools are required for the development and optimization process of SF₆-Selfblast Circuit Breakers.

The circuit breaker simulation tool has to be improved by a transient calculation using a CFD (Computational Fluid Dynamics) solver and extended by models to treat the close interaction of the electric arc and its surrounding.

Introduction

The aim of the present work is the physical description of the electrical arc in a circuit breaker which arises in the case of a short circuit in energy networks. Figure 1 shows the required models which are necessary to describe the electric arc with his environment.

Physical models

To simulate the electrical arc a model to take care of the gas flow, the electrode ablation, the electromagnetic field, the turbulence effect, nozzle ablation, and the radiation is necessary. In figure 1 three approximation methods taking care of the radiation are shown. The Two-Zone-Model describes the ablation and radiation dominated arc in a cylindrical, ablating nozzle. The main advantage of this integral electrical arc model is the short simulation time. On the other hand some restrictions do limit the implementation of a more physical based modelling.

The method of partial characteristics needs two functions called $\Delta SIM(T_P, T_\xi, |P - \xi|)$ and $SOM(T_P, T_S, |P - S|)$ to approximate the radiation transfer [1]. On one side the integration over the ab-

sorption coefficient is done in advance, resulting in the partial characteristic functions. On the other side the spatial integration over all solid angles is substituted by a summation over arbitrary single directions. Any single direction starts at the point of interest and ends at the boundary of the computational domain. This approximation enables to determine the nozzle ablation using the radiation flux at the edge points of the nozzle contour.

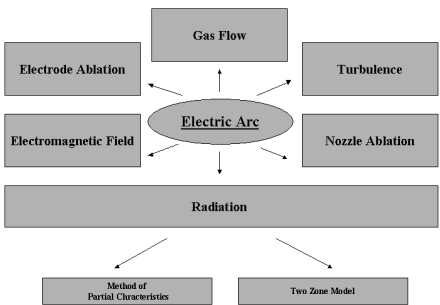


Fig. 1: Physical models which are necessary to describe the electric arc with his environment.

Implementation

To simulate the gas flow a commercial software package is used and other physical models, shown in figure 1, were added by user routines. In the present work CFX4 (AEA technology) which was used in [2] and [3] has been replaced by the Version CFX5 which offers the following advantages:

- CFX5 is using an unstructured grid allowing to simulate very complex 3-D geometries.
- Mesh Controls are available if a fine mesh is required at a point, along a line or a surface.
- A new turbulence model is available using the $k-\omega$ model which describes turbulence effects better close to the walls of the volume and the $k-\epsilon$ model which is more accurate within inner regions.
- The memory management system offers the opportunity to parallel computing.
- Moving grids can be better used to simulate the movement of contact systems. Based on the displacement field, the grid surface of the fluid mesh is adapted (figure 2 and 3). To improve the quality of the deformed grid, a smoothing procedure is carried out. If the grid quality is below a certain level, the grid has to be remeshed.



Fig. 2: Unstructured grid at timestep one

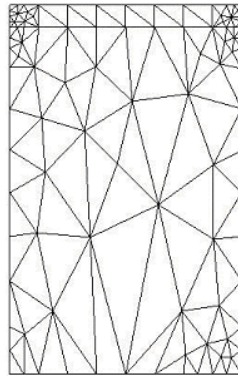


Fig. 3: Unstructured grid at timestep two

Results

So far the improved simulation tool makes use of the Two-Zone-Model. In the next step a circuit breaker simulation tool which uses the method of partial characteristics will be developed. The ageing of a circuit breaker nozzle after several short circuits should then be investigated.

Reference

- [1] Aubrecht, V., Protasevich, E.T. Radiative Transport of Energy in SF₆ Arc Plasma, Tomsk 2000
- [2] Claessens, Max: Simulation von Gasströmungen in SF₆-Selbstblaschaltern bei Kurzschlussabschaltung, Dissertation, 1997
- [3] de Hesselle, Markus: Modellierung von Strahlung und Gasströmung in SF₆-Selbstblaschaltern Dissertation, 2001

Contact

Dipl.-Ing. Carsten Lüders
lueders@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94914

Modellierung und Simulation des abklingenden SF_6 Lichtbogens in Hochspannungsschaltern

Die Simulation der Hochstromphase eines Leistungsschalters liefert u.A. Informationen über die Beblasungstemperatur und den Beblasungsdruck. Die Bestimmung der thermischen Grenzausschaltleistung eines SF_6 Selbstblasschalters erfordert eine exakte Simulation des Stromnulldurchgangs und des anschliessenden Nachstroms. Aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke nach Stromnull, liegt kein lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTE) vor. Die elektrische Leitfähigkeit des Gasplasmas hängt somit vom Druck, der Temperatur, der Gaszusammensetzung und der elektrischen Feldstärke ab. Der Einsatz der Simulation erlaubt systematische Studien des Einflusses von Beblasungstemperatur, Beblasungsdruck und Löschgassqualität auf die thermische Ausschaltleistung.

Einleitung

Beim Trennen der Kontakte eines stromdurchflossenen Leistungsschalters wird ein elektrischer Lichtbogen gezündet, der nur durch externe Kühlung zum Erlöschen gebracht werden kann. Während der Hochstromphase wird durch Abbrand der PTFE-Düse in der Druck-Kammer ein Überdruck aufgebaut. Kurz vor dem Stromnulldurchgang führt der reduzierte Druck in der Schaltkammer zu einer Strömungsumkehr. Der Lichtbogen wird dadurch mit relativ kaltem Gas aus der Druckkammer beblasen. Mit den am Institut entwickelten Modellen kann sowohl die Hochstromphase [1] als auch der Bereich des Stromnulldurchgangs [2] simuliert werden.

Simulation

Physikalisch kann der Schaltlichtbogen durch die Navier-Stokes-Gleichung, die Maxwell-Gleichungen und die Strahlungstransportgleichung beschrieben werden. Die Simulation erfordert neben der numerischen Lösung dieser Differenzialgleichungen eine genaue Kenntnis der Plasma-

Materialdaten wie Viskosität, Massendichte, Wärmekapazität, thermische und elektrische Leitfähigkeit. Die Strahlung wird vereinfacht über Netto-Emissions-Koeffizienten berücksichtigt. Aufgrund des geringen Durchmessers des Lichtbogens von etwa $100 \mu m$ im Stromnulldurchgang ist eine sehr feine räumliche Diskretisierung notwendig.

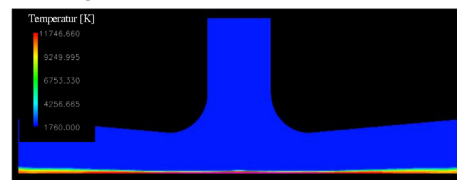


Abb. 1: Temperaturverteilung im Stromnulldurchgang

Die Simulation wird mit der Berechnung eines stationären Lichtbogens initialisiert. Anschließend wird der Strom mit der entsprechenden Steilheit linear bis zum Stromnulldurchgang reduziert. Nach Stromnull wird der Lichtbogen mit der wiederkehrenden Spannung belastet. Aufgrund der Restleitfähigkeit des Gasplasmas fließt ein Nachstrom, der bei erfolgreicher Löschung des Lichtbogens innerhalb von einigen Microsekunden erlischt.

Die nach Stromnull vorliegende hohe elektrische Feldstärke führt zu ei-

ner Erhöhung der Elektronentemperatur und -dichte. Nach [3] kann der dadurch resultierende Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit näherungsweise über einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden:

$$\sigma = \sigma_{LTE}(p, T) \cdot c_{corr}(p, T, E)$$

Hierbei ist σ_{LTE} die elektrische Leitfähigkeit unter LTE-Bedingungen.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die in der Simulation verwendete Geometrie und die Temperaturverteilung im Stromnulldurchgang. In Abbildung 2 ist die radiale Temperaturverteilung für einen stationären 400 A Lichtbogen und zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs dargestellt. Ein Beispiel für simulierte Nachstromverläufe für verschiedene Anfangssteigungen der wiederkehrenden Spannung zeigt Abbildung 3.

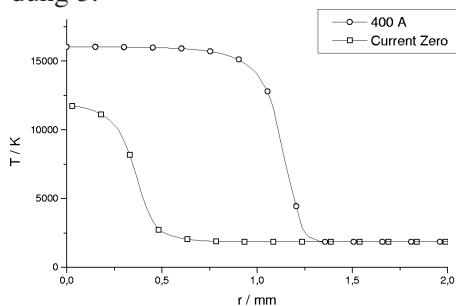


Abb. 2: radiale Temperaturverteilung

Ausblick

Die vorhandenen Simulations-Tools sollen zunächst anhand von vorliegenden Messungen evaluiert und verbessert werden.

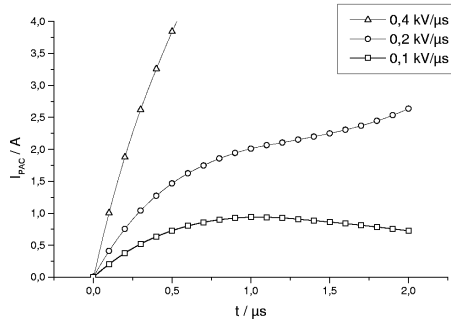


Abb. 3: simulierte Nachstromverläufe

Anschließend kann der Einfluß der Löschgaseigenschaften auf die Grenzausschaltleistung des Schalters systematisch untersucht werden. Die Umstellung der Simulation auf den neuen Solver CFX-5.x ermöglicht den Einsatz eines unstrukturier-ten Gitters, verbesserter Turbulenz-Modelle und die Berechnung von 3D-Schaltermgeometrien.

Quellen

- [1] Claessens, Max: *Simulation von Gasströmungen in SF₆-Selbstblasschaltern bei Kurzschlussabschaltung*, Dissertation RWTH Aachen 1997
- [2] von Starck, Roland: *Modellierung und Simulation des Stromnulldurchgangsbereichs in SF₆-Selbstblasschaltern bei Ausschaltung von Kurzschlußströmen*, Dissertation RWTH Aachen 2002
- [3] Gleizes et al.: *SF₆ circuit breaker arc modelling: influence of the electric field on the electrical conductivity*, J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (14 May 1994) 985-993

Kontakt

Dipl.-Ing. Michael Schwinne
schwinne@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94015

Modelling and simulation of the decaying SF_6 arc in modern self-blast circuit breakers

The simulation of the high current time period provides information about the blow temperature and the blow pressure. In order to predict the thermal performance of SF_6 circuit breakers a detailed simulation of current zero and the following post arc current is necessary. Due to the high electric field intensity after current zero, a local thermodynamic equilibrium (LTE) doesn't exist. Therefore, the electric conductivity of the plasma is a function of the pressure, the temperature, the composition of the gas and the electric field strength. The use of simulations allows systematic studies of the influence of the blow temperature, the blow pressure and the pollution of the blow gas on the thermal performance.

Introduction

With the separation of the contacts of a high voltage circuit breaker an electric arc is ignited, which can only be quenched by external cooling. During the high current time period, the ablation of the PTFE nozzle causes a pressure increase within the pressure chamber. The pressure reduction in the arc chamber just before current zero leads to a reversion of the gas flow and therefore to an blowing of the electric arc by relatively cold gas out of the pressure chamber. This procedure can be simulated using the physical models developed at the institut for high voltage technologies. The two zone model [1] which is used in these simulations is valid for the calculation of ablation controlled arcs, but cannot be applied for the simulation of current zero and the post arc current. A physical model for the simulation of the decaying SF_6 arc has been developed in [2].

Simulation

The transient electric arc can be described by the navier-stokes equation, the maxwell equations and the radiation transport equation. Besides the numeric solution of these differential equations, an exact knowledge of the

material properties such as mass density, thermal capacity, viscosity, thermal and electric conductivity is required. Net emission coefficients are used for a simplified calculation of the radiation. Due to the small diameter of the arc of approximately $100 \mu m$ at current zero crossover a very fine spatial discretisation is required.

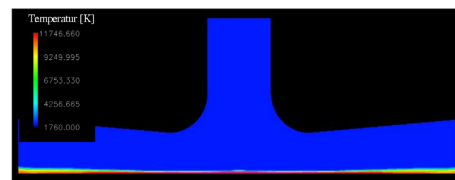


Fig. 1: temperature distribution at current zero

The simulation is initialized by the computation of a stationary arc. Afterwards the current is reduced with a constant slope down to zero. Due to the transient recovery voltage after current zero a post arc current will be driven through the remaining arc plasma resulting in a heating effect. In case of a sufficient cooling of the arc, the post arc current will be interrupted within a few microseconds, otherwise a thermal reignition will occur. The high electric field intensity after current zero leads to an increased temperature and density of the electrons and therefore to an increased electric conductivity of the

plasma. This effect is considered using correction factors [3]:

$$\sigma = \sigma_{LTE}(p, T) \cdot c_{corr}(p, T, E)$$

where σ_{LTE} describes the electric conductivity at LTE conditions.

Results

Figure 1 shows both the geometry of the nozzle used in the simulations and the temperature distribution at current zero. The radial temperature distributions of the stationary 400 A arc and at the time of current zero are plotted in figure 2. Post arc currents for different slopes of the transient recovery voltage are plotted in Figure 3. Using the simulation tools, the critical rate of rise of recovery voltage (RRRV) can be determined.

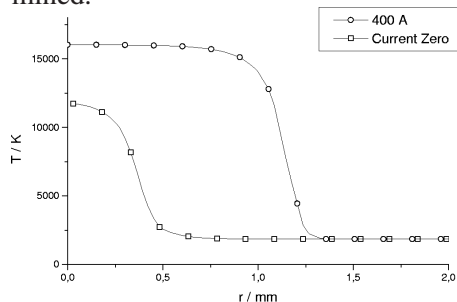


Fig. 2: radial temperature distribution

Outlook

Further investigations will focus on comparisons between simulation results and measured data from reference experiments. Afterwards, the influence of the blow temperature and blow pressure on the thermal performance can be studied. The reimplementation

of the calculation method in the new solver CFX-5.x allows the use of improved turbulence models and unstructured grids.

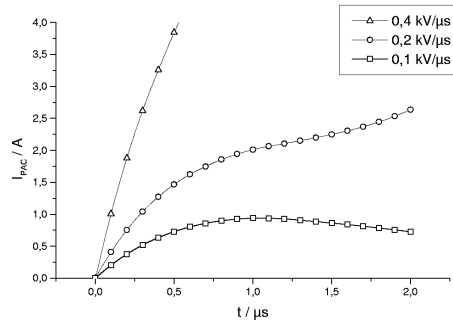


Fig. 3: post arc currents

References

- [1] Claessens, Max: *Simulation von Gasströmungen in SF₆-Selbstblasschaltern bei Kurzschlussabschaltung*, Dissertation RWTH Aachen 1997
- [2] von Starck, Roland: *Modellierung und Simulation des Stromnulldurchgangsbereichs in SF₆-Selbstblasschaltern bei Ausschaltung von Kurzschlußströmen*, Dissertation RWTH Aachen 2002
- [3] Gleizes et al.: *SF₆ circuit breaker arc modelling: influence of the electric field on the electrical conductivity*, J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (14 May 1994) 985-993

Contact

Dipl.-Ing. Michael Schwinne
schwinne@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94015

Aufbau eines synthetischen Prüfkreises zur Untersuchung der thermischen Wiederverfestigung eines SF₆-Leistungsschalter

Die thermischen Wiederverfestigung von SF₆-Selbstblas-Schaltern ist von verschiedenen Parametern abhängig. Die genaue Analyse der einzelnen Parameter ist von besonderer Bedeutung, um ein noch genaueres Bild der Funktionsweise eines Selbstblas-Schalters zu erlangen. Auch beinhaltet sie die Möglichkeit, entsprechende CFD-Simulationen zu überprüfen oder eventuell abzugleichen. Zu diesem Zweck wird ein synthetischer Prüfkreis aufgebaut, mit dessen Hilfe eine genaue Betrachtung der thermischen Wiederverfestigung untersucht werden kann.

Einleitung

In früheren Arbeiten am Institut für Hochspannungstechnik wurden vielfältige Untersuchungen an SF₆-Selbstblas-Schaltermodellen mit Hilfe eines synthetischen Prüfkreises durchgeführt. Dabei betrug die Hochstromamplitude etwa 3,6 kA. Um die Auswahl der zu untersuchenden Parameter zu erhöhen, ist es erforderlich, einen leistungsstärkeren Prüfkreis aufzubauen, mit dessen Hilfe reale Bedingungen besser nachgebildet werden können. Zu diesem Zweck wird ein Prüfkreis aufgebaut, der nach dem Prinzip der Stromüberlagerung arbeitet und eine Hochstromamplitude von etwa 30 kA aufweist. Die Anforderungen an den Prüfkreis werden im Folgenden erläutert.

Anforderungen an den Prüfkreis

Der Prüfkreis wird nach dem Prinzip der Stromüberlagerung (Abb. 1) aufgebaut und folgt den Vorgaben der IEC 56. Die IEC 56 beinhaltet die allgemeinen Regeln für die synthetische Ein- und Ausschaltprüfung im Leistungsbe- reich. Das Stromüberlagerungsverfahren beschreibt dabei ein synthetisches

Prüfverfahren, bei dem der Hochspannungskreis vor dem Nulldurchgang des betriebsfrequenten Stromes auf den Prüfschalter geschaltet wird. Auf diese Weise wird der Prüfschalter selbsttätig mit dem Hochspannungskreis verbunden, nachdem der Strom im Hilfs- schalter unterbrochen wurde, so daß es keinerlei Verzögerung zwischen der Strombeanspruchung und der Span- nungsbeanspruchung gibt.

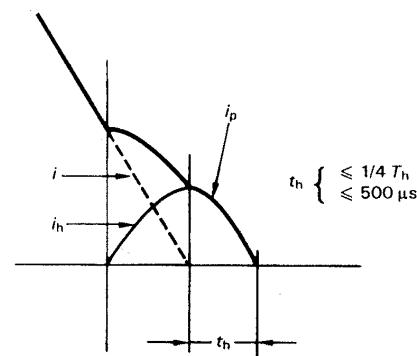


Abb. 1: In der Abbildung ist der Überlage- rungsstrom nach IEC 56 zu sehen. Die Dimensionierung der Schalt- kreiselemente erfolgt unter Berück- sichtigung, dass die Impedanz des Hochspannungskreises etwa der Netz- impedanz entspricht und die Fre- quenz des Kreises zwischen 250 Hz und 1000 Hz liegen sollte. Im Ideal- fall muß der gleichwertige Schwing-

widerstand gleich dem Quotienten $(du/dt)/(di/dt)$ sein. Dabei sind du/dt die Steilheit der festgelegten Einschwingspannung und di/dt die Steilheit des festgelegten Kurzschlußstromes.

Weitere Vorgaben sind durch die angestrebten Untersuchungen gegeben, z.B. der Hochstromkreis, der einen sinusförmigen Strom mit der Amplitude von bis zu 30 kA und einer Frequenz von 50 Hz liefern soll, bzw. der Hochspannungskreis, der einen Überlagerungsstrom mit einer Steilheit von bis zu $30\text{ A}/\mu\text{s}$ und einer wiederkehrenden Spannung der Steilheit von bis zu $10\text{ kV}/\mu\text{s}$ liefern soll.

Die Elemente des Prüfkreis-

Der Prüfkreis ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Der Hochstromkreis besteht hauptsächlich aus einer Kapazität, einer Induktivität, einem Draufschalter und einem Hilfsschalter. Die Kapazität besteht dabei aus der Parallelschaltung mehrerer einzelner Kondensatoren. Die Kapazität und die Induktivität bilden einen Serienschwingkreis, der auf 50 Hz abgestimmt ist. Da die Kondensatoren zusammen eine Kapazität von etwa 50 mF besitzen, wird eine Luftspule der Größe $0,2\text{ mH}$ verwendet. Die Ladespannung beträgt maximal etwa 3 kV . Der Draufschalter und der Hilfsschalter haben die Funktionen den Kreis zu schließen und nach 10 ms wieder zu öffnen. Dabei besteht der Draufschalter aus einem prellfreien Schalter und der Hilfsschalter aus einem Vakuumschalter, welcher nahe

dem Stromnulldurchgang löscht.

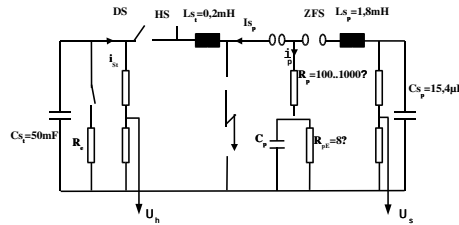


Abb. 2: Schematischer Aufbau des synthetischen Prüfkreis nach dem Stromüberlagerungsverfahren.

Der Hochspannungskreis besteht aus zwei Kapazitäten, einer Luftspule, zwei ohmschen Widerständen und zwei Funkenstrecken. Im Bereich der Stromüberlagerung bildet die Kapazität $C_{Sp} = 15,4\text{ }\mu\text{F}$ mit der Induktivität $L_{Sp} = 1,8\text{ mH}$ einen Schwingkreis der Frequenz 1000 Hz . Die Stromsteilheit des Überlagerungsstromes wird über die Ladespannung der Kapazität geregelt. Diese Kapazität kann bis auf 54 kV aufgeladen werden. Nach dem Verlöschen des Stromes im Testschalter lädt sich die Kapazität C_p über den Widerstand auf. Die Steilheit der wiederkehrenden Spannung kann über die Größe des Widerstandes R_p verändert werden. Über die Funkenstrecke ZFS kann der Zeitpunkt des Zuschaltens des Hochspannungskreises gesteuert werden. Die zweite Funkenstrecke verhindert die Aufladung des Kondensators C_p durch den Hochstrom.

Kontakt

Dipl.-Ing. Robert Dommerque
dommerque@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94945

Construction of a Synthetic Test Plant to Investigate the Thermal Recovery Strength of a SF₆-Circuit-Breaker

The thermal recovery strength of SF₆-self-blast-circuit-breakers depend on several different parameters. For further improvements of these circuit breakers more detailed knowledge about the complex processes during operations as well as powerful simulation tools are necessary. Parts of these informations will be extracted out of experiments using the test setup described here.

Introduction

Previous investigations on SF₆-self-blast-circuit-breakermodels have been carried out by a synthetic test setup. Due to the low peak current of 3,6 kA, this test setup cannot be used further on. In the new setup the current maximum is 30 kA, and it works with the principle of the injection current. The requests of this setup are further explained in the next chapter.

Dimensioning of the Setup

The synthetic circuit will be build with the principle method of the current superposition (Fig. 1) and follows the guidelines IEC 56. The IEC 56 describes the general rules for the synthetic turn on test and turn off test for a breaker. The method of the current superposition is there explained as a synthetic test method. In this test method the high voltage circle is switched to the test breaker before the current zero of the operating frequency. In this way the test breaker is automatically connected to the high voltage circle, after the current in the auxiliary breaker is interrupted. Therefore there is no delaying between the current stress and the voltage stress.

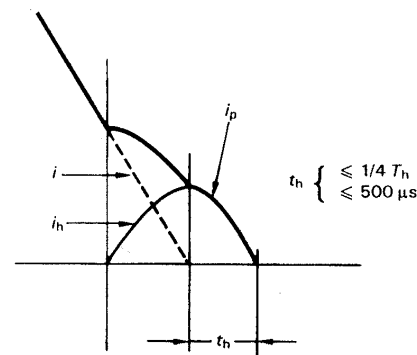


Fig. 1: The principle methode of the injection current

Additionally the norm is stipulated that the impedance of the high voltage circle has the value of the net impedance. The frequency of the high voltage circle has to be between 250 Hz and 1000 Hz. The moment to connect the high voltage circle to the high current circle is also fixed. In an ideal case, the equally valued oscillating resistance is similar to the quotient $(du/dt)/(di/dt)$. du/dt is the steepness of the fixed oscillating voltage, and di/dt is the steepness of the also fixed short circuit current.

The aspired investigations prescribe that the high current circle shall give a current that is formed like a sinus with an amplitude of up to 30 kA and a frequency of 50 Hz. It is also prescribed that the high voltage circle shall give a injection current with the steepness of up to 30 A/μs and a recurrent voltage

of the steepness up to $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

The single elements of the test circle are chosen with regard to the above named norm IEC 56 and to the prescriptions of the desired investigation.

The Elements of the Setup

The test circle is schematically shown in the figure 2. The high current circle mainly consists of a capacity, an inductivity, an on switch and an auxiliary breaker. The capacity consists of the parallel circuit of several capacitors. The capacity and the inductivity form a serial oscillating system, which is tuned on 50 Hz . The capacity is set to 50 mF , therefore a $0,2 \text{ mH}$ air coil is used here. The maximum charging voltage is 3 kV . The on switch and the auxiliary breaker close the circle and open it again after 10 ms . The on switch consists of a switch and the auxiliary breaker of a vacuum breaker, which extinguishes at current zero.

The high voltage circle consists of two capacities, one air coil, two [ohmic] resistances, and two spark gaps. The current injection art is build by the capacity $C_{Sp} = 15,4 \mu\text{F}$ and the inductivity $L_{Sp} = 1,8 \text{ mH}$ with an oscillating frequency of 1000 Hz . The steepness of the injection current is set by the charging voltage of the capacity. This capacity can be charged up to 54 kV . After the current zero in the test breaker, the capacity C_p is recharged by the resistance. The steepness of the recurrent voltage can be regulated by the resistance R_p . The moment to switch on the high voltage circle can be controlled by the spark gap ZFS. The second spark gap shall prevent the capacitor C_p from being charged by the current out of the high current circel.

Contact

Dipl.-Ing. Robert Dommerque
dommerque@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94945

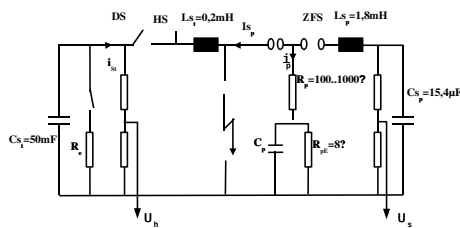


Fig. 2: Technical plan of the synthetic circuit

Untersuchungen zur Beherrschung der Auswirkungen von Störlichtbögen in elektrischen Anlagen

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen treten äusserst selten auf, lassen sich jedoch prinzipiell nicht völlig vermeiden. Die Auswirkungen von Fehlerlichtbögen müssen deshalb bei der Konstruktion und Dimensionierung von Schaltanlagen und Schaltanlagegebäuden berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit zur Begrenzung der Auswirkungen von Störlichtbögen ist der Einsatz von Kühlgittern, auch Störlichtbogenabsorber genannt.

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen sind innere Fehler, die als Folge von Kurzschlüssen auftreten. Als Ursache für die Entstehung von Störlichtbögen werden u. a. das Versagen der Isolation (z. B. auf Grund von Überbeanspruchungen oder Alterung) und Fehlfunktionen oder Fehlbedienung durch das Personal angegeben. Störlichtbögen können als frei brennende Hochstromlichtbögen z. B. an offenen Sammelschienensystemen entstehen oder sie können in abgeschlossenen Teilbereichen von Anlagen auftreten, wie z. B. in Schotträumen eines Schaltfeldes. In Mittelspannungsnetzen liegt die Grössenordnung der in Störlichtbögen umgesetzten elektrischen Leistung bis zu einigen zehn MW. Der Lichtbogen wird bis zum Ansprechen des Schutzes mit Energie versorgt, so dass vorhandene Leiter- und Isoliermaterialien über die gesamte Abschaltzeit verdampfen und sogar verbrennen. Aufheizung und chemische Reaktionen zwischen Materialien und Umgebungsgas verursachen i. a. eine Druckerhöhung, die es zum Schutz von Personen und zur Minimierung von Schäden zu beherrschen gilt.

Berechnung von Überdrücken

Zur Berechnung der Überdruckentwicklung in Folge von Störlichtbögen wird als höchster Beanspruchungsfall ein dreipoliger Kurzschluss vorausgesetzt, der beim ungünstigsten Phasenwinkel einsetzt. Während eines dreipoligen Kurzschlusses brennen in der Regel zwei Lichtbögen gleichzeitig zwischen den Phasen. Der Lichtbogensummenstrom ergibt sich aus der Umhüllenden der betragsmässigen Maximalwerte der drei Stromverläufe. Die dem Lichtbogen zugeführte elektrische Leistung wird mit Gl. (1) berechnet, wobei u_{LB} die Lichtbogenspannung ist [1]:

$$W_e = u_{LB} \cdot \frac{1}{2} (|i_1| + |i_2| + |i_3|) \quad (1)$$

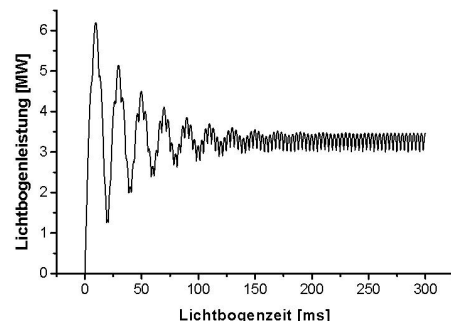


Abb. 1: Lichtbogenleistungsverlauf

In Abb. 1 ist ein typischer Lichtbogenleistungsverlauf bei einem generatorfernen, dreiphasigen Kurzschluss in ei-

ner 12 kV-Mittelspannungsanlage mit einem Kurzschlussstrom von 8,75 kA dargestellt. Der Druckaufbau in einem geschlossenen Raum mit dem Volumen V kann mit Gl. (2) bestimmt werden:

$$\Delta p = \frac{(\kappa - 1) \cdot k_p \cdot W_e}{V} \quad (2)$$

Wobei κ der Adiabatenkoeffizient des Isoliergases ist und k_p der Anteil der elektrischen Energie, der eine Druck-erhöhung bewirkt.

Berechnungen zur Druckentwicklung in Schaltanlagen in Folge von Störlichtbögen sind notwendig zur Beurteilung des Störlichtbogenrisikos, zur Einsparung von Entwicklungs- und Prüfkosten und im Fall, dass Prüfungen nicht durchgeführt werden können, z. B. in bereits errichteten Gebäuden.

Experimentelle Untersuchungen

Für Kurzschlussversuche wird ein Reihenschwingkreis mit einer aus 1500 Elektrolytkondensatoren bestehenden Batterie wieder in Funktion genommen ($C_{ges} = 0,3 \text{ F}$, $U_N = 1000 \text{ V}$). Die Kondensatoren (jeweils $C = 820 \mu\text{F}$) sind zur Erhöhung der Betriebssicherheit mit einem Diodennetzwerk versehen. Die Entladedioden D_a und die den Ladestrom führenden Dioden D_b , siehe Abb. 2, begrenzen die im Fehlerfall umgesetzte Energie auf den Energieinhalt eines Kondensators. Das Aufteilen der Ladespannung auf die Quellen U_1 und U_2 gewährleistet die symmetrische Aufladung der jeweils zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren [2]. Die Versuchsanlage wird zur Untersuchung von Lichtbogenabsorbern in Betrieb genommen.

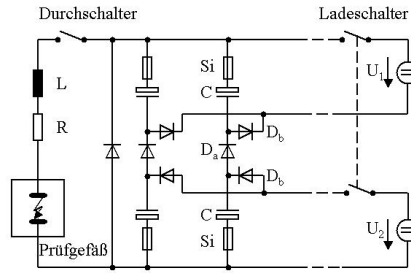


Abb. 2: Hochstromkreis

Lichtbogenabsorber oder Kühlgitter bestehen i. a. aus Streckmetallschichten, welche beim Durchströmen mit heißen Gasen diesen einen Teil ihrer Energie entziehen. Absorber sind passive Schutzeinrichtungen ohne mechanisch bewegte Teile, die keiner Wartung bedürfen. Die Effizienz von Kühlgittern kann mittels Leitblechen zur Erhöhung der turbulenten Strömung verbessert werden.

Quellen

- [1] D. Wehlich, *Zur Ausbildung mehrpoliger Störlichtbögen und zur Innendruckentwicklung in luftisolierten, metallgekapselten Mittelspannungs-Schaltzellen*, Dissertation TU Dresden, 1984
- [2] M. Schumacher, *Untersuchungen zur Modellierung der Druckbelastung von Schaltanlagegebäuden durch Störlichtbögen*, Dissertation RWTH Aachen, 1995

Kontakt

Dipl.-Ing. Michael Schmale
Schmale@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94958

Investigations on the Control of Fault Arcs in Electrical Installations

Fault arcs in electrical installations occur extremely rare, but can not be avoided completely. Therefore the effects of fault arcs must be considered during the design and dimensioning phase of electrical installations and buildings. One measure to reduce the effects of fault arcs is the application of arc absorbers consisting of e. g. cooling meshes.

Fault Arcs in Electrical Installations – Calculation of overpressure

Fault arcs in electrical installations are internal faults that appear in consequence of short circuits. Among other things as a cause for the occurrence of fault arcs insulation failures (e. g. due to overvoltages or ageing) and failures or maloperation of plant components initiated by the staff are indicated. Fault arcs often burn as free high current arcs e. g. at open busbar systems or they occur in isolated areas of electrical systems, like e. g. in different closed gas sections of a switchboard. In medium voltage systems the order of magnitude of the electric power transferred in fault arcs is near to some ten MW. The fault arc is supplied with energy up to the activation of the protection device, so that existing conducting and insulating materials vaporise and even burn during the whole fault clearing time. Heating and chemical reactions between materials and surrounding gas cause among other things a pressure rise that has to be controlled in order to protect people and to minimize damages.

To calculate the development of overpressures in consequence of fault arcs a three-pole short circuit is assumed as the highest stress case, starting at the most disadvantageous phase angle. During a three-pole short circuit, normally two electric arcs burn at the same time between the phases. The sum of the electric arc current is calculated from the enveloping curve of the absolute values of the maximum of the three phase currents. The electric power supplied to the fault arc is calculated with equation (1), whereas u_{LB} is the fault arc voltage [2]:

$$W_e = u_{LB} \cdot \frac{1}{2} (|i_1| + |i_2| + |i_3|) \quad (1)$$

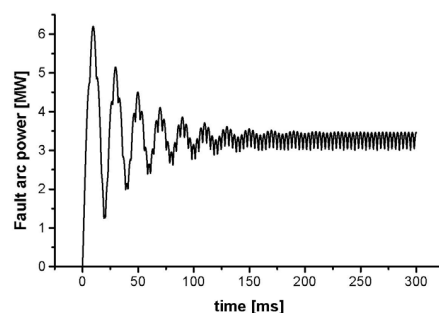


Fig. 1: Development of the fault arc power

Fig. 1 shows a typical fault arc power development for a generator-far, three-phase short circuit in a 12 kV-medium voltage installation with a short circuit current of 8,75 kA.

The pressure rise in a closed volume V results from equation (2):

$$\Delta p = \frac{(\kappa - 1) \cdot k_p \cdot W_e}{V} \quad (2)$$

where κ is the adiabatic coefficient of the insulating gas and k_p is the fraction of the electric power which causes a pressure rise.

Calculations of the pressure rise in electrical installations caused by fault arcs are necessary to estimate the risk of fault arcs, to reduce the costs for development and testing and in the case, that tests can not be performed, e. g. in already erected buildings.

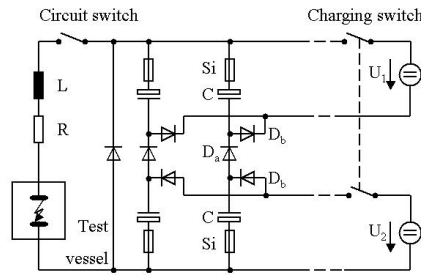


Fig. 2: High current circuit

Fault arc absorbers e. g. cooling meshes, generally consist of expanded metal layers, which take away a part of the energy while hot gases flow through. Arc absorbers are passive protective equipments without mechanically moving parts which need no maintenance. The efficiency of cooling meshes can be improved by using guiding steel plates in order to improve turbulent gas flow.

Experimental Investigations

A series resonant circuit with an existing battery of 1500 electrolytic capacitors ($C_{ges} = 0,3 \text{ F}$, $U_N = 1000 \text{ V}$) is retrofitted in order to perform short circuit tests. The capacitors (each with $C = 820 \mu\text{F}$) are provided with a diode network for the rise of the operational safety. The discharge diodes D_a and the diodes leading the charging current D_b , see fig. 2, limit the fault case energy to the energy content of one capacitor. The partition of the charging voltage on the sources U_1 and U_2 guarantees the symmetric charging of two capacitors switched in series [2].

The testing plant will be put into operation to examine cooling meshes.

References

- [1] D. Wehlich, *Zur Ausbildung mehrpoliger Störlichtbögen und zur Innendruckentwicklung in luftisolierten, metallgekapselten Mittelspannungs-Schaltzellen*, Dissertation TU Dresden, 1984
- [2] M. Schumacher, *Untersuchungen zur Modellierung der Druckbelastung von Schaltanlagen Gebäuden durch Störlichtbögen*, Dissertation RWTH Aachen, 1995

Contact

Dipl.-Ing. Michael Schmale
Schmale@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94958

Reduktion von Schwefeldioxid in Luft mit Barrierenentladungen

Die dielektrische Barrierenentladung (dielectric barrier discharge, DBD) liefert selbst bei Atmosphärendruck nicht-thermische Plasmen, die einen weiten Einsatzbereich aufweisen. Neben der Erzeugung von Ozon können diese auch zur Abgasreinigung verwendet werden z. B. zur Entschwefelung von Verbrennungsabgasen. Diese enthalten den Schwefel in Form von Schwefeldioxid, das durch die Behandlung mit Barrierenentladungen zu Schwefeltrioxid umgewandelt werden kann, welches einfacher aus dem Abgas entfernbar ist.

Einführung

Eine Reduzierung der Schwefeldioxidkonzentration in Abgasen kann über Oxidationsprozesse erfolgen. Dieser Prozess wird theoretisch mit einer vereinfachten Reaktionskinetik beschrieben, die auf den Vorgängen bei der Ozonsynthese basiert. Der Prozess der Entschwefelung ist mit einem Modellgas, das aus bis 0.1 % Schwefeldioxid in synthetischer Luft besteht, experimentell untersucht worden.

Chemische Kinetik der Umwandlung von SO₂ in SO₃

Die Energie, die Elektronen im nicht-thermischen Plasma aus dem elektrischen Feld aufnehmen, ist mehrfach größer als diejenige der schweren Teilchen. Sie beträgt einige eV. Diese Energie ist groß genug, um Moleküle über inelastische Stöße anzuregen und Dissoziationsprozesse auszulösen.

Da ein SO₂/Luftgemisch nur eine relativ kleine Menge SO₂-Zumischung enthält, ist zu erwarten, dass die Eigenschaften des Plasmas ähnlich sind wie diejenigen in reinem Luftplasma.

Die erste Stufe des Ozoneerzeugungsprozesses ist die Dissoziation von Sauerstoffmolekülen:



Die Sauerstoffdissoziation in Luft kann direkt über Elektronenstöße mit mole-

kularem Sauerstoff erfolgen und auch indirekt über angeregte Stickstoffmoleküle. Die Anzahl der erzeugten Sauerstoffatome n ist proportional zu der im Plasma umgesetzten Energie W .

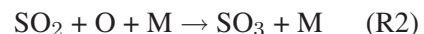
$$n = K \cdot W \quad (1)$$

(K - Proportionalitätskonstante). Normiert man diese Gleichung auf die Volumeneinheit, so gilt:

$$[\text{O}] = K \cdot W/V \quad (2)$$

$[\text{O}]$ - Sauerstoffatomkonzentration, W/V - auf die Volumeinheit bezogene in der Entladung umgesetzte Energie (an Stelle dieser Größe wird häufig der Wert P/Q - Leistung pro Gasvolumenstrom oder Energiedichte benutzt).

Bei der Autoxidation der Schwefeldioxide in trockener Luft werden Sauerstoffatome verbraucht:



Ein anderer wichtiger Kanal des Verbrauchs an O-Atomen ist die Ozonbildung:



Die Reaktionen R2 und R3 konkurrieren miteinander.

Unter Berücksichtigung der Reaktionen R1 bis R3 erhält man für die Reaktionskinetik:

$$[\text{SO}_2] = [\text{SO}_2]_0 \cdot \exp(P/Q/\beta) \quad (3)$$

$$\beta = [\text{O}_2] / K \cdot k_3/k_2$$

k_2 und k_3 sind hier die Geschwindigkeitskonstanten der Reaktionen R2 und R3. Der Wert des Proportionalitätsfaktors K aus Gleichung (1) ist bekannt.

Er beträgt $2.3\% \text{vol}/(Wh/l)$. Der Faktor β beschreibt den Energieverbrauch. Er hängt nicht von der Anfangskonzentration $[\text{SO}_2]_0$ ab und kann über die Konstanten k_2 , k_3 und K abgeschätzt werden:

$$\beta = \frac{20\%}{2.3 \frac{\%}{Wh/l}} \cdot \frac{5.6 \cdot 10^{-34}}{1.4 \cdot 10^{-33}} = 3.5 Wh/l$$

Als Reaktionsprodukt erhält man Schwefeltrioxid. Es kann unter bestimmten Bedingungen zu einem Rückprozess ($\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2$) kommen. SO_3 ist unter normalen Bedingungen ein fester Stoff. Die Kinetik der Heterophasenreaktionen ist jedoch schwer abschätzbar, so dass die Größe $[\text{SO}_2]_\infty$ in Gleichung (3) fehlt. Sie ist nur experimentell bestimmbar.

Experimentelle Untersuchung der SO_2 -Reduktion mit DBD

Das verwendete Modellgas ist ein Gemisch von synthetischer Luft mit bis zu $0.1\% \text{vol}$ Schwefeldioxid bei Atmosphärendruck. Die Volumengeschwindigkeit des Gasflusses wurde kontrolliert und geregelt.

Die Entladungszelle wurde mit einer Wechselspannung von 13 bis 15 kV (Amplitude) und 15 kHz betrieben. Die Leistung wurde mit Hilfe von Lissajous-Figuren bestimmt. Sie betrug zwischen 100 und 400 W. Um die entstehende Wärme abzuführen, wurde die DBD-Zelle mit Öl gekühlt. Die Gastemperatur wurde kontrolliert und betrug 50 bis 100°C in der Entladungsregion. Die Gasmischung wurde mit einem FTIR-Spektrometer (Thermo-Nicolett Avatar 320) und einer beheizten 2 m Multipassgaszelle analysiert. In einer Serie von Experimenten wurde die Abhängigkeit der SO_2 Kon-

zentration von der Energiedichte P/V mit unterschiedlichen Anfangskonzentrationen $[\text{SO}_2]_0$ bestimmt. Die SO_2 -Konzentration nimmt exponentiell mit der Energiedichte ab. Der Energieverbrauchsfaktor β beträgt 5.8 bzw. 5.2 Wh/l bei 980 und 547 ppmv $[\text{SO}_2]_0$. Wie sich aus der Analyse der Reaktionskinetik ergibt, sollte der β -Wert nicht von $[\text{SO}_2]_0$ abhängen. Die Restkonzentration $[\text{SO}_2]_\infty$ wird stark von der Ablagerung von SO_3 auf den Elektrodenoberflächen beeinflusst und ist von mehreren Prozessparametern abhängig.

Der Einfluß weiterer Faktoren auf die SO_2 -Reduktion wie der Leistungsdichte pro Elektrodenfläche, Spannung und Frequenz der Stromversorgung, Material und Dimension der Elektroden, Temperatur des Gases im Entladungsspalt wurde in weiteren Experimenten untersucht. Neben der Energiedichte P/Q haben die Leistungsdichte, die Frequenz und die Größe des Entladungsspalts Einfluß auf den SO_2 -Abbauprozess.

Ergebnisse der Arbeit

Der beste experimentell ermittelte β -Wert beträgt $3.5 Wh/l$ in voller Übereinstimmung mit der Theorie. Die maximale SO_2 -Reduktion betrug 95%.

Kontakt

Dr. rer. nat. (Russ) Anatoli Saveliev
saveliev@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94912
Dr. rer. nat. (Russ) Ayrat Murtazin
murtazin@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94934

Sulphur Dioxide Reduction in Barrier Discharges

Dielectric barrier discharges (DBD) are atmospheric pressure non-thermal plasmas, which are used in a broad range of applications. Apart from ozone generation off-gas cleaning is an important field e.g. flue gases desulphurisation. Flue gases contain sulphur in form of sulphur dioxide, which is oxidised to sulphur trioxide as a result of barrier discharge treatment. Sulphur trioxide can be removed easily by other means.

Introduction

The decrease of sulphur dioxide concentration in flue gases results from oxidation processes. These processes are explained theoretically by a simplified reaction kinetics model similar to that which describes ozone synthesis. The desulphurisation process is investigated experimentally with sample gases of 0.1

Chemical kinetics of SO₂ conversion

In non-thermal plasmas electrons gain energy from the electric field. This energy is much larger than that of the heavier particles. The value of the energy is some eV, high enough to excite and dissociate molecules by inelastic collisions.

As the gas under investigation has only a quite small admixture of SO₂, it can be expected that the properties of the plasma are those of a plasma in pure air.

The first step of ozone generation is the dissociation of oxygen molecules:

Die erste Stufe des Ozonerzeugungsprozesses ist die Dissoziation von Sauerstoffmolekülen:



The dissociation of oxygen molecules in air can be performed in two ways,

directly by electron impact, and indirectly by collisions with excited nitrogen molecules. The number of produced oxygen atoms n is proportional to the energy W dissipated in the discharge.

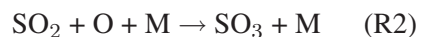
$$n = K \cdot W \quad (1)$$

(K - proportionality factor). Normalization on volume yields:

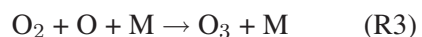
$$[\text{O}] = K \cdot W/V \quad (2)$$

$[\text{O}]$ - oxygen atom concentration, W/V energy deposited in the unit of volume (instead of this value the P/Q power per gas flow rate or energy density is applied often).

In dry air oxygen atoms will oxidise sulphur dioxide:



The other important channel of O-atom consumption is ozone synthesis:



Reactions R2 and R3 compete with one another.

Considering reactions R1 to R3 one obtains:

$$[\text{SO}_2] = [\text{SO}_2]_0 \cdot \exp(P/Q/\beta) \quad (3)$$

$$\beta = [\text{O}_2] / K \cdot k_3/k_2$$

here k_2 and k_3 are the rate coefficients for reactions R2 and R3, correspondingly. The value of the proportional factor K in equation (1) is well-known. It is 2.3%vol/(Wh/l). The factor β characterizes energy consumption. It does not depend on initial concentration $[\text{SO}_2]_0$ and can be estimated from the coefficients k_2 , k_3 and

K abgeschätzt werden:

$$\beta = \frac{20\%}{2.3 \frac{\%}{Wh/l}} \cdot \frac{5.6 \cdot 10^{-34}}{1.4 \cdot 10^{-33}} = 3.5 Wh/l$$

The final oxidation product is sulphur trioxide. The back reaction ($SO_3 \rightarrow SO_2$) can take place under certain conditions. SO_3 is a solid under normal conditions. The kinetics of heterogeneous reactions, however, can hardly be estimated. That is why the residual sulphur dioxide concentration $[SO_2]_{\infty}$ scarcely can be found in a simple way like proposed above. It has to be determined experimentally.

Experimental investigation of SO_2 reduction

The sample gas used is synthetic air with up to 0.1 %vol sulphur dioxide admixture at normal pressure. The gas flow rate is controlled.

The discharge cell is operated by alternating voltage from 13 to 15 kV (amplitude) and 15 kHz. The electric power was determined by means of Lissajous figures. It was between 100 and 400 W. For effective heat conduction, the DBD cell was cooled with oil. The gas temperature was measured continuously and it was in the range of 50 to 100°C in the discharge region. The gas at the outlet of the device was analysed by FTIR-spectroscopy (Thermo Nicolet Avatar 320) equipped with a heated 2 m multi-pass gas cell. In a series of experiments the dependence of the SO_2 concentration on the energy density P/V at various initial concentrations $[SO_2]_0$ was inves-

tigated. The SO_2 concentration decreases exponentially with energy density. The energy consumption factor β is equal to 5.8 and 5.2 Wh/l for 980 and 547 ppmv $[SO_2]_0$ respectively. As it follows from the reaction kinetics, the β -value should not depend on $[SO_2]_0$. The residual concentration $[SO_2]_{\infty}$ is affected heavily by SO_3 deposition on the electrode surface and depends on a number of process parameters.

The influence of other factors on SO_2 removal such as the power density per electrode surface unit, voltage and frequency of the power supply, material und dimensions of the electrodes, gas temperature in the discharge gap was investigated in further experiments. Apart from the energy density P/Q , the power density, frequency and the width of the discharge gap have influence on SO_2 destruction.

Results

The best experimentally determined β -value was 3.5 Wh/l that is in good agreement with the one theoretically predicted. The maximum SO_2 efficiency was better than 95%.

Contact

Dr. rer. nat. (Russ) Anatoli Saveliev
saveliev@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94912
Dr. rer. nat. (Russ) Ayrat Murtazin
murtazin@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94934

Einsatzspannung in koplanaren Barrierenentladungsanordnungen

Koplanare Entladungsanordnungen bestehen aus Elektrodenpaaren entgegengesetzter Polarität, die in einem Dielektrikum eingefasst sind. In Experimenten hat sich gezeigt, daß die Einsatzspannung, also die minimale Spannung bei der eine Entladung entsteht, in koplanaren Entladungsanordnungen viel größer ist als in vergleichbaren Volumenentladungsanordnungen. Mit Hilfe eines Feldberechnungsprogramms wird dies für unterschiedliche Konfigurationen analysiert.

Einleitung

Es werden drei grundsätzliche Anordnungen zur Erzeugung dielektrischer Barrierenentladungen (DBD) unterschieden, die Volumenentladungs- (VD), die Oberflächenentladungs- (SD), und die koplanare (CD) Entladungsanordnung (Abb.1). VD ist die klassische Variante und besteht im allgemeinen aus einem Gasspalt, der von zwei parallelen Elektrodenplatten gebildet wird, von denen mindestens eine mit einem Dielektrikum beschichtet ist. SD besteht aus einem oder mehreren Drähten, die sich auf einem Dielektrikum (z.B. Glasplatte) befinden. Auf der Rückseite des Dielektrikums befindet sich die (plattenförmige) Gegenelektrode.

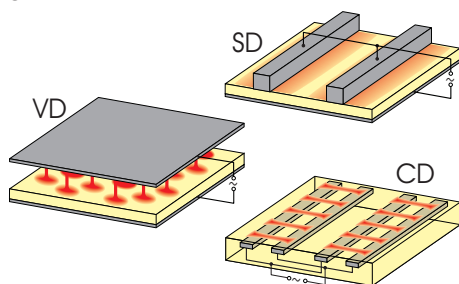


Abb. 1: Anordnungen zur Erzeugung von DBDs

Die CD besteht aus Elektrodenpaaren (Drähten), die im Dielektrikum nahe der Oberfläche liegen. Die Entladung bildet sich auf der Oberfläche des Dielektrikums zwischen bzw. über den Elektroden im Gasraum aus. Die Vor-

teile der VD (konstanter Elektrodenabstand) und der SD (direkte Oberflächenbehandlung) treten in dieser Entladungsanordnung auf.

Typische Anwendungen für DBDs sind die Ozonproduktion, Oberflächenmodifikation und Lichterzeugung (CO₂-Laser, UV und VUV Lampen, sowie plasmadisplay panels).

Einsatzspannung

Die Einsatzspannung von dielektrischen Barrierenentladungen ist von der Anordnung abhängig. Bei SDs ist sie vergleichsweise gering, da die Entladung immer im Paschenminimum stattfindet [1]. In CDs ist die Einsatzspannung noch größer als in VDs mit vergleichbarem Elektrodenabstand.

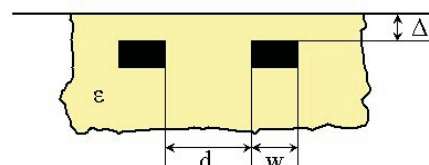


Abb. 2: Koplanare Entladungsanordnung

Ausschlaggebend ist die Feldstärkeverteilung, die bei VD homogen über dem Gasspalt verteilt ist. Bei CD befindet sich das Maximum der Feldstärke im Dielektrikum direkt zwischen den Elektroden [2]. Wichtig für die Zündung der Entladung ist jedoch die Feldstärke im Gasraum, direkt über dem Dielektrikum (vgl. Abb. 2). Das elektrische Feld des 2-dimensionalen Mo-

dells der CD wird mit einem kommerziellen Simulationsprogramm (Maxwell, Fa. Ansoft) berechnet, wobei der Elektrodenabstand d , die Dielektrikumsdicke Δ , die Elektrodenform und die Dielektrizitätszahl variiert werden.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen den Einfluss des Elektrodenabstandes und der Elektrodenform auf die Verteilung des elektrischen Feldes $10 \mu\text{m}$ über dem Dielektrikum. Wie den Diagrammen entnommen werden kann, treten über den Elektroden zwei Feldstärkemaxima auf. Bei kleineren Elektrodenabständen tritt nur noch ein Maximum in der Mitte des Elektrodenpaares auf (vgl. [3]).

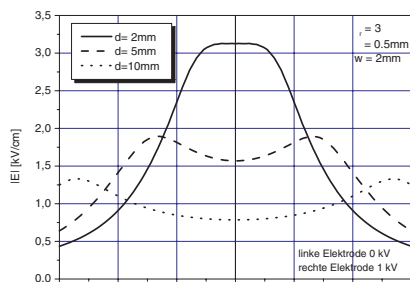


Abb. 3: Variation des Elektrodenabstandes

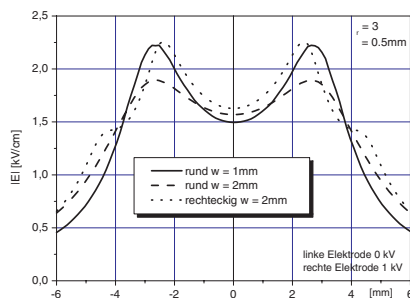


Abb. 4: Variation der Elektrodenform

Aus der elektrischen Feldstärke lässt sich die Einsatzspannung ableiten. In Abbildung 5 sind die errechneten Einsatzspannungen mit den Ergebnissen aus Messungen aufgetragen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung, so dass der hier gezeigte Ansatz zur Bestimmung der Einsatzspannung in CDs zulässig ist.

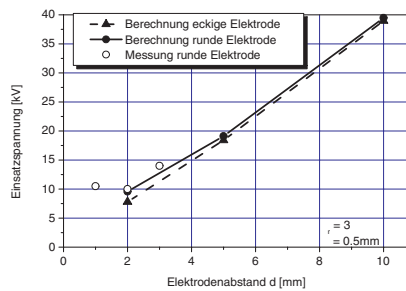


Abb. 5: Einsatzspannung

Mit Hilfe dieses Ansatzes lassen sich die Einsatzspannungen für unterschiedliche CDs vorhersagen.

Quellen

- [1] Haacke M., Humpert C., Pietsch G. J.: *Influence of Field Strength and Energy Distribution of Different Barrier Discharge Arrangements on Ozone Generation*, Ozone Science and Engineering, Vol. 24, pp. 193-201, 2002
- [2] Hulka L., Pietsch G. J.: *On the Ignition Voltage and Structure of Coplanar Barrier Discharges*, 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärve, Estland, pp. 295-263, 2002
- [3] Gibalov V. I., Pietsch G. J.: *Parameters of barrier discharges in coplanar arrangements*, 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärve, Estland, pp. 153-157, 2002

Kontakt

Dipl.-Ing. Lutz Hulka
hulka@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94937

On the Ignition Voltage of Coplanar Barrier Discharges

Coplanar barrier discharges appear in arrangements where pairs of electrodes, with opposite polarity, are embedded in a solid dielectric. Experiments show that the ignition voltage, the minimum voltage at which a discharge appears, in coplanar discharge arrangement is much higher than that in comparable volume discharge arrangement. By the use of a field calculation program, these observations are verified even for different configurations.

Introduction

In general three basic configurations to produce dielectric barrier discharges (DBDs) can be distinguished, the volume discharge (VD), the surface discharge (SD) and the coplanar discharge (CD) arrangement (Fig.1). The VD arrangement is the most common one. In general it consists of a gas gap between parallel electrode plates with at least one electrode covered by a dielectric layer. The surface discharge arrangement consists of one or more long electrodes on the surface of a dielectric and an extended counter electrode on its reverse side.

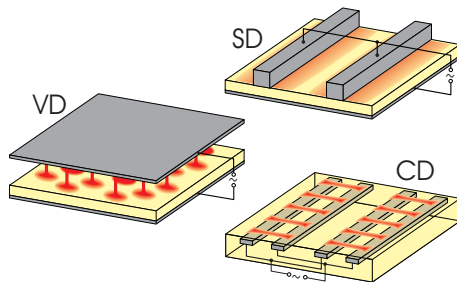


Fig. 1: Three basic configurations of DBDs

The CD arrangement consists of pairs of extended electrodes which are embedded in a dielectric close to its surface. The discharge occurs on the surface of the dielectric in between the location of the electrodes. In this type of discharge, the advantages of VD arrangements (like constant electrode gap) and SD arrangements (like direct contact with the surface) are combined.

There are a broad range of applications for DBDs, like ozone generation, surface modification and light production, e.g. in CO₂ lasers, UV, and VUV lamps as well as in ac plasma display panels.

Ignition Voltage

The ignition voltage of DBDs depends on the arrangement. In SD arrangements it is comparatively low because the discharge ignites at Paschen minimum [1]. In CD arrangements the ignition voltage is rather high, even much higher than in VD arrangements with comparable electrode distances.

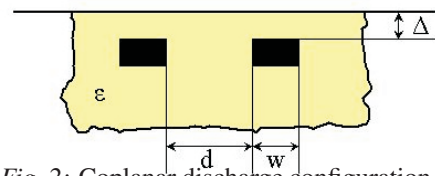


Fig. 2: Coplanar discharge configuration

The reason is found in the different field strength distributions. While the field strength distribution in VD devices is rather homogeneous within the gas gap, the situation in CD devices is quite different [2]. Here the field strength maximum is in between the electrodes within the dielectric bloc (compare Fig. 2).

By using a simulation program (Maxwell, by Ansoft), the electric field distribution of 2-dimension models of coplanar discharge arrangements can be calculated, in which the electrodes

distance d , the thickness of dielectric Δ , the electrode form as well as the dielectric permittivity are varied.

Figure 3 and 4 show the effect of the electrode distance and the electrode shape on the electric field distribution. For small electrode distances a single maximum occurs in the middle of the electrode pair. At higher distance two of them appear at the location of the electrode edges (compare [3]).

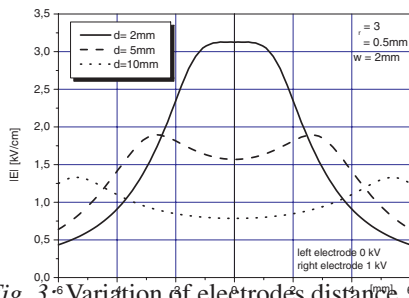


Fig. 3: Variation of electrodes distance

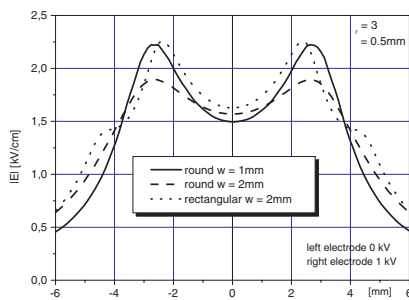


Fig. 4: Variation of electrodes shape

Using the values of the electric field strengths, the ignition voltage can be estimated. Figure 5 shows the comparison between the ignition voltages from the calculation and the measurement. The measured values are in good agreement with those found by the calculation.

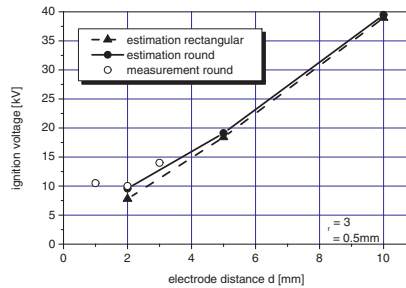


Fig. 5: Ignition Voltage

Using this approach the ignition voltage for CDs can be estimated before a new configuration is tested.

References

- [1] Haacke M., Humpert C., Pietsch G. J.: *Influence of Field Strength and Energy Distribution of Different Barrier Discharge Arrangements on Ozone Generation*, Ozone Science and Engineering, Vol. 24, pp. 193-201, 2002
- [2] Hulka L., Pietsch G. J.: *On the Ignition Voltage and Structure of Coplanar Barrier Discharges*, 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärve, Estland, pp. 295-263, 2002
- [3] Gibalov V. I., Pietsch G. J.: *Parameters of barrier discharges in coplanar arrangements*, 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärve, Estland, pp. 153-157, 2002

Contact

Dipl.-Ing. Lutz Hulka
hulka@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94937

Untersuchung zur Zustandsüberwachung an Hochspannungs-Leistungsschaltern

Bedingt durch die Liberalisierung der Energiemärkte werden neue Wartungsstrategien verwendet und entwickelt, um Kosten einzusparen und Ausfallraten zu reduzieren. In der Umsetzung ist der Übergang von der vorbeugenden Instandhaltung zu einer zustandsorientierten Instandhaltung bzw. direkt zur zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung. In diesem Bericht werden Untersuchungen zur Zustandsüberwachung von Hochspannungs-Leistungsschaltern beschrieben, die keinen Eingriff in die Aktivteile erfordern. Während 6.000 Schaltungen sind verschiedene Kenngrößen unter variablen Betriebsbedingungen aufgenommen und ausgewertet worden. Ziel ist die Ableitung von Kenngrößen zur Bestimmung des optimalen Wartungszeitpunktes.

Einleitung

Bisher werden Hochspannungsleistungsschalter nach einer vom Hersteller vorgegebenen Anzahl von Schaltungen oder nach einem vorgegebenen Zeitraum festgelegten Revisionen unterzogen. Alterung und Verschlechterung der Eigenschaften von Leistungsschaltern sind von vielen Einflussfaktoren abhängig, z.B. Anzahl und Stärke der Kurzschlussstrom-Unterbrechung, Belastungsstrom, Umwelt, Wartungsmaßnahmen, Kenntnisse des Personals usw. Deshalb ist die zustandsorientierte Instandhaltung eine wichtige Maßnahme, um die erforderliche Qualität der Anlagen zu gewährleisten [1]-[5].

Aufbau des Versuchstandes

Für die Untersuchungen wurde ein 123kV Leistungsschalter von Siemens benutzt, an dem verschiedene Messgrößen im unbelasteten Zustand nach jeweils 500 Schaltungen bis zum Endwert von 6.000 Schaltungen aufgenommen wurden. U.a. wurden folgende Kenngrößen ermittelt: Strom der Einschaltspule, Strom der Ausschaltspule, Stromaufnahme des Pumpenmotors, Hilfskontakte des Steuerkreises, dynamischer Widerstand an al-

len drei Phasen, Schaltzeiten und Vibrationsmessung an jedem Pol, am Hydraulikantrieb und Pumpenmotor. Die Betriebsbedingungen sind verändert worden, um reale Umstände zu simulieren, z.B. die Veränderung der Versorgungsspannung des Hilfsstromkreises und des Pumpenmotors, SF6-Fülldruck und Druck in Hydraulikantrieb.

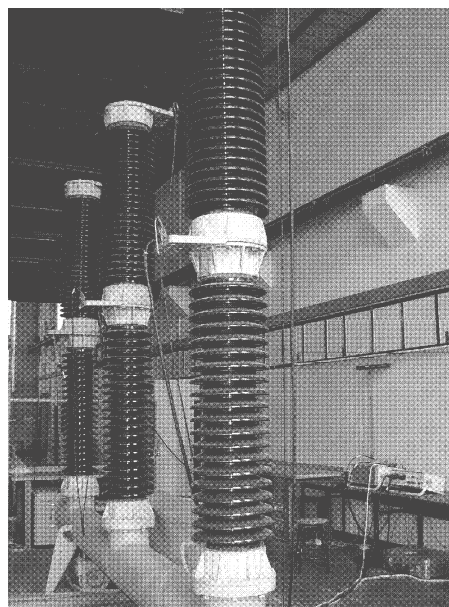


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung

U.a. wurden nach 6000 Schaltungen die genannten Kenngrößen ausgewertet und mit den Referenzdaten verglichen, um eine Referenzda-

tenbasis für die Instandhaltungsstrategie zu bestimmen. Die Signalverarbeitungstechnik und Schwingungsanalyse [6] sind mit den Signalen von jedem Meßort benutzt worden, um abnormale oder veränderliche Bedingungen zu erfassen. Zusätzlich wurden Messungen an einem Hochspannungs-Leistungsschalter vor Ort vor und nach der Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt.

und den Dämpfungsgrad zu ermitteln.

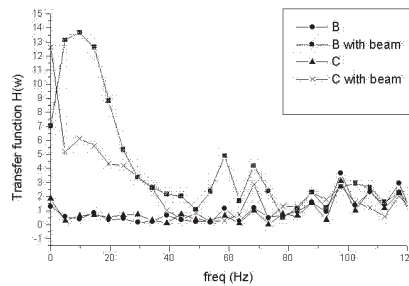


Abbildung 3: Die Übertragungsfunktion des Vibrationsignals am Pol B und C

Messergebnisse

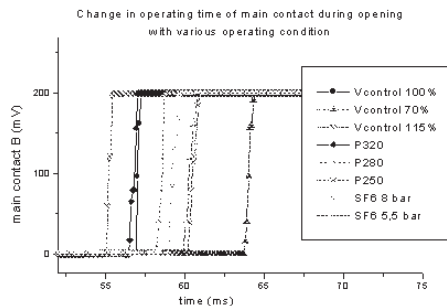


Abbildung 2: Messergebnisse der Schaltzeit der Hauptkontakte

In Bild 2 sind die Änderungen der Schaltzeit des Hauptkontakts während der Öffnung dargestellt. Abweichungen der Steuerspannung haben einen großen Einfluss auf die Schaltzeit. Wenn der Hydraulikdruck reduziert ist, ist die Schaltzeit länger. Eine SF6-Druckänderung hat auch einen Einfluss auf die Schaltzeit. Der mechanische Antrieb und der Pumpenmotor sind so zuverlässig, so daß auch nach 6.000 Schaltungen keine wesentliche Änderung ersichtlich ist. In Bild 3 ist die Übertragungsfunktion der Schwingung von Pol B und C dargestellt, um die Eigenfrequenz

Quellen

- [1] P.Barken, et al., "Methodology for monitoring the condition of high voltage circuit breaker", Cigre' Session Paper Ref.13-04, Published: 1992
- [2] P.Hoff, et al., "Condition monitoring of SF6 circuit breakers", Cigre' Session Paper Ref.13-104, Published: 1992
- [3] P.R.Voumard, "A simple approach to condition monitoring of circuit breakers", Cigre' Session Paper Ref.13-203, Published: 1994
- [4] M.Runde, et al., "Acoustic diagnosis of high voltage circuit breakers", IEEE transaction on power delivery, Vol7, No.3, July 1992, page 1306-1315
- [5] D.P.Hess, et al., "Non invasive condition assessment and event timing for power circuit breakers", IEEE transaction on power delivery, Vol7, No.1, January 1992
- [6] Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall Inc., 1994

Kontakt

Thanapong Suwanasri M.Sc.
suwanasri@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94944

Non Invasive Condition Monitoring of High Voltage Circuit Breakers

Because of electricity market liberalization, new maintenance strategies are used and developed nowadays in order to reduce maintenance costs and failure rates. Condition based maintenance is taking over preventive maintenance and already followed by Reliability Centered Maintenance strategies. Non invasive techniques without opening major parts of SF6 circuit breaker have been studied throughout this work. During 6,000 switching operations, various parameters were measured and evaluated under different operating conditions to determine the time for the next maintenance requirement.

Introduction

Up till now, high voltage circuit breakers have been maintained after specific number of operations or after specific time intervals. In fact, the aging and deterioration of circuit breakers depend on many factors, such as number and severity of fault current interruption, normal load current, environment, maintenance methods and skills etc. Therefore condition based maintenance is now playing an important role in order to maintain the equipment as it requires [1],[2],[3]. The condition monitoring of a high voltage circuit breaker with non invasive techniques under normal operating condition without opening or dismantling major parts, which is the point of interest for many years as shown in [4],[5], has been studied.

Experiment Setup

A 123kV circuit breaker was served throughout the study. Investigations were carried out by measuring various parameters since the beginning or initial condition and every 500 no-load switching operations up to 6000 switching operations, such as close and trip coil current, pumping motor current, auxiliary contacts of control circuit, dynamic resistance of main con-

tacts of each pole, operating time and in addition vibration signals of each pole, operating mechanism and pumping motor. The operating conditions have been varied in order to simulate real situations that could probably occur in service such as the variation of circuit breaker control voltage, motor supply voltage, SF6 pressure variation in case of leakage or over-filling and changing of hydraulic oil pressure.

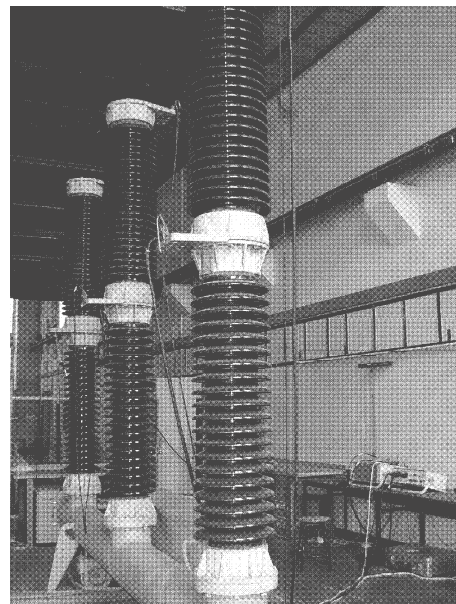


Fig. 1: Experiment setup

After 6,000 switching operations, the values of various parameters are evaluated and compared with initial condition to determine the base line for maintenance. Signal processing tech-

niques and vibration analysis [6] have been used with vibration signal at each location to detect abnormal or changing in condition. Furthermore, on site measurement with a power circuit breaker in service before and after maintenance and artificial defect that could probably happened in the real situations are included in this experiment.

Measurement Results

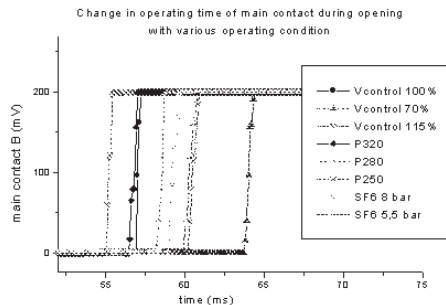


Fig. 2: Measurement results of main contact operating time
In figure 1.5 presents the changing in operating time of main contact during opening. We can conclude that the variation of control voltage has largely effected on operating time. The operating time is also slower when hydraulic oil pressure is lower. The pressure of SF6 gas has also effect on operating time. The operating mechanism is very reliable because of no significant change in operating time after 6,000 switching operations.

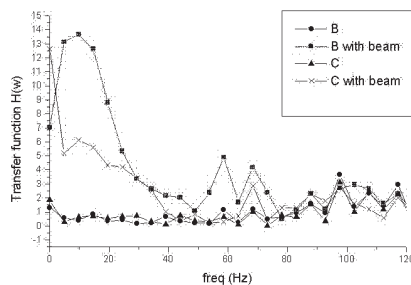


Fig. 3: Transfer function of vibration signal of pole B and C

Figure 1.6 shows the transfer function of vibration of pole B and C after applying vibration analysis to determine the natural frequency and modal damping ratio. The result was verified by apply beams connected all poles and the natural frequencies were shifted to lower frequency as shown by 2 upper curves. Pumping motor is also reliable and no significant change in characteristics (I_{max} , I_{avg} and operating time) after 6,000 switching operations.

References

- [1] P.Barken, et al., "Methodology for monitoring the condition of high voltage circuit breaker", Cigre' Session Paper Ref.13-04, Published: 1988
- [2] P.Hoff, et al., "Condition monitoring of SF6 circuit breakers", Cigre' Session Paper Ref.13-104, Published: 1992
- [3] P.R.Voumard, "A simple approach to condition monitoring of circuit breakers", Cigre' Session Paper Ref.13-203, Published: 1994
- [4] M.Runde, et al., "Acoustic diagnosis of high voltage circuit breakers", IEEE transaction on power delivery, Vol7, No.3, July 1992, page 1306-1315
- [5] D.P.Hess, et al., "Non invasive condition accessment and event timing for power circuit breakers", IEEE transaction on power delivery, Vol7, No.1, January 1992
- [6] Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall Inc., 1994

Contact

Thanapong Suwanasri M.Sc.
suwanasri@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94944

Entwicklung leichter, kompakter Hochspannungsisoliersysteme

In vielen Bereichen der Technik besteht Bedarf an leichten und kompakten elektrischen Isoliersystemen hoher Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Geringe Dichte bei hoher mechanischer Stabilität sind Eigenschaften, die bei Schäumen zu finden sind. Sie werden heute schon in vielen Bereichen der Technik eingesetzt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird der Einsatz hochentwickelter Hartschäume auf Polyurethanbasis (PUR) unter Hochspannungsbedingungen untersucht. Es sollen die Vor- und Nachteile von Isoliersystemen auf Schaumbasis beleuchtet und die elektrischen Eigenschaften verschiedener Schäume dargestellt und bewertet werden.

Isolierwerkstoffe, die in der Elektrotechnik eingesetzt werden, müssen nicht nur elektrischen Anforderungen genügen sondern oft auch bestimmte Eigenschaften wie mechanische und thermische Stabilität, geringes Gewicht sowie gute Verarbeitbarkeit aufweisen. In vielen Bereichen ist eine mittlere elektrische Spannungsfestigkeit von einigen Kilovolt pro Millimeter ausreichend. Der Werkstoff soll dabei bis zum Erreichen der Durchschlagfeldstärke möglichst teilentladungsfrei sein, um die Grenzfeldstärke für die Dimensionierung der Isolationsstrecke möglichst hoch auslegen zu können.

Ein Material, das diese Anforderungen möglicherweise erfüllen kann, ist Hartschaum auf Polyurethanbasis. Dieser Werkstoff wird schon seit Jahren in verschiedensten technischen Anwendungen eingesetzt. Daher scheint eine Untersuchung der Anwendbarkeit als elektrischer Isolierstoff sinnvoll und vielversprechend.

Elektrische Daten zu PUR-Hartschaum liegen in der Literatur nur in sehr geringem Umfang vor. Veröffentlichungen aus den 70er und 80er Jahren beziehen sich auf PUR-

Schäume, die das Ergebnis der zu dieser Zeit gerade in den Anfängen begriffenen Technik waren.

Um festzustellen, ob heutige PUR-Schäume den o.g. Anforderungen genügen, sind entsprechende Untersuchungen mit den aktuellen Materialien erforderlich. Hierzu laufen zur Zeit Durchschlagsuntersuchungen, Durchgangswiderstandsmessungen sowie Teilentladungsmessungen an verschiedenen PUR-Schäumen. Dabei werden verschiedene Parameter wie Rohdichte, Bläschengröße, Füllstoffe und Treibmittel variiert.

Erste Ergebnisse zeigen mit Durchschlagfeldstärken von 5kV/mm bis 8kV/mm vielversprechende Eigenschaften von PUR-Schäumen. Im weiteren Verlauf des Projektes wird untersucht, ob sich die Werte durch gezielte Beeinflussung verschiedener Parameter noch steigern lassen.

Kontakt

Dr.-Ing. Ralf Puffer
puffer@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94959

Development of Light and Compact Highvoltage Insulation Systems

In many areas of electrical engineering there is an increasing demand for compact insulation systems with a high reliability and availability. Low density, good mechanical properties and reduced usage of resources are some advantages of solid foams which are already widely used in other technical fields. In the following the application of different polyurethane based solid foams under electrical conditions is described. Advantages and disadvantages of electrical insulation systems using solid foams are specified and the electrical properties of these foams, such as breakdown strength for AC and DC voltages, are characterised and evaluated.

Insulation materials used in electrical power engineering do not only have to fulfil dielectric demands but also to show certain properties like mechanical and thermal strength, low density and easy processability. For most applications an average dielectric strength of some kilovolts per millimeter is acceptable. In order to operate the dielectric close to the physical limits, the insulation has to be designed to avoid partial discharges.

A material which could potentially fulfil these demands is a polyurethane based solid foam (PUR). This material has been used in many other technical fields for years. Therefore an investigation on the applicability as an electrical insulating material is very promising.

There are only very few electrical data about PUR solid foams in the literature. Papers from the 70th and 80th refer to PUR foams that were developed in the very beginning of the PUR technology.

To determine if modern PUR foams can fulfil above-named demands, it is necessary to perform certain investigations. Hereunto investigations on the electrical breakdown field strength, measurements of the volume resistance and of partial discharges are carried out for different PUR foams. Thereby different parameters like density, diameter of the bubbles, fillers and blowing agents are varied.

First results show promising characteristics of PUR foam. The breakdown field strength is measured from 5 kV/mm to 8 kV/mm. In the further process of the project it will be investigated if these values can be increased by modifying different parameters.

Contact

Dr.-Ing. Ralf Puffer
puffer@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94959

Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) von Energieversorgungsnetzen

2,2 Milliarden Menschen auf der Welt haben heute keinen Zugang zu elektrischer Energie. Zu dem steigenden Energiebedarf der Weltbevölkerung kommt gleichzeitig ein wachsendes Umweltbewusstsein hinzu. Daher wird der effiziente Umgang mit Energieressourcen zunehmend wichtiger. Dies hat zur Folge, dass auch Energieversorgungsnetze mit Umweltmanagementsystemen, wie z.B. der Ökobilanzierung, auf ihre ökologischen Auswirkungen hin untersucht und entsprechend optimiert werden.

Ursprung der Ökobilanzierung

Seit dem vermehrten Auftreten von Umweltkatastrophen und Umweltskandalen in den 80er Jahren hat sich in der Gesellschaft ein stärkeres Umweltbewusstsein eingestellt. Dies führte zur Entwicklung von Methoden und Verordnungen unterschiedlichster Art mit dem Ziel, eine ökologisch nachhaltigere Produktgestaltung zu schaffen. Ökobilanzen nach ISO 14000ff sind heutzutage ein wichtiges Instrument des modernen Umweltmanagements, um Produkte, Produktionsprozesse und Systeme auf ihre Umweltverträglichkeit hin zu analysieren.

Ökobilanzierung von Energieversorgungsnetzen

Energieversorgungsnetze sind Systeme, die sich aus elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln wie Schaltanlagen, Transformatoren, Kabeln und Freileitungen zusammensetzen. Um eine Ökobilanz eines Energieversorgungsnetzes zu erstellen, ist es notwendig, die einzelnen Bestandteile eines Netzes näher zu betrachten und quantitativ zu bilanzieren. Dabei ist der komplette Lebenszyklus der Anlagen und Betriebsmittel zu betrachten. Von

der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung der Betriebsmittel und Anlagen nach ihrem Gebrauch, sind alle auftretenden Materialaufwendungen, Emissionen und Energieaufwendungen zu berücksichtigen. Auch die Instandhaltung der Betriebsmittel und Anlagen in Energieversorgungsnetzen muss dabei berücksichtigt werden um eine ganzheitliche Bilanzierung zu ermöglichen.

Ausblick

In Zukunft werden sich sowohl die Techniken der Energieerzeugung als auch die Energieversorgungsnetze in ihrer Struktur durch den erhöhten Energiebedarf der Weltbevölkerung und dem Ziel nach ökologisch nachhaltigerem Wirtschaften verändern. Die Ökobilanzierung wird diesen Entwicklungsprozess mitgestalten. Ergebnisse von Ökobilanzstudien können dabei die Energieeffizienz in der elektrischen Energietechnik erhöhen und zum Ressourcenschutz beitragen.

Kontakt

Cand.-Ing. Thomas Smolka
smolka@ifht.rwth-aachen.de

Life Cycle Assessment of Power Grids

Today, worldwide more than 2.2 billion people do not access electricity. The energy demand is increasing but also environmental consciousness in the society is growing. The efficient use of energy is getting more and more important. Trends do show that power grids are being analysed and optimized concerning their ecological assessments.

The Origin of Life Cycle Assessment

After a series of environmental scandals and debacles in the years 1980 - 1990 a new environmental consciousness was formed in the society. New methods and restrictions have been created to recreate a sustainable and ecological product composition. Today Life Cycle Assessment (LCA) based on the ISO 14040ff standard is an important instrument in the environmental management. LCA is being used to analyse products, systems and manufacturing processes on their environmental impacts.

Life Cycle Assessment of power systems

Power grids are systems consisting of different electrical equipments as switchgears, transformers, cables and overhead lines. For the creation of an Life Cycle Assessment about power grids, it is very important to analyse all different components and their influence on the balance. Therefore it is necessary to consider the complete life cycle of each electrical equipment.

The life cycle contains the manufacturing, the utilisation and the disposal process of all electrical equipments and installations. All resource extractions, energy consumptions and emissions have to be considered. The maintenance and repair process of all electrical equipments and installations has to be considered in the balance as well to enable an integrated balancing.

Outlook

The structure of power systems and power generation techniques will be diversified based on a higher energy demand of the world population and the goal of a more sustainable economising. The Life Cycle Assessment will organize this development process. Results of LCA studies can increase the energy efficiency in power engineering and contribute to the protection of resources.

Contact

Cand.-Ing. Thomas Smolka
smolka@ifht.rwth-aachen.de

Experimentelle Untersuchung der Heißgasströmung in einem SF₆-Selbstblasschaltermodell mittels Particle Image Velocimetry (PIV) zur Verifikation von Simulationsmodellen

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2001

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Klaus Möller
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer

Bei der Entwicklung von Selbstblasschaltern werden rechnergestützte Simulationswerkzeuge eingesetzt, die die Strömungsvorgänge im Schalter nachbilden. Die Genauigkeit der Simulation ist in hohem Maße abhängig von der Güte der physikalischen Modelle, die die komplexen Zusammenhänge erfassen, und der numerischen Implementierung der Modelle in den Gleichungslöser. Zur Überprüfung ihrer Gültigkeit und Genauigkeit ist die Simulation auf Rückkopplung mit dem Experiment angewiesen.

Wesentliche Merkmale der Gasströmung im Schalter sind die Strömungsstruktur und die Gasgeschwindigkeit. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit [1] mit dem Verfahren der Particle Image Velocimetry (PIV) messtechnisch erfasst, um neue Einblicke in die physikalischen Prozesse innerhalb des Selbstblasschalters zu erhalten und so die bisherigen Kenntnisse deutlich zu erweitern.

Einleitung

In der Energietechnik werden Hochspannungs-Leistungsschalter eingesetzt, um Ströme bis zu mehreren 10 kA sicher und schnell ein- und auszuschalten. Die neueste Generation sind die SF₆-Selbstblasschalter, die zunehmend als Sicherheits- und Schaltelemente in Hochspannungsnetzen Verwendung finden.

Das eigentliche Schaltelement ist bei allen Hochspannungs-Leistungsschaltern der Schaltlichtbogen, der zwischen den sich öffnenden Kontakten entsteht. In gasbeblasenen Schaltern wird dem Lichtbogen durch eine intensive Gasströmung soviel Energie entzogen, dass er im Strom-nulldurchgang verlöscht und innerhalb

kürzester Zeit die Gasstrecke vom leitfähigen in den isolierenden Zustand überführt wird. Das Ausschaltvermögen wird dabei unmittelbar durch die Löschgasströmung und den Zustand des Löschgases bestimmt.

Die in der Schalterentwicklung eingesetzten Simulationswerkzeuge liefern aufgrund der Komplexität der physikalischen Prozesse innerhalb des Schalters derzeit noch keine hinreichend genauen quantitativen Aussagen. Zur Überprüfung ihrer Genauigkeit ist die Simulation auf Rückkopplung mit dem Experiment angewiesen.

Messaufbau

Zur Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung wurde ein SF₆-Selbstblasschaltermodell genutzt und um einen optischen Zugang zur Druckkammer und zum Düsenbereich erweitert (Abb. 1). Dadurch ist es möglich, optische Messverfahren einzusetzen, die sowohl die Strömung im Schalter unbeeinflusst lassen als auch schnell genug arbeiten, um die Vorgänge während einer Schalthandlung beobachten zu können. Der Schalter wird für die Messungen in einem synthetischen Prüfkreis betrieben.

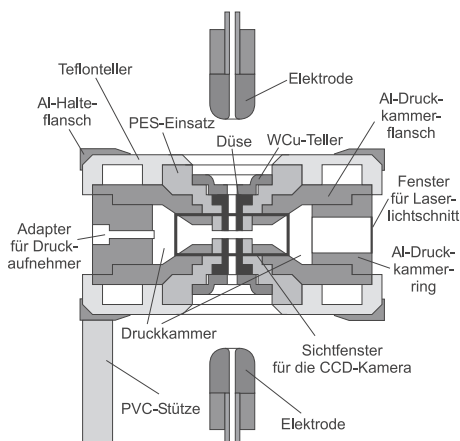


Abb. 1: Querschnitt des verwendeten Schaltermodells

Zur Visualisierung der Strömungsvorgänge und insbesondere zur Messung der Geschwindigkeit der Heißgasströmung ist die Methode der Particle Image Velocimetry (PIV) geeignet (Abb. 2). Dabei wird mit Hilfe eines optischen Linsensystems aus einem Laserstrahl eine Lichtschnittebene erzeugt. Diese bestrahlt die zu beobachtende Strömung. In der Strömung befindliche kleinste Partikel aus abgebranntem Düsenmaterial reflektieren das Laserlicht, das dann von einer CCD-Kamera aufgezeichnet wird.

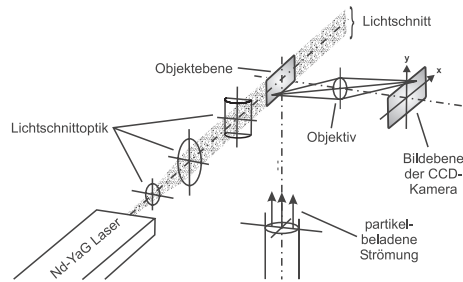


Abb. 2: Prinzip der Particle Image Velocimetry

Um die Bewegung der Partikel sichtbar zu machen, ist der Laser gepulst. Das von den Partikeln in die Kamera reflektierte Licht zweier sehr kurzer Laserpulse belichtet zwei Bilder der synchron zum Laser arbeitenden CCD-Kamera. Mit diesen beiden Bildern - dem Partikelbild zum Zeitpunkt t1 und dem Partikelbild zum Zeitpunkt t2 - sowie dem zeitlichen Abstand der beiden Bilder wird mit Hilfe eines Kreuzkorrelationsalgorithmus das Geschwindigkeitsfeld der Strömung berechnet.

Ergebnisse

In Abb. 3 a)-c) sind drei Strömungsfelder in der Druckkammer dargestellt, die zu den Zeitpunkten 8 ms, 9 ms und 10 ms der Lichtbogenzeit gemessen worden sind. Sie zeigen die Entwicklung der Strömung in der Nähe des Stromnulldurchgangs.

Zum Zeitpunkt 8 ms sind die Geschwindigkeiten im Bereich 2 sehr gering. Dies deutet darauf hin, dass sich gerade zu diesem Zeitpunkt die Strömungsrichtung ändert. Der zuvor durch das in die Druckkammer strömende abgedampfte Düsenmaterial aufgebaute Druck ist hier genauso groß wie der Druck im Lichtbogenbereich. Dadurch kommt es zur Stagnation der Strömung in diesem Be-

reich. Da der Lichtbogendurchmesser zum Stromnulldurchgang hin kleiner wird, wird auch nur noch in geringem Umfang Düsenmaterial verdampft. Dadurch nimmt der Druck im Düsenbereich weiter ab. Die Rückströmung aus der Druckkammer auf den Lichtbogen setzt ein, wie in Abb. 3 b) zum Zeitpunkt 9 ms zu erkennen ist (3, 4, 5).

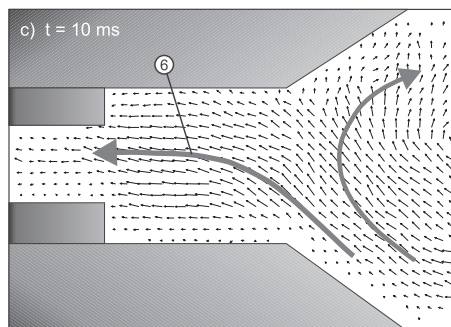
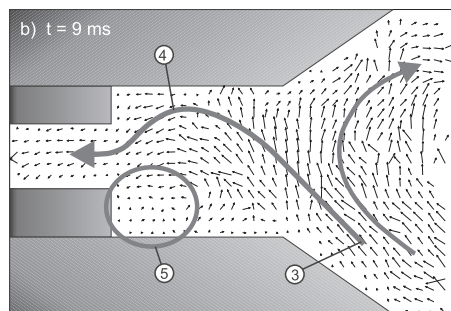
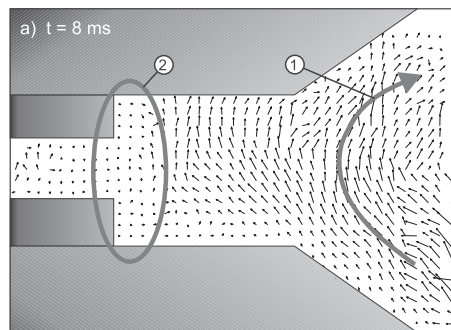


Abb. 3: Typische Entwicklung der Heißgasströmung in der Druckkammer in der Nähe des Stromnulldurchgangs a) $t = 8 \text{ ms}$, b) $t = 9 \text{ ms}$, c) $t = 10 \text{ ms}$

Zum Stromnulldurchgang hin verringert sich der Druck im Lichtbogenbereich weiter, so dass sich die Strömungsgeschwindigkeiten im lichtbogennahen Bereich entsprechend erhö-

hen. Zum Zeitpunkt 10 ms erreichen die Geschwindigkeiten hier ihr Maximum - die Strömung ist in Richtung Lichtbogen voll ausgeprägt (6).

Charakteristisch für die Strömung in der Druckkammer ist der sich ausbildende rechtsläufige Wirbel im rechten Teil der Abbildungen (1). Nähere Untersuchungen zur Ursache der Entstehung des Wirbels haben gezeigt, dass das in die Druckkammer einströmende heiße Gas aufgrund von Auftriebseffekten aus der Symmetrieachse heraus nach oben abgelenkt wird. Die Simulation muss in der Lage sein, ein solches unsymmetrisches Wirbelsystem zu berechnen.

Der Einfluss des Auftriebs auf das Strömungsfeld ist mit CFD-Simulationen untersucht worden. Beispielhafte Ergebnisse der Simulationen bei einer Lichtbogenzeit von 10 ms sind in Abb. 4 gezeigt.

Die Simulation ohne den Einfluss des Auftriebs zeigt ein symmetrisches Wirbelsystem in der Druckkammer. Dieses Ergebnis ist ein wichtiger Beleg für die Stabilität des Gleichungslösers. Es ist die Voraussetzung für eine sinnvolle Simulation mit Berücksichtigung des Auftriebs. Aus der Simulation mit Berücksichtigung des Auftriebs resultiert ein rechtsdrehendes Wirbelsystem wie im Experiment. Dieses Wirbelsystem entwickelt sich (hier nicht abgebildet) aus einer kleinen Ablenkung des Plasmastrahls zu Beginn der Lichtbogenzeit, der durch den Auftriebseffekt hervorgerufen wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass der Auftrieb einen wichtigen Einfluss auf die Wirbelstruktur innerhalb der Druckkammer des verwendeten Modellschalters hat.

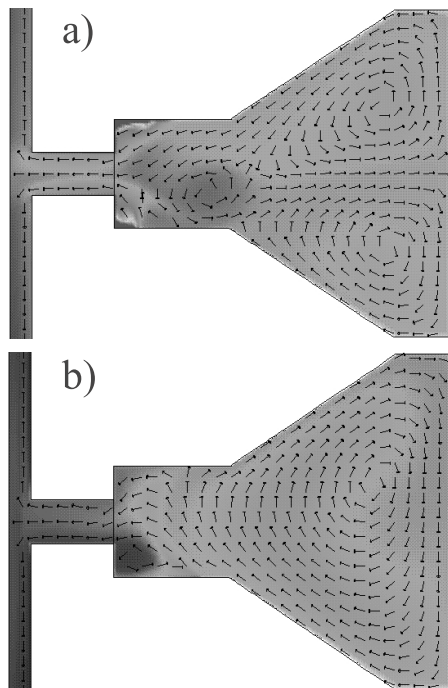


Abb. 4: Simulationsergebnisse a) ohne Auftrieb, b) mit Auftrieb

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die simulierte Strömungsstruktur mit der im Experiment gewonnenen Struktur weitestgehend übereinstimmt. Unterschiede sind im Detail zu finden. Um diese Unterschiede zu minimieren und so die Simulation effektiver und zuverlässiger zu gestalten, sind folgende Punkte zu beachten bzw. bei der Simulationsmodellbildung zu berücksichtigen:

- Bei symmetrischen Anordnungen der Schaltkammergeometrie, bei denen der Heißgasstrahl mittig in die Druckkammer einströmt, kann der Auftrieb einen deutlichen Einfluss auf die Entwicklung der Gasströmung haben. In diesen Fällen muss der Einfluss des Auftriebs untersucht werden. Gegebenenfalls kann er durch konstruktive Maßnahmen wie die

Führung des Heißgasstrahls verringert werden.

- Durchmischungsvorgänge und die Grenzflächeneffekte bei aufeinandertreffenden Gasströmungen aus heißem und kaltem Gas werden durch das Simulationsmodell nicht genügend genau nachgebildet. Da aber die genaue Simulation der Strömungsstruktur gerade im Bereich des Stromnulldurchgangs von großer Bedeutung ist, ist das Simulationsmodell hier präziser an die Bedingungen im Selbstblasschalter anzupassen.
- Die beim Selbstblasschalter durch Abbrand auftretende Änderung der Geometrie im für das Strömungsverhalten sensiblen Düsenbereich ist in Simulationsrechnungen bisher nicht berücksichtigt worden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die Notwendigkeit, auch die Änderung der Geometrie in der Simulation zu berücksichtigen.

Quellen

[1] Puffer, Ralf: Experimentelle Untersuchung der Heißgasströmung in einem SF₆-Selbstblasschaltermodell mittels Particle Image Velocimetry (PIV) zur Verifikation von Simulationsmodellen, Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen, Dissertation, 2001, ISBN 3-934318-26-6

Kontakt

Dr.-Ing. Ralf Puffer
puffer@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94959

Experimental Investigation on the Hot Gas Flow inside an SF₆ Selfblast Circuit Breaker using Particle Image Velocimetry (PIV) to verify Simulation Models

Day of the oral examination: December, 18th, 2001

Reporter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Klaus Möller
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer

For the development of SF₆ selfblast circuit breakers simulation tools are used to calculate the hot gas flow inside the circuit breaker. The accuracy of simulation results depends on the quality of the physical models and their numerical implementation into the flow solver. In order to proof the accuracy an iteration process between simulations and experiments is necessary. Therefore significant data of the gas flow such as the structure of vortex systems and velocity fields have to be obtained. In this thesis [1] this is done using an optical method called Particle Image Velocimetry. The PIV measurement method supplies velocity fields of the hot gas flow inside a circuit breaker model. Thus a qualitative and quantitative comparison between experimental and simulative results is possible.

Introduction

finally distinguishing it at current zero.

High voltage circuit breakers are an important element in power systems with rated values up to 800 kV and 80 kA. Most modern breakers are using the selfblast technology.

The SF₆ selfblast circuit breaker is characterised by a close and complex interaction between the switching arc, the radiation transfer, the ablation of the nozzle material and the gas flow.

The central element in any highvoltage circuit breaker is the switching arc, which is ignited between the contacts. The arc is vaporising the surface layer of a nozzle system consisting of PTFE material. The gaseous ablation leads to a high overpressure in the nozzle region and is the driving force for the gas flow into the pressure chamber.

Due to the complexity of the physical interaction inside the circuit breaker simulation tools do not yet supply sufficient quantitative results. Especially in the current zero region precise results are necessary to predict the maximum possible thermal performance of the simulated circuit breaker.

Close to current zero the pressure in the pressure chamber is higher than the pressure in the nozzle region. Therefore the gas is flowing back from the pressure chamber into the nozzle region where it is cooling the arc and

To proof the accuracy of simulation tools experimental verification is necessary. The velocity and the structure of the gas flow are main characteristics of an selfblast circuit breaker's functionality. Therefore a measurement system was built up, which is

able to measure this data using an optical method called Particle Image Velocimetry.

Measurement Setup

In order to investigate the hot gas flow within an SF₆ selfblast circuit breaker an experimental interruptor has been modified providing optical access to the pressure chamber and to the nozzle region. This allows optical measurements without influencing the hot gas flow and which are able to observe the flow during the arcing time. The cross-section of the selfblast interruptor used for the investigation is shown in Fig. 1. The main part consists of a cylindrical double-nozzle-arrangement. It is symmetrically surrounded by the pressure chamber. The nozzle material, which is vaporized by the arc burning in the nozzles, generates a gas flow into the pressure chamber, which has been investigated using the PIV-technique. The interruptor is operated in a synthetic test circuit. The shape of the current used for the measurement follows of a positive sine half cycle with a frequency of 50 Hz.

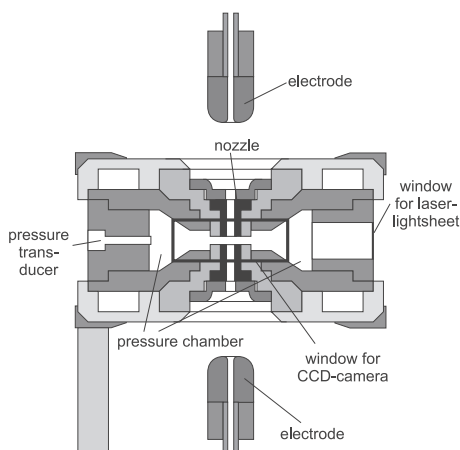


Fig. 1: Cross-section of circuit breaker

To visualize the hot gas flow and to measure its velocity the method of Par-

ticle Image Velocimetry (PIV) is used (Fig. 2). A very thin laser-lightsheet enlightens through a window in the interruptor a layer of the flow. Small particles from the ablated nozzle material reflect the light into a CCD-camera which is focussed on the flow through a second window. In order to observe the movement of the particles the laser is pulsed. The CCD-camera is synchronized to the laser and records two pictures of the particles in the hot gas flow. Based on these two pictures the velocity field is calculated using a crosscorrelation algorithm. The measurement result is a vector field of the velocity of the hot gas flow.

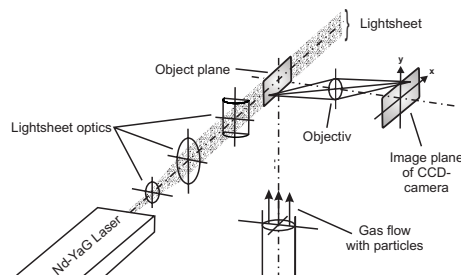


Fig. 2: Particle Image Velocimetry basics

Results

In Fig. 3 a)-c) three velocity fields of the gas flow inside the pressure chamber are shown. They have been measured at arcing times of 8 ms, 9 ms and 10 ms and show the development of the flow close to current zero. At 8 ms the velocities in area 2 are quite low and the directions of the vectors are inordinate. This means that the direction of the flow is just turning in this point in time from flowing into the pressure chamber to flowing into the direction of the arc. At this moment the pressure in the pressure chamber, which was built up by the vaporized nozzle material, is as high as the pressure in the arc region. This causes the stagnation of the flow in area 2. Since the radius of

the arc is getting smaller towards current zero, just a small amount of nozzle material is vaporized and the pressure in the nozzle region is continuing to decrease. Now the back flow of the gas from the pressure chamber onto the arc starts (see Fig. 3 b), (3, 4, 5)).

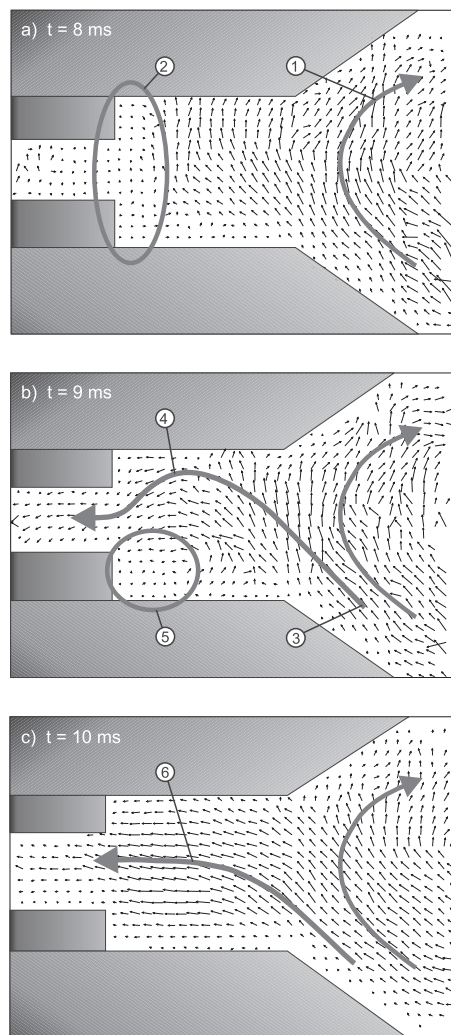


Fig. 3: Typical development of the hot gas flow in the pressure chamber close to current zero a) $t = 8 \text{ ms}$, b) $t = 9 \text{ ms}$, c) $t = 10 \text{ ms}$

Due to the decreasing pressure in the nozzle region, the velocity is continuing to increase up to the arcing time of 10 ms. At this point in time the flow onto the arc is completely devel-

oped (6).

Characteristic for the flow field in the pressure chamber is the clockwise rotating vortex system in the widening part of the pressure chamber (1). Investigations on the reason of the formation of the vortex system have shown that the gas flowing into the pressure chamber is deviated a little bit out of the symmetry plane due to buoyancy-effects which results in an unsymmetrical vortex system. The simulation has to be able to simulate the same vortex system since, depending on the vortex structure, decisive changes of the flow field will occur.

The influence of buoyancy on the flow field of the gas has been investigated with Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. Exemplary results of the simulation at an arcing time of 10 ms are shown in Fig. 4. The simulation without buoyancy shows a symmetrical vortex system in the pressure chamber. This result is a very important proof of the stability of the flow solver. It is the assumption for a reasonable simulation in consideration of buoyancy. In these simulation results a clockwise turning vortex system similar to the experiments is obtained. In the progression of the simulation over time, which is not shown here, the vortex system develops out of a little deviation of the hot gas flow caused by buoyancy. These results proof that buoyancy has an important influence on the structure of the vortex system inside the pressure chamber of the used interruptor. In addition it is also relevant for the switching capability of the interruptor.

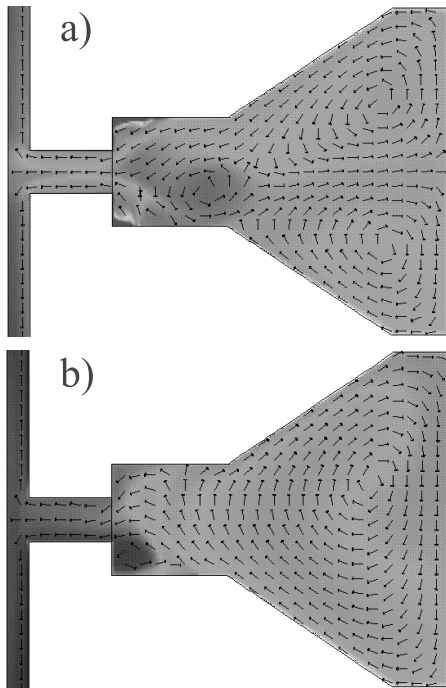


Fig. 4: Simulation results a) without buoyancy b) with buoyancy

Conclusion

The PIV-system has successfully been used to measure velocity fields inside the pressure chamber of an SF₆ self-blast circuit breaker model. The time resolved measurements deliver important data about the flow fields inside the pressure chamber and the nozzle

area. The experimental results are used to verify simulation results and to provide important hints for the modification of the simulation model. Around current zero the experimental results show a clockwise rotating vortex system inside the pressure chamber which does not match with conventional simulation results. The analysis of the results shows an important influence of buoyancy on the structure of the gas flow.

References

- [1] Puffer, Ralf: Experimentelle Untersuchung der Heißgasströmung in einem SF₆-Selbstblassechaltermodell mittels Particle Image Velocimetry (PIV) zur Verifikation von Simulationsmodellen, Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen, Dissertation, 2001, ISBN 3-934318-26-6

Contact

Dr.-Ing. Ralf Puffer
 puffer@ifht.rwth-aachen.de
 ++49/(0)241/80-94959

Modellierung des dynamischen Verhaltens von Oberflächen-Barrierentladungen und der Ozonerzeugung

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Pietsch
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer
 Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2002

Eine spezielle Form der dielektrischen Barrierentladung stellt die Oberflächen-Barrierentladung dar. Sie entsteht z. B. in Entladungsanordnungen mit schmalen, ausgedehnten Elektroden auf der Oberseite eines Dielektrikums und einer flächigen Gegenelektrode auf der Unterseite. Oberflächenentladungen werden u. a. zur Oberflächenbehandlung von Kunststofffolien und bei plasmatechnischen Anwendungen eingesetzt, wie der Abgasreinigung und der Ozonerzeugung. Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Oberflächen-Barrierentladungen wurde ein zweidimensionales, selbst-konsistentes Modell entwickelt, mit dem die Entladungsentwicklung während vollständiger Spannungspulse bei negativer und positiver Polarität sowie im Wechselspannungsbetrieb untersucht wurde. Die Simulationsergebnisse zeigen in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen ein stufenförmiges Vorwachsen der Entladung auf der dielektrischen Oberfläche. Aufbauend auf den Ergebnissen der Entladungssimulation wurde die Ozonerzeugung in Oberflächenentladungsanordnungen orts aufgelöst modelliert. Die Ergebnisse erklären die geringe Effizienz der Ozonerzeugung mit Oberflächenentladungen bei Luftbetrieb im Vergleich mit einer konventionellen Entladungsanordnung mit Gasspalt.

Einleitung

In Entladungsanordnungen, in denen mindestens eine der beiden Elektroden vollständig mit einem Dielektrikum beschichtet ist, kommt es bei Erreichen der Zündfeldstärke im Gasraum zur Ausbildung von dielektrischen Barrierentladungen. Während der Entladungsentwicklung reduziert sich durch die Ansammlung von Ladungsträgern auf dem Dielektrikum die Feldstärke im Gasraum und die Entladung wird infolgedessen nach kurzer Zeit, bei Atmosphärendruck typischerweise nach etwa 10 ns, gestoppt.

Bei Barrierentladungen handelt es sich um transiente, nicht-thermische Entladungen, die in zahlreichen plasmatechnischen Anwendungen eingesetzt werden, u. a. bei der Zersetzung

von umweltschädlichen Gasen und bei der Erzeugung von Ozon (O_3). Ozon ist ein Oxidations-, Reinigungs- und Sterilisationsmittel und besitzt große Bedeutung bei der Wasseraufbereitung, in medizinischen Anwendungen und im Bereich der Halbleiterfertigung [1].

Neben der Ozonerzeugung existieren weitere Anwendungen von Barrierentladungen, wie z. B. die Oberflächenbehandlung von Kunststofffolien. Darüber hinaus finden Barrierentladungen in Excimer-Lampen und in miniaturisierten Fluoreszenzlampen von Plasmadisplays Anwendung.

Eine spezielle Form der dielektrischen Barrierentladung stellt die Oberflächen-Barrierentladung dar. Sie entsteht z. B. in Entladungsanordnungen mit schmalen, ausgedehnten

Elektroden auf der Oberseite einer dielektrischen Schicht und einer flächigen Gegenelektrode auf der Unterseite (Abb. 1).

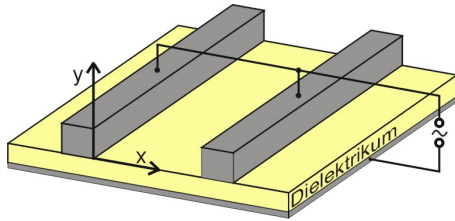


Abb. 1: Ausschnitt einer Oberflächenentladungsanordnung.

Ziel dieser Arbeit ist es, das dynamische Verhalten von Oberflächenentladungen zu modellieren und die räumliche Entladungsentwicklung bei negativer und positiver Polarität der Elektroden sowie im Wechselspannungsbetrieb in Sauerstoff und Luft bei Atmosphärendruck zu untersuchen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Entladungssimulation wird die Ozonerzeugung mit Oberflächenentladungsanordnungen diskutiert.

Modellierung

Zur Berechnung der Bewegung und Vermehrung geladener Teilchen im elektrischen Feld kann die Boltzmann-Transportgleichung aufgrund der kurzen Relaxationszeit der Elektronenenergieverteilung in guter Näherung auf die Kontinuitätsgleichungen der Teilchendichten n_i von Elektronen, positiven und negativen Ionen zurückgeführt werden:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \operatorname{div}(n_i \vec{v}_i) - D_i \Delta n_i = S_i$$

D_i bezeichnet die jeweiligen Diffusionskonstanten der Teilchen. Die Driftgeschwindigkeiten $\vec{v}_i$ und die Volumenquellterme S_i , die Ionisation, Anlagerung und Rekombination geladener Teilchen berücksichtigen, können als Funktionen der lokalen elektrischen

Feldstärke $\vec{E}$ beschrieben werden (local field approximation). Das Feld wird selbst-konsistent in Abhängigkeit der Raum- und Oberflächenladungsdichten mit Hilfe der Poisson-Gleichung berechnet.

Bei der Lösung der Poisson-Gleichung müssen neben den festen Randbedingungen des Potentials auf den Elektroden auch die Randbedingungen der elektrischen Feldstärke an der Grenze Dielektrikum-Gasraum berücksichtigt werden. Neben den Volumenquelltermen wird die Produktion von Sekundärelektronen an den Oberflächen berechnet, die durch den Aufprall von positiven Ionen und Photonen ausgelöst werden.

Neben den vereinfachten Quelltermen S_i wird zur Bestimmung der Ozonerzeugung zeit- und raumaufgelöst ein komplexes Reaktionssystem, das im Fall von Luft als Prozessgas 19 Spezies und 119 Reaktionen umfasst, gelöst. Hierbei dienen die während der Entladungsentwicklung berechneten Elektronendichten und Energiedichten, die auch eine Bestimmung der Temperaturverteilung ermöglichen, und die Verteilungen der elektrischen Feldstärke als Eingangsdaten.

Aufgrund der Symmetrie der Oberflächenentladungsanordnung kann das gekoppelte Differentialgleichungssystem in einem zweidimensionalen Ansatz gelöst werden (Abb. 1). Hierbei werden für Luft als Prozessgas die folgenden Randparameter verwendet:

Elektrodenabstand:	12 mm
Elektrodenbreite:	3 mm
Dielektrikumsdicke:	2 mm
Dielektrizitätskonstante:	8,4
Gasdruck:	1 bar
Spannungsamplitude:	12 kV
Frequenz:	10 kHz

Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse ergeben ein stufenförmiges Vorwachsen der Entladung auf der dielektrischen Oberfläche in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen (Abb. 2) [2]. In jeder Entladungsstufe kommt es aufgrund der Akkumulation von Ladungsträgern auf dem Dielektrikum zur Verringerung der Feldstärke im Entladungsraum und zum Verlöschen der Entladungsstufe. Erst bei erhöhter Spannung treten weitere Entladungsstufen auf.

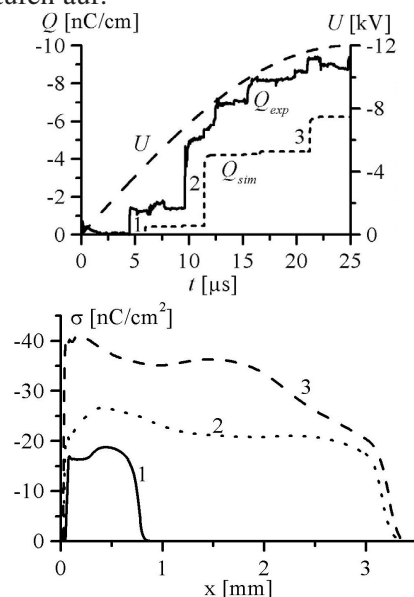


Abb. 2: Auf die Leiterlänge bezogene umgesetzte Ladung und auf dem Dielektrikum akkumulierte Oberflächenladung nach den einzelnen Entladungsstufen bei negativer Polarität.

Die Entladungsentwicklung wird bei negativer Polarität durch einen Kathodenfall an der metallischen Oberflächenelektrode bestimmt, in dessen Verlauf maximale reduzierte Feldstärken von 2000 Td erreicht werden. Die Entladungsausbreitung entlang der dielektrischen Oberfläche ist mit einem Feldstärkemaximum von maximal 210 Td an der Spitze der Entladung verbunden (Abb. 3).

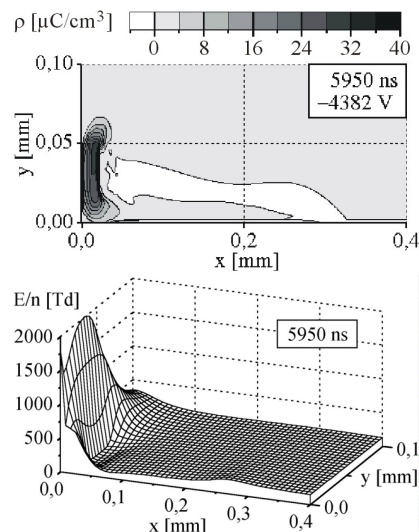


Abb. 3: Raumladungsdichte und Betrag der reduzierten Feldstärke im Strommaximum der ersten Entladungsstufe bei negativer Polarität.

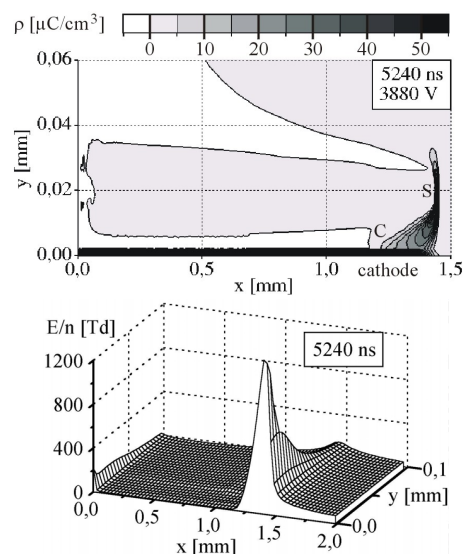


Abb. 4: Raumladungsdichte und Betrag der reduzierten Feldstärke während der ersten Entladungsstufe bei positiver Polarität.

Bei positiver Polarität der Elektroden entwickelt sich in jeder Entladungsstufe ein positiver Streamer auf der dielektrischen Oberfläche. Am Streamerkopf werden maximale Feldstärken von 700 Td erreicht (Abb. 4, S), im Entladungskanal bricht die Feldstärke bis auf einen Wert von 10 Td zu-

sammen. An der Dielektrikumsoberfläche in der Nähe des Streamerkopfs bildet sich ein Kathodenfallraum mit vergleichbaren Eigenschaften wie bei negativer Polarität (Abb. 4, C).

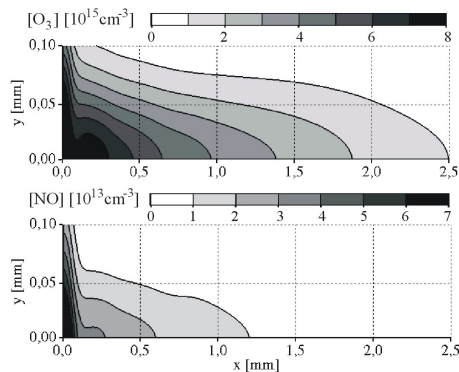


Abb. 5: Verteilung der O_3 - und NO -Konzentration am Ende eines negativen Spannungspulses.

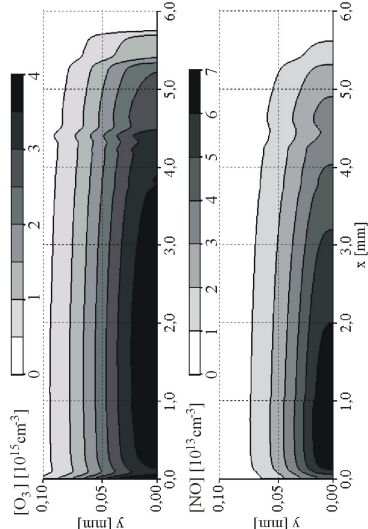


Abb. 6: Verteilung der O_3 - und NO -Konzentration am Ende eines positiven Spannungspulses.

Die Ergebnisse der orts aufgelösten Simulation der plasmachemischen Vorgänge in Luft zeigen, dass bei negativer Polarität hohe Elektronenenergiegedichten und damit verbunden hohe Sauerstoffatom- sowie Ozonkonzentrationen im Bereich des Kathodenfallraums und im Bereich der dielektrischen Oberfläche auftreten. Im Bereich des Kathodenfallraums treten aufgrund der hohen Feldstärke zusätz-

lich vergleichsweise große Konzentrationen von Stickstoffatomen und Stickoxiden auf (Abb. 5).

Auch bei positiver Polarität der Elektroden kommt es aufgrund der hohen Feldstärke im Streamerkopf neben der Dissoziation von Sauerstoff zur Dissoziation von Stickstoff. Dies führt dazu, dass im gesamten Entladungsbereich neben Ozon auch Stickoxide gebildet werden (Abb. 6), so dass bezogen auf die produzierte Ozonmenge etwa die dreifache Menge an Stickoxiden gebildet wird wie bei negativer Polarität. Stickoxide führen zu einer katalytischen Zerstörung von Ozon. Verstärkt wird die Stickoxidbildung in beiden Polaritäten darüber hinaus durch lokale Übertemperaturen von bis zu 80 K, die insbesondere im Entladungsbereich vor der metallischen Elektrode auftreten. Hiermit lässt sich die geringe Effizienz der Ozonerzeugung mit Oberflächenentladungen bei Luftbetrieb im Vergleich mit einer konventionellen Entladungsanordnung mit Gasspalt erklären.

Quellen

- [1] Kogelschatz, U.; Eliasson, B.; Egli, W.: Dielectric-Barrier Discharges Principle and Applications, Proceedings of the XXIIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Toulouse, 1997, S. 1–19
- [2] Gibalov, V.I.; Pietsch, G.J.: The Development of Dielectric Barrier Discharges in Gas Gaps and on Surfaces, Journal of Physics D: Applied Physics 33, 2000, S. 275–278

Kontakt

Dr.-Ing. Christof Humpert
ABB Calor Emag Mittelspannung
Christof.Humpert@de.abb.com
++49/(0)2102/12-1519

Modelling of the Dynamic Behaviour of Surface Barrier Discharges and Ozone Generation

Reporter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Pietsch
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer
 Day of oral examination: 15 February 2002

Surface discharges, a special kind of barrier discharges, occur in arrangements e. g. with small but extended high-voltage electrodes in parallel (wires, bars, stripes) on one side of a dielectric layer and a plane counter electrode on its reverse side. Surface barrier discharges are used among others for surface treatment of plastic foils and in plasmachemistry for example to clean exhaust gases or to produce ozone. To investigate the dynamic behaviour of surface barrier discharges a two-dimensional, self-consistent model has been developed, which make it possible to simulate the discharge development during voltage pulses of negative and positive polarity as well as at AC voltage. The simulation results show a stepwise development of the discharge on the dielectric surface at both polarities in good agreement with experimental findings. Based on the results of the discharge simulation the ozone generation in surface discharge arrangements is analysed. The results explain the low efficiency of the ozone production from air with surface discharges in comparison with a conventional discharge arrangement with a gas gap.

66

Introduction

Dielectric barrier discharges occur in arrangements, in which one or both electrodes are covered completely with a dielectric. During the development of a barrier discharge, charge carriers are accumulated on the dielectric leading to a reduction of the field strength and the discharge decays at atmospheric pressure after 10 ns to 100 ns.

Dielectric barrier discharges are transient, non-thermal discharges, which are used in plasmachemistry for example to clean exhaust gases or to produce ozone (O_3). Ozone is utilised among other things for water treatment, in medical applications and in the semiconductor industry during the wafer production [1].

Additionally to ozone generation barrier discharges are used for surface treatment of plastic foils and as light

sources, for example in excimer lamps or plasmadisplays.

Surface discharges, as a special kind of barrier discharges, occur in arrangements e. g. with small but extended high-voltage electrodes in parallel (wires, bars, stripes) on one side of a dielectric layer and a plane counter electrode on its reverse side (Fig. 1).

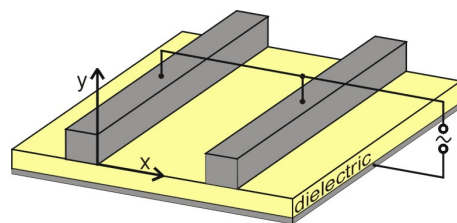


Fig. 1: Profile of a surface discharge arrangement.

This work has the aim to model the dynamics of surface discharges and to simulate the spatial and temporal re-

solved discharge development in oxygen and air at atmospheric pressure. The discharge development is investigated at negative and positive polarity of the surface electrode as well as at AC voltage. Based on the results of the discharge simulation the ozone generation in surface discharge arrangements is analysed.

Modelling

To calculate the temporal and spatial behaviour of charge carrier densities in dependence of the electric field strength, the Boltzmann equation can be replaced by the continuity equations of the particle densities n_i of electrons, positive and negative ions because of the short relaxation time of the electron energy distribution function:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \operatorname{div}(n_i \vec{v}_i) - D_i \Delta n_i = S_i$$

D_i is the diffusion coefficient of the particle species, respectively. The drift velocity $\vec{v}_i$ and the source terms S_i , which take ionisation, attachment and recombination into account, are in this approach functions of the local electric field strength $\vec{E}$ (local field approximation). The field strength is solved self-consistent with the help of the Poisson equation in dependence of the densities of volume and surface charges.

To solve the Poisson equation the boundary conditions of potential at the metallic electrodes and the boundary conditions of electric field strength at the boundary between dielectric and gas volume have to be considered. Besides the production of charged particles in the discharge volume secondary electron emission by photons and positive ions at the cathode surface is taken into account.

Additionally to the source terms S_i a chemical reactions scheme is solved spatial and temporal resolved in dependence of the distributions of electron density and field strength to analyse the ozone generation process. In air the reaction scheme includes 19 species and 119 reactions. The temperature in the discharge area is determined from energy densities of electrons and ions and included in the chemical reaction system.

Because of the symmetry of the SD arrangement the complete equation system can be solved in a two dimensional approach (Fig. 1). For this the following properties of the discharge arrangement are used:

electrode distance:	12 mm
electrode width:	3 mm
dielectric thickness:	2 mm
permittivity:	8,4
gas pressure:	1 bar
voltage amplitude:	12 kV
voltage frequency:	10 kHz

Results

The simulation results reveal a step-wise development of the discharge on the dielectric surface at both polarities in good agreement with experimental findings (Fig. 2) [2]. In each discharge step, the accumulation of charge carriers on the dielectric surface leads to a reduction of the field strength and the decay of the discharge step. At increased voltage a further step can develop.

The discharge development at negative polarity of the surface electrodes is dominated by a cathode fall mechanism at the metallic surface electrode. In the cathode fall a maximum reduced field strength of about 2000 Td is found. The propagation of the discharge along the dielectric surface is combined with a field strength maximum of

about 210 Td at the tip of the discharge (Fig. 3).

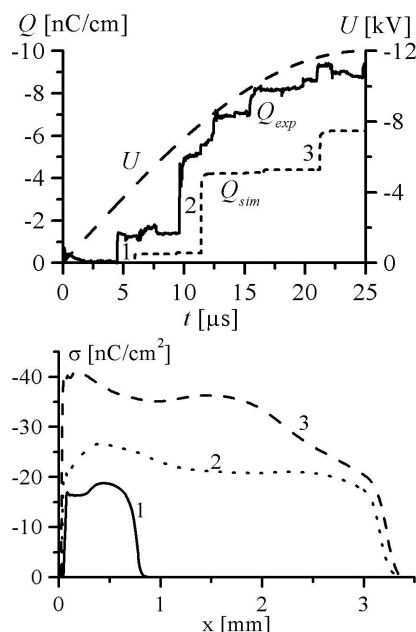


Fig. 2: Transferred charge per electrode length and surface charge accumulated on the dielectric with negative polarity.

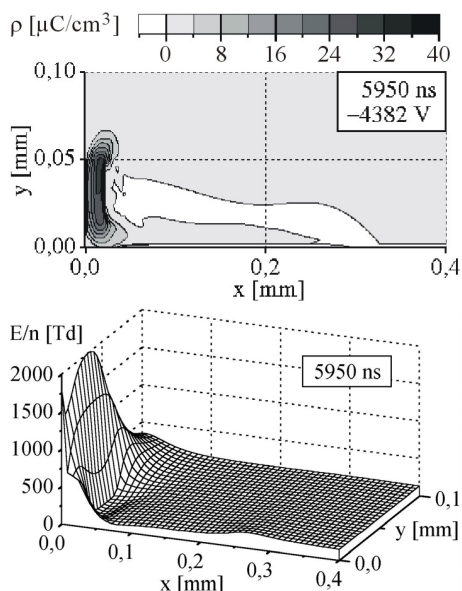


Fig. 3: Charge density and absolute value of the reduced field strength at current maximum of the first discharge step with negative polarity.

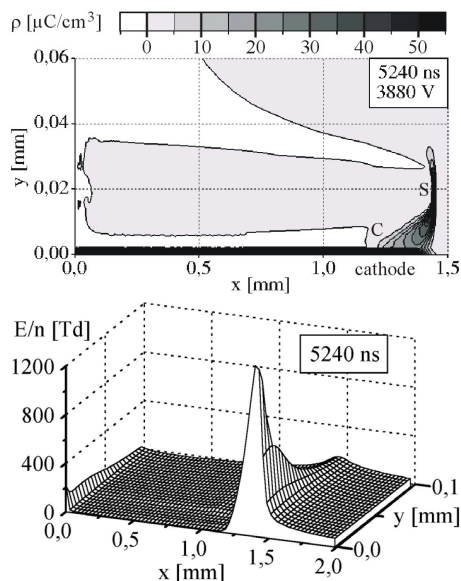


Fig. 4: Charge density and absolute value of the reduced field strength during the first discharge step with positive polarity.

At positive polarity of the surface electrodes a positive streamer propagates along the dielectric surface in each discharge step. At the streamer head, a maximum reduced field strength of about 700 Td is found (Fig. 4, S). In the streamer channel the field strength drops to about 10 Td. A cathode fall is found as well, which appears near the streamer head on the dielectric surface and has comparable properties as that with negative polarity (Fig. 4, C).

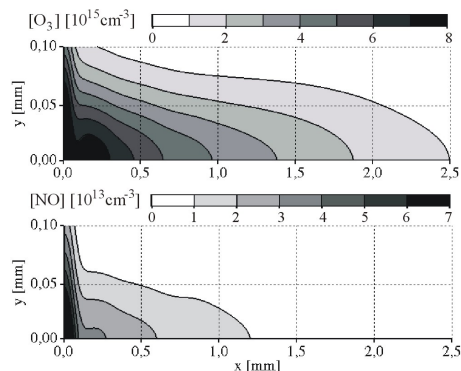


Fig. 5: Distribution of O_3^- and NO-concentration after a negative voltage pulse.

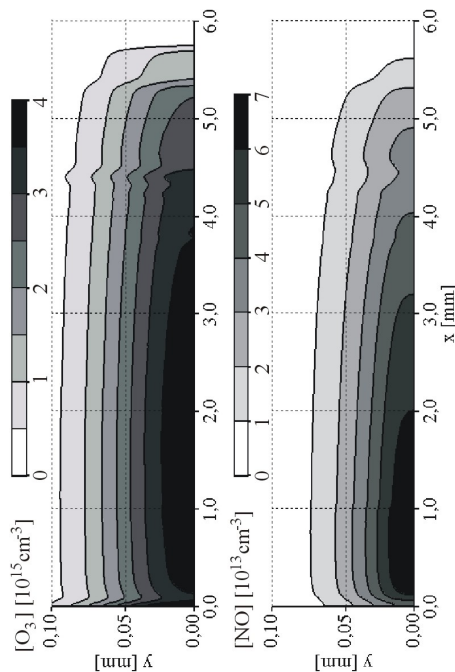


Fig. 6: Distribution of O_3^- and NO^- concentration after a positive voltage pulse.

The results of the spatial resolved simulation of the plasma-chemical processes in air show, that with negative polarity high oxygen and ozone concentrations occur in the cathode fall area and near the dielectric surface. Because of the high field strength high concentrations of nitrogen atoms and nitrogen oxides emerge especially in the cathode fall area (Fig. 5).

With positive polarity the high field strength in the streamer head leads to dissociation of oxygen and nitrogen. As a consequence in the whole discharge area nitrogen oxides are produced besides ozone (Fig. 6), so that

in comparison with negative polarity three times more nitrogen oxides are produced in relation to the amount of ozone.

Nitrogen oxides destroy effectively ozone in catalytic reaction chains. Additionally local over-temperatures of up to 80 K found at both polarities nearby the surface electrodes intensify the production of nitrogen oxides and the ozone destruction process. This may explain the low efficiency of the ozone production from air with surface discharges in comparison with a conventional discharge arrangement with a gas gap.

References

- [1] Kogelschatz, U.; Eliasson, B.; Egli, W.: Dielectric-Barrier Discharges Principle and Applications, Proceedings of the XXIIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Toulouse, 1997, p. 1–19
- [2] Gibalov, V.I.; Pietsch, G.J.: The Development of Dielectric Barrier Discharges in Gas Gaps and on Surfaces, Journal of Physics D: Applied Physics 33, 2000, p. 275–278

Contact

Dr.-Ing. Christof Humpert
 ABB Calor Emag Mittelspannung
 Christof.Humpert@de.abb.com
 ++49/(0)2102/12-1519

Modellierung der Auswirkungen von Störlichtbögen in elektrischen Anlagen

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2002

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Pietsch
 Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Boehme
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen sind seltene Ereignisse. Treten sie jedoch auf, so können sie neben der Unterbrechung der Energieversorgung und Schäden in elektrischen Anlagen auch Personen gefährden. Zur Beherrschung ihrer Auswirkungen, der Druck- und Temperaturentwicklung in ihrer Umgebung, ist deren Modellierung von Bedeutung. Eine exakte Bestimmung der Auswirkungen ist auch für die Fälle unerlässlich, in denen keine Messungen vorgenommen werden können. Ein wichtiger Parameter, als thermischer Transferkoeffizient k_p bezeichnet, für die Bestimmung der Druckentwicklung wird in der Arbeit erstmalig theoretisch bestimmt in Abhängigkeit von der Art und der Dichte des Isoliergases, dem Volumen in dem der Lichtbogen brennt, sowie vom Elektrodenmaterial unter Berücksichtigung von Materialverdampfung und chemischen Reaktionen des Metaldampfes mit dem Isoliergas. Weiterhin wird die Wandverformung von Schaltanlagegebäuden durch die Druckeinwirkung von Störlichtbögen simuliert. Um den Einfluss des sich ändernden Gaszustands auf die Lichtbogeneigenschaften (Temperatur und Brennspannung) beschreiben zu können, wird ein Strahlungsmodell mit einem Nettoemissionskoeffizienten eingeführt. Die hier vorgestellte Strahlungsnachbildung im Lichtbogen und in seiner Umgebung kann für die Bestimmung der Temperaturentwicklung in Schaltanlagen herangezogen werden. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung der Auswirkungen durch Störlichtbögen wird an einigen Beispielen demonstriert.

Betrachtetes System

Bild 1 zeigt eine Schaltanlage. Betrachtet wird ein Modell die Schaltanlage, in der ein Lichtbogen brennt. Der Lichtbogen führt dem betrachteten System Energie zu, die sich aus verschiedenen Anteilen zusammen setzt. Die zugeführte Energie bewirkt sowohl eine Erhöhung der inneren Energie, als auch darüber hinaus konvektiven Energietransport. Zudem beeinflussen Verdampfung des Lichtbogenfußpunktmaterials und chemische Reaktionen zwischen Metaldampf und Umgebungsgas die Wärmemenge. Weitere Energieanteile, die nicht unmittelbar zur Wärmemenge des betrachteten System

beitragen, sind die nicht vom Gas absorbierte Strahlungsemission und die Wärmeleitung in die Elektroden oder Wände des Anlagenraumes (mit weißen Pfeilen).

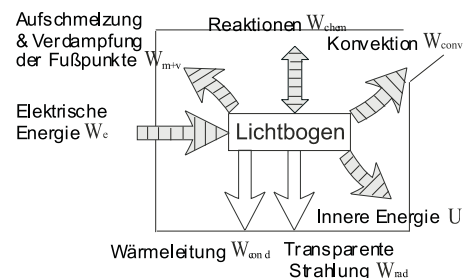


Abb. 1: Energieflüsse beim Störlichtbogen in einer elektrischen Anlage

Materialverhalten und chemische Reaktionen

Wenn das Umgebungsgas eines Störlichtbogens nur aus bestimmten Komponenten bestehend angenommen werden kann, soll der Gaszustand als relativer Reinheit bezeichnet werden. Der thermische Transferkoeffizient k_p kann bei relativer Reinheit als eine Konstante abgeschätzt werden.

Im Fall, dass relative Reinheit nicht gegeben ist, wird metallisches Material verstärkt aufgeschmolzen und verdampft. Der Metalldampf in Lichtbogennähe kann sogar die Gaszusammensetzung dominieren. Durch chemische Reaktionen des Fußpunktmaterials mit dem Umgebungsgas kann dem System zusätzlich Energie zugeführt werden.

Um die Einflüsse einiger Parameter wie z.B. die Art des Isoliergases und des Fußpunktmaterials, der Gasdichte und der Geometrie der elektrischen Anlage auf die k_p -Werte abschätzen zu können, wird das Verfahren auf geschlossene Anordnungen angewendet (Bild 2 bis 5) [1].

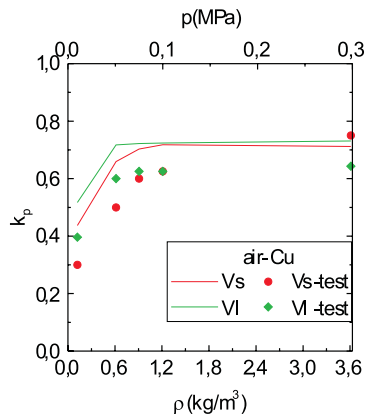


Abb. 2: Berechnete und gemessene k_p -Werte für Cu in Luft

Untersuchung auf reale MS-Kompaktstation

In einer Mittelspannungskompaktstation mit Schalterraum, Kabelanschlußraum und Transformatorraum zeigt es sich eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentell und rechnerisch bestimmten Druckverläufen, vgl. Bild 6 und 7 [1].

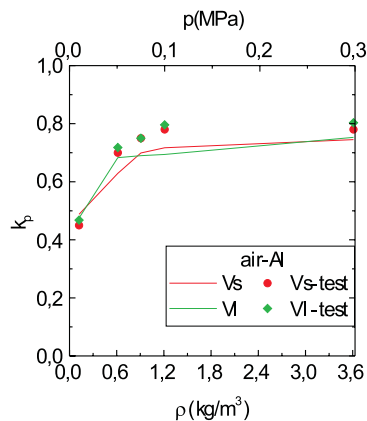


Abb. 3: Berechnete und gemessene k_p -Werte für Cu in Luft

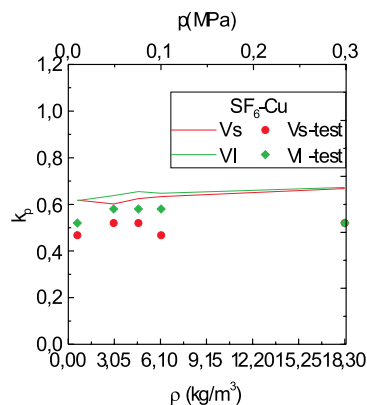


Abb. 4: Berechnete und gemessene k_p -Werte für Cu in SF₆

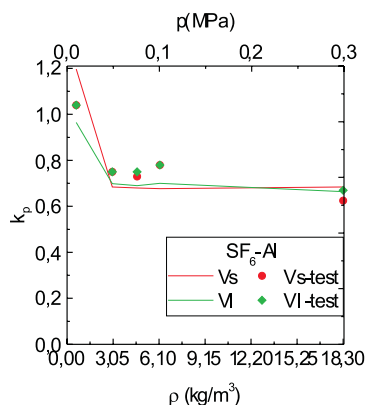


Abb. 5: Berechnete und gemessene k_p -Werte für Al in SF₆

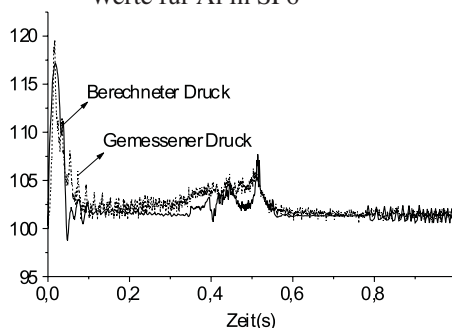


Abb. 6: Experimentell und rechnerisch bestimmter Druckverlauf im Kabelanschlussraum

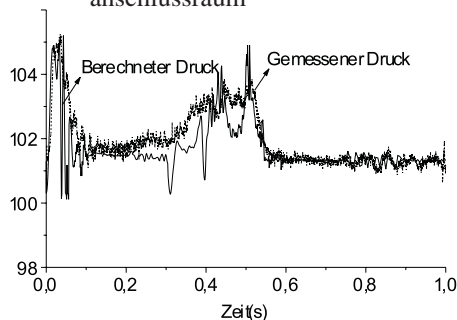


Abb. 7: Experimentell und rechnerisch bestimmter Druckverlauf im Transformatorraum

In diesen Fällen können Materialverdampfung und chemische Reaktionen für die Druckentwicklung besonders wichtig werden.

Strahlungstransport

Das betrachtete Strahlungssystem wird in zwei Zonen eingeteilt (Bild 8). Diese sind die elektrisch leitende Plasmazone

ne (das heiße Lichtbogenzentrum und dessen Randbereich) und die nichtleitende, kalte Gasumgebung, die die Plasmazone umschließt.

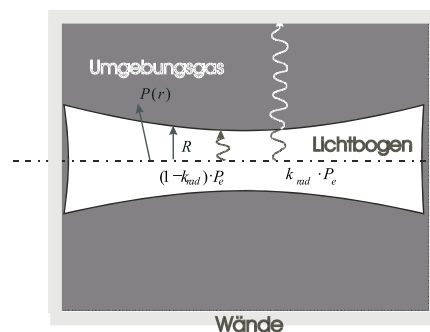


Abb. 8: Energietransport vom Lichtbogen in das Umgebungsgas durch Strahlung

Von der in den Lichtbogen eingespeisten Leistung P_e wird ein Teil $k_{rad}P_e$ durch das Umgebungsgas hindurch emittiert und gelangt an die Begrenzungsflächen. Der übrige Teil $(1 - k_{rad})P_e$ wird im Lichtbogen oder dessen Rand absorbiert und durch Wärmeleitung, Diffusion und Konvektion an das Umgebungsgas abgegeben. Dieser Anteil trägt z. B. zum Druckanstieg bei.

Das Strahlungsverhalten kann mittels des dichteabhängigen Nettoemissionskoeffizienten in die Leistungsbilanz eingekoppelt werden, wobei die Brennspannung und die Temperatur des Lichtbogens bestimmt werden können. Die Bilder 9 bis 11 zeigen berechnete Temperaturverteilungen an verschiedenen Punkten in einer Mittelspannungskompaktstation mit Fehlerraum, Entlastungsraum und Kanal [1].

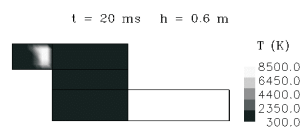


Abb. 9: Temperaturverteilung über dem Fußboden

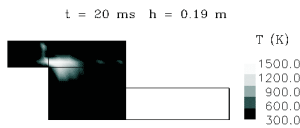


Abb. 10: Temperaturfeld auf den Querschnitt durch den Entlastungsraum

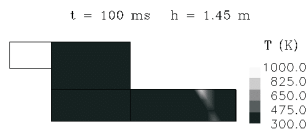


Abb. 11: Temperaturfeld auf den Querschnitt durch den Kanal. Die Temperatur in frei brennenden Hochstrom-Lichtbögen in Luft sind gemessen worden [2], wobei Werte zwischen 8.000 K und 12.000 K auftraten.

Abschätzung der Wandverformung von Gebäudewänden

In typischen Mittelspannungskomplettstationen (z. B. von einer 2m1,5m0,085m großen Betonwand) setzen die Wandeigenfrequenzen im Bereich von ca. 300 Hz und aufgeprägte Frequenzen des Druckverlaufes bis ca. 20 Hz auf. In solchen Fällen folgt die Wandverformung bei Störlichtbogenfehlern der Druckbelastung unverzüglich und die Wandbewegung zeigt ein statisches trägheitsloses Verhalten, wobei ein Nährungsverfahren hier benutzt wird. Das Prinzip dieses Verfahrens beruht darauf, eine Lösung in Form von analytischen Funktionen zu finden, die sich für eine vom Programmpaket CFX4 gestützte Lösung ohne weitere spezifische Algorithmen eignet. Nachfolgend wird als ein An-

wendungsbeispiel die Reaktion einer Gebäudewand eines Anlagegebäudes auf einen Störlichtbogen vorgestellt. In Bild 12 ist der Verlauf der Wandverformung gezeigt [1]. Die maximale Auslenkung der Wand (die betrachtete Wand liegt rechts) beträgt etwa 6 mm zum Zeitpunkt 100 ms.

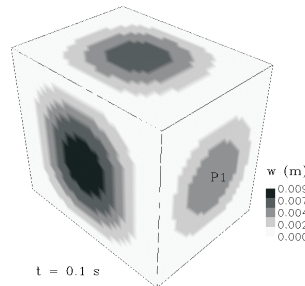


Abb. 12: Schematische Darstellung der Wandverformung während des Lichtbogenfehlers.

Quellen

- [1] X. Zhang; Modellierung der Auswirkungen von Störlichtbögen in elektrischen Anlagen; Dissertation, RWTH Aachen, 2002
- [2] M. Iwata, et al.; Spectroscopic Determination of Temperature and Electrode Vapor-Concentration for Arc Jet of 50 Ka Class AC Arc in Long Gap; Proc, 13th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, Glasgow(UK), Vol. 1, pp. 90-93, 1997

Kontakt

Dr.-Ing. Xiang Zhang
xiang@ifht.rwth-aachen.de

Studien-, Staats- und Diplomarbeiten

Diplomarbeiten

Tröger, Alexander:

Untersuchung verschiedener Mischdielektrika zum Aufbau einer kompakten Isolationsanordnung für Hochspannungserzeuger

Um einen Hochspannungserzeuger kompakt, leicht, mechanisch und thermisch stabil sowie elektrisch hoch beanspruchbar aufzubauen, wird ein Isoliermedium benötigt, dass diese Anforderungen erfüllen kann. Im Rahmen der Arbeit werden daher verschiedene Mischdielektrika auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Es werden Durchschlagfestigkeiten, Teilentladungsverhalten, Verarbeitbarkeit und Ölverträglichkeit bestimmt. Mit Hilfe der Software Maxwell wird das elektrische Feld für verschiedene Elektrodenanordnungen und Mischdielektrika berechnet. Wesentliches Ergebnis der Arbeit ist ein Isoliersystem, welches zum Aufbau eines Prototypen geeignet ist.

Schwinne, Michael:

Modellierung des thermischen Abschaltvorgangs in Leistungsschaltern mit Black Box Modellen

Zur Beschreibung der Wechselwirkung eines Schaltlichtbogens mit dem elektrischen Netz werden sogenannte 'Black Box Modelle' eingesetzt. Diese beruhen auf einer einfachen Differentialgleichung, die aus einer vereinfachten Energiebetrachtung abgeleitet wurde (Cassie, Mayr). Die beiden in dieser DGL enthaltenen Parameter P (Kühlleistung) und τ (Zeitkonstante) sind keine Konstanten, son-

dern eine Funktion der abhängigen Variablen G (elektrischer Leitwert). Seit kurzem ist man in der Lage, die physikalischen Vorgänge während des thermischen Löschens eines Schaltlichtbogens mit hochauflösenden CFD-Simulationswerkzeugen nachzubilden. Dabei werden die kompletten MHD-Gleichungen gelöst, man ist also nicht mehr auf Messungen angewiesen, die zum einen sehr aufwendig und insbesondere bei SF6-Schaltern aufgrund der sehr kurzen und kleinen Nachströme auch sehr problematisch sind. In der Diplomarbeit wurde die Möglichkeit untersucht, inwieweit die Parameter der Differentialgleichung ('Black Box Modelle') aus Simulationsergebnissen gewonnen werden können.

Masterarbeiten

Ramirez Alanis, Margil Servando:

Erkennung verschiedener Fehlerarten in polymeren Isolierstoffen mit Hilfe von Ultraschallmessungen

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung verschiedener Fehlerarten in Silikonkautschuk und Polyethylen mittels Ultraschallmessung. Im Laborversuch werden Prüflinge mit Fremdkörpern versetzt, um gezielt Fehlermuster einzubauen, die in der Kabeltechnik mögliche Fehlerquellen darstellen. Im Detail werden dabei Untersuchungen zu unvollständiger Vernetzung, mechanischer Beanspruchung und singulärer Fehlstellen durchgeführt.

Studienarbeiten

Radick, Marius:

*Untersuchung singulärer Fehlstellen
in polymeren Isolierstoffen mit Hilfe
der Ultraschalltechnik*



Veröffentlichungen

Kerstin Jenkes, Bernhard Heil, Armin Schnettler:
Simulation of Vacuum Arcs in Circuit Breakers Based on Kinetic Modelling
XXth ISDEIV, Tours, 2002

Christian Cornelissen, Armin Schnettler:
Neue Verfahren zur Zustandsbewertung von Kabelsystemen
ETG-Fachbericht 87, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2002

Christian Cornelissen, Anette Wiesmath, Armin Schnettler, Bernhard Blümich:
Nicht-destruktive Verfahren zur Zustandsbewertung von Kabelsystemen: Ultraschall und Kernspinresonanz
Elektrizitätswirtschaft 101 (2002), Nr. 10, S. 38-43

Christian Cornelissen, Armin Schnettler:
Non-destructive diagnostic facilities for cable systems
2002 IEEE ISEI, Boston [USA], 2002

Lutz Hulka, G. J. Pietsch:
On the ignition voltage and structure of coplanar barrier discharges
Proc. 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry „Hakone VIII“, Pühajärve [Estland], Vol. 2, pp. 259-263, 2002

A. B. Saveliev, G. J. Pietsch:
On the structure of dielectric barrier surface discharges
Proc. 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry „Hakone VIII“, Pühajärve [Estland], Vol.2, pp. 229-233, 2002

V. I. Gibalov, T. Murata, G. J. Pietsch:
Parameters of barrier discharges in coplanar arrangements
Proc. 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry „Hakone VIII“, Pühajärve [Estland], Vol. 1, pp. 153-157, 2002

G. J. Pietsch, C. Humpert:
Discharge mechanism and ozone generation by surface discharges depending on polarity
Proc. 8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry „Hakone VIII“, Pühajärve [Estland], Vol. 2, pp. 234-238, 2002

M. Haacke, C. Humpert, G. J. Pietsch:
Influence of field strength and energy distribution of different barrier discharge arrangements on ozone generation
Ozone Science and Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 193-201, 2002

C. Humpert, G. J. Pietsch:
Investigation on the dynamics of surface barrier discharges during a cycle of the applied voltage
Proc. XIX Int. Conf. on Gas Disch. and their Appl., Liverpool, UK, Vol. 1, pp.

203-206, 2002

V. I. Gibalov, T. Murata, G. J. Pietsch:
Some characteristic parameters of co-planar discharge arrangements
Proc. XIX Int. Conf. on Gas Disch. and their Appl., Liverpool, UK, Vol. 1, pp. 183-186, 2002

G. J. Pietsch, S. Saveliev:
Some properties of barrier discharges on dielectric surfaces
Proc. XIX Int. Conf. on Gas Disch. and their Appl., Liverpool, UK, Vol. 1, pp. 179-182, 2002

X. Zhang, G. J. Pietsch:
Determination of the thermal transfer coefficient k_p of the energy balance of fault arcs in electrical installations
Proc. XIX Int. Conf. on Gas Disch. and their Appl., Liverpool, UK, Vol. 1, pp. 135-138, 2002

Ralf Puffer, Klaus Möller, Armin Schnettler:
Optimierung von Simulationswerkzeugen für SF_6 -Leistungsschalter
Elektrizitätswirtschaft 101 (2002), Nr. 6, S. 56-58, 2002



Lehre am ifht

Teaching at ifht



Lehre am ifht

Im Rahmen des Hauptdiploms werden vom Institut mehrere Vorlesungen angeboten, welche zum Teil auch in englischer Sprache gehalten werden. Dies ist ein Angebot für die Masterstudiengänge, aber auch für interessierte deutschsprachige Studenten, die ihre englischen Sprachkenntnisse vertiefen wollen.

Hochspannungstechnik I (SS)

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

Inhalt

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

High Voltage Engineering I (SS)

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

Contents

- Overvoltages in power systems: Travelling waves, overvoltage protection
- Breakdown-phenomena: Statistics, breakdown in gases, solids and liquids

- Insulation systems and dielectrics

Hochspannungstechnik II (WS)

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

Inhalt

- Erzeugung und Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen
- Hochspannungsgeräte: Konstruktionsmerkmale, Kondensator, Durchführungen und Ausleitungen, Transformator, Schalter, Wandler
- EMV
- Technische Exkursion

High Voltage Engineering II (SS)

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

Contents

- Generation and measurement of high AC, DC and impulse voltages
- High voltage equipment: Construction, capacitors, transformers, breakers, instrument transformers

- Electromagnetic compatibility (EMC)
- Technical excursion

Schaltgeräte und Schaltanlagen

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

Inhalt

- Schaltgeräte: Grundlagen, Bauarten, Funktionsweisen, Normen
- Schaltanlagen: Bauweise, Instandhaltungsmanagement

Grundlagen der Gasentladungstechnik (WS)

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, Ü1, für 5. Semester

Inhalt

- Grundbegriffe der kinetischen Gastheorie, Stoßgesetze, Maxwell-Boltzmannsche und Druyvestynsche Geschwindigkeitsverteilung, Wärmeleitung, innere Reibung, (ambipolare) Diffusion, Boltzmannsche Transportgleichung
- Elementarprozesse im Plasma Elektronenanregung, Ionisierung, Dissoziation, Stöße zweiter Art, negative Ionen;
- Ladungsträgererzeugung Volumenionisation; Oberflächenionisation (durch Teilchenstöße, Felder, thermische Ionisation);

- Zünden von Gasentladungen Lawinenzündung, Paschengesetz, Vakuumdurchschlag; Kanaldurchschlag;
- Glimmentladung, Kathodenmechanismen, Ähnlichkeitsbeziehungen; Sonderformen, Dielektrische Barrieren-Entladung
- Lichtbogenentladung, Elektrodenbereiche, Plasmaströmungen, Bogensäule, Charakteristik; Elenbaas-Hellergleichung; Wechselstromlichtbogen, dynamische Strom-Spannungs-Charakteristik; Funke und Blitz.

Basics of Gas Discharge Engineering (WS)

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, E1, for 5. Semester

Contents

- Fundamentals of kinetic gas theory, collision processes, velocity distributions of Maxwell-Boltzmann and Druyvesteyn, heat conduction, viscosity, (ambipolar) diffusion, Boltzmann equation
- Elementary processes in plasmas, electron excitation, ionization, dissociation, collisions of the second kind, negative ions
- Generation of charge carriers in the gas volume, on surfaces (by particles, fields, thermal effects)
- Ignition processes, avalanche ionization, Paschen law, vacuum breakdown, streamer mechanism

- Glow discharges, cathode mechanisms, similarity relations, special types, dielectric barrier discharge
- Arcs, electrode regions, plasma flows, arc column, current-voltage characteristic, Elenbaas-Heller equation, AC discharges, dynamic characteristic, high frequency discharges, sparks and lightnings.

Ausschaltvorgang, physikalische Lichtbogenmodelle, Zweipolmodelle.

Gas Discharge Engineering (SS)

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, E1, for 6. Semester

Gasentladungstechnik (SS) Contents

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, Ü1, für 6. Semester

Inhalt

- Gasentladungslampen, Grundlagen der Lichttechnik, Lichtausbeute, Farbwiedergabe, Glimmlampen, Metaldampf- und Edelgasentladungslampen, Beschaltung
- Kontrollierte Kernfusion, physikalische Grundlagen, magnetischer Einschluss, Trägheits-einschluss, Reaktorkonzepte;
- Ozonerzeugung, Elektrische Staubfilter
- Schaltlichtbogen, Beanspruchungen bei Ausschaltvorgängen; Schaltprinzipien in Nieder-, Mittel- und Hochspannungsschaltern; Magnetblas-, Hartgas-, Ölschalter, Öl als Dielektrikum, Druckluft-, SF₆-Schalter, Eigenschaften von SF₆, Vakuumschalter, Lichtbogen im Vakuum, Kontakte
- Beschreibung von Schaltlichtbögen, Elementarprozesse beim

- Gas discharge lamps, basics of lighting engineering, efficacy and efficiency, colour-rendering index, glow discharge lamps, metal vapour and noble gas discharge lamps, wiring
- Controlled nuclear fusion, fundamentals, magnetic inclusion, inertial inclusion, experimental devices, concepts of reactors, risks and endanger
- Ozone generation, electrostatic precipitation
- Switching-arcs, electric stress during the breaking process, switch-off principles, magnetic blow-out-, hard-gas-, oil circuit-breaker, properties of insulating oil, SF₆ circuit breaker, properties of SF₆, vacuum breaker, arcs in vacuum, contacts of vacuum breakers
- Description of circuit breaker arcs, elementary processes during switch-off, physical models, black-box models.

Vorlesung Schutzmaßnahmen und Schutzeinrichtungen in elektrischen Netzen und Anlagen

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
V 2, Ü1, für 5. Semester

Inhalt

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

Protective Measures and Equipment in Power Supply Systems and Electrical Installations

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

Contents

- 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 of high-frequency fields
- Protective measures of low voltage installations against direct and at indirect contact, configurations of the network, safety, protection and function 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 transformers, motors and generators

Fachdidaktik der Elektrotechnik I - III

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
WS V2, SS TÛ2, SS TÛ4, für Lehramtsstudierende S II

Inhalt

- Lehr- oder Lernziel, Lernzieltypen, -kategorien, -niveaus, Gewinnung von Lernzielen, Lernerfolgskontrolle;
- Lernpsychologische und soziologische Aspekte des Unterrichts, Lernformen; Speichervorgang im Gehirn; Lernmotivation, Sozialformen des Unterrichts;
- Lehrstoff, Auswahl, Lehrstoff-Zeit-Problem; Strukturierung, didaktische Reduktion;
- Medien, bildliche Darstellungen, Bild- und raumseitige Anforderungen bei Projektionen;
- Lehrmethoden, Unterrichtsprinzipien, deduktive und induktive Methode; Analogmethode, Projektverfahren, programmierter Unterricht; handlungsorientierter Unterricht; Unterrichtsvorbereitung, pädagogische Vorbereitung, didaktische Analyse, Unterrichtsverlaufsplanung;
- Seminarvorträge;
- Betreuung von Grundlagenpraktika.

Didactics of Electrical Engineering I - III

Dozent: Prof. Dr. rer. nat G. J. Pietsch
WS V2, SS TÛ2, SS TÛ4, for stu-

dents of the teaching career at vocational schools

Contents

- Teaching and educational objectives, types, categories, levels, development of educational objectives, success control of teaching and learning
- Psychological and sociological aspects of teaching, types of learning, storage processes in the brain, learning motivation, social types of teaching
- Subject matters, choice, subject-time problem, structuring, didactical reduction
- Teaching aids, kinds of figures, demands on illustrations and drawings for projections
- Teaching methods, principles of teaching, deductive and inductive method, method of analogy, project method, programmed instruction, action orientated teaching, preparation of teaching, didactical preparation and analysis, planning of the sequence of teaching steps, types of occupations in the field of electrical engineering.
- Seminar lectures prepared by students
- Preparations of practical courses by students

Energiekabel (WS)

Dozent: Dr.-Ing. D. Meurer
V2, Ü1, für 5. Semester

Inhalt

- Einleitung: Kabelindustrie, Kabelmarkt, Energiekabel in Netzen, Geschichte, technische Normen, Uebertragungseigenschaften
- Aufbauelemente: Werkstoffe, Leiter, Isolierung, Schirm, Mantel, Armierung
- Bauarten: Nieder-/Mittel-/Hochspannungskabel, EVU-/Spezialkabel
- Produktion: Papierisolierung, extrudierte Isolierung, Leiter/Ader/Kabel
- Qualitätsmanagement: ISO 9000, Qualitätssicherung, Typ-/Auswahl-/Stueckpruefung, Pruefung nach Verlegung, Alterung, Lebensdauer
- Garnituren: Endverschluesse, Muffen, Feldsteuerung, Montagetechniken
- Kabelprojekte: Kabeltrasse, Belastbarkeit, Transport, Verlegung
- Hochleistungskabel: Verluste, Kuehlung, HVDC, gasisolierte Kabel, Tieftemperaturkabel, supraleitende Kabel (LTSC, HTSC)
- works, 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)

Power Cable Engineering (WS)

Dozent: Dr.-Ing. D. Meurer
V2, E1, for 5. Semester

Contents

- Introduction: cable industry, cable market, power cables in net-

Fachdidaktik der Elektrotechnik - Schulpraktische Studien (WS)

Dozent: Stud.-Dir. K. Alscher
V 2, für Lehramtskandidaten S II

- Sekundarstufe II: Ziel, Dauer, Aufnahmebedingungen, Unterricht, Abschlüsse - Mitwirkungsorgane bei der beruflichen Aus- und Weiterbildung - Duale Ausbildung: Schule und Betrieb, Zuständigkeiten. Analyse der Lehr- und Lernsituation, Auswahl und Abgrenzung des

Lernstoffes: Vorbildung, schulische Situation, Lernbereitschaft
- Ausbildungssituation, Handwerk/Industriebetrieb, überbetriebliche Ausbildung.

- Auswahl und Abgrenzung des Lernstoffes: Wert des Themas für den Schüler, didaktische Analyse - Richtlinien und Lehrpläne industrielle und handwerkliche Elektroberufe nach der Neuordnung - didaktische und fachwissenschaftliche Orientierungspunkte für Unterrichtsmethoden - Prinzip des Exemplarischen - Grundsätze der Lernerfolgsüberprüfung.
- Vor- und Nachbereitung des schulpraktischen Einsatzes: Berufe, Auswahl der entsprechenden Schulformen - Erstellung von Unterlagen für den Einsatz in der Schule - Berichterstattung, Referat, evtl. Unterrichtsversuch sowie Hilfestellung zu fachdidaktischen Fragen - Qualifikationsanforderungen elektrotechnischer Berufe.

Praktika am ifht

Physikalisch-technische Laborübungen für Maschinenbauer (SS)

TÜ 4, für 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

Physical Technical Laboratory (PTL) for students in mechanical engineering (SS)

Teamwork of the Faculty of Electrical Engineering, the Faculty of Mechanical Engineering and the Faculty of Mathematics and Natural Sciences.

Contents

Within this laboratory four experiments are offered by the Institute of High Voltage Engineering:

1. Power sources, transformers

2. Enlargement of measuring range, instrument transformers, power meters in three-phase systems
3. Electron beam oscilloscope, rectification
4. Digital measurement techniques

Elektrotechnisches Praktikum I

TÜ 3, für 2. Semester Elektrotechniker und Lehramtskandidaten

Inhalt

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

- Strom- und Spannungsquellen
- Spannungsteiler
- Messungen in linearen Netzwerken
- Simulation linearer Netzwerke
- Dioden und Transistoren
- Operationsverstärker (Messung)
- Operationsverstärker (Simulation)
- Messung nichtelektrischer Größen

Laboratory in Electrical High Voltage Laboratory Engineering I

TÜ 4, for 7. Semester

Contents

This laboratory contains 8 basic experiments to achieve knowledge in measurement and experimental techniques:

- Bipolar sources
- Highvoltage divider
- Measurement in linear networks
- Simulation of linear networks
- Diodes and Transistors
- Op-amp (Measurement)
- Op-amp (Simulation)
- Measurement of non-linear parameters

Hochspannungstechnisches Praktikum

TÜ 4, für 7. Semester für Elektrotechniker

Inhalt

- Gleichspannungsuntersuchungen
- Durchschlagsuntersuchungen
- Vorentladungsuntersuchungen
- Elektromagnetische Verträglichkeit
- Stoßspannungsverteilung
- Simulation transienter Ausgleichsvorgängen auf Leitungen
- Dimensionierung synthetischer Prüfkreise
- Hochspannungsmeßtechnik

Contents

- High voltage DC testing
- Testing of insulators
- Corona discharges
- Elektromagnetic compatibility
- Surge voltage distribution in transformer windings
- Traveling wave calculation and simulation
- Dimensioning of synthetic test circuits
- High voltage measurement techniques

Energietechnisches Praktikum I (SS)

TÜ 4, für 6. Semester

Inhalt

Das energietechnische Praktikum I wird von mehreren Lehrstühlen durchgeführt. Ein Versuch findet am Institut für Hochspannungstechnik statt:

- Blitzstoßspannung und Überspannungsableiter

Laboratory in Electrical Power Engineering I (SS)

TÜ 4, for 6. Semester

Contents

The laboratory in Electrical Power Engineering I is carried out by several institutes. One experiment takes place at the Institute of High Voltage Engineering:

- Investigation with high voltage impulses

Energietechnisches Praktikum II (WS)

TÜ 4, für 7. Semester

Inhalt

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

- Stoßspannungsverteilung an Transformatorwicklungen

- Elektromagnetische Verträglichkeit in Hochspannungsanlagen

Laboratory in Electrical Power Engineering II (WS)

TÜ 4, for 7. Semester

Contents

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

- Surge voltage distribution in transformer windings
- Electromagnetic compatibility.





Chronik

VDE Seminar

Kabelkolloquium

Aktivitäten 2002

Exkursion Hochspannungstechnik

Schweiz/Italien Exkursion



91

Chronicle

VDE Seminar

Cabel Colloquium

Activities in 2002

Excursion High-Volt-Lecture

Excursion Schwitzerland/Italy



Chronik 2002

05.11.01

CFX Seminar, Universität Bochum;
Teilnehmer: C. Lüders, M. Schmale,
M. Schwinne

kau; Teilnehmer: G. Pietsch

11.02.02

Hochspannerball am Rosenmontag in
der Hochspannungshalle

15.11.01

Kick-off-meeting eines EU-Projekts
zur Luftreinhaltung mittels nicht-
thermischer Entladungen; Teilnehmer:
G. Pietsch

20.11.01

Besuch von Schülern des Goethe Gym-
nasiums Stolberg; Betreuer: C. Corne-
lissen, K. Jenkes-Botterweck

15.12.01-20.12.01

Besuch von Prof. Maksymiuk und
Prof. Ciok, Techn. Hochschule War-
schau

21.-25.01.02

DAAD-Vorauswahlsitzung für Stipen-
dientenbewerber aus der russ. Föderation
in Moskau; Teilnehmer: G. Pietsch

29.01.02

Promotionsprüfung von Roland von
Starck

31.01.02

Letzter Arbeitstag von Christof Hum-
pert

01.02.02

Energiekabel-Exkursion zum Ker-
penwerk in Stolberg; Leitung: Prof.
Schuppe, C. Cornelissen

10.02.02

Auswahlsitzung des Russlandsfonds
der Deutschen Wirtschaft für russ.
Führungsnachwuchskräfte in Mos-



15.02.02

Promotionsprüfung von Christof Hum-
pert

25.-27.02.02

ETG-Fachtagung „Diagnostik elektri-
scher Betriebsmittel“ in Berlin; Teil-
nehmer: A. Schnettler, C. Cornelissen

27.-28.02.02

Kolloquium des Instituts für Kunststoff-
verarbeitung der RWTH Aachen im
Eurogress; Teilnehmer: R. Puffer

28.02.02

Letzter Arbeitstag von Uwe von Felde

12.-13.03.02

DAAD-Auswahlsitzung für Stipen-
diaten aus der russ. Föderation
in Bonn-Bad Godesberg; Teilneh-

mer: G. Pietsch

14.-23.03.02

Exkursion in die Schweiz und nach Italien

24.-31.03.02

Dr. Gibalov, Moscow State University besucht das Institut



31.03.02

Letzter Arbeitstag von Gisela Suttner

06.-09.04.02

6th month-meeting des EU Projekts „Development of a non-thermal plasma air cleaning technology“; Teilnehmer: G. Pietsch und A. Saveljev

07.-10.04.02

„IEEE International Symposium on electrical instalation“ in Boston, USA; Teilnehmer: C. Cornelissen

08.-10.04.02

Besuch von Mr. Setty, M. K. Pandurange (Universität Bangalore, Thailand), Mr. Chatterjee (RWTH Aachen)

22.04.02

Dr. Jongung Choi, LG Industrial Systems, Korea, besucht das Institut

24.04.02

DAAD-Auswahlsitzung zum Leonhard-Euler Stipendienprogramm in Bonn-Bad Godesberg;

Teilnehmer: G. Pietsch

25.-26.04.02

Plenarversammlung des Fakultätentages für Elektrotechnik und Informationstechnik in Erlangen; Teilnehmer: G. Pietsch

08.05.02

Dr. Somchaitiran Varodom, Dr. Suk-sun Nungam, Thailand, besuchen im Rahmen des Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS) das Institut

15.05.02

Erster Arbeitstag von Michael Schwinne

20.-28.05.02

Dr. M. Bartlova, Dr. V. Aubrecht aus Brno, University of Technology, besuchen das Institut

26.-28.05.02

DFG-Kolloquium in Darmstadt, Schwerpunkt „Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und Anlagen der elektrischen Energieversorgung“, Teilnehmer: A. Schnettler, K. Möller, R. Puffer, C. Cornelissen

10.06.02

DAAD-Sitzung zur Verlängerung von Stipendien für Studierende aus der russ. Föderation in Bonn Bad-Godesberg; Teilnehmer: G. Pietsch

10.-11.06.02

Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“, RWTH-Aachen, in Kooperation mit dem VDE, Regio Aachen; Leitung: Dr. M. Schumacher, ABB

21.06.02

Kolloquiumsvortrag „Physics of Li-

thing and Ball Lightning“ von Dr. John J. Lowke, CSIRO Telekommunikations und Industrial Physics, Sydney, Australia

30.06.02

Letzter Arbeitstag von Dr.-Ing. Alexander Schmitz

30.06-05.07.02

Société Francais du Vide: XXth Internationale Symposium on „Discharges and El. Instalation in Vacuum“, Paris, Teilnehmer: K. Jenkes-Botterweck, B. Heil

01.07.02-30.08.02

Dipl. -Ing. Corina Ivas, Transelectrica Bacău Rumänien, besucht das Institut für zwei Monate

01.07.02

Inbetriebnahme der neuen Stoßspannungsanlage in der Hochspannungshalle

01.07.02

Prof. Wallace, Monash University, Centre of El. Power Engineering, Australien, besucht das Institut

04.07.02

BMFT-Verbundtreffen zum Projekt „Sterilisation“ in Freising; Teilnehmer: G. Pietsch

09.07.02

Erster Arbeitstag von Erika Böhm

12.07.02

M. Schwinne erhält die Springorum Gedenkmünze für sein Diplom mit Auszeichnung.

R. Puffer erhält die Borchers-Plakette für seine mit Auszeichnung bestandene Doktor-Prüfung



13.-14.07.02

Segelwochenende

19.07.02

Promotionsprüfung von Xiang Zhang

20.-25.07.02

„8th International Symposium on High Pressure“, Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärre, Estonia; Teilnehmer: G. Pietsch, A. Saveljev, L. Hulka

31.07.02

Letzter Arbeitstag von Dr.-Ing. Xiang Zhang

08.08.02

Prof. Dr. Soji Kojima, Kogakuin, University Tokyo, Japan, besucht das Institut

09.08.02

Fußballturnier der Fakultät VI - wir trainieren weiter...

19.-31.08.02

Im Rahmen eines Kooperationsprojekts besucht V. Timatkov aus Russland das Institut

20.08.02

G. Pietsch hält einen Vortrag über koplanare Entladungen am Philips-Forschungszentrum in Aachen

20.08.02

Dr. Al-Yadoumi, Dr. Gamal Ahazza,

Sanaa, Nord Jemen, besuchen das Institut

25.-30.08.02

CIGRÉ-Meeting, 39th Session 2002, Paris; Teilnehmer: A. Schnettler, M. Schwinne



01.-06.09.02

University of Liverpool, Conference on Gas Discharges and their Applications; Teilnehmer: G. Pietsch, A. Saveljev, C. Humpert

04.11.02

Unterzeichnung der Kooperationsvereinbarung zwischen der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH) und der RWTH Aachen

10.09.02

Sitzung der Technologie Stichting in Eindhoven; Teilnehmer: G. Pietsch

05.11.02

A. Schnettler, T. Smolka besuchen das Wuppertaler Institut für Klima und Umwelt

30.09.02

Dr. K. Walczak, Poznan University of Technology, Polen, besucht das Institut bis 30.11.02

04.-12.11.02

Dr. V. Gibalov, Moskau, besucht das Institut

21.-23.10.02

VDE-Kongress „Net Worlds“ in Dresden; Teilnehmer: A. Schnettler, K. Möller, C. Cornelissen, R. Dommerque, R. Puffer, M. Schmale, M. Schwinne



22.10.02

Dr.-Ing. Markus de Hesselle und Dr.-Ing. Ralf Puffer erhalten den Literaturpreis der ETG im Rahmen des VDE Kongresses

08.11.02

Kabelkolloquium, Verabschiedung von Prof. Dr. W.-D. Schuppe und Begrüßung von Dr. D. Meurer

30.-31.10.02

Studenten-Exkursion nach Hanau, Bad Honnef, Mannheim

12.-13.11.02

Milestonemeeting zum EU-Projekt „Luftreinhaltung mittels nicht-thermischer Entladungen“ in Ismaning; Teilnehmer: G. Pietsch

30.10.02

Dr. Tonkogonov besucht das Institut als DAAD-Stipendiat für drei Monate

13.11.02

Beginn der Baumaßnahmen für die

Verlagerung der mech. Werkstatt und des Seminarraumes	21.11.02 DK CIGRÉ-Sitzung in Mannheim; Teilnehmer: A. Schnettler
09.-16.11.02 German Technology Symposium in Bangkok, Thailand; Teilnehmer: A. Schnettler	28.-29.11.02 5th Euregional Workshop on the Ex- ploitation of Low Temperature Plasma Physics in Kerkrade; Teilnehmer: G. Pietsch
16.11.02 „Hochwissenschaftliches Kolloquium“	29.11.02 Kolloquium „One World Develop- ment: Forschen und Lernen für eine gemeinsame Zukunft“; Teilnehmer: A. Schnettler
18.11.02 A. Schnettler, R. Dommerque, M. Schwinne besuchen die Universität Dortmund	
19.11.02 Betriebsausflug nach Köln, Besichti- gung Flughafen	14.-17.12.02 A. Schnettler, K. Möller besuchen Warschauer TU



VDE-Seminar Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen 11./12.Juni 2002

Das Blockseminar wurde als Weiterbildungsveranstaltung des Instituts für Hochspannungstechnik in Zusammenarbeit mit dem VDE-Regio Aachen am 10./11. Juni 2002 angeboten.

Ein Überblick über Aufbau und Funktionsweise von Komponenten und Anlagen der elektrischen Energieübertragung und -verteilung wurde von Referenten aus der Industrie und von Energie-Versorgungsunternehmen gegeben.

Für die Seminarleitung konnte Herr Dr.-Ing. Schumacher gewonnen werden.

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



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



Das Seminar-Programm gliederte sich in folgende Vorträge:



- **Begrüßung**
Dr.-Ing. Haye Roth
VDE
- **Einführung in die Thematik**
Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB Calor Emag Schaltanlagen
AG, Hanau-Großauheim
- **Schaltlichtbögen**
Dr.-Ing. Max S. Claessens,
ABB Hochspannungstechnik
AG, Zürich
- **SF₆-Last- und Leistungsschalter**
Dr.-Ing. Roland von Starck,
Siemens AG, Berlin
- **Vakuumschalter**
Dr.-Ing. Burkhard Fenski,
ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH, Ratingen

- **Last-/Trennschalter**
Dr.-Ing. Thomas Betz,
ABB Calor Emag Schaltanlagen
AG, Hanau-Großauheim
- **Hochspannungssicherungen**
Dipl.-Ing. Ulrich Haas,
Sicherungen GmbH, Lünen
- **Einführung in die Anlagen-
technik**
Dr.-Ing. Martin Schumacher,
ABB Calor Emag Schaltanlagen
AG, Hanau-Großauheim
- **Hochspannungsschaltanlagen**
Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn,
ALSTOM Energietechnik
GmbH, Transmission & Distri-
bution, Frankfurt am Main
- **Schutz- und Stationsleittech-
nik**
Dr.-Ing. Siegfried Lemmer,
Siemens AG, Nürnberg
- **Mittelspannungsfelder und -
schaltanlagen**
Dr.-Ing. Stefan Göttlich,
ABB Calor Emag Mittelspan-
nung GmbH, Ratingen
- **Betriebserfahrungen mit mo-
derner Anlagentechnik**
Dr.-Ing. Heinrich Hoppe-Oehl,
RWE Net AG, Dortmund
- **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
in der Entwicklung**
Dr.-Ing. Hartmut Knobloch,
Siemens AG, Berlin
- **Instandhaltungsstrategien**
Prof.Dr.-Ing. Armin Schnettler,
RWTH Aachen, Institut für
Hochspannungstechnik



Aufgrund der hohen Resonanz und der vielen positiven Rückmeldungen soll das Seminar auch 2003 wieder angeboten werden. Bei allen Vortragenden möchten wir uns an dieser Stelle auch noch einmal bedanken.

Kabelkolloquium am Institut für Hochspannungstechnik

Nach 25 Jahren Lehrtätigkeit am Institut für Hochspannungstechnik hat Prof. Dr. -Ing. Wolf-Dieter Schuppe im Wintersemester 2001/2002 zum letzten Mal die Vorlesung *Energiekabel* gehalten. Als Nachfolger konnte Dr. Dietmar Meurer von der Firma NEXANS, Hannover gewonnen werden, der selbst am Institut für Hochspannungstechnik promoviert hat.

Am 8.11.2002 wurde dieser Umstand genutzt, zur Verabschiedung von Prof. Schuppe ein Kolloquium zu aktuellen Themen im Bereich der Kabeltechnik zu veranstalten. Zu diesem Anlass konnten eine Reihe namhafter Vertreter aus Industrie und Hochschule begrüßt werden. Im ersten Teil der Veranstaltung wurden in vier Fachvorträgen folgende Themen genauer beleuchtet und im Kolloquium diskutiert:

Prof. Schuppe: *Märkte und Technik von Energiekabeln*

Prof. Schuppe hat in seinem Vortrag zunächst einen Überblick über die Entwicklung der Kabeltechnik in den letzten Jahren gegeben. Dank seiner eigenen Erfahrung in der Kabelindustrie konnte dabei die Entwicklung dieses Wirtschaftszweiges fachkundig analysiert werden. Darauf basierend wurden interessante Perspektiven für die Zukunft aufgezeigt und auch die Rolle zukünftiger Ingenieure in diesem Bereich genauer betrachtet.

Dr. Meurer: *Diagnostik an betriebsgealterten Energiekabeln*

Herr Dr. Meurer hat zunächst die Frage der Notwendigkeit einer Diagnostik

im Bereich der Energiekabel diskutiert, wobei verschiedene Aspekte der Alterung bzw. Schädigung genauer beleuchtet wurden. Auf dieser Basis wurden die Vor- und Nachteile der momentan einsetzbaren Diagnoseverfahren, wie beispielsweise der IRC-Analyse, analysiert. In der anschließenden Diskussion wurde unter anderem auf die schwierige Entscheidung über den Einsatz einer Diagnose in Anbetracht der oftmals nicht unerheblichen Kosten eingegangen.



Abb. 1: Das Kolloquium bot die Möglichkeit für viele interessante Gespräche.

Hr. Cornelissen: *Ultraschall- und NMR-Untersuchungen an Kabelgarnituren*

Herr Cornelissen hat einen Einblick in die aktuellen Forschungsarbeiten des Instituts im Bereich der polymeren Isolierstoffe gegeben. Die Ultraschalldiagnostik und die Kernspinresonanz (NMR) werden dabei als mögliche neue Verfahren der Zustandsbewertung insbesondere von Garnituren untersucht. Es wurde eine Reihe vielversprechender Resultate aus bisherigen Untersuchungen vorgestellt und

ein Ausblick auf industrielle Einsatzmöglichkeiten der automatisierten Ultraschall Diagnostik gegeben.

Dr. Steinbrink: *Aktuelle Anwendungen & Energiekabelprojekte*

Dr. -Ing. Steinbrink, von der Firma NEXANS, hat im ersten Teil seines Vortrags von einem Off-Shore-Windpark berichtet, bei dem über 80 Einzelanlagen mittels spezieller Seekabel untereinander und mit dem Festland verbunden werden mussten. Im zweiten Abschnitt wurde auf den Bau des Transrapid in Shanghai/China und die Ausrüstung des Zugs mit einer speziellen Wanderfeldleitung eingegangen. Ein Bericht über den Bau eines neuen Abschnitts der 380kV-Diagonale durch Berlin und den besonderen Anforderungen dieses Projektes in Hinblick auf die Verletechnik rundeten diesen Vortrag ab.



Abb. 2: Dr. Steinbrink berichtet von aktuellen Projekten.

Prof. Möller, Institutsleiter von 1973 - 2000, gab in einer anschließenden Ansprache einen kurzen Abriss des beruflichen Werdeganges von Prof. Schuppe und würdigte dabei insbesondere dessen Verdienste um Lehre und Forschung am Institut für Hochspannungstechnik. Prof. Schnettler überbrachte im Anschluss die besten Wünsche des Fachbereichs und dankte Prof. Schuppe für seine Arbeit

am Institut.



Abb. 3: Prof. Schnettler dankt Prof. Schuppe.

Nach einem Mittagsimbiss wurde im zweiten Teil des Kolloquiums den Teilnehmern die Möglichkeit geboten, sowohl das Institut für Hochspannungstechnik als auch das Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (Prof. Blümich) zu besichtigen. Prof. Blümich arbeitet im Rahmen eines DFG-Projektes mit dem Institut für Hochspannungstechnik im Bereich der Untersuchung polymerer Isolierstoffe zusammen und führt in seinem Institut NMR-Untersuchungen an Garnituren durch. Zeitgleich hielt Dr. Meurer die Vorlesung *Energiekabel - Power Cable Engineering*, die mit knapp 20 Teilnehmern ebenso guten Zuspruch bei den Studenten erfährt, wie es in den vergangenen Jahren bei Prof. Schuppe der Fall war.



Abb. 4: Prof. Möller, Prof. Schuppe und Dr. Meurer (v.l.n.r)

Betriebsausflug am 19.11.2002

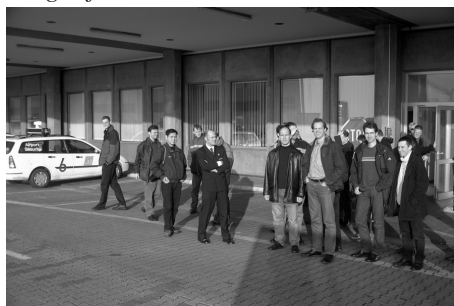
In diesem Jahr ging es beim Betriebsausflug zum Flughafen Köln/Bonn. Nach einer Besichtigungstour des Flughafens und einem Mittagessen fand anschliessend noch eine Besichtigung der deutschen Flugsicherung statt.

Flughafen Köln/Bonn

Um 7:00 Uhr morgens ging es vom RWTH Hauptgebäude mit dem Bus zum Köln/Bonner-Flughafen. Der Schwerpunkt des Flughafens liegt im Frachtverkehr; in der Nacht startet und landet etwa alle 2 Minuten ein Flugzeug. United Parcel Service (UPS) hat sein Europazentrum in Köln/Bonn aufgebaut. Im Passagierverkehr werden rund 6 Millionen Fluggäste jedes Jahr abgefertigt.



Filmvorstellung im Besucherraum des Flughafens



Gruppe vor der Fahrt über das Betriebsgelände

Die Führung begann mit der Präsentation eines kurzen Filmes, in dem der Flughafen vorgestellt wurde. Weiter ging es mit einer informativen Busfahrt über das Betriebsgelände. Nach

der Besichtigung des Flughafengebäudes konnten in einer Diskussion Fragen geklärt werden.

Luft Art Foyer

Im Anschluß an die Führung konnte im Untergeschoß des Flughafengebäudes die luftfahrthistorische Ausstellung „Luft Art Foyer“ besucht werden.



Fokker-Dreidecker aus dem Jahre 1917

Die erst in diesem Jahr eröffnete Dauerausstellung zeichnet die Luftfahrtsgeschichte von Köln nach. Nachdem die Flugzeuge aus der Anfangszeit der Luftfahrt bestaunt worden waren, gab es im Flughafen-Bistro zur Stärkung ein Mittagessen.



Besuch der Luftfahrtausstellung

Die deutsche Flugsicherung Ausklang

Am frühen Nachmittag wurde der Standort Köln/Bonn der deutschen Flugsicherung (DFS) besucht. Neben Informationen über die Arbeit der DFS und einer interessanten Diskussion über die Flugsicherung, konnte der Tower besichtigt und den Fluglotsen bei ihrer Arbeit über die Schulter geblickt werden. Die Towerlotsen koordinieren den Flugverkehr auf den Start- und Landebahnen sowie in unmittelbarer Flughafennähe. Sehr interessant waren auch die Informationen über den Beruf und die Ausbildung von Fluglotsen.



Ausblick vom Tower auf das Flughafengelände

Gegen 14:30 Uhr ging es mit dem Bus zurück nach Aachen oder wahlweise in die Kölner Innenstadt. Eine größere Gruppe blieb in Köln und lies den Betriebsausflug bei einem Kölsch und gutem Essen ausklingen.



Ausklang in Köln



Exkursion nach Hanau, Mannheim und Bad Honnef am 30./31.10.2002

Im Rahmen der Vorlesung Hochspannungstechnik und des Seminars Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen fand dieses Jahr eine zweitägige Exkursion für Studenten und Assistenten statt. Neben der Besichtigung eines Steinkohlekraftwerks hatten wir dabei die Gelegenheit, einiges über die Entwicklung und Produktion von gasisolierten Schaltanlagen, Energiekabeln und Transformatoren zu erfahren.

Mittwoch, 30.10.2002

Um 6.00 Uhr begann die Exkursion mit der Abfahrt vor dem Hauptgebäude der RWTH in Richtung Hanau. Teilnehmer waren 34 Studenten, 7 Assistenten und Prof. Schnettler. Der erste Besuch führte uns zu dem von E.ON betriebenen Steinkohlekraftwerk Staudinger in Hanau.



Abb. 1: E.ON Steinkohlekraftwerk Staudinger, Hanau

Nach einem informativen Vortrag über das Kraftwerk und einer anschließenden Werksbesichtigung, fuhren wir weiter zur nahegelegenen ABB Calor Emag Schaltanlagen. Mit einigen interessanten Vorträgen zum Geschäftsfeld und zu der Produktion und Entwicklung gasisolierter Schaltanlagen begann unser Besuch. Anschließend fand eine Werksführung statt, bei der wir die Gelegenheit hatten, sowohl die Entwicklungsabteilung als auch die Produktion der gasisolierten Schaltanlagen zu besichtigen.

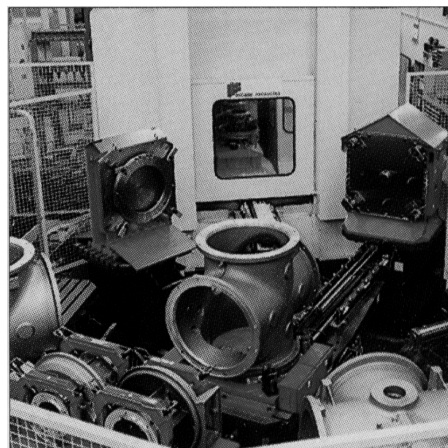


Abb. 2: Teil der GIS-Fertigung bei ABB Calor Emag Schaltanlagen, Hanau

Anschließend ging die Fahrt weiter nach Mannheim, wo wir gegen 18.00 Uhr in der Jugendherberge eintrafen. Der Abend stand zur freien Verfügung, wobei die meisten der Teilnehmer der freundlichen Einladung der ABB Energiekabel zu einem Bier folgten.

Donnerstag, 31.10.2002

Am Vormittag stand der Besuch der ABB Energiekabel auf dem Programm. Zunächst wurden uns Informationen über das Werk und Einzelheiten zu den Produktionsverfahren von Energiekabeln gegeben. Eine Werksführung, bei der wir neben den Produktionslinien auch das Prüffeld besichtigten, rundete den Besuch ab.

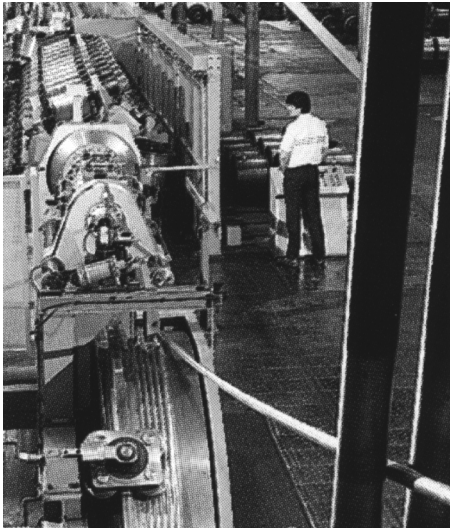


Abb. 3: Verseilmaschine bei ABB Energiekabel, Mannheim

Nach dem Mittagessen ging es dann schon wieder Richtung Aachen, wobei am Nachmittag unser letzter Besuch bei ABB Transformatoren in Bad Honnef stattfand. Nachdem wir über den Geschäftsbereich Transformatoren der ABB und speziell über das Werk Bad Honnef zahlreiche Informationen erhalten hatten, konnten wir bei der Werksbesichtigung die einzelnen Fertigungsprozesse der Transformatoren nachvollziehen. Mit der Besichtigung des Prüffelds endete schließlich unser Besuch und damit auch die Exkursion. Die anschließende Rückfahrt dauerte dann nicht mehr allzu lang, so dass wir um 20.00 Uhr wieder in Aachen ankamen.



Exkursion nach Italien und in die Schweiz

Eine der diesjährigen Exkursionen führte uns durch die Schweiz, über die Alpen und schließlich nach Italien. Wir hatten die Gelegenheit, mit einer Zahnradbahn auf das Jungfrauojoch zu gelangen, Europas höchstgelegenen Bahnhof (3454 Meter über dem Meer). Nach einem kurzen Zwischenstopp in Grindelwald führte unsere Reise weiter nach Italien, wo wir von Mailand aus in der Industrieregion Norditalien unter anderem CESI, ENEL, ABB-Italien und Lamborghini besichtigen konnten.

In der Schweiz

Am Freitag, den 15.03.02, haben wir uns vor dem RWTH-Hauptgebäude in den frühen Morgenstunden getroffen, um die lang ersehnte Exkursion 2002 anzutreten. Wer mitfahren durfte, konnte sich auf Grund des grossen Andrangs wirklich glücklich schätzen und hat mit bester Laune und grosser Vorfreude Platz in dem Bus genommen. Erste Anlaufstation war Interlaken in der Schweiz, wo wir bei den Jungfrau-bahnen zu Gast waren.



Abb. 1: Exkursionsteilnehmer begutachten die Zahnradbahn

Die Jungfraubahnen

Die Jungfraubahn ist das Pionierwerk der Bergbahnen. Sie wurde 1912 von der Kleinen Scheidegg bis ins Jungfrauojoch durchgehend in Betrieb genommen. Endstation ist das 3454 m ü. M. gelegene Jungfrauojoch. Die beiden Felshallen bilden den höchstgelegenen Bahnhof Europas. Von Beginn weg war die Bahn elektrifiziert. Sie fährt noch heute mit 1125 V Drehstrom und weist daher zwei parallel verlaufende Fahrleitungen auf. Wichtigster Streckenabschnitt ist der 7 km lange Tunnel durch die Bergmassive des Eigers und des Mönchs. Die Zwischenstationen Eigerwand und Eismeer sind als Kavernen in den Fels gesprengt und erlauben jede für sich einen besonderen Aus- resp. Tiefblick.

Grindelwald

Samstag und Sonntag standen zur freien Verfügung. Untergebracht waren wir im Naturfreundehaus; neben intensiver Gespräche boten sich auch verschiedene Wintersportmöglichkeiten an.



Abb. 2: Zusammen auf der Piste

Neben den herrlichen Tagen im Schnee sind die gemütlichen Abende zusammen auf der Hütte in besonders guter Erinnerung geblieben.

Italien

In den frühen Morgenstunden von Montag, den 18.03.02, führte unsere Reise weiter nach Italien.

CESI und der Politecnico in Mailand

Nach unserer Ankunft in Mailand war der erste Programmpunkt der Besuch von CESI. Als eines der größten Hochspannungsprüfinstitute Europas war die Besichtigung ein wahres Erlebnis: wir konnten in sämtliche Labore und haben auch die 400 kV Kabelteststrecke (im Auftrag der BEWAG) sehen können. Nach einer ausgezeichneten Mittagsverköstigung, ein Kompliment, das sich eigentlich auf alle unsere Mittagspausen in Italien übertragen lässt, fuhren wir zurück ins Mailänder Zentrum um uns den historischen Campus vom Politecnico Mailands anzusehen. Auch hier wurden wir äusserst freundlich empfangen. Anschliessend gab es eine schöne Stadtführung, bis wir dann gegen Abend unsere Bleibe für die nächsten 4 Nächte ansteuerten, das Hotel Sara.

Das ABB Forschungszentrum

Am nächsten morgen stand die Besichtigung des ABB-Forschungszentrums in Sesto San Giovanni an, ein Vorort Mailands. Auch hier hat uns das Mittagessen sehr gemundet. Dieser Standort ist kurz nach unserem Besuch im Rahmen der Rationalisierungen bei ABB zum Opfer gefallen. Der Nachmittag stand dann jedem Mitfahrer zur freien Verfügung. Die Stadt Mailand lockte bei wunderschönen Wetter die Exkursionsteilnehmern zum Duomo, in die Galleria Vittorio Emanuele und zu den anderen Kulturdenkmäler.



Abb. 3: Auf dem Mailänder Dom

Lamborghini

Mittwoch, den 20.03.02, sind wir in Richtung Bologna gefahren und nach einigen vom Busfahrer hausgemachten Schwierigkeiten waren wir endlich bei Lamborghini in Sant'Agata Bolognese. Dort führte uns der deutsche Betriebsleiter, Herr Dr. Schneider, durch die Werkshallen und wir konnten die Produktionsstätte eines der ruhmreichsten Sportautomarken der Welt sehen. Danach gab es noch einen Rundgang in dem hauseigenen Museum, nur eine Probefahrt war leider nicht möglich.



Abb. 4: Das ifht mit Studenten vor dem Werk

Nach einer köstlichen Mittagsmahlzeit in einer uns empfohlenen Trattoria durften wir zu einer privaten Oldtimer Ausstellung, die 'Collezione Righini', wo wir z. B. den allerersten Ferrari gesehen haben und andere Oldtimer von unschätzbaren Wert.



Abb. 5: Gemeinsames Mittagessen



Abb. 6: Lutz und Robert in einem Oldtimer

Auf der Rückfahrt haben wir in Campegine (RE) Rast gemacht, wo uns die Cantine Cooperative Riunite zu einer Weinprobe eingeladen hatten. Freundlicherweise hatten wir auch die Gelegenheit, die Abfülleinrichtungen zu sehen und zum guten Abschluss hat jeder Besucher eine Flasche Wein als Abschiedsgeschenk erhalten.

Das Kraftwerk 'La Casella' von ENEL

Donnerstag, den 21.03.02, haben wir das thermische Kraftwerk von ENEL La Casella in Castel San Giovanni (PC) besucht. Da gerade Revisions-

zeit war, konnten wir tiefe Einblicke in die Kraftwerkstechnik genießen.

Das ENEL-Umspannwerk von Tavazzano

Am Freitag Vormittag hatten einige von uns noch die Gelegenheit das berühmte Bild von Leonardo zu sehen, 'Das Abendmahl', während die anderen noch eine letzte Einkaufstour unternahmen. Nachmittags war dann das für eine Hochspannungstechnikexkursion obligatorische Umspannwerk von Tavazzano in Lodi zu besichtigen. Nach einer sehr ausführlichen Führung und grossem Interesse der Teilnehmer haben wir uns gen Aachen auf den Weg gemacht.



Abb. 7: Exkursionsteilnehmer im Umspannwerk

Nach einem Tankstopp unter einer Autobahnbrücke sind wir dann erschöpft und voller schöner Erinnerungen an diese tolle Exkursion in Aachen angekommen.

Organisatoren

Dipl.-Ing. Lutz Hulka

Hulka@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94937

Dipl.-Ing. Michael Schmale

Schmale@ifht.rwth-aachen.de
++49/(0)241/80-94958

Mitarbeiter des ifht 2002

Staff of ifht 2002

